

## **Estimation du flux de chaleur en Algérie du Nord à partir de la Thermométrie silice**

**Abderrahmane ISSAADI et Fatima-Zohra BOUCHARREB-HAOUCHINE**

Laboratoire d'hydrogéologie, Institut des Sciences de la Terre,  
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène,  
B.P. 32 El Alia, Bab Ezzouar, Alger - Algérie

**Résumé:** Après un rappel des travaux réalisés dans ce domaine en Algérie, nous nous proposons de définir les tendances régionales du flux de chaleur en Algérie du Nord.

En nous fondant sur la méthode proposée par A. Chandler *et al.* (1979-1980) qui lie la chaleur à la température silice, nous avons élaboré la carte des anomalies géothermiques dans laquelle apparaissent plusieurs linéaments chauds superposables à des zones d'accidents tectoniques majeurs. Des arguments géophysiques supplémentaires tels que l'alignement des foyers sismiques et les anomalies gravimétriques ainsi que le gaz carbonique d'origine profonde justifient l'existence de ces linéaments chauds.

Les températures atteintes dans les réservoirs par les eaux thermominérales indiquent globalement les mêmes anomalies.

**Mots clés:** Thermalisme - Géothermie - Gradient - Flux de chaleur - Géothermométrie - Silice - Anomalie - Faille - Géophysique - Volcanisme - Gaz carbonique - Endogène.

### **Heat flow estimate in the North of Algeria by the silica temperature**

**Abstract:** After an up to date with the latest works realised in this field in Algeria, we intended to define regional tendencies of heat flow through out the North of Algeria.

By placing one's reliance on the method propounded by A. Chandler *and al.* (1979-1980) which tie in the heat and the silica temperature, we have drawn up the map of geothermal anomalies. There appear several hot lineaments super imposables at zones of major tectonic faults. Additional geophysical arguments such as the alignments of seismic sources and gravimetric anomalies as well as some characteristics of thermomineral waters with CO<sub>2</sub> presence of deep origine, give proof of the existence of this hot lineaments.

The temperature in the reservoirs of thermominerals waters gives the seem anomalies.

**Key words:** Thermalism - Geothermic - Gradient - Flux of heat - Geothermometry - Silice - Anomaly - Fault - Geophysic - Volcanism - Carbonic gaz - Endogen.

## 1 - INTRODUCTION

La croûte continentale terrestre représentée schématiquement par les domaines de socle et les séries sédimentaires de couverture est soumise à un flux permanent de chaleur issu essentiellement du manteau et de la désintégration radioactive des minéraux des roches magmatiques. Il traduit un transfert de calories depuis la profondeur jusqu'en surface.

L'augmentation de la température avec la profondeur exprime le gradient géothermique qui est défini par le rapport entre le flux et la conductivité thermique des roches :

$$\text{Grad } \theta = \Phi / \lambda$$

$\Phi$  = flux (mw/m<sup>2</sup>)

$\lambda$  = coefficient de conduction

→  
Grad  $\theta$  = vecteur de composantes :  
 $\partial\theta / \partial x, \partial\theta / \partial y, \partial\theta / \partial z$

Vouloir quantifier le gradient géothermique ou le flux géothermique nécessite donc la connaissance de la conductivité des roches, paramètre difficilement accessible car ne disposant pas de moyens de mesures in-situ. Aussi, l'utilisation de la méthode préconisée par A. Chandler *et ses collaborateurs*, fondée sur la géothermométrie silice des eaux minérales et thermales et des forages profonds nous a paru intéressante. Avant de donner les résultats obtenus par cette méthode, nous présentons les travaux réalisés dans ce domaine par certains auteurs et par nous-mêmes.

## 2 - TRAVAUX ANTERIEURS

### 2.1. Le gradient géothermique

Les seules mesures effectuées en Algérie sont celles des régions de Bou-Hadjar non loin de la frontière algéro-tunisienne et de l'Oued Bou Namoussa aux alentours du barrage de Hammam

Meskhoutine. Les forages exécutés, profonds entre 60m et 120m, ont donné des valeurs pour une profondeur de 10m, respectivement de 1,6°C, 0,75°C et 1,0°C. Celle estimée dans la région nord-numidique (Azzaba), serait de 0,49°C (Mezghani *et al.*, 1988), de même, les mesures effectuées sur des forages de Tafaraoui dans l'Oranie le 11/03/1987 donnent une valeur de 0,63°C (Communication orale, P. Verdeil).

En fait, ces résultats peuvent être faussés par des circulations d'eaux chaudes dans les aquifères. Seul un forage profond pourrait donner une valeur exacte du gradient géothermique.

La première carte du gradient géothermique (Kazi Tani, 1974) établie à l'aide des diagraphies thermométriques continues effectuées lors des tests de production et des descentes d'outils diagraphiques donne une approche globale du gradient géothermique à travers l'Algérie du Nord (fig. 1).

