

# Carte du gradient géothermique au Maroc

Abdelkrim RIMI

Institut Scientifique, Département de Physique du Globe, Av. Ibn Batouta, B.P. 703 Agdal, Rabat, Maroc. e-mail : [rimi@israbat.ac.ma](mailto:rimi@israbat.ac.ma)

**Résumé.** Une nouvelle compilation de données sur les gradients géothermiques au Maroc est présentée en utilisant 461 températures de fond de puits pétroliers (BHT) corrigées, 22 profils thermiques mesurés dans des forages de profondeur entre 75 et 500 m et en intégrant les valeurs des zones frontalières. Une carte de courbes d'égaux valeurs de gradient géothermique montre les tendances macroscopiques de la distribution. Pour la comparaison, les sources chaudes sont aussi ajoutées sans tenir compte de la profondeur d'origine de l'eau. Dans le nord-est du Maroc, le gradient élevé de 35 à 50°C/km et jusqu'à plus de 65°C/km en Alboran et le sud-est de l'Espagne est attribué au volcanisme récent et l'amincissement de la croûte terrestre alors que dans le Prérif, l'anomalie de 35-45°C/km reste locale et s'explique par la nature marneuse des formations et par la fracturation intense favorisant une circulation de fluides. Sur la marge atlantique, la tendance d'élévation du gradient en direction des îles Canaries est associée au phénomène de *hot spot* à l'origine de leur naissance.

**Mots clés :** Maroc, géothermie, carte, gradient géothermique, source thermale

## Geothermal gradient map of Morocco.

**Abstract.** A new compilation of thermal gradient data in Morocco and bordering regions has been attempted by using 461 corrected bottom hole temperatures (BHT), 22 thermal profiles in shallow boreholes 75-500 m depth. A contour map shows the main spatial variations of the thermal gradient where thermal springs are superimposed for comparison. In northeastern Morocco, the 35-50°C/km thermal gradient range which exceeds 65°C/km in the Alboran sea and southeastern Spain is linked to the recent volcanism and crustal thinning, while the 35-45°C/km anomaly in the Prerif remains local and may be explained by the marly formations and also by dense fractures which generate fluid circulation. On the Atlantic margin the trend of thermal gradient increase toward the Canary Islands is a consequence of the hot spot phenomenon at the origin of their formation.

**Key words:** Morocco, geothermics, map, geothermal gradient, thermal spring

## INTRODUCTION

Depuis 1983, plusieurs travaux ont essayé d'estimer les valeurs du gradient géothermique au Maroc. Les méthodes adoptées varient depuis les mesures directes dans les forages (Rimi & Lucazeau 1987, Zaghoulou 1999) à des évaluations indirectes à partir d'échantillonnages de géothermomètres chimiques, principalement SiO<sub>2</sub>, dans des sources ou des forages (Bahi *et al.* 1983, Ziyadi 1993, Boukdir 1994, Benabidate 1994, Lahrach 1994, Zaghoulou 1999, et Cidu & Bahaj 2000). La composition chimique à la résurgence doit être considérée avec précaution ; en effet, lors de son ascension, l'eau peut soit provenir directement et rapidement des niveaux profonds et chauds, dans quel cas la composition chimique reflète celle des formations réservoirs, soit subir des transformations et mélanges successifs caractérisant les différentes formations aquifères parcourues.

