

SIMULATION CONDITIONNELLE A TROIS FACIES DANS UNE FALAISE DE LA FORMATION DU BRENT

G. MATHERON*, H. BEUCHER*, Ch. de FOUQUET*, A. GALLI*, Ch. RAVENNE**



TABLE DES MATIERES

Résumé.....	214	Abstract.....	214
A - INTRODUCTION.....	215	D - SIMULATIONS.....	232
B - SIMULATION D'ENSEMBLES ALEATOIRES..	216	1 - Les simulations conditionnelles de la coupe.....	232
1 - Simulation conditionnelle d'ensembles aléatoires par des gaussiennes seuillées.....	217	2 - Simulations dans un plan vertical perpendiculaire à la coupe.....	236
2 - Cas particulier d'une covariance produit.....	218	3 - Simulation dans le plan horizontal.....	236
3 - Covariance factorisée à deux exponentielles.....	219	4 - Simulation de coupes en arrière de la falaise.....	236
4 - Application: simulation conditionnelle d'une falaise à trois faciès.....	219	E - EXEMPLES.....	242
C - ANALYSE STRUCTURALE DES FACIES DE LA COUPE.....	220	1 - Répartition verticale des faciès.....	242
1 - Représentation de la coupe.....	220	2 - Influence de la covariance.....	242
2 - Analyse structurale de la variable faciès.....	227	F - CONCLUSION.....	242
		REFERENCES.....	249

ILLUSTRATIONS

Figure 1. Corrélation latérale entre forages.....	215
Figure 2. Falaise réelle et interprétation géologique.....	221
Figure 3. Matrice des numéros de faciès.....	222
Figure 4. Proportions cumulées des trois faciès, direction verticale.....	223
Figure 5. Variogrammes verticaux des faciès.....	224
Figure 6. Variogrammes horizontaux des faciès.....	225
Figure 7. Proportions cumulées des trois faciès, direction horizontale.....	226
Figure 8. Seuils gaussiens, direction verticale.....	226
Figure 9. Valeur du faciès, moyenné sur les 174 lignes.....	228
Figure 10. Variogramme horizontal de la valeur moyenne du faciès et ajustement.....	228
Figure 11. Covariances verticales non stationnaires et ajustement.....	229
Figure 12. Covariances horizontales stationnaires et ajustement.....	230
Figure 13. Covariances non stationnaires dans une direction intermédiaire et ajustement.....	231
Figure 14. Simulations conditionnelles de la coupe verticale.....	233
Figure 15. Simulations: coupe verticale perpendiculaire à la falaise.....	237
Figure 16. Simulation: coupe horizontale perpendiculaire à la falaise.....	238
Figure 17. Simulations: coupes verticales en arrière de la falaise.....	243
Figure 18. Exemple: stationnarité de la répartition verticale des faciès. Même covariance des gaussiennes.....	245
Figure 19. Exemple: stationnarité de la répartition verticale des faciès. Modification des proportions, même covariance des gaussiennes.....	246
Figure 20. Exemple: modification de la portée horizontale, même répartition verticale non stationnaire des faciès.....	247

* Centre de Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, 35 rue St-Honoré, 77305 FONTAINEBLEAU, France
 ** Institut Français du Pétrole, 1 et 4 avenue du Bois-Préau, B.P. 311, 92506 RUEIL MALMAISON, France
Etudes Géostatistiques V - Séminaire C.F.S.G. sur la Géostatistique 15-16 Juin 1987, Fontainebleau. Sci. de la Terre, Sér. Inf., Nancy, 1988, 28, pp. 213 à 249.

RESUME

La connaissance des hétérogénéités des formations pétrolifères est capitale pour la fiabilité des simulations des réservoirs. Mais les campagnes de reconnaissance (sismique, puits) ne permettent pas une étude suffisamment précise de ces hétérogénéités entre puits. Quand elle est possible, l'étude d'affleurement des formations fournit beaucoup d'information, sous réserve de vérifier que les caractéristiques du champ seront similaires.

