

CONTRIBUTION DE LA GEOSTATISTIQUE A L'ETUDE DE LA THERMICITE DES RIDES OCEANQUES DU PACIFIQUE

J.P. CHILÈS¹, R. GABLE¹ et R.H. MORIN²

¹ BRGM, BP 6009, 45060 Orléans Cédex 2, France
² U.S. Geological Survey, Denver, Colorado, USA

RESUME. Le site du forage 504B, situé dans le Pacifique équatorial Est dans une zone de subduction, a fait l'objet de plusieurs missions de reconnaissance. Malgré le nombre et la variété des données recueillies, le système hydrothermal de cette zone reste mal déterminé. Plusieurs hypothèses de transfert de masse et de chaleur dans la croûte ont été avancées. L'étude géostatistique présentée ici analyse finement les corrélations entre la bathymétrie et le flux de chaleur au fond de la mer sur l'ensemble du site. Les traitements effectués permettent notamment : i) d'identifier et de filtrer les erreurs de mesure concernant le flux, de façon à mettre en évidence la corrélation réelle entre bathymétrie et flux ; ii) d'analyser cette corrélation en termes directionnels, par l'utilisation de variogrammes croisés et de graphes de codispersion. Cette étude fait apparaître deux régimes thermiques différents : certaines zones présentent une forte corrélation négative entre bathymétrie et flux, et les autres une forte corrélation positive. Les premières correspondent à des transferts de chaleur de type convectif, et les secondes à des transferts de type conductif.

ABSTRACT. The site of hole 504B is located in a subduction zone in the eastern equatorial Pacific Ocean and has been extensively surveyed. Despite of the abundance and variety of data, the hydrothermal behaviour of this site remains difficult to understand. Several models of mass and heat transfer within the crust have been developed. The present geostatistical study carefully analyses the correlations between bathymetry and heat flux at the seafloor. The methods used enable : i) to identify and filter the measurement errors on the flux, and thereby to restore the underlying correlations ; ii) to analyse the correlations from a directional perspective with cross-variograms and codispersion graphs. The study brings out two different behaviours : some zones display a high negative correlation between bathymetry and flux, whereas others present a high positive correlation. The former corresponds to a convective mode of heat transfer, while the latter is linked with a conductive mode.

TABLE DES MATIERES

1. Introduction
2. Données disponibles
3. Analyse statistique des corrélations
4. Analyse des variogrammes directs et croisés
5. Analyse du graphe du coefficient de codispersion
6. Amélioration par filtrage de l'erreur de mesure
7. Conclusion

1. INTRODUCTION

Le régime thermique et hydrogéologique de la croûte océanique des zones de subduction fait l'objet d'études à l'échelle régionale. Le site du forage 504B, situé dans le Pacifique équatorial Est, au large du Costa Rica, a été l'objet de missions de reconnaissance soutenues, en particulier dans le cadre du programme ODP (Ocean Drilling Program). Malgré le nombre et la variété des données recueillies, le système hydrothermal de cette zone reste mal déterminé. Plusieurs hypothèses de transfert de masse et de chaleur dans la croûte ont été avancées. Le travail présenté ici est une contribution de la géostatistique à la validation des modèles possibles. On trouvera dans Gable *et al.* (1991) l'exposé détaillé du problème et les références aux études réalisées. En simplifiant, l'objectif est ici de déterminer si le transfert de chaleur dans la croûte océanique est de type conductif ou de type convectif. Un transfert conductif se traduit au niveau du fond marin, à cause de la réfraction thermique, par un flux de chaleur élevé dans les bas fonds (forte bathymétrie) et faible dans les hauts fonds (faible bathymétrie), c'est-à-dire par une corrélation positive entre les variations de la bathymétrie et du flux. Un transfert convectif (entrée de l'eau froide dans les bas fonds perméables, puis percolation et réchauffement à travers la couverture sédimentaire jusqu'aux hauts fonds) se traduit par les effets inverses.

La corrélation dans ce site est étudiée d'abord avec les outils statistiques classiques : coefficient de corrélation et nuage de corrélation. L'approche géostatistique permet d'améliorer les résultats par une analyse spatiale des corrélations. En particulier, elle permet : i) de trouver les corrélations sous-jacentes en filtrant les erreurs de mesure ; ii) de faire apparaître les directions de meilleure corrélation.

2. DONNEES DISPONIBLES

Le domaine étudié couvre environ 200 km². Le flux de chaleur est connu en 267 points, dont 184 forment une grille pseudo-régulière incomplète. Les autres appartiennent à des salves localisées dans des zones de forte variabilité. Les calculs statistiques et variographiques seraient biaisés si l'on prenait ces dernières données en considération (à moins d'introduire une pondération adaptée). Aussi les résultats qui suivent ont-ils été obtenus à partir des données à maille pseudo-régulière.

