

HARMONISATION D'UN ENSEMBLE DE PROFILS SISMIQUES 2D

André HAAS
ELF AQUITAINE
CSTJF, Avenue Larribau
64018 PAU Cedex
France

RESUME. Les écarts couramment observés aux intersections entre profils sismiques 2D constituent une difficulté importante pour le passage aux cartes structurales. L'harmonisation d'un ensemble de profils sismiques peut être envisagé par deux méthodes :

- La méthode la plus simple est de réduire les écarts aux croisements en appliquant un décalage constant aux données de chacun des profils. L'optimisation porte sur la somme des carrés des écarts.
- Une méthode plus élaborée consiste à effectuer la cartographie par cokrigage en considérant les données de chaque profil comme une variable auxiliaire. Des profondeurs ponctuelles exactes peuvent être également ajoutées, résolvant ainsi le problème plus général du calage sismique-puits.

ABSTRACT. Misties at the intersections of 2D seismic lines are a common feature and are a serious problem in structural contouring. The methods are proposed for harmonizing a set of seismic lines :

- The simplest method consists in reducing misties by applying a constant shift to each seismic line. The mean squared difference between misties is the optimization criterium.
- A more sophisticated method involves mapping by cokriging, where each seismic line is considered as an auxiliary variable. Exact well data can also be incorporated into the system of equations, thus solving the more general problem of seismic-to-well match.

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION
2. CAUSE DES ECARTS AUX CROISEMENTS
3. HARMONISATION DES DONNEES
4. REDUCTION DES ECARTS PAR MOINDRES CARRES
5. COKRIGEAGE DE PROFILS
6. CONCLUSIONS

1 - INTRODUCTION

En exploration pétrolière la sismique apporte une contribution majeure à la représentation du sous-sol : les interfaces entre couches géologiques de caractéristiques acoustiques différentes sont pointées puis cartographiées; d'éventuels pièges à hydrocarbures peuvent être aussi détectés.

L'acquisition sismique est effectuée le long de lignes échantillonnées suivant une densité importante ; la distance entre points de mesure (ou points milieux communs) est couramment égale à 25 m. La distance entre lignes varie beaucoup suivant le type de campagne sismique :

- En phase d'appréciation ou de développement d'un champ, on réalise de plus en plus souvent des campagnes "3D", c'est-à-dire telles que la distance entre lignes soit du même ordre que la distance entre points de mesure ; cette distance peut être par exemple comprise entre 25 et 100 m. Nous ne considérons pas ce type d'acquisition dans cette étude.
- En exploration intensive ou de grande reconnaissance, les lignes sismiques peuvent être complètement isolées : ce cas particulier ne fait pas non plus partie de nos préoccupations.
- Le cas le plus courant est l'acquisition de lignes sismiques "2D" suivant un maillage régulier de l'ordre du km, - 500 m pour une étude détaillée à plusieurs km pour une étude plus étendue. Ce mode d'échantillonnage pose des problèmes d'estimation spécifiques. En particulier il est souvent nécessaire de procéder à un sous-échantillonnage important (un point de mesure sur 5 ou 10) pour que les algorithmes utilisés, -notamment le krigeage-, le soient dans de bonnes conditions.
- Enfin citons aussi le cas moins fréquent de maillages sismiques irréguliers : les problèmes d'estimation sont alors encore plus cruciaux.

Une source majeure de difficultés est provoquée par l'hétérogénéité ou la non-consistance des mesures effectuées sur les différents profils 2D. L'interpolation des horizons aux points d'intersection des lignes sismiques montre qu'il existe souvent des écarts importants en temps et surtout en profondeur, -jusqu'à 50 mètres ou davantage.

Dans le chapitre suivant, nous analyserons les différentes causes possibles et la nature de ces écarts. Nous tenterons ensuite d'y apporter remède.

2 - CAUSES DES ECARTS AUX CROISEMENTS

Les écarts aux croisements peuvent être générés à différentes phases de la préparation des données.

I - Acquisition

A ce stade, les écarts peuvent être dus à l'utilisation de données hétérogènes, principalement la prise en compte de plusieurs campagnes sismiques réalisées à des époques différentes. Des campagnes trop anciennes peuvent être inutilisables.

L'harmonisation de profils enregistrés avec des sources différentes constitue un problème difficile : une déconvolution adaptée aux différents profils permet de résorber une partie des écarts. Un tel traitement n'est pas toujours possible faute de temps ou des données initiales ; dans ces conditions il faut s'attendre à des décalages importants entre les profils.

II - Traitement sismique

Même au sein d'une même campagne sismique, le signal émis peut varier, entraînant des décalages entre profils ou même le long d'un profil.

Les traitements de focalisation sont également source de différences entre les profils. L'orientation du profil par rapport au pendage des interfaces, joue un rôle très important dans la sommation des traces à point milieu commun ("stack" ou couverture multiple), mais surtout dans la migration. La migration d'un profil "dip" (dans le sens du pendage) provoque des déports latéraux alors qu'elle n'a aucun effet dans le cas d'un profil "strike" (perpendiculaire au pendage).

D'une façon générale, le fait d'appliquer des traitements indépendants aux différents profils 2D, -sans prise en compte de la 3ème dimension-, conduit à des distorsions difficiles à corriger. Les décalages verticaux provoqués par l'utilisation de vitesses erronées dans la migration profondeur sont cependant plus faciles à réduire que les décalages latéraux dus aux pendages.

En sismique terrestre, les conditions d'enregistrement en surface constituent une source majeure de décalages; les corrections statiques destinées à éliminer les effets de la topographie et d'anomalies superficielles de vitesse ne suffisent pas toujours à résoudre le problème de façon satisfaisante.

III - Interprétation

La tâche de l'interpréteur est plus ou moins difficile suivant la qualité des données et la complexité géologique. L'existence de zones bruitées peut rendre difficile le pointé d'un horizon. Dans le cas de véritables

discontinuités (passage de failles) l'interpréteur doit choisir entre plusieurs solutions ; les corrélations sont facilitées par la prise en compte du "caractère" de l'ondelette suivie. Cependant on peut craindre des erreurs brutales de plusieurs dizaines de ms, en cas de changement de phase.

Une interprétation soignée permet d'éviter des écarts importants, notamment par une "fermeture" itérative des différentes mailles. Cependant il n'est pas possible de résorber tous les écarts et l'interpréteur ne dispose pas toujours d'un temps suffisant pour résoudre toutes les difficultés.