Dans une première étape, l'étude d'un affleurement en falaise d'une formation de Brent est résumée par une coupe verticale à trois faciès, que l'on cherche à simuler.

La simulation de variables en tout ou rien est connue, mais jusqu'à maintenant, la conditionnalisation restait approximative. Une méthode de simulation conditionnelle est présentée et mise en oeuvre, à deux dimensions, pour une falaise du Yorkshire.

ABSTRACT

Quantitative methods taking into account the sedimentological characteristics will answer the needs of reservoir engineers: with the data available (seismic recordings, wells), it is not possible for the engineers to study heterogeneities between wells accurately enough. The study of an outcrop presenting a similar type of sedimentation provides much more information. As an example, the study of a cliff in the Brent formation in Yorkshire was performed. The cliff is summarized on an image with three facies which have to be simulated.

Simulations of binary variables are well known, although it is difficult to condition the experimental values accurately. A method for conditional modelling in 2D is presented and applied to the studied cliff.

A – INTRODUCTION

La modélisation des hétérogénéités des dépôts est actuellement un problème majeur pour l'évaluation des caractéristiques dynamiques des réservoirs. Les distances entre forages sont souvent trop importantes pour que les corrélations entre passées gréseuses soient fiables: la connaissance détaillée des logs, décrits à l'échelle décimétrique ou parfois même plus finement, n'apporte pas d'information quantitative sur l'extension latérale des corps gréseux. La sismique utilisée en prospection pétrolière n'a pas une résolution suffisante pour discriminer des corps de puissance métrique à décamétrique. A partir des forages, on ne peut donc actuellement distinguer si les niveaux réservoir sont très continus ou non. Or, à même proportion de grès et d'argile, la récupération peut être très différente suivant les cas (Figure 1).

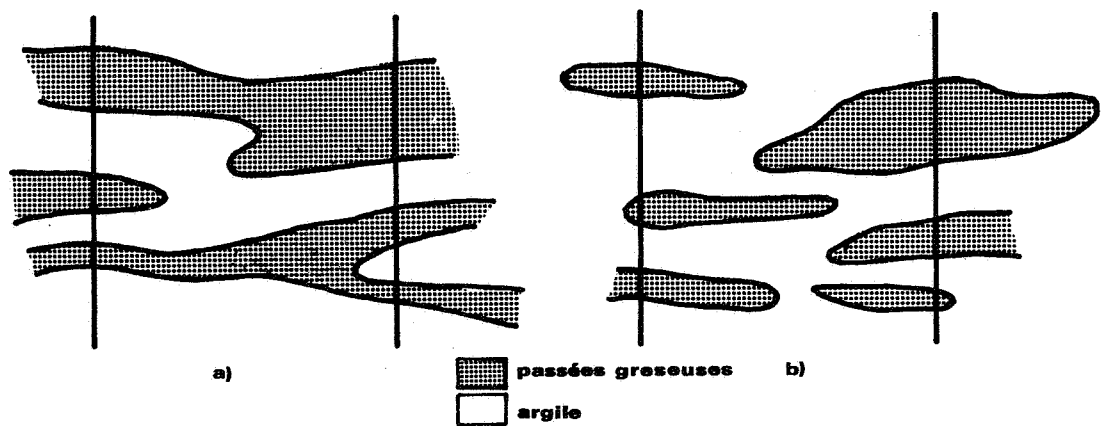


Figure 1. Corrélation latérale possible entre forages.

Pour pallier cette absence d'information sur la structure des réservoirs aux distances inférieures à l'espacement des sondages, une nouvelle démarche a été proposée (Montadert (1963), Groult et al. (1966), Tomutsa et al. (1986), Ravenne et al. (1987)): rechercher en affleurement des images comparables en un premier temps à celles des formations pétrolifères posant problème. Sous réserve que les conditions de formation des dépôts aient été similaires pour le réservoir et l'affleurement, ce dernier fournira les caractéristiques géologiques, et notamment géométriques, à différentes échelles. Un modèle de répartition des corps gréseux est alors construit et confronté à la réalité connue de l'affleurement. Si ces simulations sont satisfaisantes, on pourra alors les caler au gisement à l'aide des forages et/ou des autres informations.