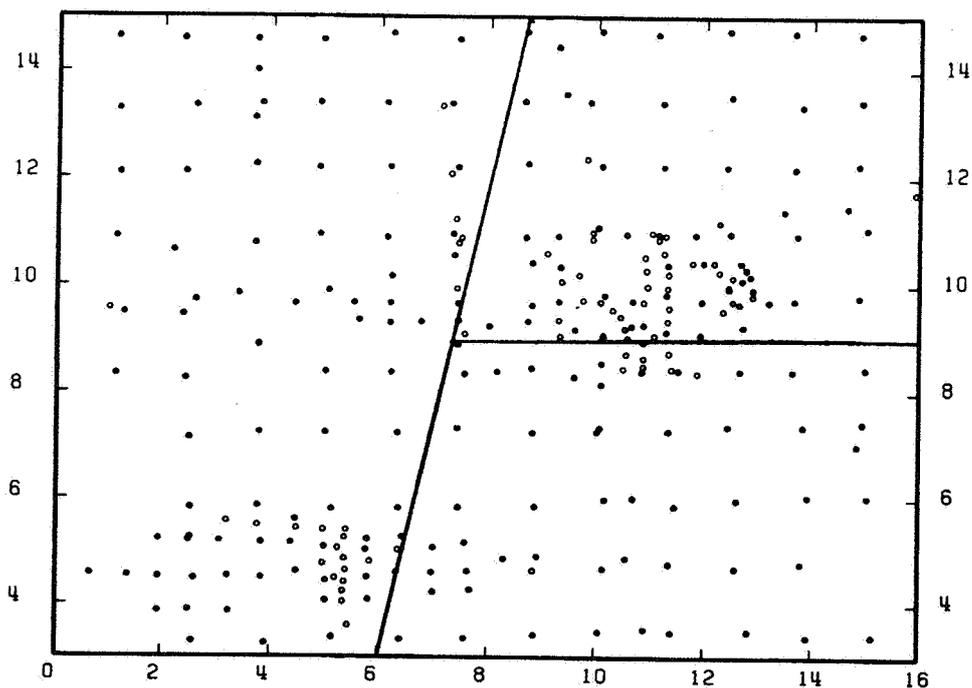


Fig. 1. Localisation des points expérimentaux, et délimitation des zones Ouest, Nord-Est et Sud-Est (cercles pleins: maille pseudo-régulière ; cercles vides: données complémentaires).

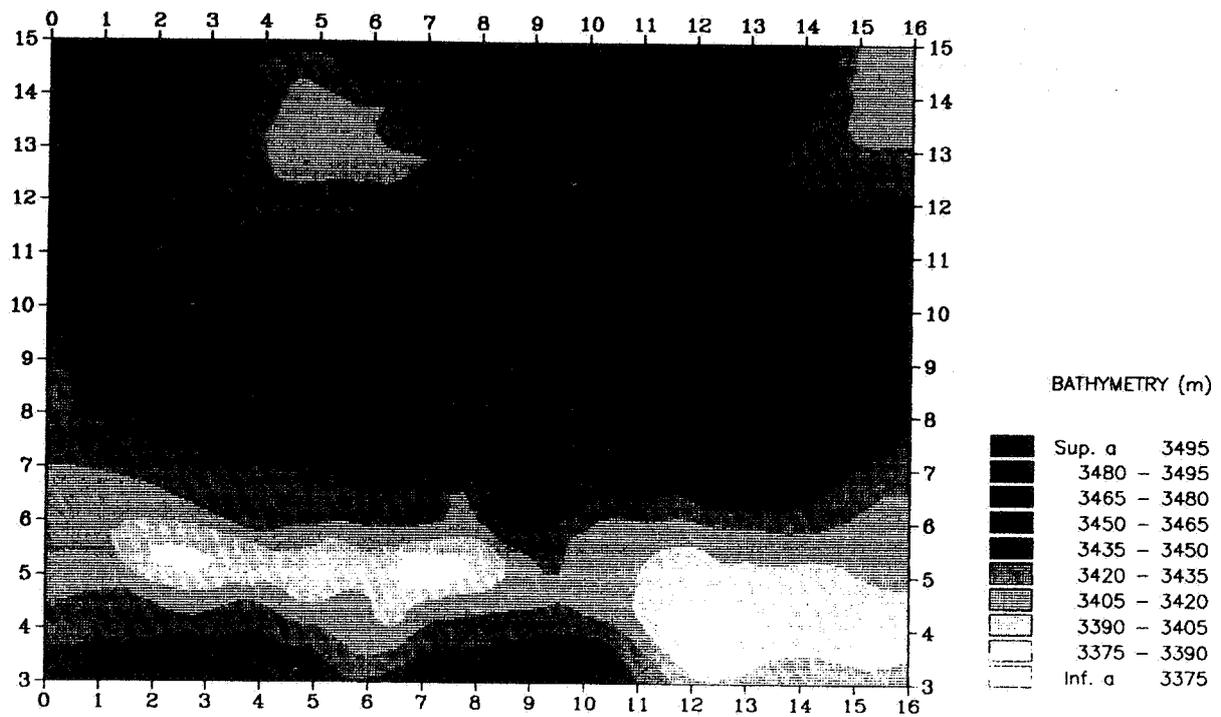


Fig. 2. Bathymétrie (carte krigée).