3 - HARMONISATION DES DONNEES

L'existence de décalages entre profils peut avoir des conséquences importantes dans la cartographie des horizons pointés, par exemple modifier notablement ou même faire disparaître des structures (anticlinaux ou autres pièges possibles) ou bien au contraire faire apparaître des structures artificielles. Le lissage des données, -obtenu par exemple en introduisant un terme de pépité dans le krigeage-, n'est pas en général suffisant pour résoudre le problème de façon satisfaisante.

Dans certains cas des corrections manuelles peuvent être tentées en effectuant un retour aux données initiales. Cependant il s'agit d'une méthode longue, difficile à envisager dans les cas courants.

Dans la suite de l'étude nous supposons que la préparation des données a été réalisée dans les règles de l'art et que le seul recours pour harmoniser les données réside dans l'utilisation de méthodes statistiques ou géostatistiques. La première méthode étudiée consiste à réduire les écarts par moindres carrés ; la seconde modélise les décalages à l'aide de covariances dans un système de cokrigeage.

4 - REDUCTION DES ECARTS PAR MOINDRES CARRES

I - Formulation

On suppose que les écarts peuvent être expliqués, -au moins partiellement-, par les disparités entre des groupes de profils (campagnes sismiques différentes) ou bien entre les profils eux-mêmes (traitements 2D indépendants). On cherche donc à réduire les écarts en appliquant un recalage constant à chaque profil ou groupe de profils.

Désignons par :

$z_{i,j}$ la valeur du profil P_i au point d'intersection avec le profil P_j ,

$\Delta_{i,j} = z_{j,i} - z_{i,j}$ l'écart au croisement,

Δz_i la correction à appliquer à P_i ,

$\Delta'_{i,j} = \Delta_{i,j} + \Delta z_j - \Delta z_i$ l'écart au croisement corrigé.

Après corrections, les nouveaux écarts doivent être les plus réduits possibles. La minimisation de la somme des carrés conduit à un système indéterminé (à une constante près) ; une contrainte supplémentaire doit être imposée, par exemple que la somme des corrections soit nulle.

Il vient le système d'équations :

$$n_i \Delta z_i - \sum_{j \in Q_i} \Delta z_j + \lambda = \Delta_i \quad (\Delta_i = \sum_{j \in Q_i} \Delta_{i,j} ; i = 1 \text{ à } p)$$

$$\sum_{i=1}^p \Delta z_i = 0$$

où :

p est le nombre de profils ,

n_i est le nombre d'intersections du profil P_i ,

Q_i est l'ensemble des profils croisant le profil P_i ,

Δ_i est la somme des écarts du profil P_i ,

λ est le paramètre de Lagrange associé à la contrainte.

En pratique, il peut être préférable de fixer l'un des profils ou groupes de profils, plutôt que d'imposer une contrainte sur la somme des corrections. Le recalage de groupes de profils conduit à des équations de même type.

En cas d'erreurs sur les vitesses lors du passage des temps aux profondeurs, on peut aussi réduire les écarts en appliquant un facteur correctif constant aux données de chaque profil ou groupe de profils; on minimise alors la somme :

$$S = \sum_{i,j} (f_j z_{j,i} - f_i z_{i,j})^2$$

où f_i est le facteur correctif à appliquer au profil P_i .

Une autre généralisation intéressante est de faire porter la réduction non pas sur un seul horizon, mais sur un groupe d'horizons voisins. En effet, il paraît peu réaliste d'estimer les différentes corrections de façon indépendante, alors que les erreurs correspondantes sont sans doute corrélées.

A titre d'illustration, considérons un ensemble de 5 profils se croisant en 8 points distincts ; les écarts $\Delta_{i,j}$ varient de -30 à 55 m (cf. figure 1) et sont caractérisés par un écart-type important :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{i,j} \Delta_{i,j}^2} = 29.1 \text{ m}$$

Fig. 1 : Ecart aux croisements

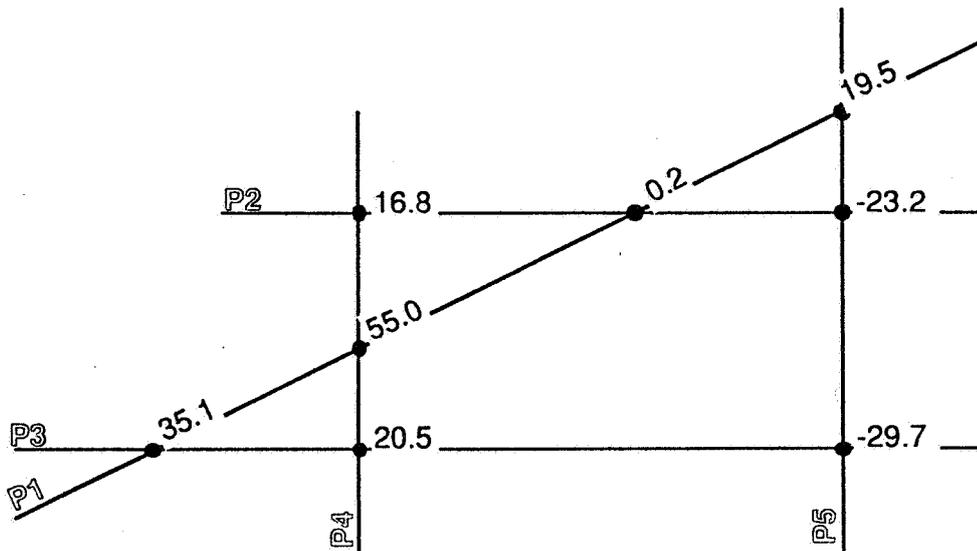
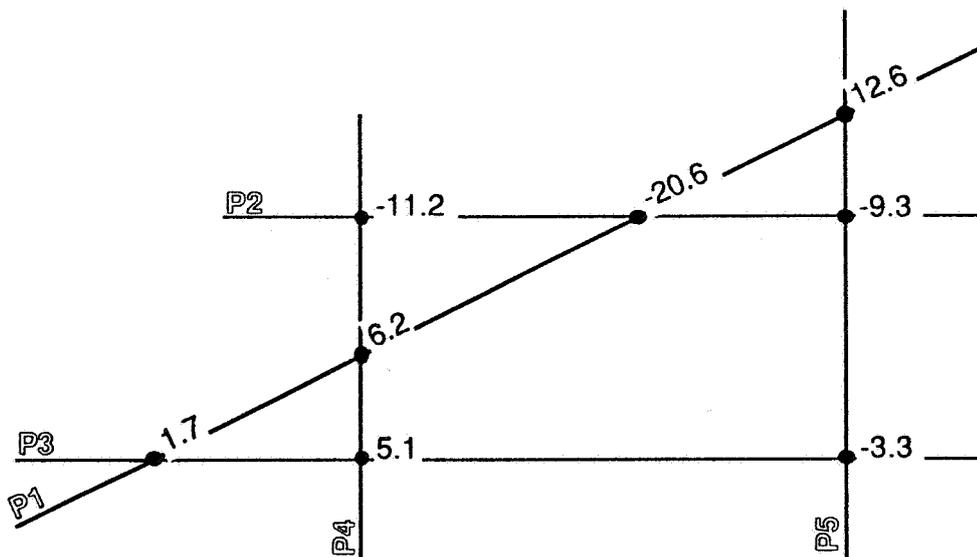