Avec le soutien de la CEE, L'Institut Français du Pétrole a engagé une recherche pour élaborer une méthodologie de simulations des hétérogénéités des réservoirs, qui associe le Centre de Géostatistique de l'Ecole des Mines de Paris*.

* Contrat TH 01070/86 avec le Groupement Européen de Recherches Technologiques sur les Hydrocarbures.

Les corps sédimentaires étudiés appartiennent à la formation du Brent, qui affleure en falaise dans le Yorkshire (Grande-Bretagne). La falaise choisie montre des agencements latéraux ou verticaux de cette formation sur une longueur d'une dizaine de kilomètres et une hauteur de 30 à 150 mètres. Nous avons retenu ici un intervalle d'une trentaine de mètres d'épaisseur, bien visible sur 500 mètres environ dans le site de Cloughton (Matheron et al. (1987)).

Les étapes de la modélisation de la falaise sont les suivantes:

- Etude géologique de l'affleurement.

Le résultat est une coupe au 100ème, qui résume les dépôts en trois faciès: grès, grès argileux et argile. Les faciès sont numérotés et la coupe est discrétisée par une maille rectangulaire.

- Elaboration d'une méthode de simulation conditionnelle d'ensembles aléatoires, à 2 ou 3 dimensions.

La conditionnalisation est la nouveauté essentielle de la méthode. Par ailleurs, le procédé de simulation de variables gaussiennes utilisé ici permet une grande interactivité et facilitera le calage aux informations de nature géologique.

- Analyse statistique et structurale de la coupe, puis simulations conditionnelles à 2 ou 3 dimensions.

- Critique des simulations par les géologues et amélioration du modèle.

- Composition des perméabilités sur les simulations géostatistiques des faciès.

Il est important d'évaluer les variations du comportement dynamique dues aux fluctuations de la répartition des faciès d'une simulation à l'autre. Ces deux derniers points sont présentés par ailleurs.

Les grandes lignes de la simulation conditionnelle d'ensembles aléatoires par des gaussiennes seuillées sont d'abord présentées, puis la méthode est mise en oeuvre pour la falaise étudiée.

B – SIMULATION D'ENSEMBLES ALEATOIRES

La simulation de faciès géologiques par des ensembles aléatoires de type génétique était déjà connue il y a une quinzaine d'années (Matheron (1969), Jacod et Joathon (1971)). Dans ces modèles, la sédimentation est régie par une équation différentielle qui exprime l'épaisseur sédimentée en fonction de l'apport de matière et de la profondeur d'eau. En faisant varier l'expression de l'apport extérieur et de la subsidence (continues ou par saccades, taux, faciès de profondeur, répartition géographique, etc.), on peut simuler une grande variété de dépôts, correspondant à des conditions de sédimentation très différentes: couches continues ou dépôts lenticulaires, migration de chenaux, turbidites, etc.

L'avantage des modèles aléatoires de type génétique est leur grande souplesse. En contrepartie, si l'on affine la description géologique, le modèle devient vite incalculable, et les paramètres sont alors calés empiriquement (Bouchet (1985)).

La composante discontinue de la sédimentation est construite à partir d'un schéma booléen dans $R^3 = \{(x, y, t)\}$. Malheureusement, on ne sait pas conditionner les schémas booléens. Donc on ne peut pas se caler aux sondages traversant la série réelle.

Pour conditionnaliser les ensembles aléatoires, on retourne au modèle plus simple des gaussiennes seuillées.