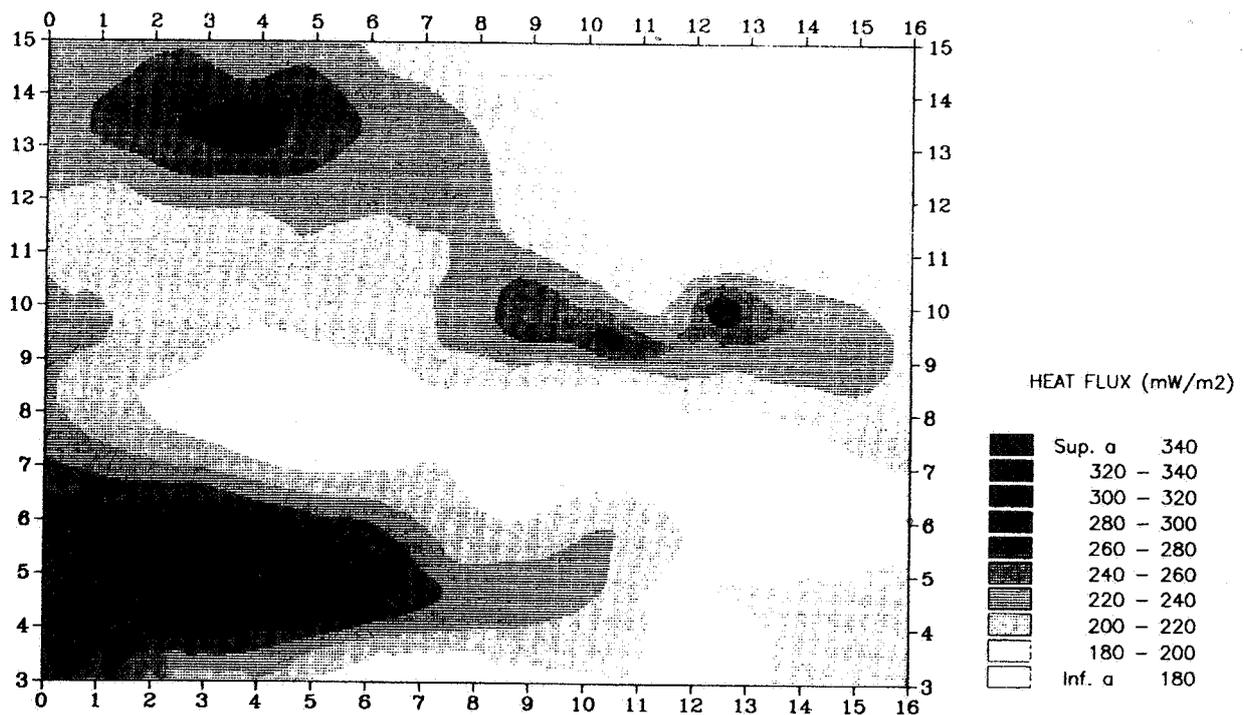


Fig. 3. Flux de chaleur (carte krigée).

La figure 1 présente la localisation des points de mesure du flux. La bathymétrie est mieux connue que le flux, et a été déterminée aux points de mesure du flux par un krigeage préliminaire. Ce krigeage a une bonne précision, si bien que l'erreur de krigeage peut être négligée. Les figures 2 et 3 présentent les cartes de la bathymétrie et du flux calculées à partir de tous les points expérimentaux. Il apparaît nettement que dans la partie Ouest les fortes valeurs du flux se trouvent dans les zones de faible bathymétrie, alors que la partie Est présente la tendance inverse. L'objectif de cette étude est de préciser et de quantifier ces observations, pour valider des hypothèses concernant la géothermie du site.

3. ETUDE STATISTIQUE DES CORRELATIONS

Le comportement géothermique du site dépendant du lien entre bathymétrie et flux, nous cherchons à établir la corrélation entre ces deux paramètres. Les figures 2 et 3 font ressortir des différences de comportement d'une zone à l'autre. Aussi le domaine d'étude a-t-il d'abord été subdivisé en huit sous-zones. Les nuages de corrélation entre les deux paramètres ont été calculés pour chacune d'elles. Puis les sous-zones de même comportement ont été regroupées. Il en a résulté trois zones homogènes : les zones Ouest, Nord-Est et Sud-Est figurant sur la figure 1. Le forage 504B est situé à la frontière des zones Ouest et Nord-Est.

La figure 4 présente les nuages de corrélation de la zone Ouest (Fig. 4a) et des zones Est (Fig. 4b, où des symboles différents permettent de distinguer la zone Nord-Est de la zone Sud-Est). Une corrélation négative significative apparaît dans les zones Ouest et Sud-Est, et au contraire une corrélation positive dans la zone Nord-Est. Les coefficients de corrélation sont les suivants :

- 0.68 dans la zone Ouest ;
- + 0.68 dans la zone Nord-Est ;
- 0.45 dans la zone Sud-Est.

Ces résultats peuvent être améliorés par des traitements géostatistiques appropriés. Nous ferons la démonstration de la méthode sur les données de la zone Ouest (on trouvera l'étude des trois zones dans Chilès, 1989), et donnerons les résultats pour les trois zones.

