

Le gradient géothermique profond du Maroc : détermination et cartographie

Yassine ZARHLOULE

Université Mohammed I, Faculté des Sciences, Département de Géologie, Laboratoire d'Hydrogéologie & Environnement,
B.P. 524, Oujda, Maroc. e-mail : yassine@sciences.univ-oujda.ac.ma

Résumé. Le but de cette étude est l'estimation du gradient géothermique et l'établissement de la carte du gradient géothermique profond du Maroc à partir des données de température des forages pétroliers. Les 410 forages retenus présentent au moins deux mesures de températures BHT à différentes profondeurs. Ils ont permis la collecte de 1204 valeurs de température (1126 BHT et 78 DST), qui ont permis le calcul du gradient géothermique pour chaque puits. Elles intéressent six bassins géologiquement et hydrogéologiquement distincts : le bassin du Maroc nord-oriental, le bassin du Maroc nord-occidental, le bassin du Sud-Ouest marocain, le bassin de Tarfaya–Laayoune–Sahara marocain et le bassin d'Errachidia–Ouarzazate–Boudnib. Les températures de fond du puits (BHT) ont été corrigées des effets de circulation de la boue précédant la mesure, soit par la méthode de Horner, soit par la comparaison de toutes les données BHT avec les températures obtenues au cours des tests de production (DST). Après correction des BHT brutes, basée sur les DST comme référence, les données de températures DST et BHT corrigées ont permis d'obtenir un gradient régional moyen qui varie entre 19°C/km et 36°C/km. Pour l'ensemble du Maroc, le gradient géothermique moyen est de 23°C/km. Le gradient géothermique ponctuel varie entre 19°C/km et 41°C/km. Les différentes valeurs du gradient géothermique calculées dans chaque forage ont servi à l'établissement de la carte du gradient géothermique moyen de chaque bassin. La compilation de l'ensemble des cartes a permis de dresser la carte du gradient géothermique du Maroc. Les anomalies géothermiques de subsurface, repérées sur les cartes régionales ont été observées dans la carte générale ; elles sont principalement liées à l'effet de l'hydrodynamisme profond et à des facteurs tectoniques comme les failles profondes affectant le socle, la néotectonique accompagnée d'une activité volcanique ou l'élévation du Moho.

Mots clés : Maroc, gradient géothermique, forage pétrolier, BHT, DST, anomalie thermique, hydrodynamisme.

The deep geothermal gradient of Morocco : determination and cartography.

Abstract. The aim of this study is to establish a geothermal gradient map of Morocco, by using thermal data obtained from petroleum exploration wells. Both the corrected bottom-hole temperatures (BHT) and the drill-stem test temperatures (DST) were used to elaborate the geothermal gradient map. An amount of 410 wells provided 1204 temperature values (1126 BHT and 78 DST). BHT were systematically corrected for mud circulation cooling effects either by Horner technique, when several temperature records were available at a given depth, or by comparison of all BHT with test temperatures (DST) that are representative of the actual formation temperatures. In order to establish the geothermal gradient of Morocco, the area was subdivided into five hydrogeothermal basins: north-eastern Moroccan basin, north-western Moroccan basin, Errachidia–Boudnib basin, south-western Moroccan basin and the Tarfaya–Laayoune–Sahara basin. Each basin displays the same geological evolution and is characterised by its specific reservoirs and hydrodynamism. For each basin the petroleum well data were processed. The objective was to set a regional geothermal gradient map, and then to compile a geothermal gradient map of Morocco. The regional geothermal gradient ranges from 19°C/km to 36°C/km. For the the whole of Morocco the geothermal gradient is 23°C/km. The punctual geothermal gradient ranges from 16°C/km to 41°C/km. The geothermal anomalies are related to deep hydrodynamics, recent tectonics, volcanism or to elevation of the Moho.

Keywords: Morocco, geothermal gradient, petroleum wells, BHT, DST, thermal anomalies, hydrodynamics.

INTRODUCTION

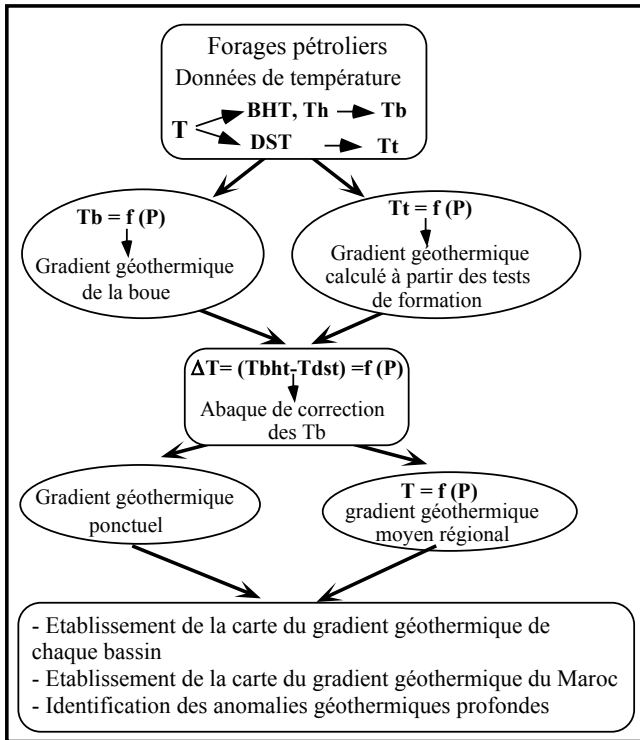
Les recherches géothermiques au Maroc ont connu un intérêt accru depuis 1968 avec des études menées par des équipes universitaires et industrielles (Facca 1968, Alsac *et al.* 1969, Bahi *et al.* 1983, Rimi & Lucazeau 1987, Rimi *et al.* 1998, Rimi 1990, 1999, 2001, Ben Aabidate 1994, Lahrach 1994, Zarhloule 1994, 1999, 2003, Boukdir 1994, Ziyadi 1993, Bellouti 1997, Lahlou Mimi *et al.* 1999, El Morabiti 2000, Benmakhlof 2000, Cidu & Bahaj 2000). Selon que l'origine de la valeur de température soit mesurée directement ou estimée, ces auteurs se sont attachés à en tirer le meilleur profit afin d'approcher la température de formation recherchée. Dans tous les cas, des corrections ont été effectuées à partir de valeurs soit mesurées, soit déduites de l'adaptation d'outils géochimiques. Ces travaux ont doté le pays d'une masse importante d'informations sur la répartition spatiale du gradient géothermique ainsi que sur la température souterraine.

Le but de ce travail est l'établissement de la carte du gradient géothermique profond du Maroc à partir des données de température issues des forages pétroliers onshore et offshore. Ces forages fournissent différentes

valeurs de température sous forme soit de BHT (*bottom hole temperature*) mesurées lors des opérations de diagraphies, soit, plus rarement, de DST (*drill stem test*) mesurées lors du test de formation. Malheureusement, les BHT sont généralement inférieures aux températures de formation, à cause de l'effet de refroidissement de la boue de circulation durant les mesures. En revanche, les DST sont directement mesurées sur le fluide testé et sont, de ce fait, considérées comme étant les plus proches de la température réelle de la formation. Pour rendre les BHT brutes fiables afin d'estimer avec le plus de précision possible le gradient géothermique, plusieurs méthodes d'estimation ont été élaborées (Schoepfel & Gillaranz 1966, Timko & Fertl 1972, Gable 1978, Maget 1978, Ben Dhia 1983, 1988, Lam & Jones 1984, Chapman *et al.* 1984, Jones *et al.* 1985, Laschenbruch *et al.* 1985, Deming 1989, Zarhloule *et al.* 1999, Zarhloule 1999, 2003).

METHODOLOGIE ET ACQUISITION DES DONNEES DE TEMPERATURE

L'étude des températures de subsurface d'un bassin passe obligatoirement par l'inventaire systématique de toutes les données acquises à partir des travaux de reconnaissance des



BHT, Th et Tb: températures mesurées dans la boue, DST ou Tt: températures de test
P: profondeur.

Figure 1. Organigramme de la méthode d'étude des températures obtenues des forages pétroliers.

forages pétroliers. La méthodologie suivie pour le traitement des données de températures est résumée dans l'organigramme de la figure 1.

Le dépouillement des rapports de sondage a permis d'inventorier 523 forages dont 410 ont été retenus (Fig. 2, Tabl. I). Ces forages présentent au moins deux mesures de température à différentes profondeurs. Ainsi, 1204 valeurs de température ont été récoltées (1126 BHT et 78 DST) dont 555 pour le bassin du Maroc nord-occidental, 53 pour le Maroc nord-oriental, 346 pour le bassin du Sud-Ouest marocain, 171 pour le bassin de Tarfaya-Laayoune-Sahara marocain, 63 pour le bassin d'Errachidia-Ourzazate-Boudnib et 16 pour le bassin de Tadla. Pour ce dernier, le dépouillement des rapports de fin de sondage a montré que seuls quatre forages contiennent deux mesures de température ou plus (DRZ1, KAT1, KMS1, KAT2). Ces puits, trop proches les uns des autres, ne permettent pas la construction d'une carte de gradient géothermique régional.

Les BHT sont les valeurs de température les plus répandues ; elles sont mesurées à différentes profondeurs dans chaque forage. Cependant, elles ne reflètent pas la température réelle de la formation, et l'écart observé est de 10 à 15°C (Deming 1989) ; cette différence dépend de la profondeur de la mesure, de la diffusivité thermique du milieu et du temps écoulé entre la fin de la circulation de la boue et le début de l'enregistrement.