Fig. 2 : Ecart réduits



Le système à résoudre peut être mis sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} 4 & -1 & -1 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 3 & 0 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 3 & -1 & -1 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 3 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -1 & 0 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \\ \Delta z_4 \\ \Delta z_5 \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 109.8 \\ -6.6 \\ -44.3 \\ -92.2 \\ 33.4 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \Delta z_1 = 22.0 \\ \Delta z_2 = 1.2 \\ \Delta z_3 = -11.4 \\ \Delta z_4 = -26.8 \\ \Delta z_5 = 15.1 \end{cases}$$

Après correction, les nouveaux écarts $\Delta'_{i,j}$ varient de -11 à 21 m (cf. figure 2) avec un écart-type environ 3 fois plus faible :

$$\sigma' = 10.4 \text{ m}$$

II - Exemple d'application

L'exemple élémentaire précédent est extrait d'une campagne sismique composée de 14 profils (6 profils Est-Ouest, 7 profils Nord-Sud et 1 profil diagonal) définissant 48 points d'intersection. Les écarts aux croisements sont très importants : 4 d'entre eux varient autour de 70 m (cf. table 1).

Table 1 : Ecarts aux croisements

Profils	NS 1	NS 2	NS 3	NS 4	NS 5	NS 6	NS 7	D
EW 1	- 27	- 67	- 71	- 48	- 39	- 53	- 45	- 68
EW 2		- 25	- 26	6	- 24	- 35	- 26	- 7
EW 3		- 16	- 35	28	23	14	0	0
EW 4	40	4	- 8	39	25	5		30
EW 5	15	8	- 7	26	44			69
EW 6	14	- 20	- 51	- 7	29			35
D	- 20	- 54	- 37	26	- 19	- 52	- 11	
Variance = 1184 Ecart-type = 34.4								

Le système est résolu en fixant le profil diagonal, qui recoupe tous les autres profils. Les décalages estimés varient de -37 à 34 m. Après correction, les écarts aux croisements sont notablement réduits (cf. table 2). La variance des écarts est divisée par un facteur supérieur à 6, -ou l'écart type par un facteur 2.5 .

Table 2 : **Ecartés réduits**

Profils	NS 1	NS 2	NS 3	NS 4	NS 5	NS 6	NS 7	D
EW 1	15	3	9	- 12	2	10	7	- 34
EW 2		11	20	8	- 18	- 6	- 9	- 7
EW 3		- 1	- 11	8	8	22	- 4	- 21
EW 4	11	3	0	3	- 6	- 3		- 7
EW 5	- 19	2	- 4	- 14	8			- 27
EW 6	6	0	- 22	- 21	19			19
D	- 12	- 18	8	28	- 13	- 23	6	
Variance = 193 Ecart-type = 13.9								

III - Limitations

Un simple décalage des profils permet souvent d'améliorer la cohérence des données. Cependant dans l'exemple étudié, les écarts résiduels ne peuvent être considérés comme négligeables. Etudions l'effet des écarts sur la continuité spatiale.

Le variogramme expérimental des données brutes présente un pic anormal important au voisinage de l'origine (cf. figure 3) ; il retrouve ensuite une croissance régulière et tend vers un palier. Le variogramme expérimental des données réduites a les mêmes caractéristiques, mais les valeurs sont réduites de façon importante (cf. figure 4) ; ainsi le palier est diminué de plus de la moitié. Malheureusement l'anomalie à l'origine demeure présente.

En faisant abstraction de ce pic, on peut ajuster les variogrammes des données brutes ou réduites par un modèle sphérique de même portée $a=14000$ m, d'amplitude $C=2200$ ou 1100 et par un effet de pépité $C_0=1000$ ou 300 . Des cartes d'isovaleurs peuvent ensuite réalisées par krigeage utilisant les modèles ainsi définis.

La carte des données brutes (cf. figure 5) est caractérisé par un synclinal étendu au centre de la zone représentée. Les minima et maxima sont très liés au passage des profils ; ainsi la présence d'une crête à l'est le long du profil diagonal paraît très suspecte. La carte des données réduites (cf. figure 6) conserve une allure comparable, mais avec des anomalies moins marquées; la crête précédemment indiquée reste présente.

En conclusion, dans l'exemple étudié la méthode de réduction des écarts apparaît insuffisante : il est nécessaire de prendre en compte l'existence de décalages variables le long des profils.