4. ANALYSE DES VARIOGRAMMES DIRECTS ET CROISES

Réduire plusieurs variables (ici la bathymétrie et le flux) à quelques paramètres statistiques élémentaires (moyennes, variances, coefficients de corrélation) constitue une grave perte d'information. La géostatistique propose des outils plus complets : les variogrammes directs et croisés. Le variogramme des variables $Z_m(x)$ et $Z_n(x)$ (variogramme direct si $m=n$, variogramme croisé sinon) est défini par :

$$g_{mn}(h) = \frac{1}{2} E[Z_m(x+h) - Z_m(x)][Z_n(x+h) - Z_n(x)]$$

Le variogramme expérimental est calculé à partir de tous les couples de points où Z_m et Z_n sont connus. Il est aisé de montrer que la variance expérimentale de Z_m est égale à la moyenne des demi-accroissements quadratiques $\frac{1}{2} [Z_m(x_i) - Z_m(x_j)]^2$ calculés pour tous les couples (i, j) ; autrement dit, elle est égale à la valeur moyenne du variogramme direct $g_{mm}(x_i - x_j)$. De même, la covariance expérimentale (au sens statistique) entre Z_m et Z_n est la valeur moyenne du variogramme croisé $g_{mn}(x_i - x_j)$. Si on note σ_m et σ_n les écarts-types expérimentaux de Z_m et Z_n , le coefficient de corrélation apparaît comme la moyenne du variogramme croisé normé $g_{mn}(h) / (\sigma_m \sigma_n)$.

Il convient de souligner que tout ceci n'est vrai que lorsque les variables Z_m et Z_n sont connues aux mêmes points expérimentaux. C'est pour cela que nous avons calculé la valeur de la bathymétrie aux points de mesure du flux. Si Z_m et Z_n ne sont jamais mesurés ensemble, il est tout simplement impossible de calculer le variogramme croisé. Et si seulement certains points sont assortis d'une valeur de Z_m et d'une valeur de Z_n , seuls ces points peuvent être utilisés pour le calcul du variogramme croisé ; il faut alors prendre soin de ne comparer ce variogramme croisé qu'aux variogrammes directs calculés à partir de ces seuls points expérimentaux, faute de quoi les coefficients de corrélation obtenus risquent de n'avoir aucun sens (P. Chauvet me rappelle que nous avons obtenu ainsi un coefficient de corrélation de 1.07 !).

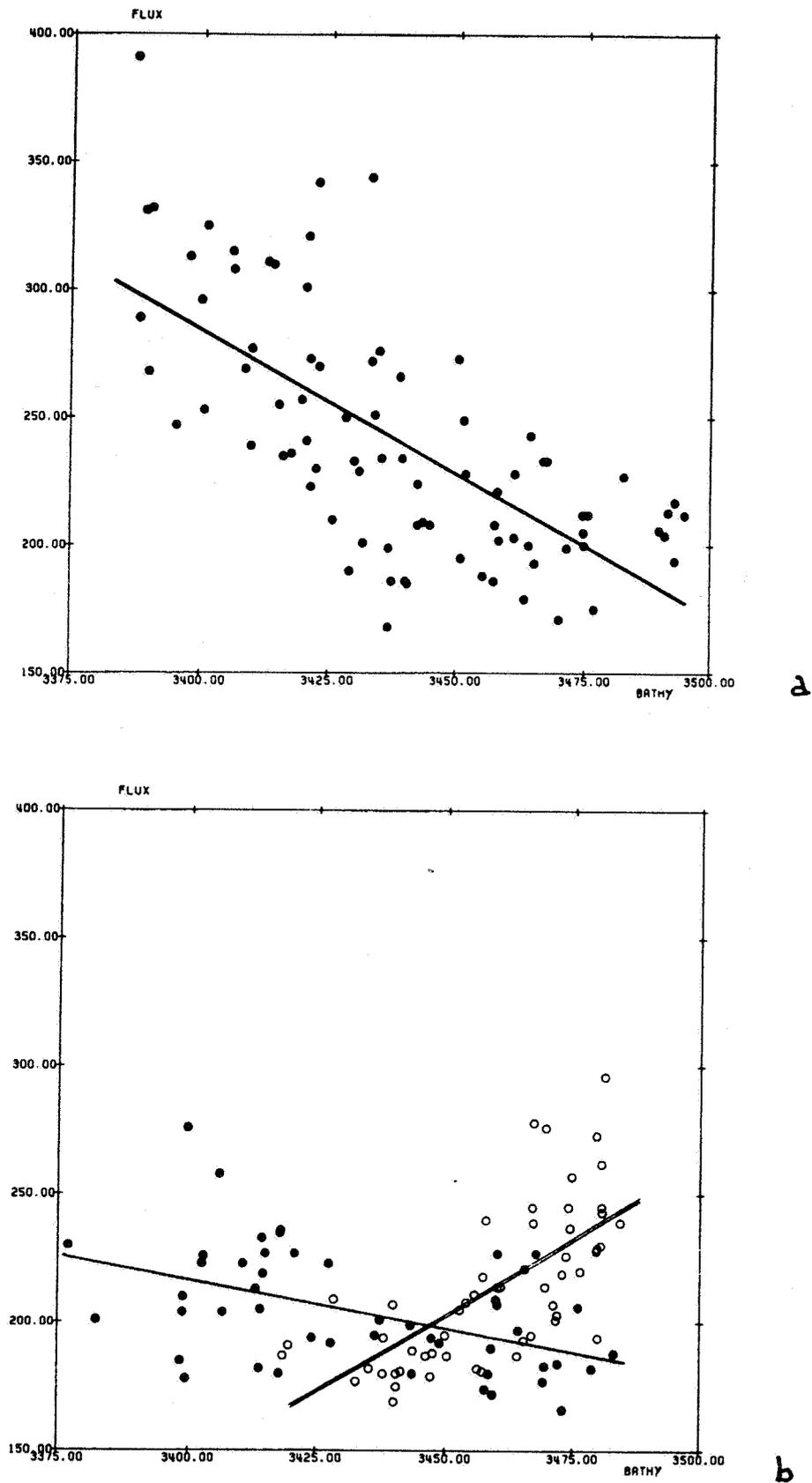
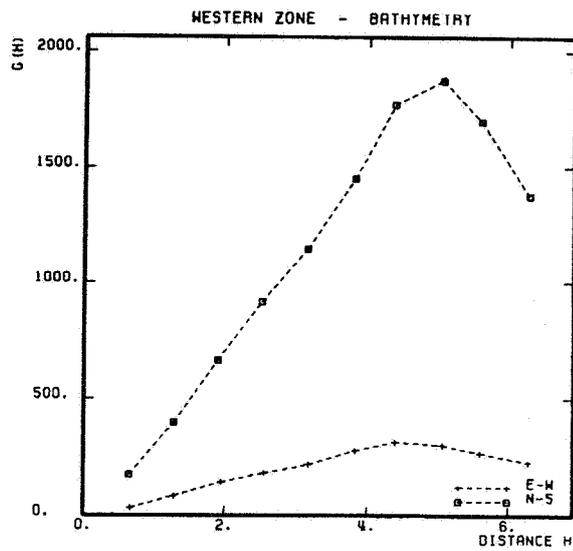
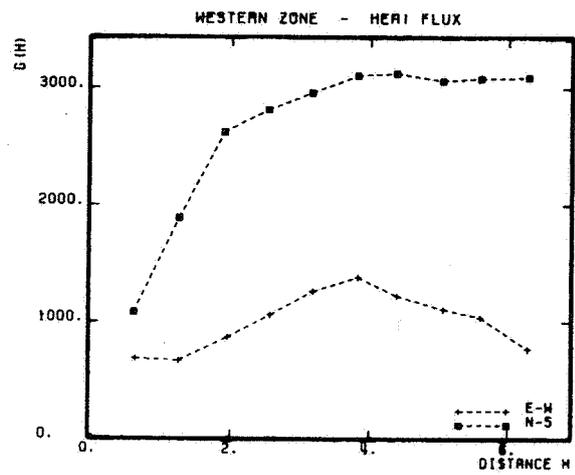