Des essais d'élaboration de cartes régionales ont été effectués par Rimi *et al.* (1998) pour le Rif, Lahrach (1994) pour le Maroc oriental puis par Boukdir (1994) pour le bassin de Tadla. Plus récemment, Zaghoulou (1999) a dressé une première carte du gradient géothermique au Maroc, sous forme de zonage de gradient en se basant sur le calcul de gradient moyen de toutes les températures dans chaque forage. Cependant, une difficulté dans cette procédure vient du fait que le gradient de température est par définition lié à la profondeur et à la nature de la roche, et donc un gradient moyen risque de ne pas représenter l'état thermique des formations en raison des contrastes de conductivité thermique et des circulations de fluide qui pourraient même

inverser le gradient de température. La cartographie du gradient thermique à l'échelle régionale présente donc l'inconvénient d'avoir une résolution très limitée ; aussi, le traçage de la carte des variations régionales du gradient thermique doit tenir en compte le fait que le gradient peut varier latéralement dans le cas des structures d'effondrement ou d'intrusion de granite ou de sel. Pour éviter cet effet, nous avons estimé les gradients thermiques moyens des grands domaines géologiques du Maroc en reportant, sur un même graphe pour chaque domaine, toutes les températures mesurées et corrigées dans les forages pétroliers en fonction de la profondeur (Rimi 1990).

## METHODOLOGIE

Dans le présent travail, pour pouvoir cartographier la distribution régionale et diminuer l'effet des variations spatiales du gradient géothermique, les critères de choix varient selon le type de puits.

Dans les forages pétroliers, les températures de fond du puits (BHT pour *bottom hole temperatures*) corrigées ont été regroupées par site ; dans le cas d'une densité élevée de puits (Gharb et Prérif), un gradient thermique moyen a été obtenu à partir de la représentation graphique de toutes les BHT pour chaque site. Dans les régions où les forages sont relativement dispersés, le gradient est déterminé pour chaque puits par la différence entre la température mesurée à la plus grande profondeur et à la surface du sol, ce qui évite ainsi les niveaux intermédiaires qui peuvent être le siège d'une convection liée à des circulations d'eau.