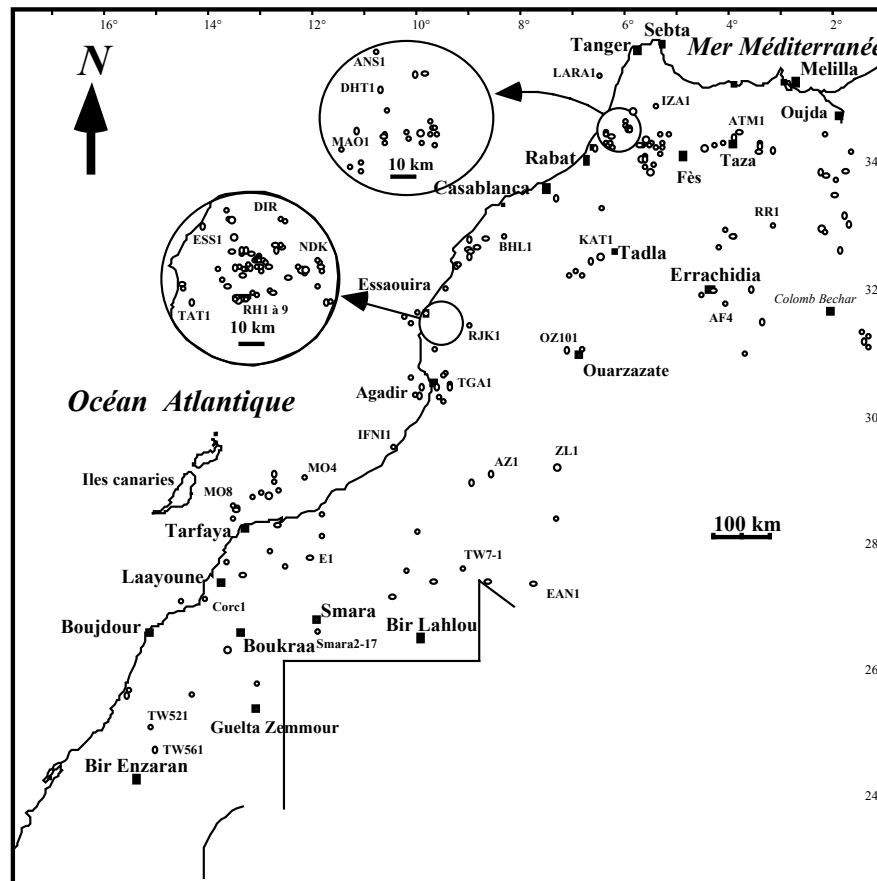


Figure 2. Carte de situation des forages pétroliers utilisés pour la détermination du gradient géothermique.

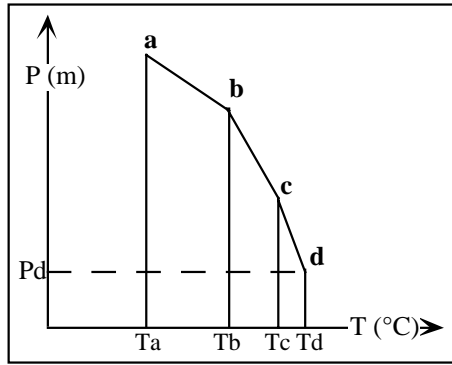


Figure 3. Représentation schématique de la méthode de calcul du gradient géothermique (Barker 1982, in Riad *et al.* 1989). Explications dans le texte.

Les DST, plutôt rares, sont directement mesurées sur le fluide testé par un thermomètre à maxima lors du test de formation. Les températures ainsi mesurées reflètent le mieux la température du niveau d'échantillonnage, et peuvent être considérées comme les plus représentatives sur le plan pratique.

Les BHT ne peuvent être utilisées pour estimer et/ou dresser une carte de gradient géothermique que si elles sont corrigées de l'effet de circulation de la boue. La méthode de correction basée sur les DST comme référence est la suivante:

- utilisation des DST des tests représentatifs comme des températures de référence ;
- estimation des écarts de température (ΔT) entre les DST et les BHT situées à la même profondeur ;
- établissement de la courbe des ΔT en fonction de la profondeur et son utilisation comme abaque de correction pour les valeurs de BHT ;
- utilisation des BHT corrigées et des DST de chaque forage étudié pour calculer son gradient géothermique.

Les gradients géothermiques moyens ponctuels déterminés soit par le calcul de la pente de la tendance linéaire des valeurs de BHT corrigées et de DST de chaque forage, soit par la relation utilisée par Riad *et al.* (1989) (Fig. 3), ont servi à l'établissement des cartes d'isogradients de chaque bassin et par la suite de la carte du gradient géothermique du Maroc. Les courbes sont tracées par interpolation linéaire selon les méthodes classiques de triangulation.

Le gradient élémentaire pour chaque intervalle est

$G_i = (T_b - T_a)/(b - a)$ en $^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$; où $a, b, c...$ sont les profondeurs en m, et $T_a, T_b, T_c...$ les températures corrigées correspondantes.

Le gradient géothermique moyen G_m dans chaque forage sera calculé en utilisant la relation

$G_m = G_a (b - a)/B + G_b (c - b)/B + \dots + G_e (B - e)/B$, avec B la profondeur maximale dans le forage, correspondant à la dernière valeur de température enregistrée.

TRAITEMENT DES DONNEES DE TEMPERATURE

Evolution des BHT brutes et des DST

La figure 4 montre l'évolution des BHT brutes en fonction de la profondeur pour chaque bassin sédimentaire ainsi que

pour l'ensemble du Maroc. La recherche d'un modèle théorique a permis d'opter pour un modèle linéaire de la forme $y = ax + b$; où b représente la température BHT à la profondeur zéro et a le gradient géothermique régional dans la boue.

Pour un ajustement suivant une droite (régression linéaire), on obtient les équations du tableau I, avec de bonnes corrélations pour l'ensemble des bassins ; l'ajustement est acceptable compte tenu de tous les facteurs de biais intervenant dans les mesures de température. Le gradient géothermique régional moyen dans les différents bassins varie de $16^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (bassin de Doukkala) à $32^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (bassin de Guercif). Pour le Maroc, le gradient obtenu est de $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$.

Cette même démarche a été adoptée pour les DST (Fig. 5) enregistrées dans les bassins d'Essaouira, de Tarfaya-Laayoune-Sahara marocain et d'Errachadia-Ouarazazate-Boudnib. Ces graphiques montrent une moindre dispersion des valeurs que celle des BHT brutes. Un ajustement linéaire de la forme $y = ax + b$, permet d'obtenir les équations du tableau I, où $y = T_{dst}$ est la température moyenne de test, $x = P$ est la profondeur de l'essai de formation, a est la pente ou le gradient géothermique moyen calculé à partir des tests, b est la température à la surface du sol, correspondant à la température moyenne annuelle de la région.

Le gradient géothermique régional moyen calculé à partir des tests dans les 3 bassins marocains varie de $23^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (bassin d'Essaouira) à $26^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (Tarfaya-Laayoune-Sahara marocain). Il est de $24^{\circ}\text{C}/\text{km}$ pour l'ensemble des ces bassins.

Correction des BHT brutes

Parmi les méthodes de correction des BHT, on distingue celle qui se base sur les DST et celle dite «Horner Plot». Selon les données disponibles, et pour respecter l'homogénéité géologique verticale et horizontale, la méthode Horner Plot a été appliquée dans le bassin du Maroc nord-oriental pour la correction des Tbht ; en revanche, la méthode de correction basée sur les DST comme référence de correction, a été appliquée dans les bassins d'Essaouira, Tarfaya-Laayoune-Sahara marocain et Errachidia-Ouarazazate-Boudnib.

Correction des Tbht par la méthode Horner Plot

L'application de cette méthode de correction nécessite la connaissance du temps de circulation de la boue et du temps écoulé entre la fin de la circulation et le début d'enregistrement.

Dans le Maroc oriental, seuls 7 forages ont permis d'appliquer cette méthode. Les températures corrigées (T_c) et les profondeurs correspondantes (Fig. 6a, Tabl. I) ont permis d'obtenir un ajustement selon une droite de régression linéaire d'équation $y = 0,035 x + 4$; avec $r (= 0,9)$ comme coefficient de corrélation.

Pour les mêmes puits, le graphique de la figure 6a montre les données de température enregistrées (T_e) en fonction de

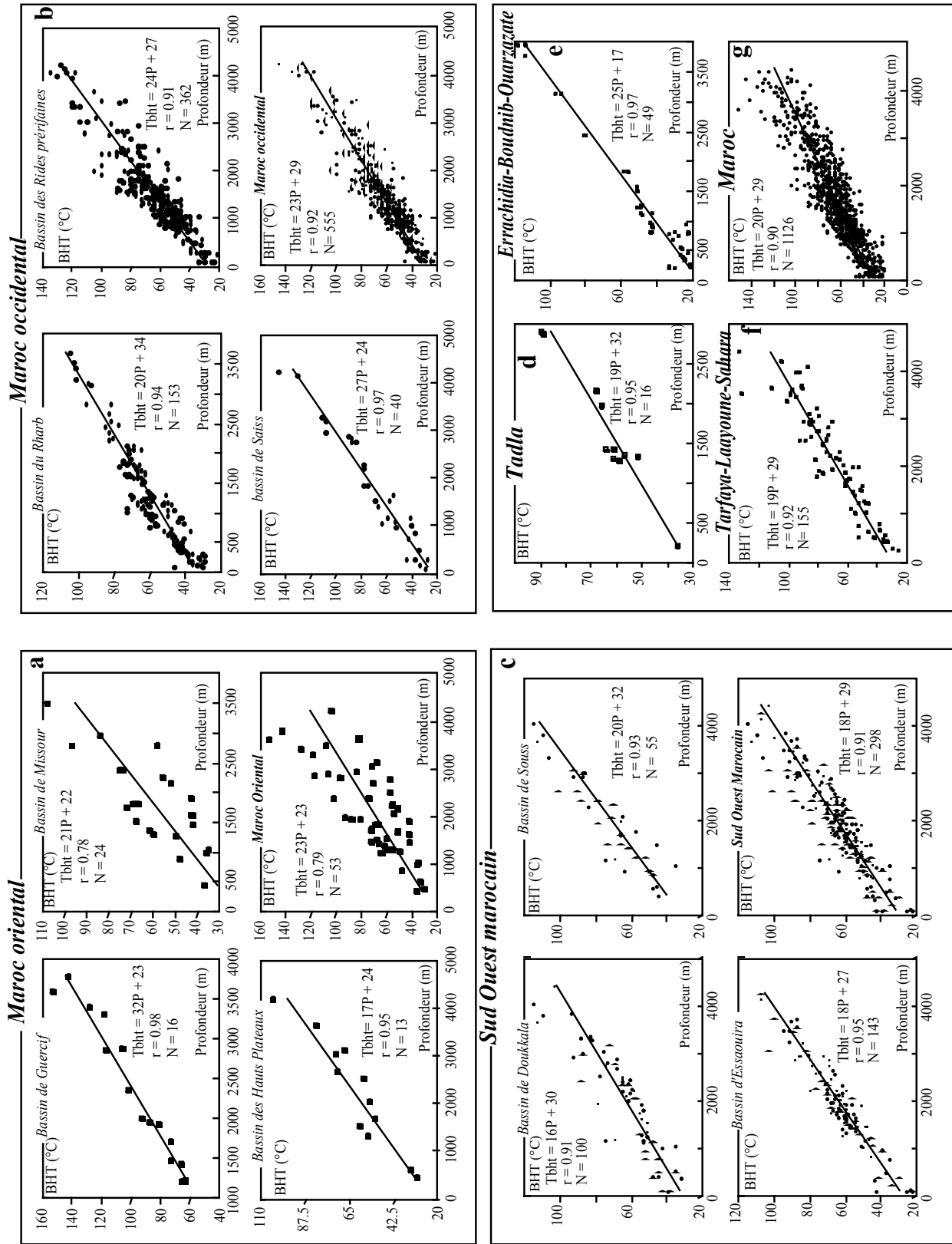


Figure 4. Relation BHT brute – profondeur pour les unités hydrogéothermiques. a, Maroc oriental ; b, Maroc occidental ; c, bassin du Sud-Ouest marocain ; d, bassin de Tadla ; e, Errachidia-Boudnib-Ouarzazate ; f, Tarfaya-Laayoune-Sahara marocain ; g, ensemble du Maroc.