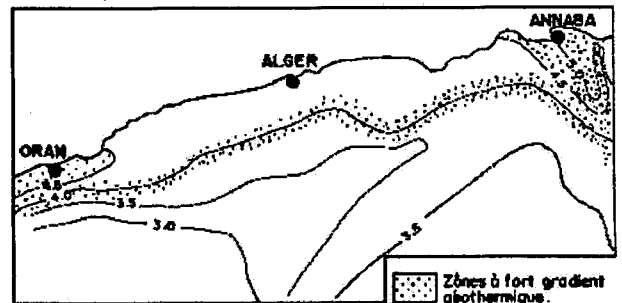


Fig. 1 - Gradient géothermique selon N. Kazi Tani, (1974)  
*Geothermal gradient according to N. Kazi Tani, (1974)*

Même si cette carte reste approximative en raison des conditions de mesure et du manque de détails dus à l'insuffisance et à la répartition hétérogène des forages pétroliers à travers l'Algérie du Nord, il n'endemeure pas moins qu'elle met en évidence au moins deux secteurs à forts gradients géothermiques.

Le premier, concerne le littoral oranais et la plaine de la Macta, le second intéresse toute la région comprise entre Skikda-Annaba et se poursuit vers le Sud jusqu'à Tébessa.

## ESTIMATION DU FLUX DE CHALEUR EN ALGÉRIE DU NORD À PARTIR DE LA THERMOMÉTRIE SILICE

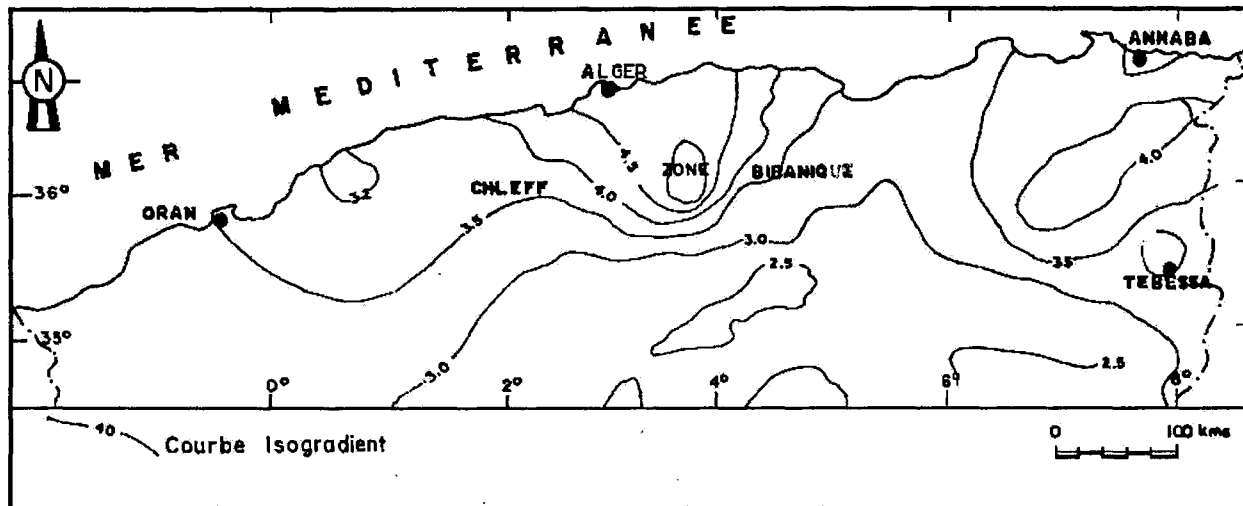


Fig. 2 - Gradient géothermique selon F.Z. Bouchareb, et A. Issaadi, (1994)  
*Geothermal gradient according to F.Z. Bouchareb, and A. Issaadi, (1994)*

Pour ce qui nous concerne (Bouchareb *et al.*, 1994), nous estimons que si l'utilisation des mesures thermométriques obtenues lors de l'exécution des forages pétroliers reste actuellement l'un des seuls moyens directs qui permet d'apprécier la valeur du gradient géothermique, en revanche, il est nécessaire en raison de l'influence de la boue de forage, de procéder à la correction des données de base fournies par les sondages pétroliers.

Sur 180 rapports de fin de sondages consultés, 67 forages ont été sélectionnés car ceux sont les seuls qui fournissent en même temps les données de B.H.T. (*Bottom Hole Temperature*) et de D.S.T. (*Drill Steam Temperature*). Les résultats obtenus ont permis de dresser la carte du gradient géothermique moyen à travers l'Algérie du Nord (fig. 2).