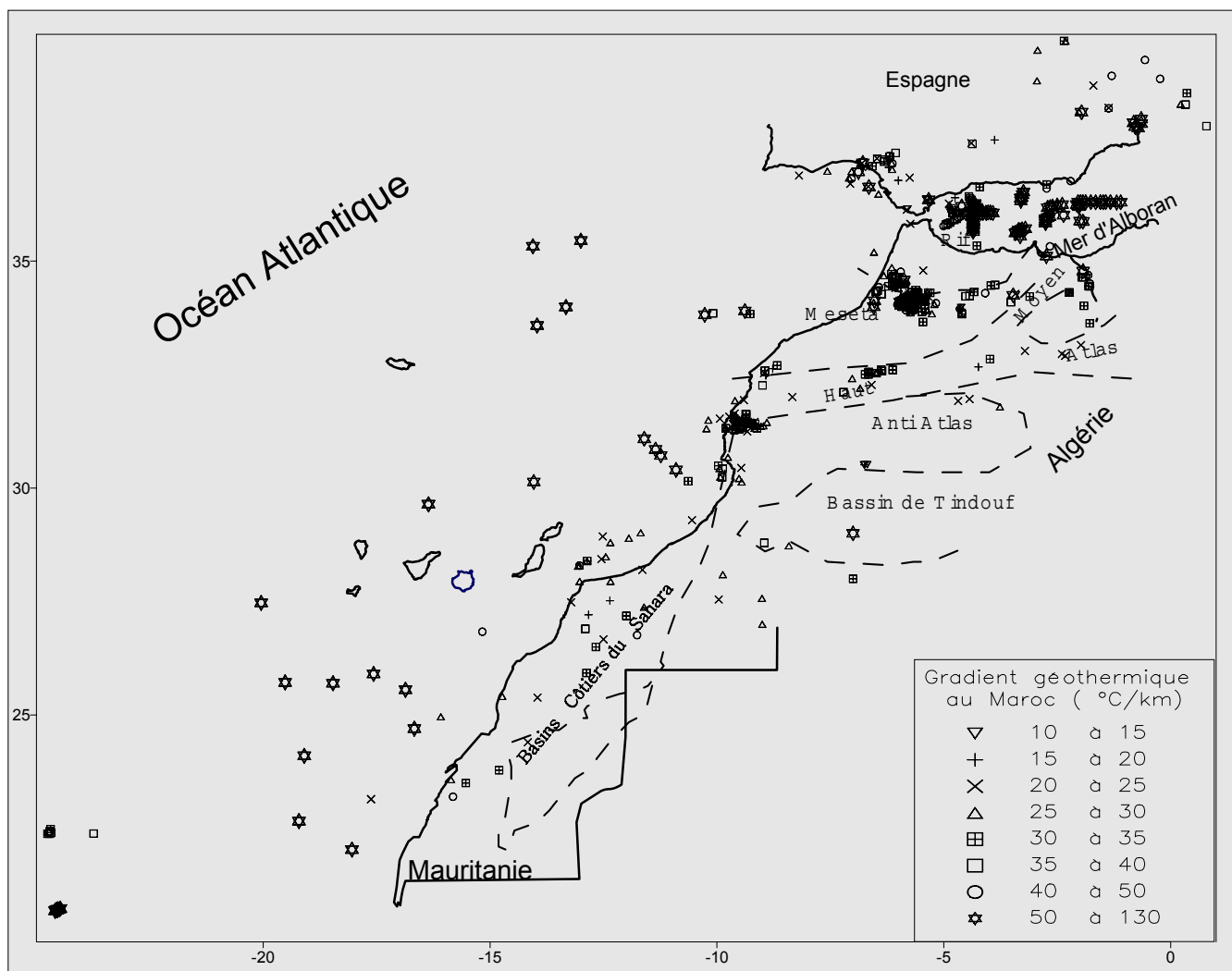


Figure 1. Valeurs ponctuelles du gradient géothermique en °C/km

Pour les sondages peu profonds, les critères de sélection sont la représentativité de l'emplacement du puits, l'équilibre thermique et l'absence de mouvements convectifs. Ainsi, 22 mesures de flux de chaleur (Rimi 1999) dans des forages peu profonds ont été incorporées, avec 75 mètres comme valeur minimale de la profondeur pour être incluses. Les autres critères sont la représentativité de l'emplacement du puits et l'absence de mouvements convectifs. Deux cartes sont présentées ; la première (Fig. 1) donne les valeurs ponctuelles du gradient par forage ou par site ; la deuxième (Fig. 2) est une carte de courbes d'isovaleurs de gradient géothermique qui montre les tendances macroscopiques de la distribution sur laquelle sont superposées les sources chaudes. Pour établir la grille de traçage de la carte nous avons utilisé le krigeage qui est une méthode géostatistique d'interpolation bien adaptée aux données irrégulièrement distribuées dans l'espace et qui permet l'estimation des valeurs locales et de générer les tendances générales en considérant l'organisation spatiale des données. Les données spatiales sont caractérisées par le comportement erratique typique des variables aléatoires et par la corrélation qui dépend de leurs coordonnées géographiques. L'étude de ces corrélations spatiales est

appelée habituellement "analyse structurale" ou "variogramme" (Fig. 3) ; elle décrit la moyenne des carrés des écarts entre des paires de données lorsque la distance qui les sépare augmente. Enfin, pour éliminer les effets de bord de la carte qui réduisent énormément l'information sur l'étendue des zones géothermiques, le calcul de la grille de traçage, intègre les données des zones frontalières : la mer d'Alboran (Polyak *et al.* 1996), le sud espagnol (Albert Beltran 1979) et la marge atlantique (Hermann *et al.* 1977, Villinger 1984). Les résidus entre les résultats de la grille calculée et les données originales sont représentés sur la figure 4.