Tableau I: Données des températures d'après les forages pétroliers, et gradients obtenus.

Unités et sous-unités hydrogéothermiques du Maroc	Données récoltées des archives de l'Office National de Recherche et d'Exploration Pétrolière (ONAREP)			Equations obtenues à partir du traitement des BHT bruts des différents bassins marocains			Equations obtenues à partir des DST des différents bassins marocains			Equations des abaques de correction des Tbht			Equations obtenues à partir du traitement des Tbht corrigées et des Tdst des différents bassins marocains			
	Nombre de forages consultés	Nombre de valeurs de température DST	BHT	Equations	r	N	Equations	r	N	Equations	r	N	Equations	r	N	
Maroc nord occidental	Rharb		153	Tbht = 20 P + 34	0.94	153							T = 23 P + 33	0.95	153	
	Rides pré-riétaires	320	362	Tbht = 24 P + 27	0.91	362							T = 28.5 P + 23	0.94	362	
	Saïss		40	Tbht = 27 P + 24	0.97	40							T = 21 P + 20	0.98	40	
Maroc nord oriental	Guercif		16	Tbht = 32 P + 23	0.98	16							T = 36 P + 16	0.99	17	
	Missour	13	24	Tbht = 21 P + 22	0.78	24							T = 25 P + 18	0.87	25	
	Hauts Plateaux		13	Tbht = 17 P + 24	0.95	13							T = 22 P + 20	0.98	14	
Bassin du sud-ouest marocain	Doukkala		100	Tbht = 16 P + 30	0.91	100							T = 19 P + 30	0.93	100	
	Essaouira	113	48	Tbht = 18 P + 27	0.95	143							T = 22 P + 24	0.96	191	
	Agadir		55	Tbht = 20 P + 30	0.93	55							T = 23 P + 31	0.95	55	
Tarfaya-Laïyoune Sahara marocain	46	16	155	Tbht = 19 P + 29	0.92	155							T = 21 P + 28	0.93	171	
Errachidia Ouarzazate Boudnib Tadmra		15	49	Tbht = 25 P + 17	0.97	49								T = 28 P + 16	0.98	63
		16	16	Tbht = 19P + 32	0.95	16								T = 22 P + 31	0.96	16
		523	78	1126	Tbht = 20 P + 29	0.90	1126							T = 23 P + 28	0.92	1193
Maroc																

Tdst ou DST: températures de tests de formation, Tbht ou BHT: température moyenne mesurée dans la boue du forage, Tex: température enregistrée, Ten: température extrapolée, T: température du forage après correction, r: coefficient de corrélation, N: nombre de températures mesurées, P: profondeur de la mesure.

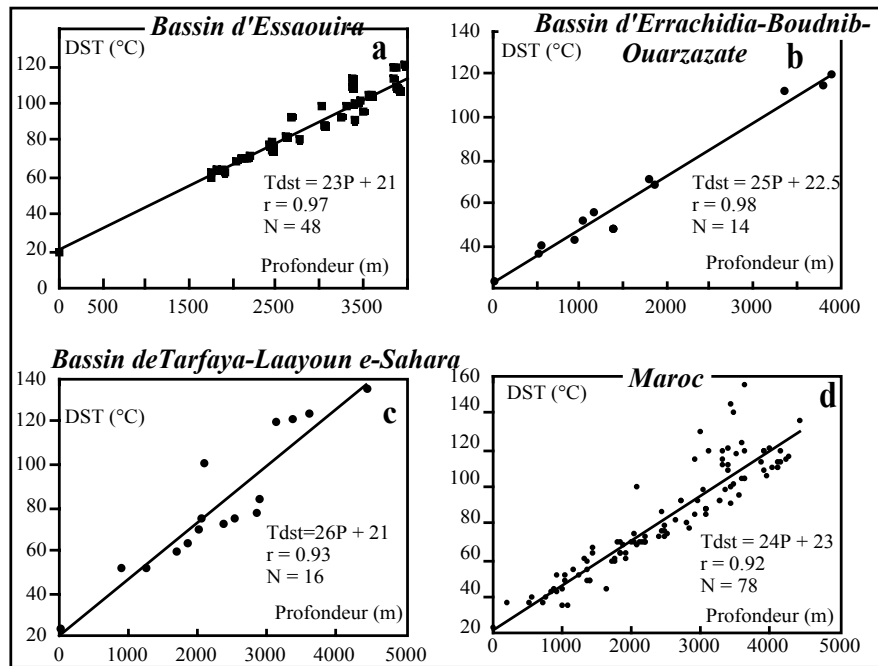


Figure 5. Relation DST–profondeur pour les unités hydrogéothermiques dont les températures T_{dst} ont été mesurées. a, bassin d'Essaouira ; b, Errachidia–Boudnib–Ouarzazate ; c, Tarfaya–Laayoune–Sahara marocain ; d, ensemble du Maroc.

la profondeur. L'équation ainsi obtenue est de la forme $y = a'x + b'$; avec $a' = 0,03$ et $b' = 8,6$ et $r = 0,86$.

La loi de variation $\Delta T = (T_c - T_e)$ est calculée en fonction de la profondeur.

$$\begin{aligned} \Delta(T) = (T_c - T_e) &= (a - a')x + (b - b') = (0,035 - 0,03)P + (4 - 8,6) \\ &= 0,005P - 4,6 \end{aligned}$$

Cette équation permet de corriger les valeurs de T_{bht} du Maroc oriental.

Correction des T_{bht} par la méthode basée sur les DST

L'estimation des T_{bht} à la profondeur voulue, revient à sélectionner les puits ayant des valeurs de T_{bht} et de T_{dst} à la même profondeur, et dont la différence est donc $\Delta T = (T_{dst} - T_{bht})$.

Cette étude ne concerne que les bassins d'Essaouira, de Tarfaya–Laayoune–Sahara marocain et d'Errachidia–Ouarzazate–Boudnib, en raison de la présence à la fois des valeurs de T_{dst} et de T_{bht} situées à la même côte pour les mêmes forages. Pour le bassin d'Essaouira, quelques valeurs de $\Delta(T)$ ont été estimées à partir des T_{dst} de Meskala et des T_{bht} de Toukimt.

Les valeurs $\Delta T = (T_{dst} - T_{bht})$ sont reportées sur un graphique en fonction de la profondeur pour les trois bassins (Fig. 6b et Tabl. I).

L'examen du graphique du bassin d'Essaouira (Fig. 6b, Tabl. I) montre un nuage de points dont l'ajustement linéaire est $\Delta(T) = 0,003P - 0,86$, avec un coefficient de corrélation $r =$

0,98 ; cette équation correspond à l'abaque de correction des T_{bht} en fonction de la profondeur.

Ce graphique montre deux parties remarquables : dans la tranche de profondeur 0 à 250 m l'écart est négatif, ce qui confirme l'idée du surchauffement de la boue par rapport aux terrains environnants ; au delà de 250 m, l'écart est positif et augmente régulièrement avec la profondeur.

Ces graphiques (Fig. 6b) montrent un nuage de points dont l'ajustement sur un modèle de type logarithmique, donne les équations de la forme $\Delta(T) = 8,6 \log P - 23$ pour le bassin d'Errachidia–Boudnib–Ouarzazate ($r = 0,95$) et $\Delta(T) = 3,5 \log P - 8,5$ ($r = 0,93$) pour le bassin de Tarfaya–Laayoune–Sahara marocain. La loi ainsi définie permet de faire correspondre à chaque valeur de T_{bht} , située à une profondeur donnée une valeur corrigée considérée comme T_{dst} .

Pour l'ensemble du Maroc, les données ΔT ont été reportées sur un graphique en fonction de la profondeur (Fig. 6b, Tabl. I). L'équation ainsi obtenue est $\Delta(T) = 0,002P + 0,062$. Cette équation a servi comme abaque de correction de certaines valeurs de T_{bht} des zones très peu couvertes par les forages pétroliers.

Une fois établie la courbe moyenne de variation de l'écart $\Delta T = (T_{dst} - T_{bht})$ en fonction de la profondeur pour chaque bassin, la courbe théorique moyenne a servi d'abaque de correction des autres valeurs de T_{bht} .

Dans les bassins de Souss, de Doukkala et de Tadla, les valeurs de T_{bht} ont été corrigées par l'abaque de correction du bassin d'Essaouira, et celles du bassin du Maroc occidental par l'abaque du bassin du Maroc oriental.