Fig. 3 : Variogramme moyen des données brutes

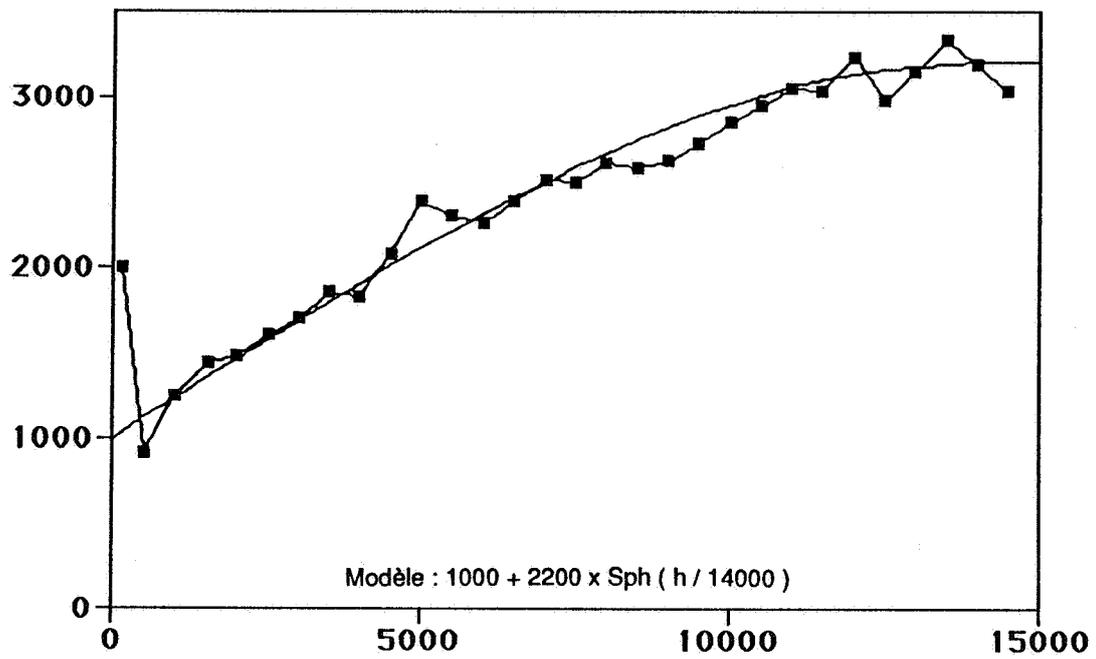


Fig. 4 : Variogramme moyen des données réduites

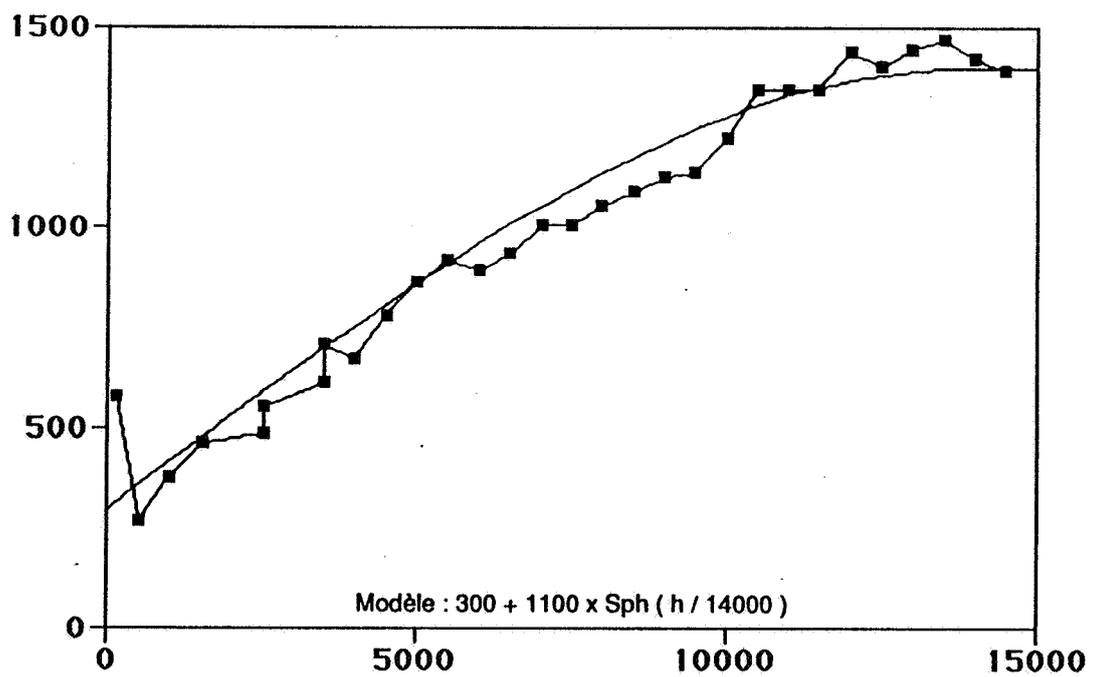
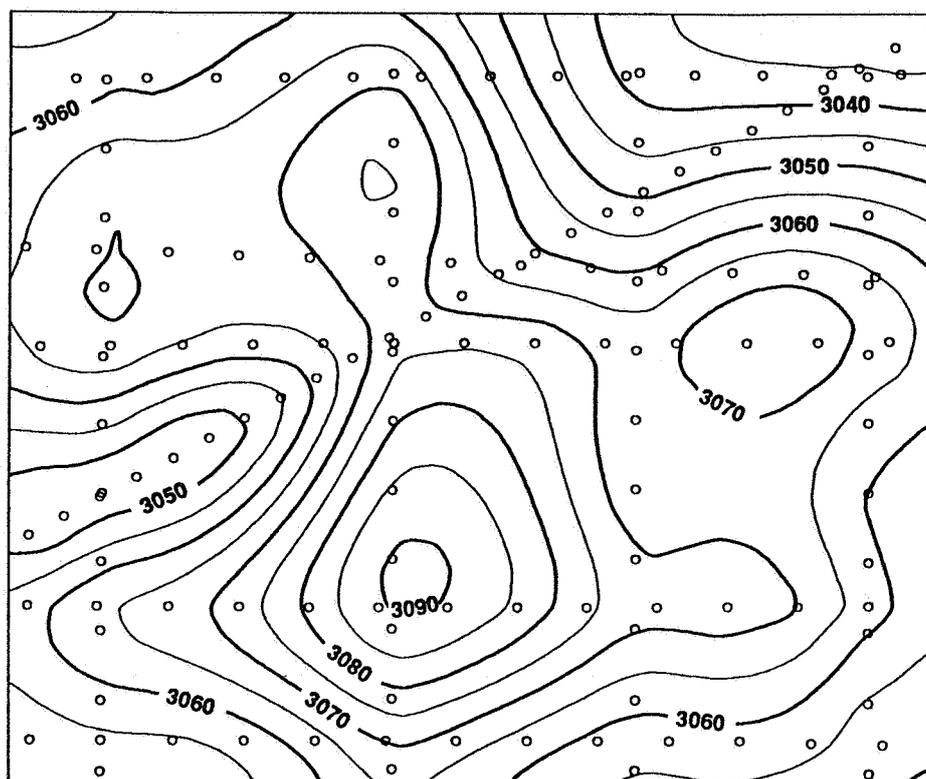
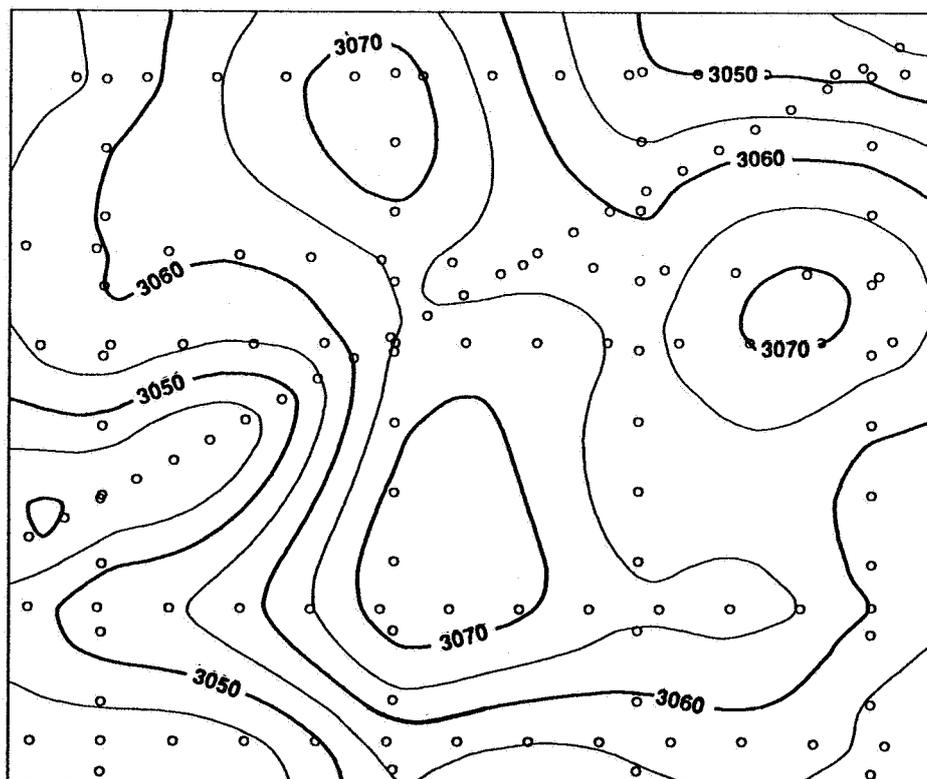