## RESULTATS

### Gradient géothermique

La valeur du gradient thermique varie de 10°C/km à plus de 100°C/km (Figs. 1 et 2). La valeur moyenne,  $35 \pm 11$ °C/km, reste plus élevée que la moyenne globale qui est de l'ordre de 20°C/km à 25°C/km. Aussi, les histogrammes de la figure 5, montrent que l'intervalle 30-45°C/km est le plus fréquent. Ceci pourrait être dû à ce que la plupart des déterminations ont été effectuées dans des zones anormale-

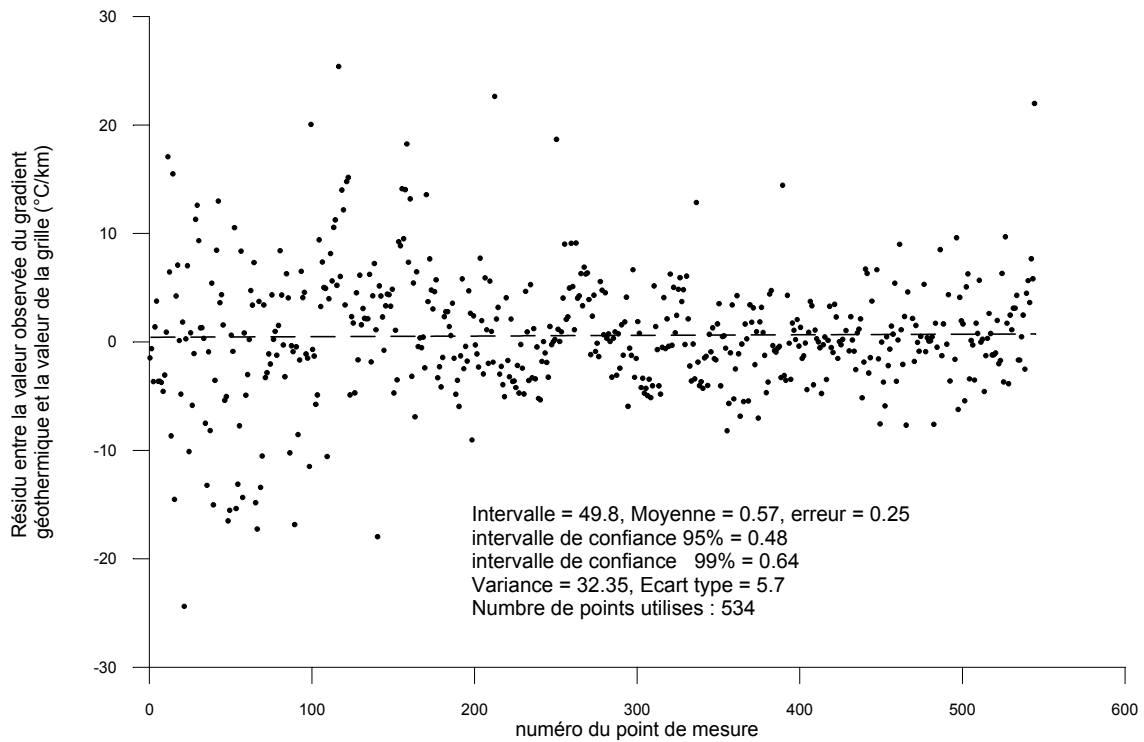


Figure 4. Variation du résidu entre les valeurs déterminées du gradient géothermique et celles interpolées par le krigeage pour établir les courbes d'égale valeur.

ment chaudes en liaison avec le volcanisme ou la tectonique d'extension (Maroc oriental). Le long de la marge atlantique, le gradient reporté d'après les données marines est élevé (40-60°C/km) (Hermann *et al.* 1977, Villinger 1984) (Figs. 1 et 2) et pourrait être lié au rajeunissement de la croûte suite au volcanisme des Iles Canaries, dont les éruptions successives se sont effectuées en plusieurs cycles, le plus ancien remontant à avant 35 Ma, alors que le plus tardif date de 1 à 2 Ma (Staudigel & Schminke 1984). Les générations des volcans des Canaries sont interprétées comme étant la manifestation en surface de profonds panaches mantelliques ascendants ou *hot spots* (cf. par ex. Morgan 1971).