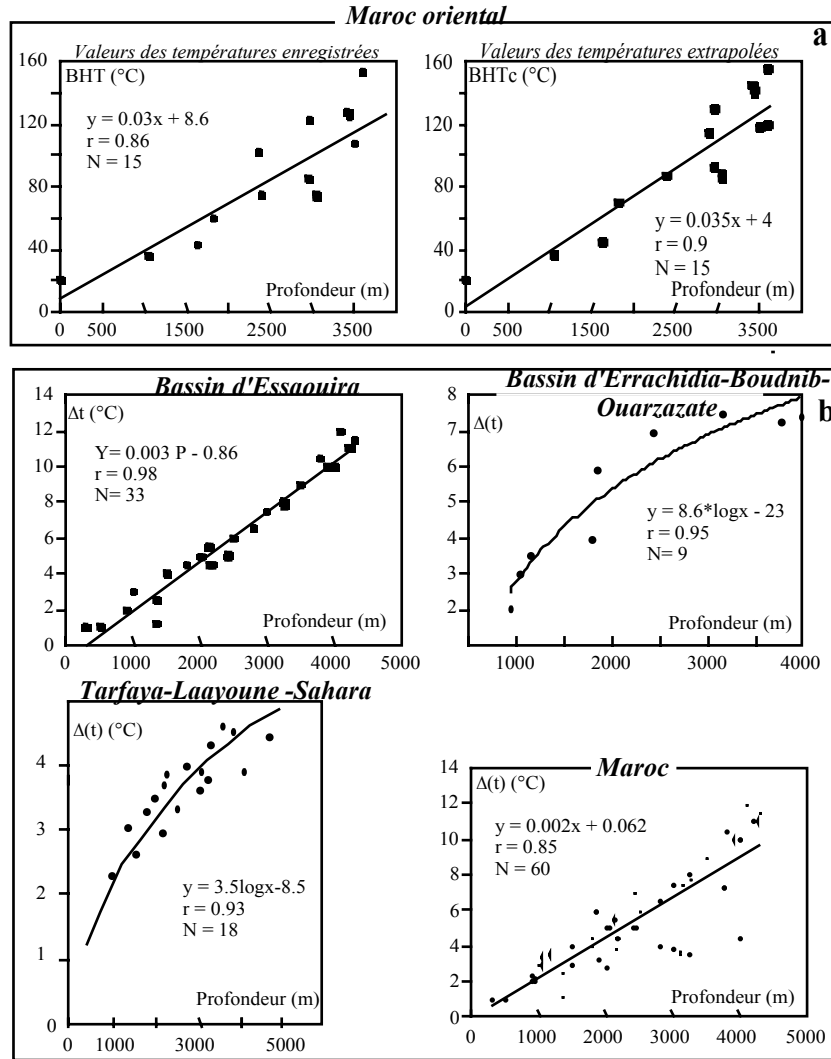


Figure 6. Abaqués de correction des BHT brutes. a, méthode Horner Plot ; b, méthode basée sur les DST comme référence de correction.

Gradients géothermiques régionaux

Le report des valeurs T_{bht} corrigées et des DST de chaque bassin en fonction de la profondeur (Fig. 7, Tabl. I) montre un nuage de points qu'on peut ajuster linéairement sous la forme : $y = ax + b$; où a représente le gradient géothermique moyen pour la région, et b l'ordonnée à l'origine.

Le gradient géothermique régional moyen dans les différents bassins varie entre 19°C/km (bassin de Doukkala) et 36°C/km (bassin de Guercif).

Le gradient géothermique régional moyen est de 28°C/km pour le bassins du Maroc nord-oriental et d'Errachidia-Ouarzazate-Boudnib, 27°C/km pour le Maroc nord-occidental, 22°C/km pour le bassin de Tadla et 21°C/km pour les bassins du Sud-Ouest marocain et Tarfaya-Laayoune-Sahara marocain. Le gradient géothermique moyen pour le Maroc est 23°C/km.

CARTOGRAPHIE DU GRADIENT GEOTHERMIQUE ET INTERPRETATION

Les gradients géothermiques moyens ponctuels déterminés par le calcul de la tendance linéaire des valeurs de BHT corrigées et de DST de chaque forage ont servi à l'établissement de la carte du gradient géothermique de chaque bassin et par la suite de la carte du gradient géothermique du Maroc.

Bassin du Maroc oriental

Dans le bassin du Maroc oriental (Fig. 8), la carte montre que le gradient géothermique varie entre 17 et 41°C/km, avec une élévation du sud vers le nord où il dépasse 38°C/km. Cette anomalie correspond géographiquement à la zone d'activité volcanique néogène et quaternaire (Fig. 9). D'autre part, la superposition de la carte des failles actives ou récentes observées sur le terrain à la carte des épices des séismes confirme l'existence d'une corrélation entre

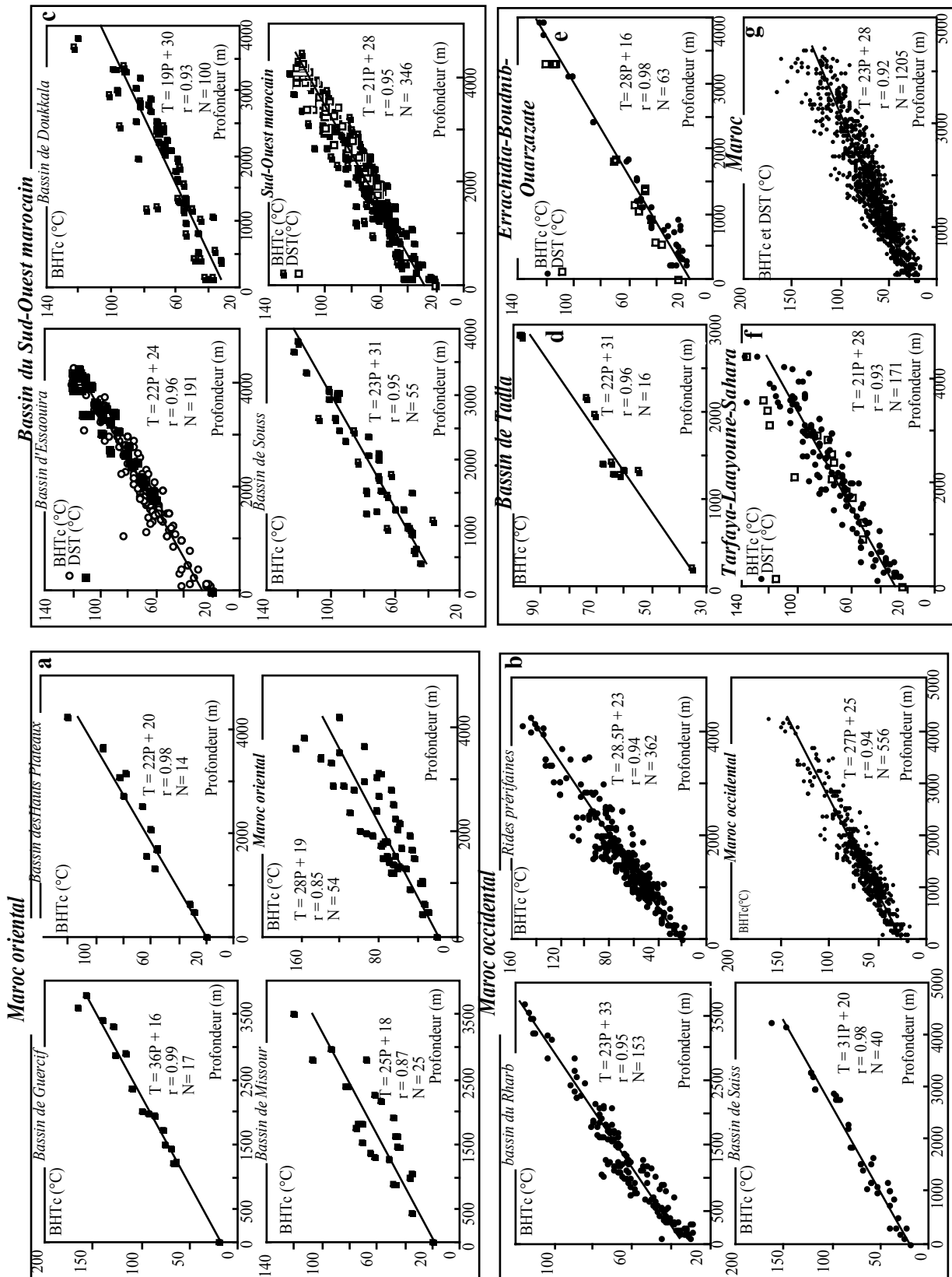


Figure 7. Température en fonction de la profondeur après correction des BHT pour les unités hydrogéothermiques. a, Maroc oriental ; b, Maroc occidental ; c, bassin du Sud-Ouest marocain ; d, bassin de Tadla ; e, bassin d'Errachidia-Boudnib-Ouarzazate ; f, bassin de Tarfaya-Laayoune-Sahara marocain ; g, ensemble du Maroc.

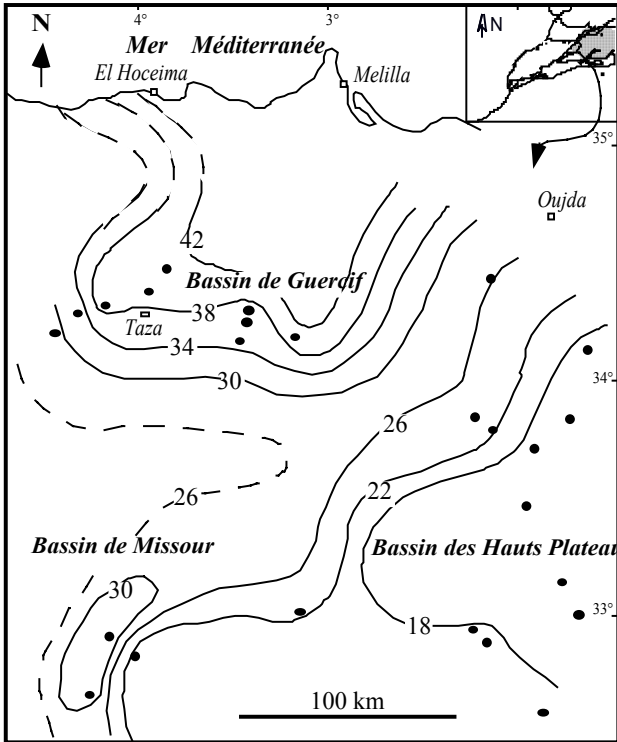


Figure 8. Carte du gradient géothermique du Maroc oriental.

sismicité et failles de direction N-S, NE-SW et quelques failles NW-SE (Aït Brahim *et al.* 1990). Ces failles sont gé-

néralement à l'origine du volcanisme néogène à quaternaire, induisant ainsi l'augmentation du gradient géothermique dans cette zone.