1 - SIMULATION CONDITIONNELLE D'ENSEMBLES ALEATOIRES

PAR DES GAUSSIENNES SEUILLEES

Soit $Y(x)$ une Fonction Aléatoire stationnaire multigaussienne, centrée et normée. la troncature au seuil a définit l'ensemble aléatoire A :

$$A = \{x, Y(x) \geq a\}$$

A est représenté par son indicatrice:

$$Z(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } Y(x) \geq a \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad [A-1]$$

et on a

$$m = E(Z) = 1 - G(a)$$

Simuler A revient à simuler la gaussienne $Y(x)$, dont la covariance ρ est reliée au covariogramme géométrique K :

$$K(h) - m^2 = C(h)$$

$$= g(a)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{H_{n-1}^2(a)}{n!} \rho^n(h)$$

$C(h)$: covariance de $Z(x)$.

La difficulté provient de ce que l'anamorphose [A-1] n'est pas bijective. Puisqu'aux points conditionnants on ne dispose que de la valeur du faciès Z , pour conditionner la simulation, il faut d'abord générer des gaussiennes, de covariance ρ et telles que

$$\begin{cases} Y_\alpha \geq a & \text{si } x_\alpha \in A \\ Y_\alpha < a & \text{si } x_\alpha \notin A \end{cases}$$

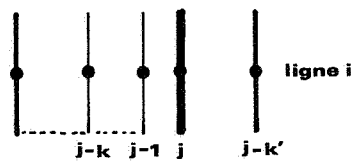
2 - CAS PARTICULIER D'UNE COVARIANCE PRODUIT

Un processus sédimentaire présente généralement une anisotropie entre la direction, supposée verticale, de dépôt des matériaux et l'horizontale.

Considérons à 2 dimensions une sédimentation à 2 faciès, l'argile et le grès. L'ensemble A représente par exemple le grès. La covariance des gaussiennes est anisotrope. Supposons qu'elle se factorise:

$$\rho(h_x, h_z) = \rho(h_x) \rho(h_z)$$

On peut alors simuler très simplement les gaussiennes en tirant parti des propriétés d'indépendance conditionnelle qui résultent de la forme de la covariance:



Si l'on a déjà simulé $(j-1)$ verticales, on peut décomposer la suivante en son espérance conditionnelle et un résidu indépendant, pour chaque ligne d'indice i .

$$Y(i, j) = Y_K(i, j) + R(i, j) \quad [A-2]$$

où $Y_K(i, j)$ est le krigeage de $Y(i, j)$ par les $(j-1)$ colonnes déjà simulées. Mais les propriétés d'effet d'écran (Matheron (1970), Rivoirard (1984)) ne conservent pour $Y_K(i, j)$ que les seuls $Y(i, j')$ situés sur la même ligne. [A-2] s'écrit donc:

$$Y(i, j) = \sum_{\alpha=1}^{j-1} \lambda^\alpha Y(i, \alpha) + R(i, j)$$

Les résidus ont, à un facteur près, même covariance que les gaussiennes. En effet, la covariance verticale s'écrit:

$$\begin{aligned} \rho_z(h) &= E(Y_{i,j} Y_{i+h,j}) \\ &= \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda^\alpha \lambda^\beta \rho_z(h) \rho_x(\alpha-\beta) + \rho_R(h) \end{aligned}$$

donc

$$\rho_R(h) = \rho_z(h) \left[1 - \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \lambda^\alpha \lambda^\beta \rho_x(\alpha-\beta) \right]$$

$$\rho_R(h) = \sigma_K^2 \rho_z(h)$$

où σ_K^2 est la variance de krigeage d'un point par tous les points de la même ligne précédemment simulés.

Le procédé de simulation est alors très simple:

- reconstruction des verticales conditionnantes
- simulation non conditionnelle des gaussiennes de covariance ρ_z
- conditionnalisation latérale:

$$Y(i,j) = Y_K(i,j) + \sigma_K R(i,j)$$

Dans le cas général d'une covariance non factorisable, la covariance des résidus ne coïncide pas avec celle des gaussiennes.

3 - COVARIANCE FACTORISEE A DEUX EXPONENTIELLES

D'après la propriété markovienne de la covariance exponentielle, le krigeage latéral ne fait intervenir que le voisin le plus proche de part et d'autre.