Fig. 4. Nuage de corrélation entre bathymétrie et flux, et droite de régression du flux par la bathymétrie. En haut : zone Ouest ; en bas : zones Nord-Est (cercles vides) et Sud-Est (cercles pleins).



a



b

c

d

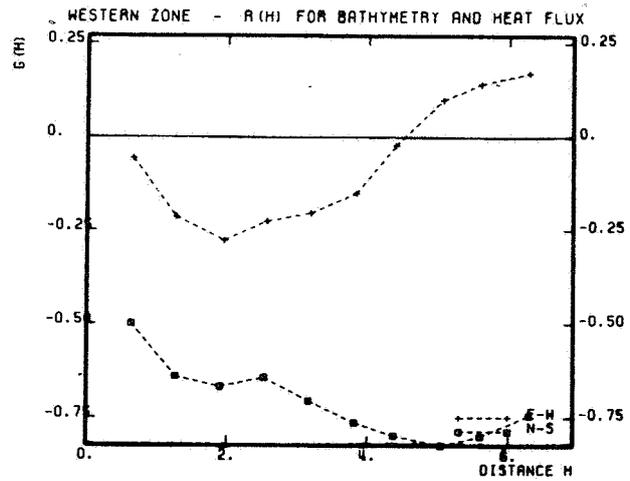
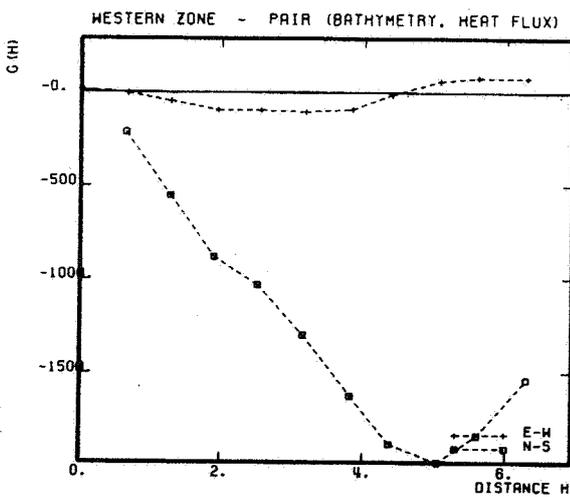


Fig. 5. Variogrammes directs de la bathymétrie (a) et du flux (b),
 variogramme croisé (c) et graphe de codispersion $r(h)$ (d).
 Zone Ouest.

Les figures 5a à 5c présentent les variogrammes directs et croisés de la bathymétrie et du flux dans la zone Ouest. Ces variogrammes sont anisotropes : les variations sont plus importantes dans la direction N-S que dans la direction E-O, comme on pouvait s'y attendre au vu des figures 2 et 3. Cette anisotropie apparente peut aussi être considérée comme l'effet d'une dérive N-S. Le choix d'une interprétation (anisotropie ou dérive) importe peu dans notre cas.