Fig. 5 : Krigeage des données brutes



Variogramme : $1000 + 2200 \times \text{Sph} (h / 14000)$

Fig. 6 : Krigeage des données réduites



Variogramme : $300 + 1100 \times \text{Sph} (h / 14000)$

5 - COKRIGEAGE DE PROFILS

En présence de profils hétérogènes, l'analyse structurale peut être réalisée de façon différente en calculant le variogramme de chacun des profils. Dans l'exemple étudié, le variogramme moyen ainsi obtenu apparaît très continu (cf. figure 7). A l'origine le comportement est de type parabolique au lieu d'être pépétique : ce résultat semble plus conforme à la réalité sous-jacente. Cependant un tel variogramme ne peut être utilisé directement pour kriger les données, même après réduction des écarts.

Le problème peut être abordé différemment en utilisant le formalisme du cokrigeage pour modéliser les corrélations entre les erreurs le long des profils.

I - Formulation

Le principe du cokrigeage est d'estimer une variable en un point à l'aide de valeurs de la même variable, mais aussi à l'aide de valeurs d'autres variables corrélées avec la variable principale. Dans la pratique le nombre de variables auxiliaires est très limité, souvent un, -quelquefois deux ou trois.

La formulation proposée consiste à considérer chaque profil, ou groupe homogène de profils, comme support d'une variable auxiliaire. Un profil ou groupe de profils de référence est néanmoins choisi comme support de la variable principale.

Plaçons-nous dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque : les accroissements des variables sont stationnaires et peuvent être caractérisées par leurs variances ou variogrammes.

L'estimateur z_0^* de la variable sous-jacente $z(x)$ au point x_0 est de la forme :

$$z_0^* = \sum_{i=1}^p \sum_{\alpha=1}^{n_i} \lambda_{i,\alpha} z_i(x_\alpha)$$

où :

$z_i(x_\alpha)$ est la valeur de la variable auxiliaire associée au profil P_i et mesurée au point x_α ,

p est le nombre de profils,

n_i est le nombre d'échantillons de P_i .

Les poids $\lambda_{i,\alpha}$ vérifient les conditions de non-biais suivantes :

$$\sum_{\alpha=1}^{n_1} \lambda_{1,\alpha} = 1 \quad \text{et} \quad \sum_{\alpha=1}^{n_i} \lambda_{i,\alpha} = 0 \quad \forall i > 1$$

La somme des poids associés au profil de référence P_1 est égale à 1, alors que la somme des poids associés à chacun des autres profils P_i est nulle. Le système de cokrigage peut être mis sous forme matricielle :

$$\Gamma \cdot \Lambda + B \cdot L = \Gamma_0$$

$$B^t \cdot \Lambda = B_0$$

où :

Γ est une matrice carrée de taille N (nombre total de données), formée des valeurs des variogrammes $\gamma_{ij}(x_\alpha - x_\beta)$ associées aux points x_α et x_β des profils P_i et P_j ,

Γ_0 est un vecteur colonne de taille N , formé des valeurs des variogrammes $\gamma_{i0}(x_\alpha - x_0)$ associées aux différents points x_α des profils P_i et au point estimé x_0 ,

B est la matrice binaire de taille $N \cdot p$ associée aux conditions de non biais : chacune des colonnes est associée à un profil ou un groupe et comporte n_i valeurs égales à 1,

Λ est le vecteur des poids, -de taille N ,

L le vecteur des coefficients de Lagrange, -de taille p .

En admettant l'indépendance entre la variable $z(x)$ et les erreurs $\varepsilon_i(x) = z_i(x) - z(x)$, ainsi qu'entre les erreurs elles-mêmes, il vient les relations :

$$\gamma_{ii}(h) = \gamma(h) + \delta_i(h)$$

$$\gamma_{ij}(h) = \gamma(h) \quad \forall i \neq j$$

$$\gamma_{i0}(h) = \gamma(h)$$

où $\gamma(h)$ et $\delta_i(h)$ désignent les variogrammes des variables $z(x)$ et $\varepsilon_i(x)$; sauf cas particulier, on associe le même modèle aux différentes erreurs : $\delta_i(h) = \delta(h) \quad \forall i$.