Verticalement, on réitère le procédé pour le résidu:

$$R(i) = r R(i-1) + \sqrt{1 - r^2} N \quad [A-3]$$

N : gaussienne réduite indépendante.

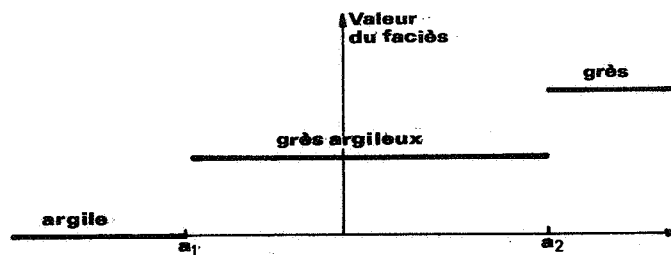
r : corrélation des résidus entre deux lignes successives

La simulation des résidus est donc particulièrement simple:

- tirer N
- calculer $R(i)$ par la relation [A-3].

4 - APPLICATION: SIMULATION CONDITIONNELLE D'UNE FALAISE A 3 FACIES

Les faciès sont ordonnés de 0 à 2, de l'argile au grès:



La valeur du faciès en un point est la somme des indicatrices, les seuils étant calculés à partir des proportions cumulées:

$$Z(x) = \sum_{j=1}^2 k_j(x) \quad ; \quad k_j(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } Y(x) \geq a_j \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

où:

$$G(a_1) = p_0 \quad \text{et} \quad G(a_2) = 1 - p_2 \quad [\text{A-4}]$$

p_0 : proportion d'argile ; p_2 : proportion de grès

Plus généralement, pour (N+1) faciès numérotés de façon quelconque:

$$Z(x) = \sum_{j=1}^N b_j k_j(x)$$

les seuils étant calculés par :

$$G(a_j) = \sum_{i=0}^{j-1} p_i \quad , \quad p_i : \text{proportion de faciès } i$$

L'anamorphose s'écrit:

$$Z = m_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{i=1}^N b_i g(a_i) H_{n-1}(a_i) \right] \frac{H_n(Y)}{n!} \quad [\text{A-5}]$$

ce qui donne la relation suivante, entre la covariance C(h) des faciès, expérimentalement accessible, et celle des gaussiennes Y:

$$C(h) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N b_i b_j g(a_i) g(a_j) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{H_{n-1}(a_i) H_{n-1}(a_j)}{n!} \rho^n(h) \quad [\text{A-6}]$$

La démarche est alors classique:

- analyse statistique et structurale de Z(x)
- simulation conditionnelle des gaussiennes de covariance ρ
- retour aux variables réelles par l'anamorphose, qui s'écrit de façon équivalente:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^N C_i 1_{a_{i-1} < Y(x) \leq a_i} \quad , \quad a_0 = -\infty$$

C_i : indice du faciès i

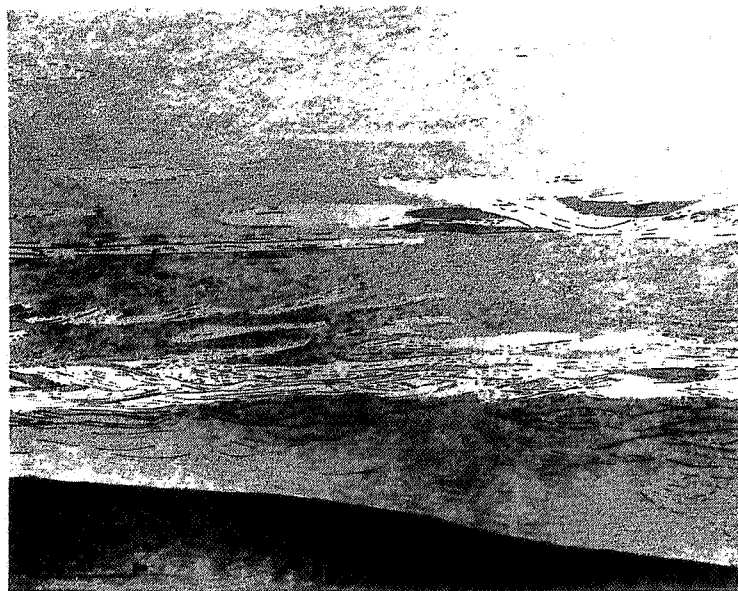
C – ANALYSE STRUCTURALE DES FACIES DE LA COUPE