Le variogramme de la bathymétrie est continu à l'origine. Le variogramme du flux lui est semblable, à ceci près qu'il présente un effet de pépité. Celui-ci provient de l'incertitude concernant les mesures du flux. La variance de l'erreur de mesure du flux vaut donc environ $300 \text{ à } 400 \text{ (mW/m}^2\text{)}^2$, ce qui correspond à un écart-type de $17 \text{ à } 20 \text{ mW/m}^2$ (pour une valeur moyenne de l'ordre de 220 mW/m^2). Le variogramme croisé confirme la corrélation négative (dans cette zone Ouest) entre bathymétrie et flux. Ce qui est intéressant, c'est qu'il fait ressortir que la corrélation est faible, pour ne pas dire négligeable, dans la direction E-O ; en contrepartie, la corrélation dans la direction N-S est meilleure que ce qu'indique le coefficient de corrélation.

5. ANALYSE DU GRAPHE DU COEFFICIENT DE CODISPERSION

Dans la mesure où on s'intéresse aux corrélations entre variation de la bathymétrie et variation du flux, un outil plus parlant que le variogramme croisé est le graphe du coefficient de codispersion $r(h)$. Le coefficient de codispersion entre deux variables Z_m et Z_n , introduit par Matheron (1965), est tout simplement le coefficient de corrélation entre $Z_m(x+h)-Z_m(x)$ et $Z_n(x+h)-Z_n(x)$. Il se déduit des variogrammes par la relation :

$$r_{mn}(h) = g_{mn}(h) / \sqrt{g_{mm}(h) g_{nn}(h)}$$

Cette courbe ne doit pas être confondue avec le corrélogramme $C(h)/C(0)$, où $C(h)$ désigne la fonction de covariance d'une variable, qui est le coefficient de corrélation entre $Z(x)$ et $Z(x+h)$.

Si le graphe $r_{mn}(h)$ en fonction de h est constant, quel que soit le couple (m, n) considéré, tous les variogrammes sont proportionnels à un même modèle de base, et on se trouve dans le cas bien connu d'une corrélation intrinsèque. C'est le seul cas où les coefficients de corrélation résument les variogrammes croisés sans perte d'information.

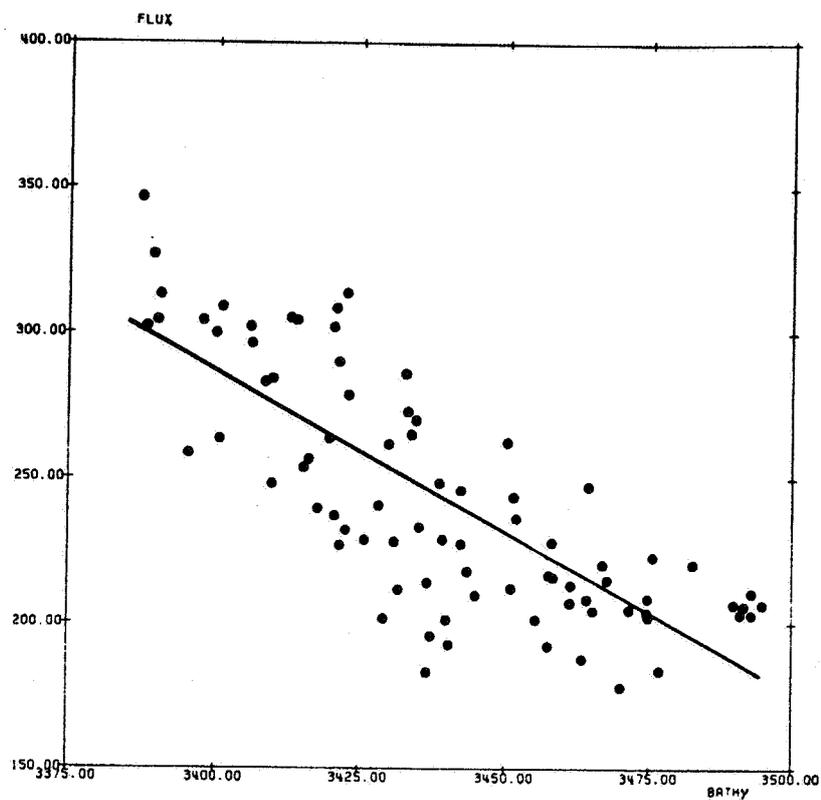
La figure 5d présente le graphe du coefficient de codispersion $r(h)$ entre bathymétrie et flux dans la zone Ouest. Aux distances moyennes et grandes, la bonne corrélation entre bathymétrie et flux dans la direction N-S apparaît nettement.