Le gradient géothermique ainsi calculé varie entre 22,2°C/Km et 53,6°C/Km. L'examen de la carte permet de définir:

- à l'Est, un gradient qui évolue entre 2,68°C/100m et 4,22°C/100m;

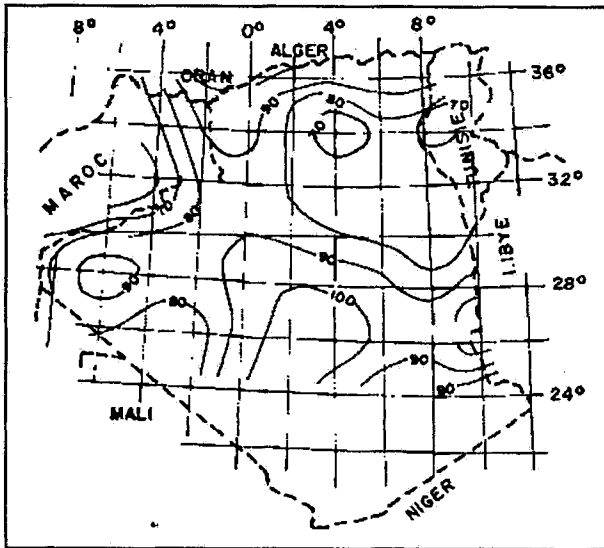
- au centre, au droit de la zone bibanique, un gradient supérieur à 5°C/100m;

- à l'Ouest, le manque de données n'a pas permis d'apporter les précisions souhaitées. Toutefois, on peut observer des valeurs relativement élevées dans le bas Chélif.

## 2.2. Le flux de chaleur

Utilisant 230 forages pétroliers et se fondant sur les températures de la boue des fluides recueillis lors des tests et des données lithologie-porosité, D. Takherist et A. Lesquer (1989) proposent la carte du flux de chaleur de l'Algérie que nous produisons ci-dessous (fig. 3).

Ces auteurs estiment que le flux de chaleur évolue entre 90mW.m<sup>-2</sup> et 100mW.m<sup>-2</sup> au niveau de la frange septentrionale de l'Algérie sans pour autant préciser les anomalies régionales et locales. Tout comme la carte du gradient, ces imprécisions seraient imputables aux manques de données dans cette partie de l'Algérie. En revanche, le nombre important de sondages dans le domaine saharien aurait permis à ces auteurs de définir d'importantes variations régionales du flux de chaleur. En effet, ils définissent un flux élevé, une zonation Nord-Sud et déterminent en bordure du socle précambrien



**Fig. 3 - Tendances régionales du flux de chaleur selon D. Takherist, et A. Lesquer, (1989)**  
**Regional tendencies of heat flow according to D. Takherist, and A. Lesquer, (1989)**

du Hoggar un axe majeur globalement orienté Est-Ouest qui semble affecter le Nord de la marge africaine des îles canaries jusqu'en Libye et relie certaines anomalies ponctuelles au volcanisme Mio-Plio-Quaternaire de type distensif.

### 3 - ESTIMATION DU FLUX DE CHALEUR À PARTIR DE LA THERMOMÉTRIE SILICE

#### 3.1 - Méthode

Mise au point par A. Chandler et P. Morgan (1978; 1979; 1980) aux U.S.A, appliquée en Egypte (Chandler *et al.*, 1980) et au Maroc (Baki *et al.*, 1983), cette méthode est basée sur des études statistiques de comparaison entre les valeurs de flux de chaleur mesurées dans les forages et les valeurs de flux déterminées à partir du géothermomètre silice. Le flux de chaleur étant obtenu par une équation linéaire liant le flux à la température silice :

$$T_{\text{SiO}_2} = mq + b$$

avec  $q$  = flux de chaleur en  $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ ,  $m$  et  $b$  sont

des constantes,  $b$  représente la température moyenne annuelle de l'air dans la région où la mesure a été effectuée et  $m$ , un coefficient dépendant de la profondeur du réservoir chaud et de la nature de l'encaissant.

La température dans le réservoir est déterminée par la relation suivante :

$$T_{\text{SiO}_2} = \frac{1315}{5,205 - \log(\text{SiO}_2)} - 273,15$$

$\text{SiO}_2$  (exprimée en  $\text{mg/l}$ ) étant la teneur en silice contenue dans l'eau des sources thermales et des forages.

#### 3.2 - Application des géothermomètres silice aux eaux thermales de l'Algérie du Nord (fig. 4 et 5)

En raison du contexte sédimentaire des émergences thermales, les géothermomètres cationiques donnent des résultats peu probants; en revanche, ceux fondés sur les différentes variétés allotropiques de la silice semblent plus adaptés (Bouchareb et Issaadi, 1995). L'application des géothermomètres à silice (Fournier, 1973) donne des résultats significatifs. En effet, le report des couples de valeurs de  $\text{SiO}_2$  et de la température mesurée à l'émergence, sur le graphique des abaques de dissolution de la silice (fig. 4), montre que la majorité des eaux est en équilibre avec le quartz, peu avec la calcédoine, par contre elles ne le sont ni avec la cristobalite ni avec la silice amorphe. Par ailleurs, les pH inférieurs à 8 n'autorisent aucune ionisation de la silice lors de la remontée des eaux vers la surface.