II - Exemple d'application

L'exemple précédent a été repris et estimé par cokrigage. Les résultats présentés ici concernent une zone limitée de 6.5 par 5.5 km contenant 135 points de données.

Le choix des 2 modèles $\gamma(h)$ et $\delta(h)$ est déterminé à l'aide des données expérimentales (cf. figure 7), qui constituent en principe une approximation de la somme $\gamma(h) + \delta(h)$.

Fig. 7 : Variogramme moyen des différents profils

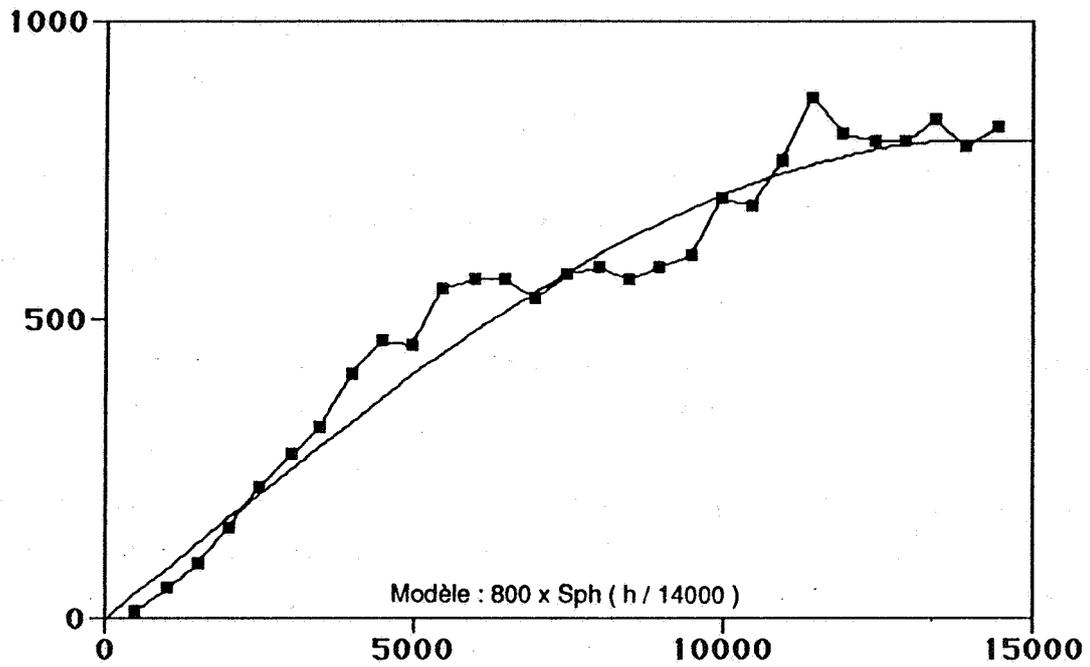
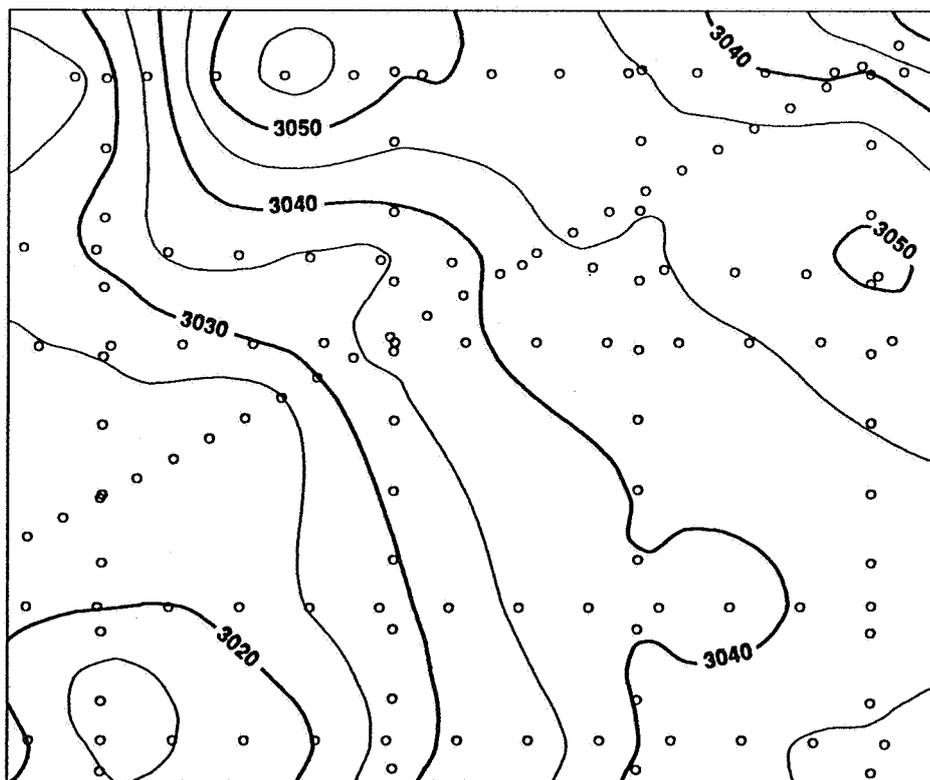


Fig. 8 : Cokrigage des profils



Variogramme principal : 700 x Sph (h / 14000)

Variogramme auxiliaire : 100 x Sph (h / 14000)

Contrairement à la méthode précédente, il est maintenant possible de supposer que l'effet de pépite est nul. La demi-variance des écarts aux croisements fournit un ordre de grandeur du palier de $\delta(h)$, soit environ 100.