6. AMELIORATION PAR FILTRAGE DE L'ERREUR DE MESURE

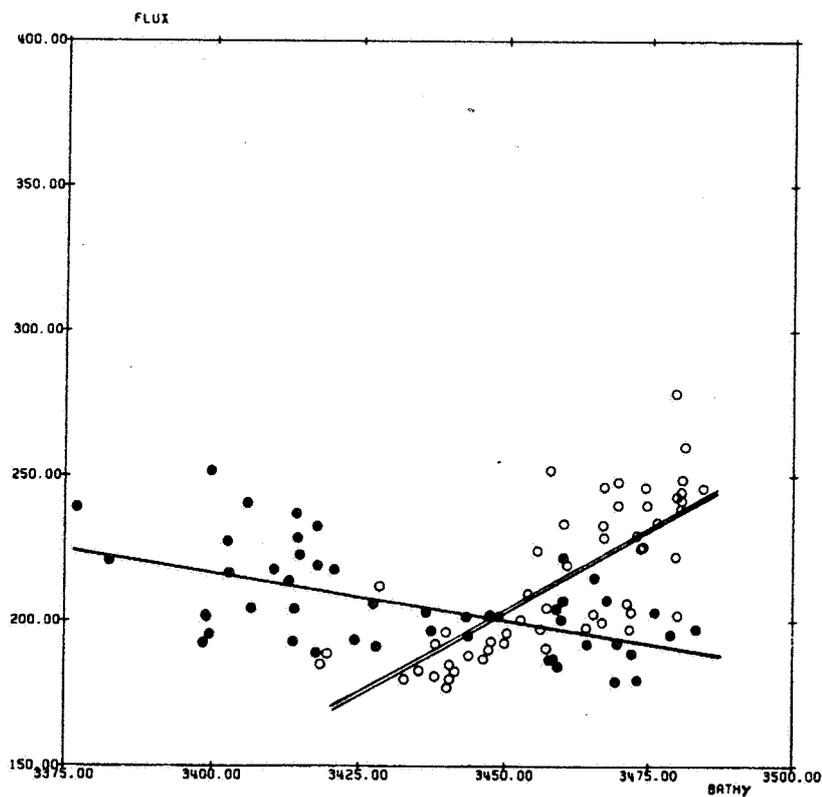
Ces résultats peuvent encore être améliorés. En effet, $r(h)$ devrait être calculé à partir de mesures exactes de la bathymétrie et du flux. Mais les données de flux sont entachées d'erreurs de mesure relativement importantes. Ces erreurs ont pour conséquence de disperser les nuages de corrélation, d'augmenter la variance du flux et son variogramme, et par conséquent de réduire le coefficient de corrélation et le coefficient de codispersion $r(h)$, surtout aux petites distances. Il y a deux méthodes pour filtrer ces erreurs de mesure :

- soustraire la variance d'erreur de mesure à la variance et au variogramme du flux, et recalculer le coefficient de corrélation et la fonction $r(h)$;
- filtrer les données de flux elles-mêmes, en les recalculant par un cokrigeage filtrant l'effet de pépité, et recalculer les paramètres statistiques et les fonctions géostatistiques.

Dans la seconde approche, l'effet des erreurs de mesure est considérablement réduit, sans être toutefois complètement éliminé, car le cokrigeage d'un point est effectué à partir des mesures en ce point et aux points voisins. On pourrait donc préférer la première approche. Celle-ci est néanmoins très dépendante du choix de l'effet de pépité. Aussi avons-nous retenu la seconde méthode. Le flux recalculé par cokrigeage sera appelé flux filtré.



a



b

Fig. 6. Nuage de corrélation entre bathymétrie et flux filtré, et droite de régression du flux par la bathymétrie. En haut : zone Ouest ; en bas : zones Nord-Est (cercles vides) et Sud-Est (cercles pleins).