On observe également une grande variation latérale au sein d'une zone étroite telle que le Prérif (Fig. 2). Ceci est dû à une combinaison de différents processus thermiques complexes (Rimi *et al.* 1998). Les variations spatiales du gradient géothermique ne coïncident pas parfaitement avec celles du flux de chaleur ; en effet, si dans l'Oriental le gradient et le flux géothermiques sont tous deux élevés, ce n'est pas le cas dans le Prérif et la côte atlantique. La zone qui s'étend le long du front de la Nappe pré-rifaine montre une importante anomalie du gradient géothermique, de 40-45°C/km, alors que le flux de chaleur demeure normal, de 60 à 70 mW/m<sup>2</sup> (Rimi 2001). Des variations rapides du flux de chaleur sont observées aux limites séparant le bassin du Gharb, la nappe du Prérif et les Rides sud-rifaines. De telles perturbations peuvent être dues aux hétérogénéités latérales de conductivité thermique (dômes de sel, proximité du socle granitique ou quartzitique et densité de fracturation). Cette région, qui couvre le Gharb, les Rides

sud-rifaines et le Prérif, montre également une structure hydrogéologique complexe avec deux sens opposés de circulation d'eau (Ostapenko 1985) : les eaux d'infiltration à partir de la Meseta et des Rides sud rifaines en direction du nord-est et du nord ; les eaux d'expulsion coulant vers le sud-ouest. Dans le Miocène du Gharb, le mouvement de l'eau est essentiellement conditionné par une migration verticale ascendante depuis les séries infra-nappes.

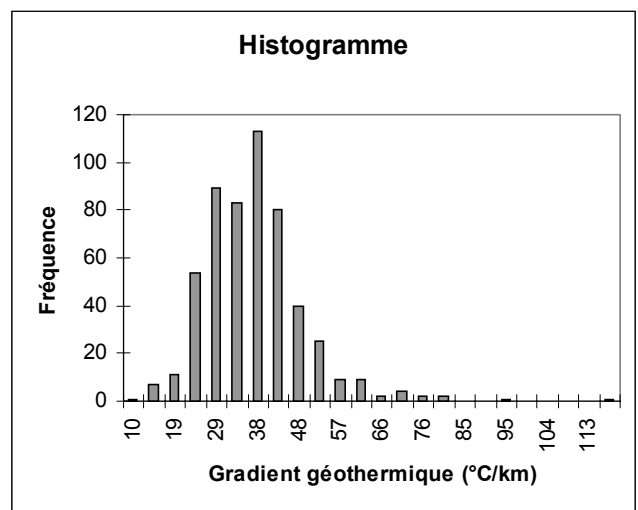


Figure 5. Histogramme de la distribution des valeurs du gradient géothermique au Maroc

Tableau I. Distribution des propriétés des sources d'eau naturelles au Maroc

Tmin (°C)	Tmax (°C)	nombre	pourcentage (%)	$\rho_{\min}$ (l/s)	$\rho_{\max}$ (l/s)	nombre	pourcentage (%)
				< 2		7	17.9
20	30	21	37.5	2	10	11	28.2
30	40	21	37.5	10	50	14	35.9
40	50	11	19.6	50	250	5	12.8
> 50		3	5.4	> 250		2	5.1
RSmin (g/l)	RSmax (g/l)	nombre	pourcentage (%)	pHmin	pHmax	nombre	pourcentage (%)
< 0,6		11	23.4	< 6,5		8	19.5
0,6	1,2	12	25.5	6,5	7,5	27	65,9
1,2	2,5	8	17.0	> 7,5		6	14.6
2,5	5	10	21.3				
> 5		6	12.8				
Faciès chimique		nombre	pourcentage (%)				
sulfuré		11	23.4				
carbo-gazeux		12	25.5				
chloruré		8	17.0				
sulfaté		10	21.3				
bicarbonaté		6	12.8				

Du point de vue énergétique, la profondeur pour atteindre une température de 60°C est de 1000 m dans l'Oriental et le Prérif, alors qu'il faudrait descendre à 2000 m pour arriver à 100°C.