Bassin du Maroc occidental

Dans le bassin du Maroc occidental (Fig. 10), le gradient géothermique fluctue entre 19°C/km et 34°C/km. Trois zones bien distinctes apparaissent, où le gradient géothermique profond est élevé :

- à l'ouest, le gradient géothermique dépasse 30°C/km ; cette augmentation est principalement liée à l'effet de l'hydrodynamisme profond (Lahrach *et al.* 1993, Ben Aabidate 1994, Zarhloule *et al.* 2001) ; cette région est caractérisée par des marnes miocènes renfermant des lentilles sableuses à des profondeurs élevées (forages ALG1 et KSR2), d'épaisseur allant jusqu'à 350 m ; ces lentilles sont caractérisées par un hydrodynamisme actif vers la zone la plus subsidente de cette région ; cette zone constitue également une zone de décharge pour les réservoirs profonds d'âge paléozoïque et crétacé (forages MAM1, SE1 et SE2), ce qui peut être à l'origine de l'élévation du gradient ;
- au centre, l'augmentation du gradient géothermique est due en premier lieu à l'effet de l'hydrodynamisme profond en raison de l'existence de plusieurs sources chaudes qui émergent dans cette zone, et des réseaux de failles proches de l'accident de Sidi Fili (Ben Aabidate 1994, Lahrach *et al.* 1998, Zarhloule, 2003) ;

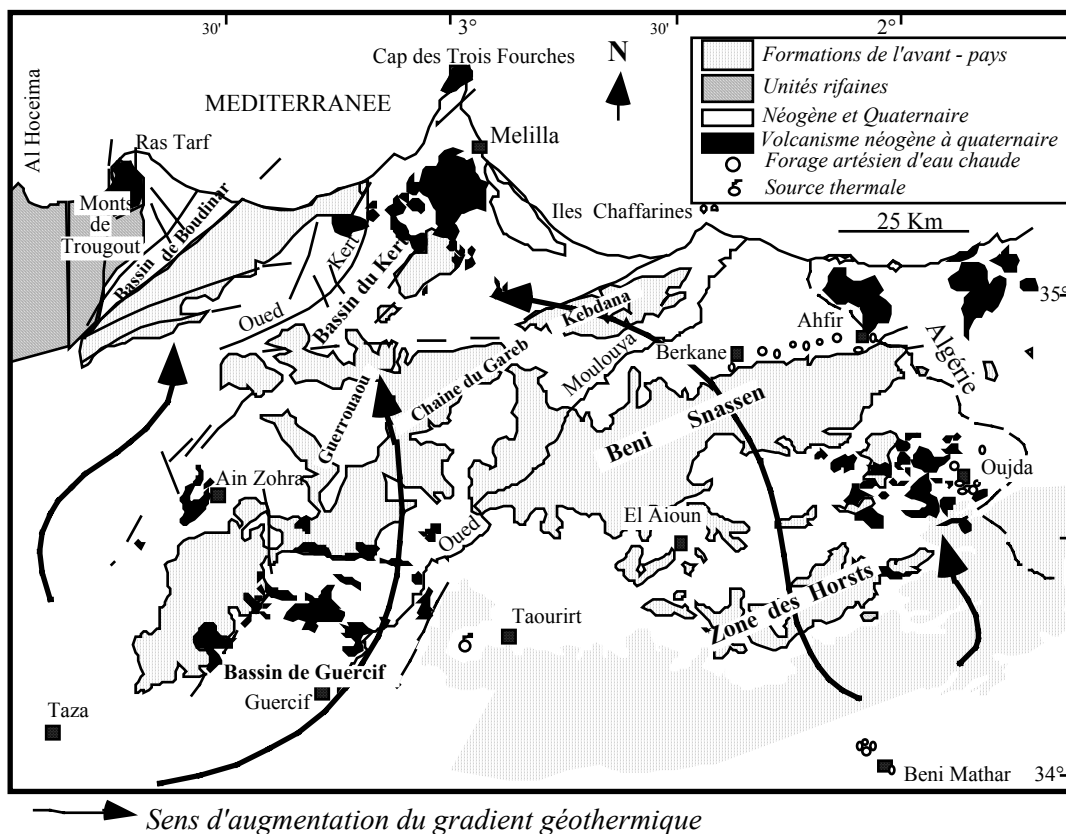
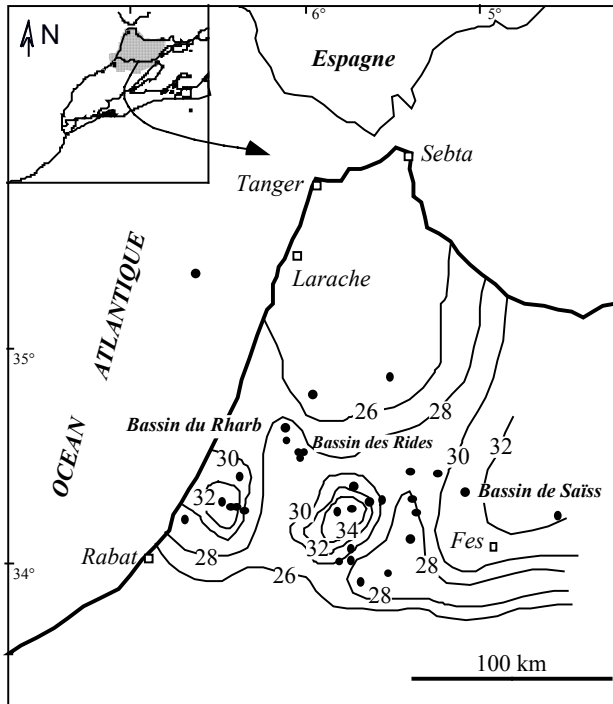


Figure 9. Relation entre les anomalies géothermiques, la répartition des principales failles et le volcanisme récent (schéma structural d'après Hernandez 1983 et Hervouët 1985).



28 Courbe d'isogradients géothermique (°C/km), ● forage pétrolier

Figure 10. Carte du gradient géothermique du Maroc occidental.

– à l'est, le gradient augmente du sud vers le nord de Fès ; cet accroissement (Zarhloule *et al.* 2001) suit l'enfouissement du réservoir liasique qui renferme de l'eau chaude ; ce dernier est à l'origine de plusieurs sources thermales dont la température dépasse 40°C et qui sont à proximité de Fès (Lahrach *et al.* 1998) ; cette zone constitue donc une aire de décharge des principaux réservoirs profonds (>1500 m), et par conséquent, l'augmentation du gradient géothermique est étroitement liée à l'hydrodynamisme des aquifères profonds.

Bassin du Sud-Ouest marocain

La carte du gradient géothermique moyen du bassin du Sud-Ouest marocain (Fig. 11) révèle que le gradient varie entre 14°C/km et 35°C/km. Cette carte montre :

- une augmentation progressive des zones nord, sud et est du bassin d'Essaouira vers le centre, au voisinage de la partie nord du diapir du Tidsi où la courbe d'isogradients dépasse 30°C/km ;
- une zone située à l'ouest du diapir de Tidsi, vers l'offshore du bassin, où le gradient atteint 30°C/km. Cette augmentation est due, d'une part, à l'influence des eaux souterraines qui convergent depuis les zones nord et sud où les réservoirs jurassiques profonds affleurent vers le centre du bassin (Zarhloule & Ben Dhia 1992, Zarhloule 1994, Zarhloule *et al.* 1999), et d'autre part aux grandes épaisseurs des terrains salifères qui sont de bons conducteurs de chaleur, engendrant un apport thermique suffisant pour accroître les gradients dans les couches supérieures (Zarhloule *et al.* 1999) ;
- une augmentation vers l'offshore du bassin d'Agadir où le gradient dépasse 30°C/km ; elle est due à des accidents du

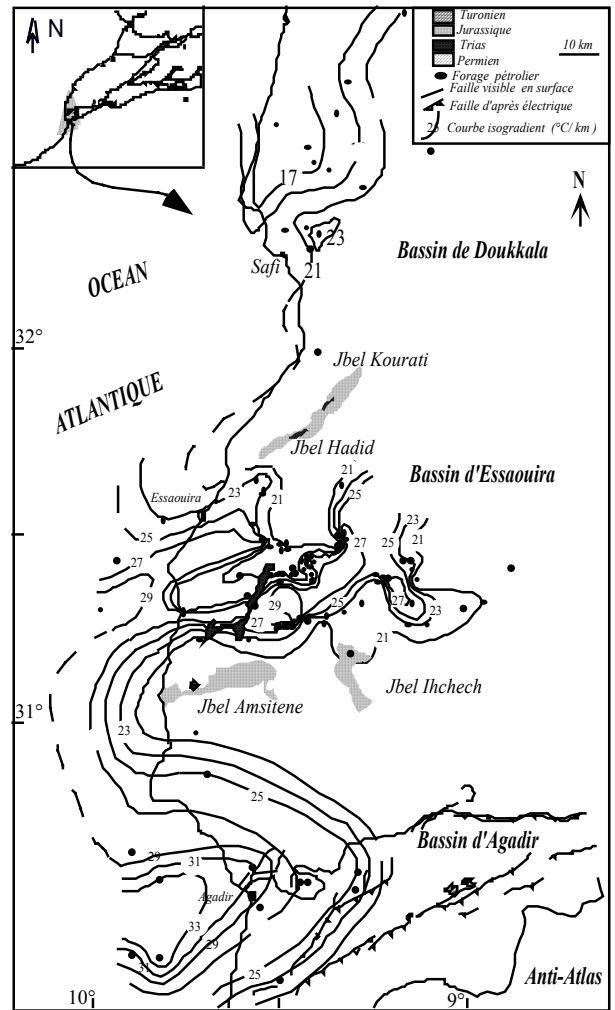


Figure 11. Carte du gradient géothermique du bassin de Sud-Ouest marocain.

socle qui constituent le prolongement en mer de ceux qui affectent le continent et qui font partie d'un faisceau d'accidents N50 et N70 (prolongement vers l'ouest de l'accident de Tizi n'Test) (Desligneris & El Morabet 1973).

Bassin de Tarfaya–Laayoune–Sahara marocain

Dans ce bassin (Fig. 12), la carte montre que le gradient géothermique oscille entre 17°C/km et 35°C/km.