1 – REPRESENTATION DE LA COUPE

Le secteur retenu a été photographié d'hélicoptère, puis les photos sont corrigées des éloignements et des variations d'altitude. Le pendage des couches est ramené à l'horizontale. A partir de l'étude détaillée des affleurements, le géologue a ensuite établi, sur ces photographies aériennes, une coupe au 100ème environ (Figure 2). Les faciès retenus, grès, grès-argileux et argile ont a priori une valeur de la perméabilité ponctuelle différente d'un ou de plusieurs ordres de grandeur.



Figure 2.
Falaise réelle et interprétation géologique.
a) Photographie aérienne.



b) Interprétation géologique simplifiée après correction des éloignements et du pendage.

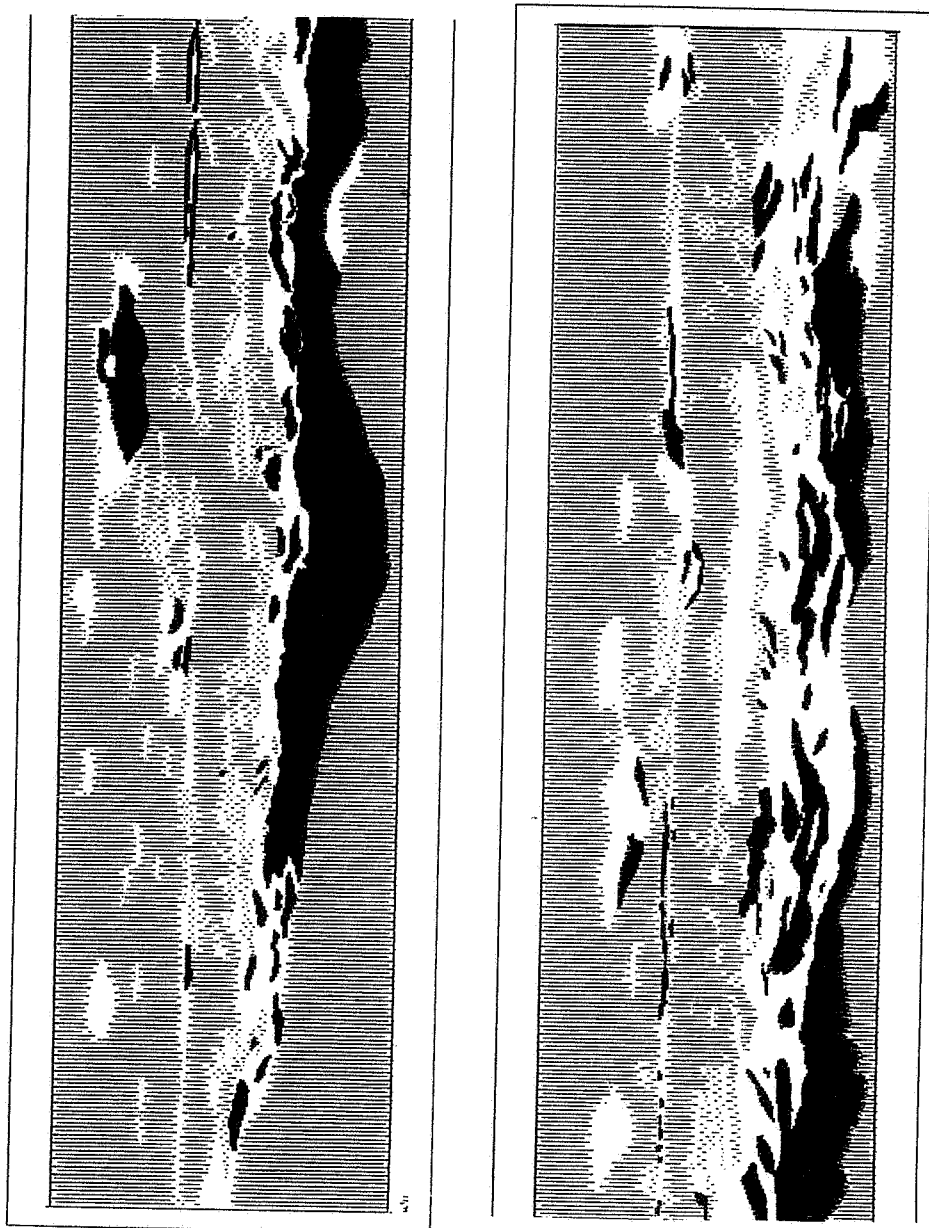
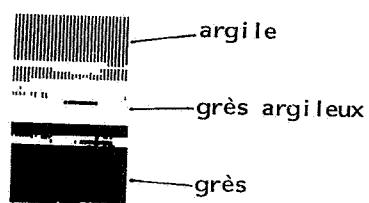