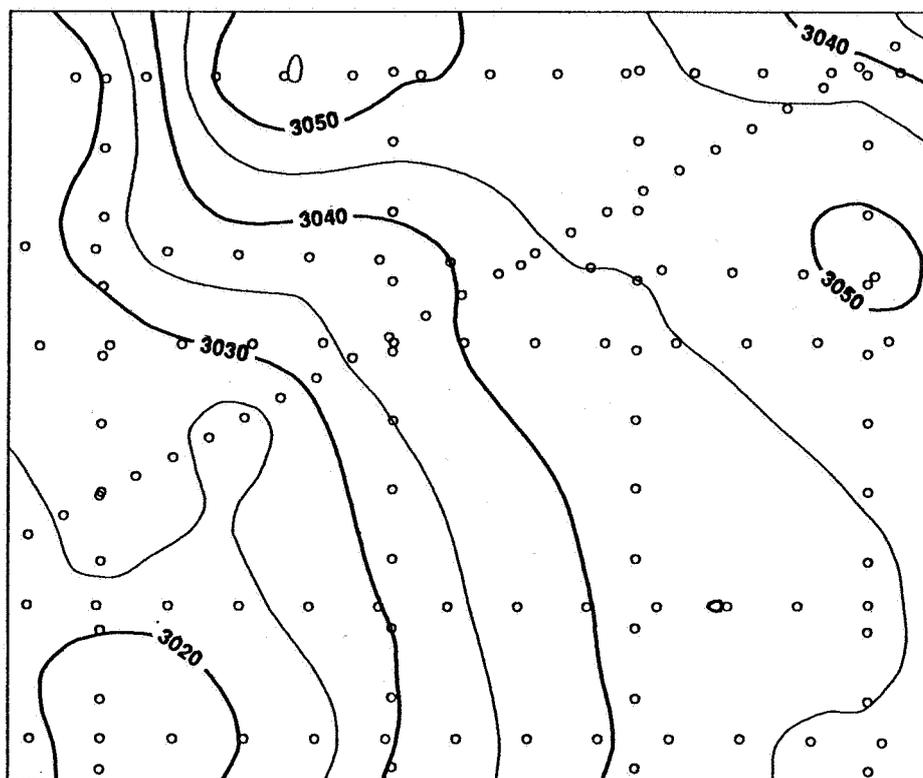
Par contre le choix d'une portée est plus arbitraire. L'hypothèse la plus simple est de supposer que les 2 modèles sont proportionnels : nous avons retenu des modèles sphériques (en négligeant le comportement parabolique à l'origine) de même portée $a=14000$ m et de paliers respectifs $C=700$ pour $\gamma(h)$ et 100 pour $\delta(h)$.

Dans ces conditions, la carte estimée (cf. figure 8) diffère sensiblement des cartes obtenues par krigeage : le synclinal central est remplacé par un gradient de direction Nord-Est avec un maximum bien marqué au Sud-Ouest, des minima au Nord et à l'Est et une remontée au Nord-Est.

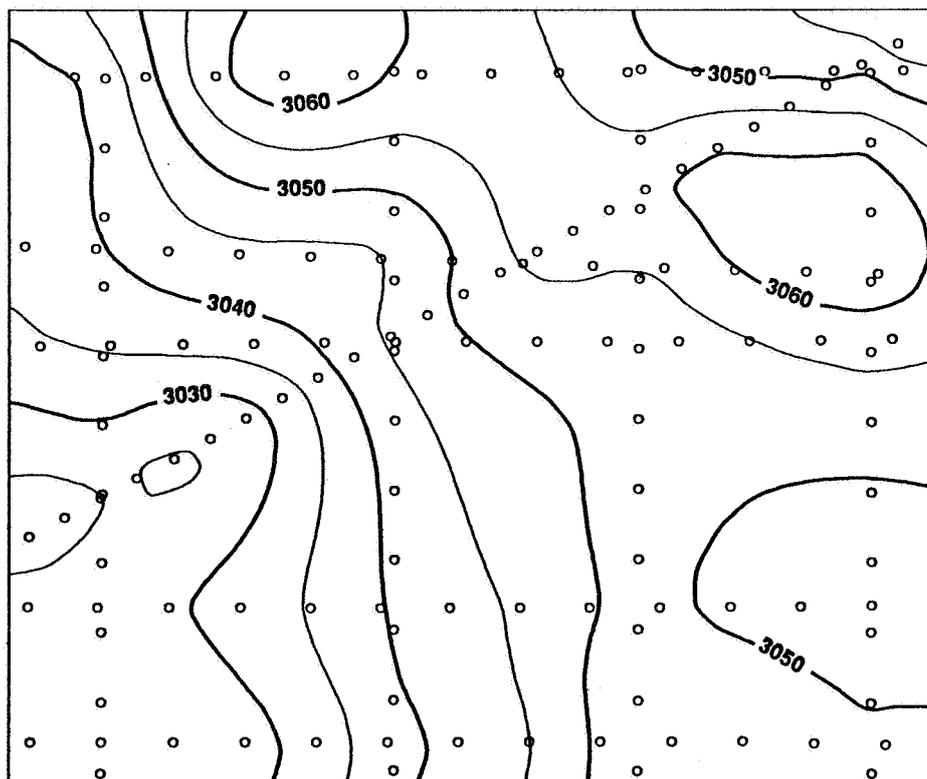
Plusieurs essais ont été réalisés pour tester l'influence des paramètres du cokrigeage :

- La portée du variogramme auxiliaire a été réduite de moitié : la valeur précédemment choisie semble en effet trop forte pour modéliser des erreurs le long des profils. La carte obtenue (cf. figure 9) demeure cependant proche de la précédente; d'autres essais réalisés avec des portées encore plus faibles aboutissent à des résultats similaires.
- A la limite le variogramme auxiliaire peut être représenté par un terme pépitique $C_0=100$. Bien que cette hypothèse paraisse peu plausible, elle conduit à une carte relativement peu différente, -quoique plus basse d'environ 10 m (cf. figure 10).
- Le choix du profil de référence est arbitraire : nous avons fait plusieurs essais en changeant le profil fixé : le résultat, - attendu -, est simplement un décalage constant de toute la carte. Le cas présenté (cf. figure 11) est relatif au profil Est-Ouest central; le décalage est de 38.6 m.
- Un résultat analogue est obtenu quand on remplace les données réduites par les données brutes (cf. figure 12) : la carte est simplement plus haute de 16 m.

Des essais ont également menés pour simuler l'existence de données de puits supposées parfaitement connues : elles remplacent alors le profil de référence. Bien attendu, le variogramme correspondant ne comporte que le terme principal $\gamma(h)$; à ceci près le fonctionnement du programme est identique et les résultats tout à fait analogues. Par exemple le fait de considérer le profil de référence comme un ensemble de puits ne change la carte que localement.