#### 3.3 - Les résultats obtenus

L'application de la méthode proposée par A. Chandler *et ses collaborateurs* en Algérie septentrionale montre que dans l'ensemble, le flux

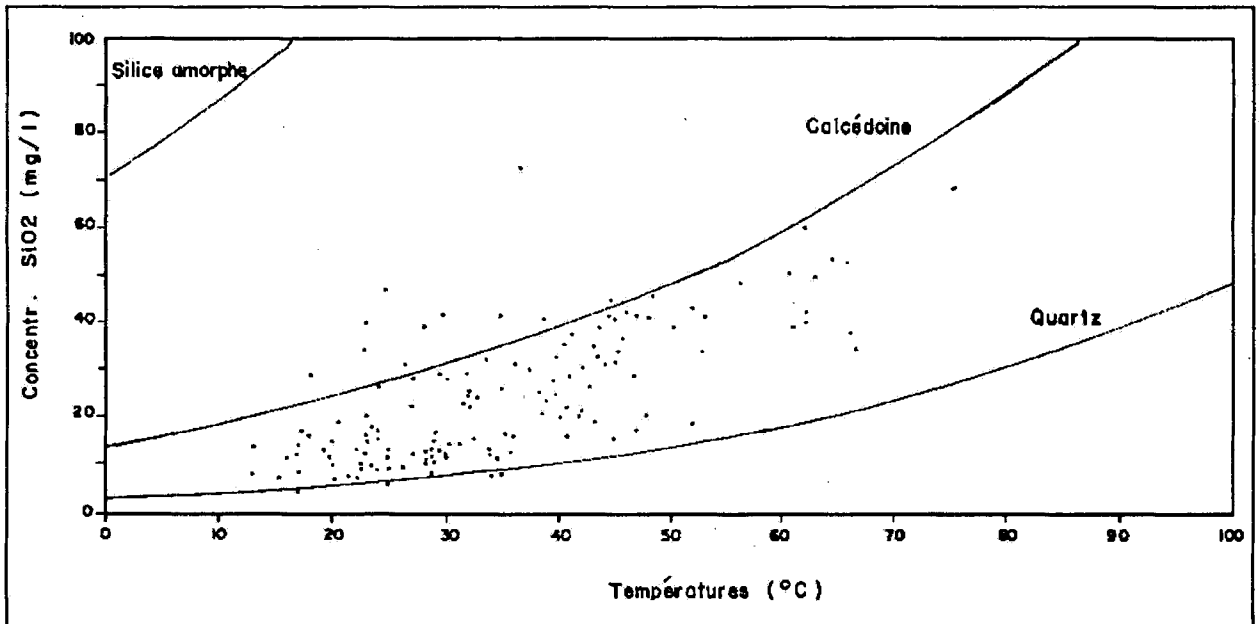


Fig. 4 - Corrélation entre température des eaux thermales et teneurs en silice selon F.Z. Bouchareb, et A. Issaadi, (1995)  
*Temperature of thermal waters from North Algeria V.S silice concentration according to F.Z. Bouchareb, and A. Issaadi, (1995)*

de chaleur varie régionalement depuis des valeurs faibles où le flux est inférieur à  $30 \text{ mW/m}^2$ . La moyenne égale à  $87 \text{ mW/m}^2$  paraît assez élevée comparée à celle de l'Europe qui est de  $64 \text{ mW/m}^2$ , mais plus faible que la moyenne du flux de chaleur déterminé en France qui est proche de  $100 \text{ mW/m}^2$ .

Comme l'indique la carte établie (fig. 6) il est possible de mettre en évidence des variations régionales significatives et de définir des zones à flux de chaleur élevé. On pourra distinguer d'Ouest en Est :

- **La zone 1** : centrée autour des basaltes de Béni-Saf, elle se prolonge en direction SW vers la plaine de Maghnia. Ce linéament est caractérisé par la présence d'un volcanisme récent lié à l'accident transverse de la Tafna qui se traduit par une densité de fracturation importante parallèlement à cette transversale. D'autre part, on note la présence en mer, suivant cette même direction, de quelques épices sismiques d'intensité VI à VIII degrés selon l'échelle de Richter. Les sources thermales,

en particulier celles situées dans le bassin d'effondrement de Maghnia liées à une structure en horst et graben montrent des températures supérieures à  $30^\circ\text{C}$ , celles de Boughrara atteignent en moyenne  $42,9^\circ\text{C}$ .