Trois zones affichent un gradient supérieur à 32°C/km:

- une zone en onshore, située au nord-est de Tarfaya, marquée par la présence d'une faille de socle de direction N65 à N70 révélée par la géophysique (Bellouti 1997) ;
- une zone en offshore, située au nord-ouest de Tarfaya, où le gradient géothermique est élevé, en relation probable avec le volcanisme des îles Canaries (Rulkoïlles 1982) ;
- une zone située au nord-est de Tindouf, où le gradient est supérieur à 32°C/km ; dans ce secteur nous ne disposons pas de données suffisantes pour proposer des explications de cette anomalie.

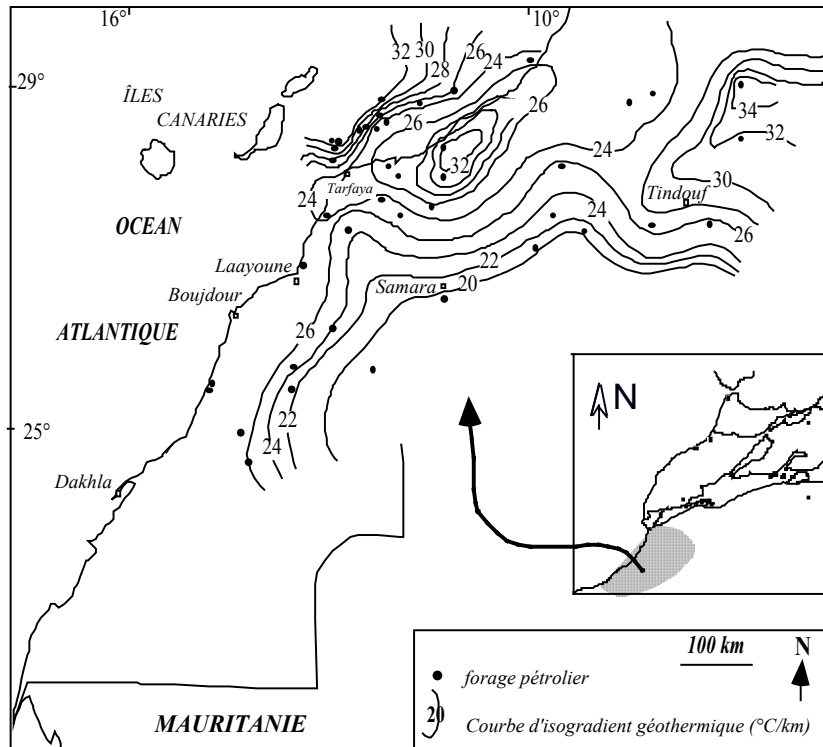


Figure 12. Carte du gradient géothermique du bassin de Tarfaya–Laayoune–Sahara marocain.

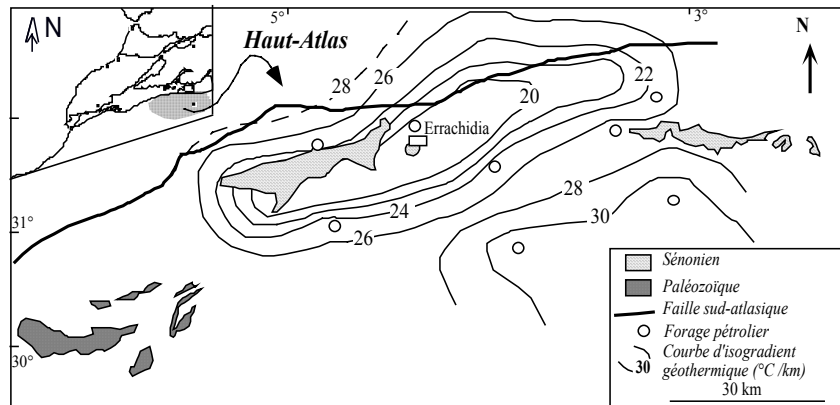


Figure 13. Carte du gradient géothermique du bassin d’Errachidia–Ouarzazate–Boudnib.

Bassin d’Errachidia–Ouarzazate–Boudnib

Dans cette zone, le gradient géothermique (Fig. 13) fluctue entre 16°C/km et 36°C/km avec une zone centrale où le gradient est inférieur à 20°C/km, et deux zones où le gradient a tendance à augmenter (partie septentrionale et partie méridionale d’Errachidia) :

- la zone centrale est largement influencée par l’envahissement des eaux météoriques froides du Haut-Atlas, favorisant ainsi le refroidissement des eaux profondes ;
- dans la partie septentrionale, l’augmentation du gradient pourrait être la conséquence du rapprochement du socle paléozoïque et des failles profondes qui l’affectent, et aussi à la subsidence récente du bassin (Bellouti 1997) ;

– dans la partie méridionale, l’accroissement du gradient pourrait être lié à la faille sud-atlasique qui sépare le bassin d’Errachidia du Haut-Atlas (Bellouti 1997).

CARTE DU GRADIENT GEOTHERMIQUE PROFOND DU MAROC

Les différentes valeurs de gradient géothermique calculées ont servi à l’établissement de la carte du gradient géothermique moyen de chaque bassin et par la suite à la réalisation de la carte du gradient géothermique du Maroc (Fig. 14).

La carte (Fig. 14) montre que le gradient géothermique au Maroc varie entre 16°C/km et 41°C/km. Il s’agit d’un territoire compartimenté en plusieurs zones principales

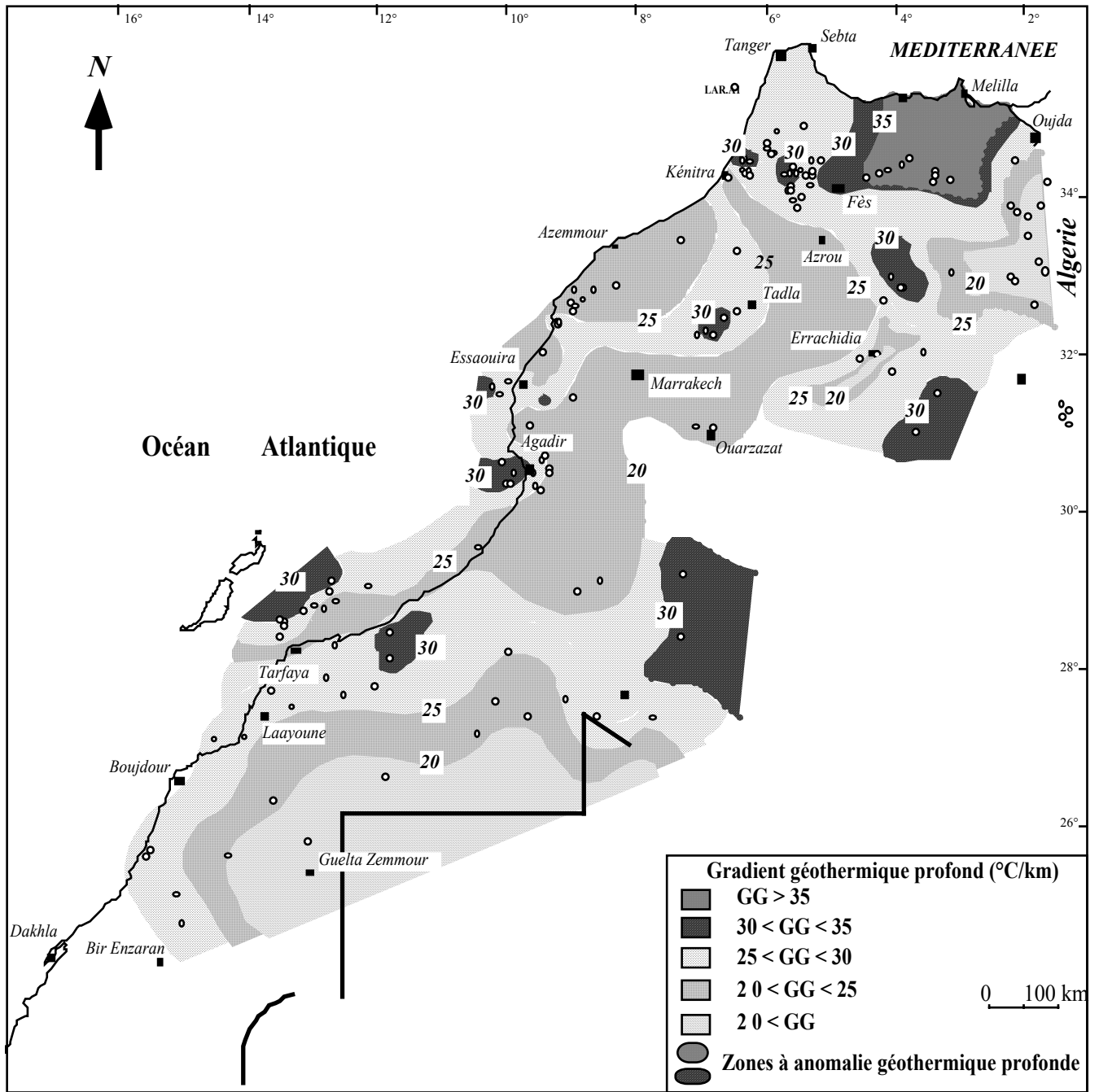


Figure 14. Carte du gradient géothermique du Maroc.

ayant des gradients géothermiques supérieurs à 30°C/km. Les principales anomalies mises en évidence dans les cartes régionales (Figs. 8 et 10 à 13) et qui s'affichent également sur la carte du Maroc (Fig. 14) peuvent trouver une explication, au moins partielle, dans certains facteurs géologiques, géophysiques et hydrogéologiques.

i/ La carte des isobathes du Moho (Tadili *et al.* 1986) montre que la croûte présente des épaisseurs minimales de l'ordre de 25 km dans la partie nord le long de la côte Méditerranéenne, et moins de 25 km au nord d'Oujda. Les études réalisées par Vallejo Martin *et al.* (1996) dans les Cordillères bétiques montrent également la remontée du manteau dans ce secteur à une profondeur de 15 km. La

superposition de la carte du gradient géothermique du Maroc aux résultats obtenus par Tadili *et al.* (1986) et Vallejo Martin *et al.* (1996), suggère que les anomalies thermiques observées dans la partie nord de la carte sont principalement liées à l'amincissement crustal.

ii/ La superposition de la carte du gradient géothermique à celle des principaux axes d'écoulement des réservoirs profonds et peu profonds à eau chaude au Maroc (Fig. 15) montre l'effet de l'hydrodynamisme sur l'élévation du gradient géothermique, observé dans les différents bassins.