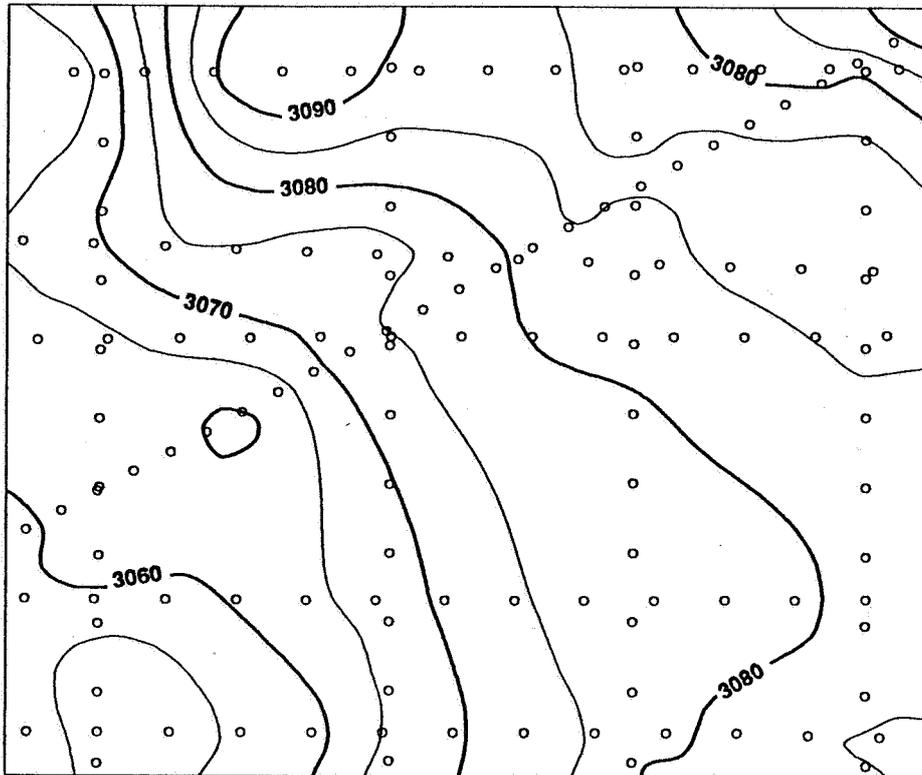
Fig. 9 : Cokrigage des profils

Variogramme principal : $700 \times \text{Sph} (h / 14000)$
Variogramme auxiliaire : $100 \times \text{Sph} (h / 7000)$

Fig. 10 : Cokrigage des profils

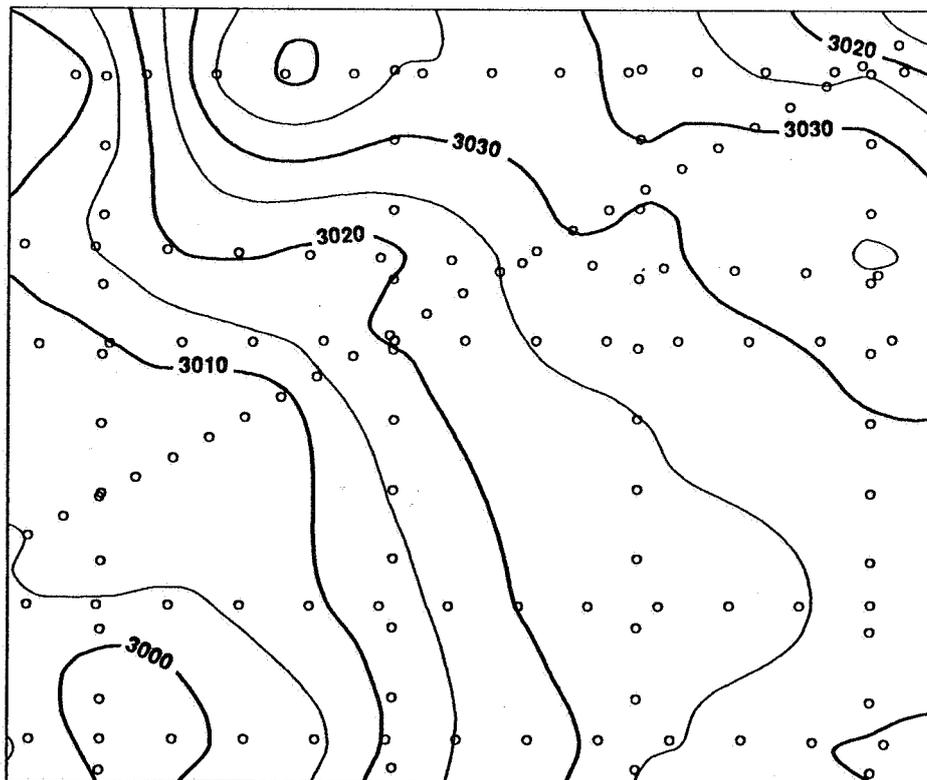
Variogramme principal : $700 \times \text{Sph} (h / 14000)$
Variogramme auxiliaire : $100 (\text{pépitique})$

Fig. 11 : Cokrigage des profils



Changement du profil de référence
(autres conditions identiques à celles de la figure 8)

Fig. 12 : Cokrigage des profils



Utilisation des données brutes
(autres conditions identiques à celles de la figure 8)

6 - CONCLUSIONS

La réduction des écarts aux croisements par moindres carrés est une opération peu coûteuse et facile d'emploi. Elle peut donc être essayée de façon assez systématique. Les données recalées peuvent être cartographiées par krigeage avec effet de pépité, si les écarts résiduels sont faibles.

Le recours au cokrigeage des profils doit être envisagé dans le cas contraire, afin de prendre en compte les corrélations entre les erreurs le long des profils. Les résultats peuvent être très différents de ceux obtenus en supposant toutes les erreurs indépendantes.

La méthode présente un autre intérêt majeur : elle permet de résoudre ipso facto le difficile problème du calage de la sismique aux puits disponibles en considérant ceux-ci comme des données fixées.

La principale difficulté réside dans la mise en oeuvre : l'estimation du variogramme des erreurs est relativement arbitraire, bien que les résultats paraissent assez peu sensibles à la portée du modèle retenu. Par ailleurs les essais réalisés jusqu'à présent ont porté sur un nombre limité de données (135 points), autorisant une inversion globale du système; dans un cadre opérationnel, il sera nécessaire d'adapter la technique du voisinage glissant pour tenir compte des profils apportant le plus d'information.

D'autres formalisations du cokrigeage peuvent être également envisagées. Des essais comparatifs seront effectués, plus particulièrement dans le cadre de travaux de recherche sur l'estimation des profondeurs à partir de données sismiques et de puits; le projet est opéré par le Centre de Géostatistique en collaboration avec ELF AQUITAINE, GDF, IFP et TOTAL CFP.