- **La zone 2** : localisée autour de Bou-Hadjjar, cette anomalie positive est relayée vers le NE par le secteur de Aïn Franin. L'existence de ce linéament est justifiée par :

- la proximité du volcanisme de Aïn Temouchent;
- la présence de sources hyperthermales avec d'abondants dégagement gazeux;
- l'existence d'une intense fracturation matérialisée par des accidents parallèles aux transversales, ceux orientés globalement W-E qui limitent la partie septentrionale des monts des Tessala et des failles mises en évidence par les travaux de néotectonique;
- les plissements plio-quaternaires et la sismicité.

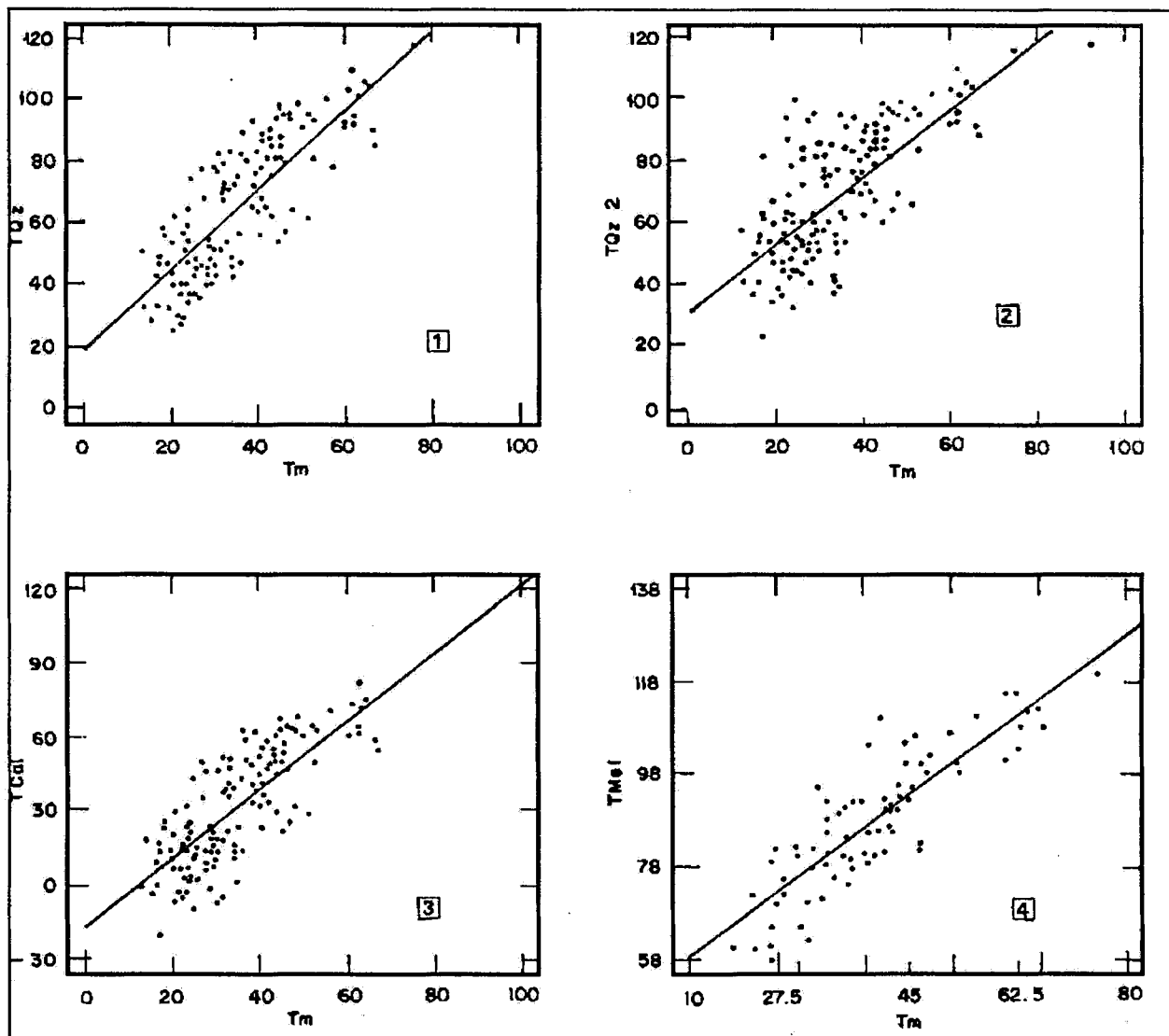


Fig. 5 - Relations thermométriques entre silice et température des eaux thermales de l'Algérie du Nord selon F.Z. Bouchareb, et A. Issaadi, (1995)

**Relationship between geothermometers and temperature of thermal waters in the North of Algeria according to F.Z. Bouchareb, and A. Issaadi, (1995)**