### Sources thermales

Les propriétés physico-chimiques de la source sont un indicateur qui peut être utilisé, après comparaison avec des données géologiques, dans l'exploration hydro-géothermique. Les températures observées donnent les premières évaluations de la profondeur de l'origine de l'eau thermale. La majeure partie de ces sources chaudes est concentrée dans le nord du pays : Maroc central, Prérif, Sillon sud-rifain et Maroc nord-oriental (Fig. 2).

Les informations recueillies dans les rapports publiés sur les propriétés physico-chimiques des sources thermo-minérales du Maroc (température, débit, résidu sec, pH et composition chimique, ...), ont été vérifiées ; ainsi, 36 points ont été éliminés sur 131, soit presque 30%, pour des raisons inhérentes à une qualité insignifiante ou mauvaise de l'eau, à un débit faible, à une température faible, et à des données douteuses ou incomplètes.

En moyenne (Tabl. I), les sources les plus chaudes sont celles du Maroc nord-oriental dont le contexte est clairement lié au volcanisme et à la tectonique récents. Dans le Rif occidental, les sources d'eau sont en général connectées à des systèmes de circulation profonde, et leur montée artésienne est favorisée par les fractures actives de

la région. Les plus chaudes que 30°C jalonnent le front de la Nappe pré-rifaine et les frontières entre les unités structurales majeures et résurgissent préférentiellement entre les courbes isogradients 30 et 40°C.km<sup>-1</sup> (Fig. 2). En revanche, les sources chaudes dans l'est du Rif et tout le Maroc oriental sont associées à l'élévation du flux mantellique. Dans le Maroc central, la source Lalla Haya (T = 42°C), même si du point de vue structural, elle est liée au massif granitique important de la région, le granite d'Oulmes, son origine demeure toujours météorique. Le Haut Atlas oriental recèle des sources thermo-minérales s'alimentant dans le Lias calcaire. La plus chaude (T>52°C avec un débit de 5 l/s) est située à Foum Zaâbel au nord d'Errachidia. C'est une eau très minéralisée chlorurée sodique, sulfatée calcique et magnésienne, bicarbonatée et à forte teneur en fluor (Saqualli 1970). Enfin, les deux sources les plus chaudes dans les provinces du Sud, Abeino (T=42°C) et Timoulay (T=40°C) sont situées dans la zone d'anomalie élevée de flux géothermique entre les Iles Canaries et le bassin de Tindouf (Rimi 1999).

### CONCLUSIONS

Bien que la méthode utilisée dans cette étude pour estimer les gradients géothermiques comporte des hypothèses simplifiées et qu'il y a encore plusieurs zones non couvertes par les mesures pour définir la structure des gradients géothermiques, il n'en demeure pas moins que la distribution des gradients est compatible avec le cadre

géologique. Dans le nord-est du Maroc, le gradient élevé est associé au volcanisme, alors que dans le Prérif, il ne peut être expliqué que par la tectonique cassante et le réseau dense de fractures favorisant une circulation de fluides qui engendre un processus de convection. La tendance d'élévation du gradient sur la marge atlantique en direction des îles Canaries est associée à la présence dans la région d'un hot spot. Par ailleurs, de faibles valeurs sont observées dans les zones tectoniquement stables telles que la Meseta

occidentale et l'Anti Atlas. Le sous-sol marocain dispose réellement de potentialités géothermiques, et les courbes température / profondeur, sont un diagnostic des processus de transfert de chaleur en sub-surface. La carte générale du gradient géothermique met en évidence les zones où doit avoir une couverture détaillée, en utilisant des sondages peu profonds avec un espacement de 2-3 km, nécessaire pour l'investigation des traits du champ thermique local.