Dans le bassin d'Essaouira, les réservoirs profonds carbonatés d'âge jurassique, affleurant au nord et au sud du

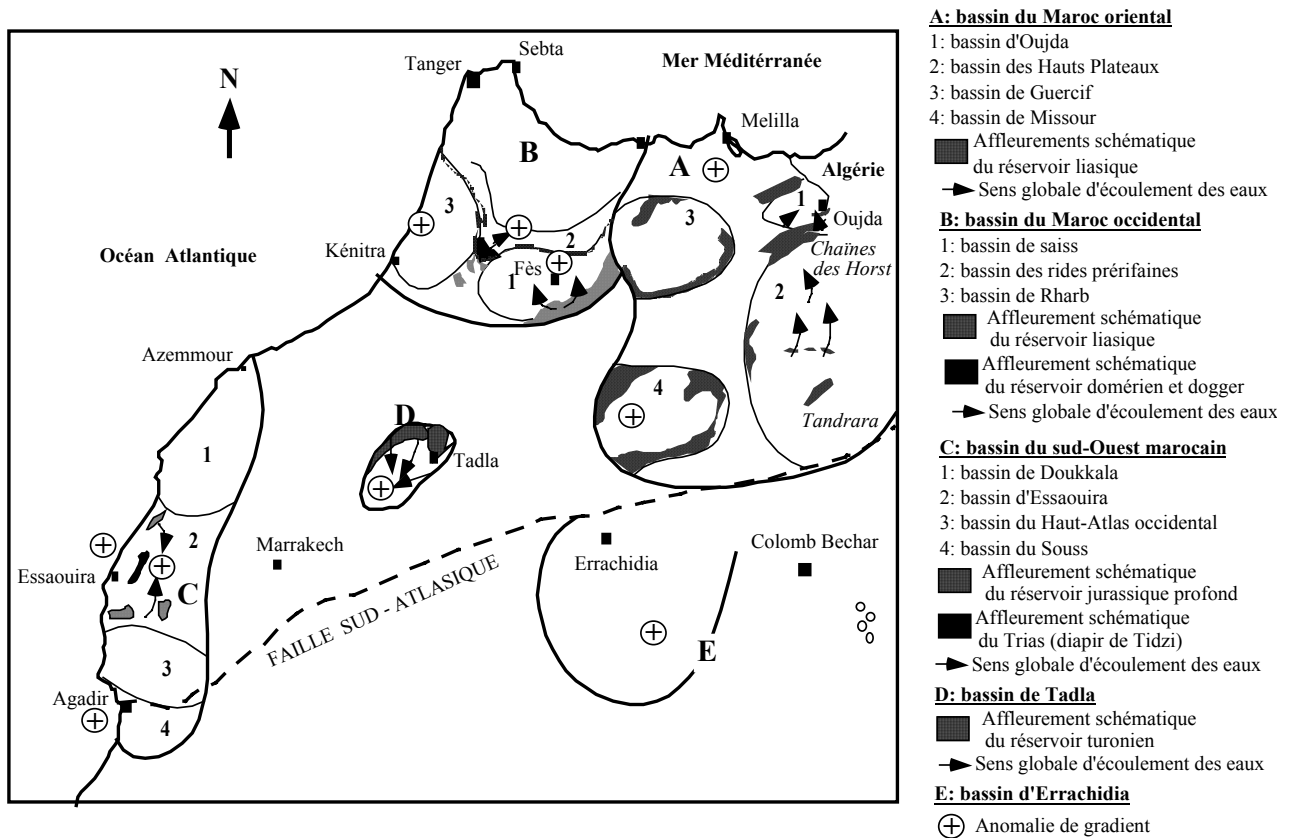


Figure 15. Carte des principaux affleurements des réservoirs profonds et peu profonds d'eau chaude au Maroc et relation entre l'élévation du gradient et l'hydrodynamisme.

bassin, constituent les principales zones d'alimentation en eaux météoriques. Vers le centre du bassin, les températures des eaux profondes augmentent suivant l'enfouissement des couches, ce qui favorise l'augmentation du gradient géothermique dans cette zone.

Dans le bassin de Saïss, les affleurements du réservoir liasique sont limités au Moyen Atlas septentrional constituant sa zone de recharge sud. Vers le nord du bassin, plusieurs sources thermales ont été répertoriées dans la région de Fès, ce qui constitue la zone de décharge de la nappe liasique marquée par une anomalie positive du gradient géothermique.

Dans le bassin des Rides prériftaines, les réservoirs profonds (Paléozoïque, Domérien et Dogger) affleurent généralement dans la partie sud-ouest (zone de recharge probable) et subissent un enfouissement vers le nord-est. L'axe principal d'écoulement concorde avec l'augmentation du gradient dans ce secteur.

Dans le bassin du Rharb, l'existence de lentilles sableuses emballées dans les marnes miocènes et à écoulement vers la zone subsidente du bassin pourrait être à l'origine de l'augmentation du gradient dans cette zone.

Enfin, dans le bassin de Tadla, le principal aquifère à eau chaude est représenté par le Turonien carbonaté. Le sens d'écoulement des eaux du Turonien coïncide avec l'augmentation du gradient dans cette zone (Zarhloule *et al.* 2001)

Au Maroc, les causes de l'augmentation du gradient géothermique restent essentiellement liées à l'hydrodynamisme profond et à des facteurs tectoniques : failles profondes affectant le socle, néotectonique et activité volcanique néogène à quaternaire.

DISCUSSION

La démarche utilisée pour l'évaluation du gradient profond, basée essentiellement sur les températures issues des forages pétroliers peut être critiquable au moins sur les points suivants :

- c'est une méthode statistique qui nécessite un grand nombre de valeurs ; le résultat final peut être influencé par les fortes concentrations de données régionales ; par ailleurs, l'existence d'un minimum d'homogénéité géologique verticale et horizontale est nécessaire pour la linéarité du gradient et la corrélation entre les sondages ; ceci est pratiquement réalisé pour le Maroc où les données ont été traitées séparément pour chaque bassin sédimentaire ;
- les autres méthodes de correction des BHT sont assez exigeantes en données spécifiques (historique du forage, temps de circulation de la boue, temps depuis l'arrêt de la circulation) qui sont rarement indiquées dans les forages du Maroc ;
- la méthode utilise la notion de gradient géothermique moyen pour un forage donnée (linéarité du gradient) ; ceci peut être mis à défaut dans le cas d'une série à grandes variations de conductivité thermique (lithologie, porosité...).

Par ailleurs, la réalisation de la carte du gradient géothermique profond doit se baser uniquement sur les températures profondes (Chapman *et al.* 1984, Hitchon 1984, Jones *et al.* 1985, Ben Dhia 1987, 1988, 1991, Deming 1989, Deming *et al.* 1992, Zarhloule 1994, 2003, Zarhloule *et al.* 1998) et le mélange de données de températures issues aussi bien des forages pétroliers (grande profondeur) que des forages hydrogéologiques (faible profondeur), influence largement l'estimation du gradient géothermique profond et par conséquent le flux de chaleur (Zielinski & Bruchhausen, 1983, Ben Dhia 1992, Zarhloule 1999). De ce fait, les résultats obtenus par Rimi & Lucazeau (1987), Rimi (1990) et Rimi (2001), par l'intégration des données de températures d'origines différentes sont discutables. En effet, les profils thermiques réalisés dans les puits de faible profondeur et intégrés dans la réalisation de la carte du gradient géothermique du Maroc par Rimi (2001) représentent un intérêt local est non régional a cause de l'interaction de plusieurs facteurs indépendamment du flux géothermique (Leshak & Lewis 1983, Ben Dhia *et al.* 1992, Zarhloule 1999).

CONCLUSION

Dans l'ensemble du Maroc, 1204 valeurs de températures (1126 BHT et 78 DST) ont été traitées pour l'estimation du gradient géothermique et l'établissement de la carte du gradient géothermique du Maroc.

La méthode utilisée a permis d'aboutir à un gradient géothermique moyen régional variant entre 19°C/km dans le bassin de Doukkala à 36°C/km dans le bassin de Guercif. Il

est de 28°C/km dans le bassin du Maroc oriental, 27°C/km dans le bassin du Maroc occidental, 21°C/km dans le bassin du Sud-Ouest marocain, 21°C/km dans le bassin de Tarfaya–Laayoune–Sahara marocain, 28°C/km dans le bassin Errachidia–Ouarzazate–Boudnib et de 22°C/km pour le bassin de Tadla. Le gradient géothermique moyen pour le Maroc est de 23°C/km.

Les différentes valeurs de gradient géothermique ponctuel calculées ont servi à l'établissement de la carte du gradient géothermique moyen du bassin du Maroc occidental, du Maroc oriental, du bassin du Sud-Ouest marocain, du bassin de Tarfaya–Laayoune–Sahara marocain, du bassin d'Errachidia–Ouarzazate–Boudnib et par la suite à la réalisation de la carte du gradient géothermique du Maroc.

Plusieurs zones affichent des anomalies de gradient géothermique, liées à l'effet de l'hydrodynamisme profond et à des facteurs tectoniques: les failles profondes affectant le socle, néotectonique accompagnée d'activité volcanique néogène à quaternaire.

Remerciements

Je remercie Dr. F. Hamouda et Dr. A. Khalek (Ministère d'Énergie et des Mines, Rabat), Dr. El Morabet (ONAREP, Rabat) et Pr. H. Ben Dhia (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie) pour l'intérêt qu'ils ont toujours consacré à ce travail. Ce sujet a été financé de 1990 à 1994 par le Ministère d'Énergie et des Mines, et de 1998 à 2000 par l'Action Intégrée n° 14/98.