1 - Température Quartz en fonction de la température des eaux thermales. (Quartz temperature v.s thermal spring temperature)

$$T_{Qz} = 1,28 * T_m + 19,22 \text{ et } r = 0,82$$

2 - Température Quartz 2 en fonction de la température des eaux thermales. (Quartz2 temperature v.s thermal springs temperature)

$$T_{Qz2} = 1,09 * T_m + 21,66 \text{ et } r = 0,72$$

3 - Température Calcédoine en fonction de la température des eaux thermales. (Calcedony temperature v.s thermal spring temperature)

$$T_{Me1} = 0,99 * T_m + 48,90 \text{ et } r = 0,86$$

4 - Température mélange en fonction de la température des eaux thermales. (Mixing temperature v.s thermal springs temperature)

$$T_{Ca1} = 1,38 * T_m - 16,60 \text{ et } r = 0,80$$

$$T_{Qz} = 1309 / 5,19 - \text{Log} (\text{SiO}_2) - 279,15$$

$$T_{Qz2} = 1522 / 5,75 - \text{Log} (\text{SiO}_2) - 273,15$$

$$T_{Ca1} = 1032 / 4,96 - \text{Log} (\text{SiO}_2) - 273,15$$

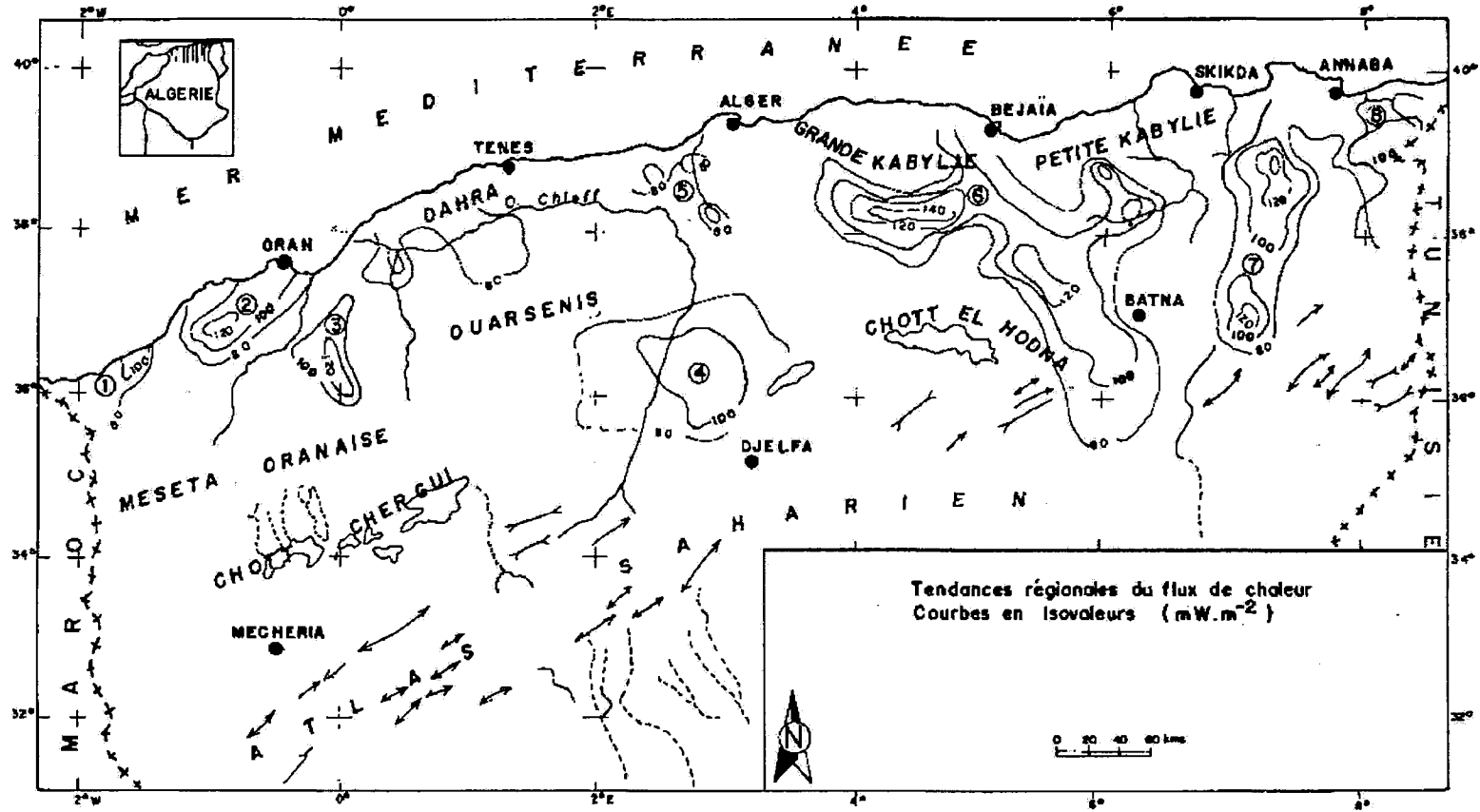


Fig. 6 - Tendances régionales du flux de chaleur estimé à l'aide de la thermométrie silice  
*Regional tendencies of heat flux estimated by silica thermometry*

- **La zone 3** : d'orientation globale S-N entre Saïda et Mascara, cette anomalie s'étale latéralement vers l'Est dans le moyen Chélif au niveau de la confluence des Oueds Mina et Chélif. Ici aussi, nous pouvons avancer la même argumentation que pour la zone 2 avec existence de foyers séismiques de plus fortes intensités.