### Références

- Albert Beltran J.F. 1979. El mapa español de flujos caloríficos, intento de correlación entre anomalías geotermicas y estructurales. *Bol. Geol. Min.*, Madrid, XC-I, 36-48.
- Bahi L., El Yamine N. & Risler J.J. 1983. Linéaments géothermiques au Maroc. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 296, sér. II, 1087-1092.
- Benabidate L. 1994. *Contribution à l'étude hydrogéothermique du Maroc nord-occidental (Rharb, Rides et Saïss)*. Thèse de spécialité, Université de Sfax, Tunisie.
- Boukdir A. 1994. *Contribution à l'étude géothermique du bassin du Tadla, Plateau des phosphates et Tassaout aval. Application au réservoir calcaire du Turonien (Crétacé)*. D.E.S. Université Cadi Ayad, Fac. Sci. Marrakech, Maroc.
- Cidu, R. & Bahaj S. 2000. Geochemistry of thermal waters from Morocco. *Geothermics*, 29, 407-430.
- Hermann B.M., Langseth M.G. & Hobart M.A. 1977. Heat flow in the oceanic crust bounding West Africa. *Tectonophysics*, 41, 1-3, 61-78.
- Lahrach A. 1994. *Potentialités hydrogéothermiques du Maroc oriental*. Doctorat de spécialité, Université de Sfax, Tunisie.
- Morgan W.J. 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, 230, 42-43.
- Ostapenko S.V. 1985. *Conditions hydrogéologiques et perspectives pétrolières du bassin du Gharb-Prérif*. Office National de la Recherche et d'Exploitation Pétrolière, Rabat, Maroc, Rapport inédit, no 31389.
- Polyak B.G., Fernandez M., Khutoskoy M.D., Soto J.I., Basov I.A., Comas M.C., Khain V. Ye, Alonso B., Agapova G.V., Mazurova I.S., Negredo A., Tochitsky V.O., de la Lind J., Bogdanov N. A. & Banda E. 1996. Heat flow in the Alboran Sea, western Mediterranean. *Tectonophysics*, 263, 191-218.
- Rimi A. & Lucazeau F. 1987. Heat flow density measurements in northern Morocco. *J. Afr. Earth Sci.*, 6, 835-843.
- Rimi A. 1990. Geothermal gradient and heat flow trends in Morocco. *Geothermics*, 19, 5, 443-454.
- Rimi A., Chalouan A. & Bahi L. 1998. Heat flow in the westernmost part of the Alpine Mediterranean system (the Rif, Morocco). *Tectonophysics*, 285, 135-146.
- Rimi A. 1999. Mantle heat flow and geotherms for the main geologic domains in Morocco. *Int. J. Earth Sci. (Geologische Rundschau)*, 88, 458-466.
- Rimi A. 2001. Carte de densité de flux de chaleur et de gradient géothermique dans le nord du Maroc. In : *Symposium : La chaîne rifaine dans son cadre méditerranéen occidental*, Rabat 29-30 octobre, 2001.
- Saquali T. 1970. *Les sources thermominérales du Prérif*. Rapport inédit n° 26, Ministère de l'Industrie et des Mines, SEGM, Meknès, Maroc. 101 p.
- Staudigel H. & Schminke H.U. 1984. The Pliocene seamount series of La Palma/Canary Islands. *J. Geophys.*, 96, 16083-16100.
- Villinger H. 1984. New heat flow values of the west of Morocco. *Initial Reports DSDP*, 79, 377-381.
- Zarhloule, Y. 1999. *Potentialités géothermiques du Maroc : traitement intégré par les températures profondes et indices de surface*. Doctorat d'Etat, Fac. Sci. Oujda, Maroc, 154 p.
- Ziyadi R. 1993. *Géologie appliquée à l'étude de l'environnement géothermique de la région de Nador (Rif nord-oriental, Maroc)*. Doctorat de Spécialité, Université de Pau et des Pays de l'Adour, France.

Manuscrit reçu le 15 décembre 2001