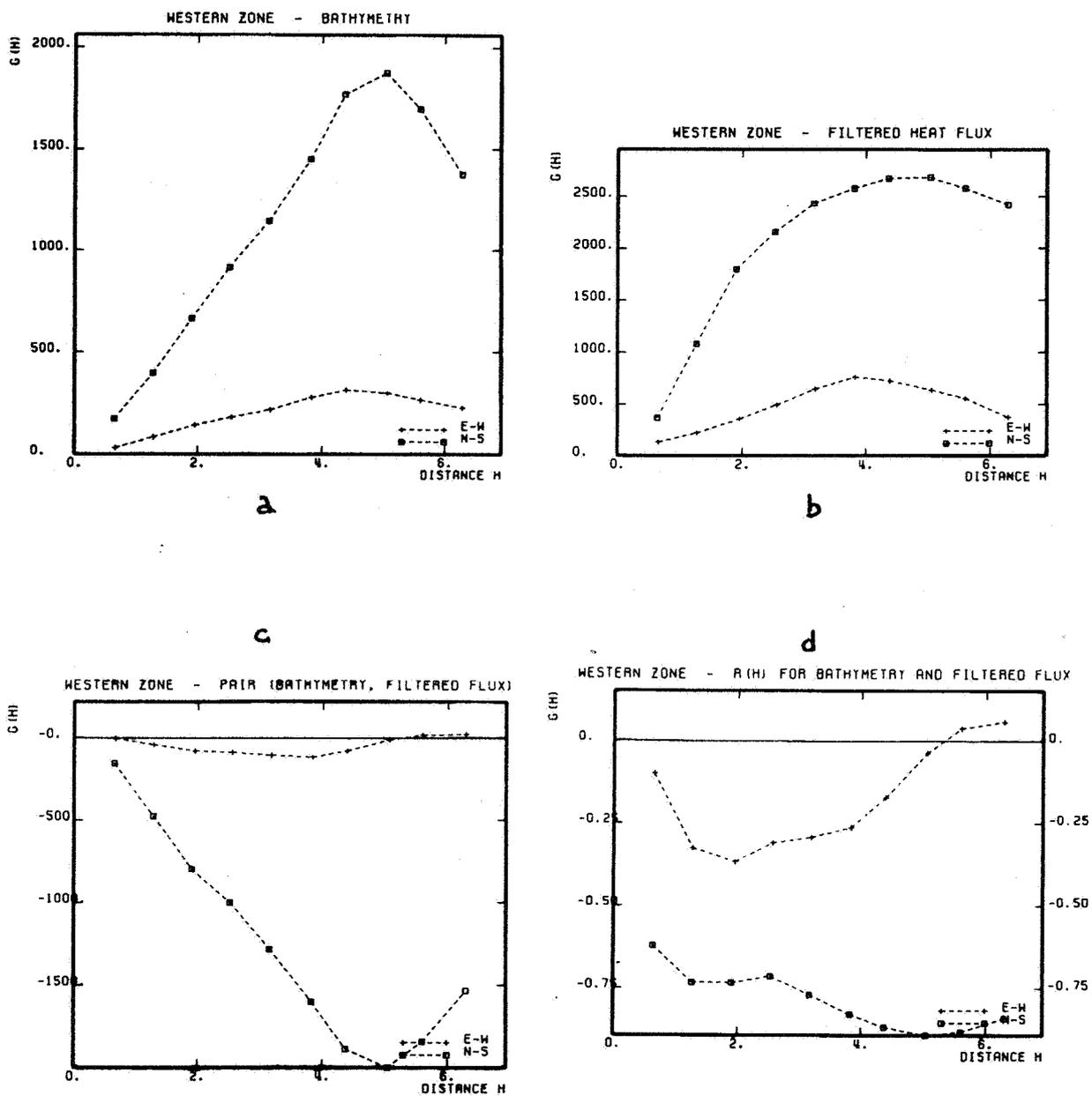


Fig. 7. Variogrammes directs de la bathymétrie (a) et du flux filtré (b), variogramme croisé (c), et graphe de codispersion $r(h)$ (d).
Zone Ouest.

La figure 6 présente les nuages de corrélation de la bathymétrie et du flux dans les trois zones. Ils sont semblables à ceux de la figure 4, mais mieux resserrés autour des lignes de régression. Les coefficients de corrélation s'élèvent à :

- 0.78 pour la zone Ouest ;
- + 0.76 pour la zone Nord-Est ;
- 0.55 pour la zone Sud-Est.

La figure 7 présente les nouvelles courbes : variogrammes de la bathymétrie (inchangé) et du flux filtré, variogramme croisé et fonction de codispersion $r(h)$ de la bathymétrie et du flux filtré. Le variogramme du flux filtré n'a pratiquement plus d'effet de pépite, si bien que le graphe de $r(h)$ peut être considéré comme non affecté par les erreurs de mesure, au moins aux grandes distances ; aux petites distances, où les variations restent faibles, des erreurs résiduelles, même faibles, peuvent encore produire une instabilité. Le variogramme croisé et le graphe de $r(h)$ confirment l'analyse précédente : peu de corrélation dans la direction E-O, où $r(h)$ fluctue autour de -0.30, et au contraire très bonne corrélation N-S, puisque $r(h)$ se stabilise autour de -0.86. L'examen des graphes des trois zones fait apparaître les corrélations suivantes dans la direction Nord-Sud :

- 0.86 pour la zone Ouest ;
- + 0.86 pour la zone Nord-Est ;
- 0.70 pour la zone Sud-Est.

7. CONCLUSION

L'analyse géostatistique fait ressortir des corrélations de 0.86 entre bathymétrie et flux (négatives dans la zone Ouest, positives dans la zone Nord-Est), alors que le coefficient de corrélation des données brutes n'est que de 0.68. Elle établit clairement les faits suivants :

- i) Les zones Ouest et Sud-Est sont caractérisées par un comportement convectif, alors que la zone Nord-Est est caractérisée par un comportement conductif.
- ii) Ce comportement concerne essentiellement les variations N-S ; la bathymétrie et le flux sont peu corrélés en E-O, mais cette impression peut être due au fait que les variations E-O sont beaucoup moins importantes que dans la direction N-S.

Reste à comprendre le changement de régime hydrogéologique. La bathymétrie présente des creux et des bosses assez réguliers. Le flux de chaleur tend à présenter l'évolution symétrique, sauf au Nord-Est où un décrochement Nord-Sud inverse la situation. La bathymétrie restant très régulière, le changement de régime ne semble pas dû à une faille ou à une discontinuité structurale qui individualiserait deux compartiments. Ce changement peut par contre s'expliquer par l'évolution des propriétés hydrogéologiques des sédiments et de la partie supérieure du socle : les phénomènes de compaction, de diagenèse, de colmatage de fractures, d'ouverture de nouvelles fractures... modifient peu à peu le mode de transfert de chaleur. Les observations effectuées dans le forage 504B, qui se trouve dans la zone de transition, confortent cette interprétation (cf. Gable *et al.*, 1991).

Une étude géostatistique de sites situés dans des contextes différents permettrait de mieux comprendre les mécanismes hydrogéologiques qui régissent la croûte océanique, et suggérerait sans doute des améliorations aux modèles actuels.

REFERENCES

- Chilès, J.P., 1989 : Geostatistical characterization of the link between bathymetry and heat flux in the East-Pacific Ocean. Rapport interne, No. 712, DT/ISA, BRGM, Orléans, France.
- Gable, R., R.H. Morin, et J.P. Chilès, 1991 : Characterization of heat transfer mechanisms through the southern flank of the Costa Rica rift from geostatistical analysis of bathymetry and heat flow. En préparation.
- Matheron, G., 1965 : Les variables régionalisées et leur estimation. Masson, Paris, 306 p.