- **La zone 4** : située dans la dépression des Zahrez, cette anomalie est circonscrite autour du Zahrez el Gharbi au croisement de la transversale qui longe l'Oued Touil et la faille de direction atlasique suggérée par l'alignement des chotts.

- **La zone 5** : est caractérisée par quelques anomalies isolées dans le Zaccar, la Mitidja occidentale et Berrouaghia. L'existence de volcanisme autour de la Mitidja occidentale et dans le Zaccar, la présence de sources minérales et thermales à dégagement gazeux abondants, l'activité séismique particulièrement intense ainsi que les accidents parallèles à la transversale de Tipaza avec leurs conjugués sont autant de facteurs qui justifient l'existence de ces anomalies à flux chaleur élevé.

- **La zone 6** : correspond à une importante anomalie positive orientée W-E au droit des Bibans et se poursuit plus à l'Est au Sud des Babors. Entre ces deux secteurs, apparaît une zone à flux élevé orientée NNW-SSE de l'extrémité Est de la grande kabylie, se prolonge vers le Sud jusque dans les Aurès et centrée au niveau de l'extrémité orientale des monts du Hodna. Ces anomalies sont suggérées par plusieurs arguments géologiques et géophysiques tels que, l'alignement de plusieurs sources hyperthermales avec d'abondants dégagements gazeux, la présence d'une intense fracturation matérialisée par des accidents plurikilométriques orientée W-E, NNE-SSW, NW-SE et l'alignement de foyers séismiques de fortes intensités.

- **La zone 7** : correspond à une nouvelle anomalie orientée globalement N-S centrée autour de la région de Hammam Meskhoutine et de Hammam Guerfa au Nord et autour de Khenchela au Sud.

Comme précédemment, l'intense fracturation avec l'existence d'accidents plurikilométriques orientés W-E, NE-SW et NW-SE, la présence de sources hyperthermales à forts dégagements gazeux, l'activité séismique (surtout autour de la région de Guelma) ainsi qu'une anomalie gravimétrique positive constituent autant d'arguments qui justifient cette anomalie.

- **La zone 8** : localisée au niveau des confins algéro-tunisiens, cette anomalie s'étale suivant une direction NE-SW avec des valeurs de flux qui oscillent entre 96 mW/m<sup>2</sup> et 125 mW/m<sup>2</sup>. Là encore, l'alignement des épïcêtres et des sources thermales ainsi que la densité de fracturation suivant cette orientation caractérise cette zone à flux de chaleur élevé.

#### 4 - TEMPÉRATURE DES EAUX THERMALES DANS LES RESERVOIRS

En nous fondant sur la thermométrie silice corrigée par le modèle mélange proposé par R.O. Fournier (1977), nous avons établi la carte des températures atteintes par les eaux thermales dans les réservoirs (fig. 7). Celle-ci révèle globalement les mêmes anomalies que la carte précédente. On pourra particulièrement distinguer par ordre d'importance :

- *le secteur de Hammam Bou Hadjar* à l'Ouest et celui des Bibans au centre où les températures peuvent atteindre et dépasser 150°C;

- *la zone de Hammam Bouhnia* à l'Ouest et celle de *Hammam Meskhoutine* à l'Est avec des températures supérieures ou égales à 120°C;

- *les secteurs de Hammam Righa* au centre, des *Hammam Béni Guéchat*, *Grouz* et *Khenchela* à l'Est où les températures sont supérieures ou égales à 100°C;

- enfin, des zones de moindre importance apparaissent, il s'agit du *bas* et *moyen Chélif*, des





Zahrez, de la *Mitidja occidentale* et de la *bande orientée NW-SE* depuis *Hammam Kéria* au Nord jusqu'à *Hammam Salihine de Biskra* au Sud et du *secteur nord oriental* au niveau de la frontière algéro-tunisienne.

## 5 - CONCLUSION

La configuration des anomalies géothermiques de l'Algérie septentrionale permet de définir une orientation globale W-E des anomalies positives de flux de chaleur, perturbée par des bandes orientées NNE-SSW à NE-SW et NNW-SSE à NW-SE (fig. 7).