Références

- Aït Brahim L., Chotin P., Tadili B. & Ramdani M. 1990. Failles actives dans le Rif central et oriental (Maroc). *C.R. Acad. Sci.*, 310, sér. II, 1123-1129.
- Alsac A., Cornet G., Destombes T.P., Hentinger R. & Lavigne J. 1969. Etude géothermique du Maroc oriental. *Rapport inédit B.R.G.M.*, n°69, 90 p.
- Bahi L., El Yamine N. & Risler J.J. 1983. Linéaments géothermiques au Maroc. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 296, sér. II, 1087-1092.
- Bellouti F. 1997. *Etude géothermique, hydrogéologique et modélisation du système aquifère du bassin d'Errachidia-Boudnib (Sud-Est marocain)*. Thèse de spécialité, Faculté des Sciences de Tunis II, 247 p.
- Ben Aabidate L. 1994. *Contribution à l'étude hydrogéothermique du Maroc nord-occidental (Rharb, Rides et Saïss)*. Thèse de Doctorat de spécialité, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie, 245 p.
- Ben Dhia H. 1983. *Les provinces géothermiques du Nord de la Tunisie méridionale*. Thèse de Doctorat ès Sciences naturelles, Univ. Bordeaux I, France, 198 p.
- Ben Dhia H. 1987. The geothermal gradient map of central Tunisia. *Tectonophysics*, 42, 1, 99-109.
- Ben Dhia H. 1988. Tunisia geothermal data from oil wells. *Geophysics*, 53, 11, 1479-1487.
- Ben Dhia H. 1991. Thermal regime and hydrodynamics in Tunisia and Algeria. *Geophysics*, 56, 7, 1093-1102.
- Ben Dhia H., Jones F.W., Meddeb N., Lucazeau F. & Bouri S. 1992. Shallow geothermal studies in Tunisia, comparison with deep subsurface information. *Geothermics*, 21, 4, 503-517.
- Benmakhoulouf M. 2001. *Les sources thermales du Maroc septentrional : relation entre la tectonique et le thermalisme*. Thèse d'Etat, Univ. Mohammed V-Agdal, Fac. Sci. Rabat, 334 p.
- Boukdir, A. 1994. *Contribution à l'étude géothermique du bassin de Tadla, Plateau des phosphates et Tassaout aval. Application au réservoir calcaire du Turonien*. Thèse de 3^{ème} Cycle, Univ. Cadi Ayyad, Fac. Sci. Marrakech, 240 p.
- Chapman D.S., Keho T.H., Bauer M.S. & Picard M.D. 1984. Heat flow in the Uinta basin determined from bottom hole temperature (BHT) data. *Geophysics*, 49, 4, 453-466.
- Cidu R. & Bahaj S. 2000. Geochemistry of thermal waters from Morocco. *Geothermics*, 29, 407-430.
- Deming D. 1989. Application of Bottom-Hole temperature corrections in geothermal studies. *Geothermics*, 8, 5/6, 775-786.
- Deming D., Sass J.H., Lechenbruch A.H. & De Rito R.F. 1992. Heat flow and subsurface temperature as evidence for basin-scale ground-water flow, North slope of Alaska. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 104, 528-542.
- Desligneris G. & El Morabet G. 1973. La région du Souss : synthèse des travaux d'exploration, problèmes pétroliers. *Rapport inédit B.R.P.M.*, Rabat, 12 p.
- El Morabiti L. 2000. *Contribution à la connaissance géologique, hydrochimique et isotopique des eaux thermales du Maroc septentrional*. Thèse d'Etat, Fac. Sci., Rabat, 276 p.
- Facca, G. 1968. L'énergie géothermique. *Ministère d'Énergie et des Mines, Rabat, Note technique n° 25*.
- Gable R. 1978. Utilisation et traitement des mesures de températures d'origine pétrolière. *Rapport intern, inédit. B.R.G.M.*, Orléans, France, 30 p.
- Hernandez J. 1983. *Le volcanisme miocène du Rif oriental (Maroc)*. Thèse d'Etat, Univ. Paris VI, 393 p.

- Hervouët Y. 1985. *Géodynamique alpine (Trias-Actuel) de la marge septentrionale de l'Afrique au Nord du bassin de Guercif (Maroc oriental)*. Thèse d'Etat, Univ. Pau, France, 367 p.
- Hitchon B. 1984. Geothermal gradients, hydrodynamics, and hydrocarbon occurrences, Alberta, Canada. *Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, 68, 6, 713-743.
- Jones F.W., Lam H.L. & Majorowics J.A. 1985. Temperature distribution at the Paleozoic and Precambrian surfaces and their implications for geothermal energy recovery in Alberta. *Can. J. Earth. Sci.*, 22, 1774-1780.
- Lahlou Mimi A., Zarhloule Y., Bouri S., Ouda B., Lahrach A., Ben Aabidate L. & Ben Dhia H. 1999. Géochimie des eaux chaudes et prospection hydrothermale au Maghreb (NW Afrique): caractérisation du réservoir d'origine et indices thermiques. *Bul. Lias. Scien. Afr. Queb.*, II, 89-104.
- Lahrach, A. 1994. *Potentialités hydrogéothermiques du Maroc oriental*. Thèse de Doctorat de spécialité, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie, 273 p.
- Lahrach A., Zarhloule Y., Ben Aabidate L., Bouri S., Ben Dhia H., Khattach D., Boughriba M., El Mandour A. & Jebrane R. 1998. La géochimie des eaux chaudes et prospection géothermique de surface au Maroc septentrional: caractérisation du réservoir d'origine et indices thermiques. *Rev. Hydrogéol. B.R.G.M.* 3, 7-23.
- Lam H.L. & Jones F.W. 1984. A statistical analysis of hole temperature data in the Hinton area of West - Central Alberta. *Tectonophysics*, 103, 237-281.
- Leschak L.A. & Lewis J.E. 1983. Geothermal prospecting with shallow-temperature surveys. *Geophysics*, 48, 975-996.
- Leschenbruch A.H., Sass J.H. & Galanis S.P. 1985. Heat flow in southernmost California and the origin of the Salton Trough. *J. Geophys. Res.*, 90, 6709-6736.
- Maget Ph. 1978. Détermination des températures des aquifères dans l'évaluation du potentiel géothermique en France. *Rapport inédit B.R.G.M.*, 16 p.
- Riad S., Abdelrahman E.M., Refai E. & El Ghalban H.M. 1989. Geothermal studies in the Nile Delta, Egypte. *J. Afr. Earth. Sci.*, 19, 637-649.
- Rimi A. 1990. Geothermal gradients and heat flow trends in Morocco. *Geothermics*, 19, 443-454.
- Rimi A. 1999. *Variations régionales du flux géothermique au Maroc, application*. Thèse de Doctorat ès Sciences, Univ. Mohammed V, Fac. Sci. Rabat, 154 p.
- Rimi A. 2001. Carte du gradient géothermique au Maroc. *Bull. Inst. Sci.*, sect. Sci. Terre, 23, 1-6.
- Rimi A. & Lucazeau F. 1987. Heat flow density measurements in Northern Morocco. *J. Afr. Earth. Sci.*, 6, 835-843.
- Rimi A., Chalouan A. & Bahi L. 1998. Heat flow in the southernmost part of the Mediterranean Alpine system, the External Rif in Morocco. *Tectonophysics*, 285, 135-146.
- Rulkoïlles A. 1982. Etude géologique et géophysique des permis Tarfaya-Laâyoune. *Rapport interne inédit ONAREP*, 28 p.
- Schoepfel R.J. & Gillarranz S. 1966. Use of well log temperature to evaluate regional geothermal gradients. *J. Petr. Tech.*, 24, 667-673.
- Tadili B., Ramdani M., Ben Sari D., Chapochnikov K. & Bellot A. 1986. Structure de la croûte dans le Nord du Maroc. *Ann. Geophys.*, 4, 99-104.
- Timko D.J. & Fertl W.H. 1972. How downhole temperature pressures affect drilling. *World Oil*, 175, 88-97.
- Vallejo Martin M., Navarro Flores A. & Carcia-Rossel L. 1996. Le contrôle néotectonique des systèmes du fonctionnement des exutoires hydrothermaux dans les Cordillères bétiques (Espagne). *Coll. Intern. « La géologie appliquée au service des collectivités locales, à l'aménagement du territoire et à l'environnement »*, 17-18 Décembre 1996, Rabat, Maroc, p. 86.
- Zarhloule Y. 1994. *Potentialités hydrogéothermiques du bassin d'Essaouira-Agadir*. Thèse de Doctorat de spécialité, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Tunisie. 239 p.
- Zarhloule Y. 1999. *Les potentialités géothermiques du Maroc : approche intégrée par les températures profondes et indices de surface*. Thèse de Doctorat ès Sciences. Oujda, Maroc, 153 p.
- Zarhloule Y. 2003. Overview of geothermal activities in Morocco. *Intern. Geoth. Confer. Multiple integrated uses of geothermal resources*, Reykjavik, Islande, 14-17 septembre, 1-8.
- Zarhloule Y. & Ben Dhia H. 1992. Première étude hydrogéothermique du réservoir argovien du bassin d'Essaouira (Maroc). *Rev. Fac. Sci. Marrakech*, n. sp. Hydrogéologie, 79-82.
- Zarhloule Y., Lahrach A., Ben Aabidate L., Bouri S., Ben Dhia H. & Khattach D. 1998. Anomalies géothermiques de surface et hydrodynamisme dans le bassin d'Agadir (Maroc). *J. Afr. Earth. Sci.*, 27, 71-85.
- Zarhloule Y., Lahrach A., Khattach D., Ben Akhy R. & Ben Dhia H. 1999. Geothermal gradient map of the south western Moroccan basin. *Moroccan. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, 3/99, 10-12.
- Zarhloule Y., Lahrach A., Ben Aabidate L., Bouri S., Boukdir A., Khattach D. & Ben Dhia H. 2001. La prospection géothermique de surface au Maroc : hydrodynamisme, anomalies géothermiques et indices de surface. *J. Afr. Earth. Sci.*, 32, 851-867.
- Zielinski G.W. & Bruchhausen P.M. 1983. Shallow temperatures and thermal regime in the hydrocarbon province of Tierra del fuego. *Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, 67, 166-177.
- Ziyadi R. 1993. *Géologie appliquée à l'étude de l'environnement géothermique de la région de Nador (Rif nord oriental, Maroc)*. Thèse d'Université, Pau, France, 348 p.

Manuscrit soumis le 11 décembre 2003 Version
modifiée acceptée le 21 septembre 2004