La confrontation des données géologiques géophysiques, des paramètres physico-chimiques et isotopiques (Issaadi, 1992) des eaux des sources minérales et thermales conduit à admettre :

**a) une anomalie majeure orientée W-E** confortée par un certain nombre d'arguments tels que :

- l'*alignement séismique majeur* de l'Afrique du Nord;

- les *accidents plurikilométriques* sud-bibanique, nord-constantinois et ceux mis en évidence par les études néotectoniques, en particulier ceux de Mostaganem et de la Macta;

- la présence de *massifs polydéformés* plus ou moins métamorphiques;

- la *disposition W-E* du volcanisme à travers l'Algérie du Nord;

- la présence de *sources hyperthermales et froides* à dégagements de CO<sub>2</sub> prépondérant et d'origine profonde.

**b) des anomalies secondaires orientées NNE-SSW à NE-SW et NNE-SSW à NW-SE.** Elles sont associées :

- au *volcanisme plio-quadernaire* à la frontière algéro-marocaine;

- aux *accidents transverses*;

- à la *séismicité* suivant ces mêmes orientations;

- à la présence de *sources hyperthermales ou méso-thermales* à dégagement abondant de CO<sub>2</sub> d'origine profonde.

C'est particulièrement à l'intersection de ces deux directions W-E et NNE-SSW à NE-SW, W-E et NNW-SSE à NW-SE que les valeurs de flux de chaleur sont les plus élevées et où se situent les sources hyperthermales à CO<sub>2</sub> prédominant d'origine endogène comme l'attestent les résultats isotopiques du carbone 13 (Issaadi, 1992).

**Remerciements :** Les auteurs tiennent à remercier le Professeur Verdeil pour la lecture critique du manuscrit.

## BIBLIOGRAPHIE

- ARNORSON, S. 1985. The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems. *J. Vol. Geotherm. Res.*, 23, pp. 299-335.
- BAKI, C. ET AL., 1983. Linéaments géothermiques au Maroc. *C.R.A.S. Paris*, T. 298, série II.
- BOUHAREB, F. Z. ET ISSAADI, A. 1994. Estimation et interprétation du gradient géothermique en Algérie du Nord. *Bull. Serv. Géol. de l'Algérie*. Vol. 5, n° 1, pp. 69-74, 7 fig.
- BOUHAREB, F. Z. ET ISSAADI, A. 1995. Application des géothermomètres chimiques aux eaux thermominérales de l'Algérie du Nord. *3ème Congrès National des Sciences de la Terre*. Tunis.
- CHANDLER, A. AND AL., 1979. The linear relation between temperatures based on the silica content of groundwater regional heat flow. A new heat flow map United States. *Review pure and applied geophysics*. Vol. 85, n° 32.
- GOGUEL, J. 1975. La géothermie. *Ed. Doin*. 124 p.

## ESTIMATION DU FLUX DE CHALEUR EN ALGÉRIE DU NORD À PARTIR DE LA THERMOMÉTRIE SILICE

- FOURNIER, R. O. AND TRUESDELL, A. H. 1974.** Geochemical indicators of subsurface temperature. Estimation of temperature and fraction of hot water mixed with cold water. *U.S. Geol. Surv. J. Res. Z*, 263-270.
- ISSAADI, A. 1992.** Le thermalisme dans son cadre géostructural. Apports à la connaissance de la structure profonde de l'Algérie et de ses ressources géothermales. Thèse de Doctorat d'Etat, I.S.T./U.S.T.H.B., Alger, 274 p.
- KAZI TANI, N. 1986.** Evolution géodynamique de la bordure nord africaine. Approche mégaséquentielle. Thèse de Doctorat ès Sciences. Université de Pau, France, 871 p.
- LAGRULA, J. 1951.** Etude gravimétrique de l'Algérie-Tunisie. *Bull. Serv. Carte géol. de l'Algérie*. 4ème série, n° 2.
- MEZGHACHI, M. ET AL., 1988.** Estimation du flux géothermique dans la zone mercurifère nord-numidique (Azzaba). *C.R.A.S. T. 307*, série II, pp. 1647-1650.
- NEDJAI, R. ET ISSAADI, A. 1988.** L'anomalie géothermique des Bibans. *Ières journées de géologie appliquée*. Tome II, pp. 169-179, Tunis.
- ROUSSEL, J. ET TRUILLET, R. 1974.** Corrélations séismo-tectoniques sur la bordure nord de l'Algérie. *Bull. Soc. Nat. Afrique du Nord*. T 67, fasc. 3-4.
- TAKHERIST, D. ET LESQUER, A. 1989.** Mise en évidence d'importantes variations régionales du flux de chaleur en Algérie. *Canadian Journal. of Earth Sciences*. n° 36, pp. 615-626.
- TRUESDELL, A.-H. AND FOURNIER, R.-O. 1977.** Procedure for estimating the temperature of a hot-water component in a mixed in a mixed water using a plot of dissolved silica v.s. enthalpie. *U.S. Geol. Surv., J. Res.* 5, pp. 49-52.