Figure 3.
Discretisation de la coupe (échelle verticale/échelle horizontale ≈ 3)



La coupe est ensuite digitalisée par une trame; la méthode de discrétisation employée utilise une maille rectangulaire de rapport $\sqrt{3}/2$. La matrice ainsi constituée comporte 174 lignes et 3 163 colonnes (Figure 3). Les faciès ont été numérotés de (1) à (3), ce qui change seulement la moyenne dans les relations données à la section B.

La falaise présente un banc gréseux massif à la base, des discontinuités intermédiaires, une passée argileuse interrompue par un banc gréseux plus fin et des passées discontinues plus épaisses, et se termine par de l'argile au sommet. Le banc gréseux du haut a d'abord été considéré comme un niveau repère. Des sondages effectués en arrière de la falaise ont infirmé cette hypothèse, mais un niveau argileux repérable par radiométrie est localisé juste en dessous. Ceci justifie la correction du pendage pour l'étude géostatistique.

La répartition des faciès n'est manifestement pas stationnaire verticalement. Pour préciser les variations, on calcule pour chaque ligne les proportions de chaque faciès. La figure 4 montre vers le haut une localisation similaire du grès et du grès argileux. A la base, le grès argileux est situé généralement au-dessus du grès. Ceci traduit des variations des conditions de dépôt au cours du temps.

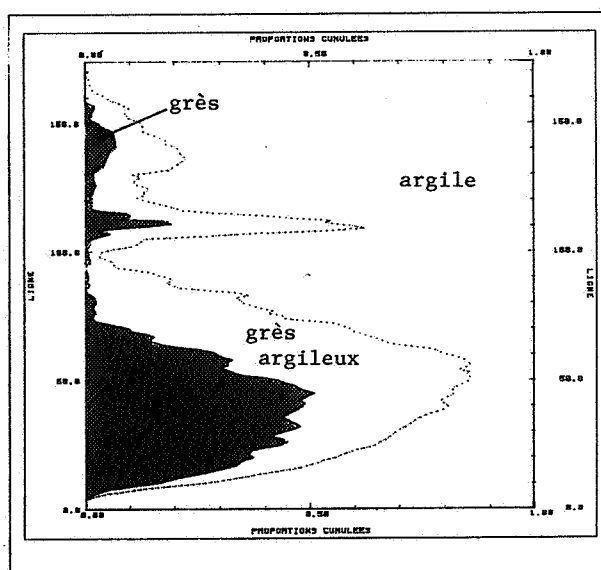


Figure 4. Proportions cumulées des trois faciès; direction verticale.

Les variogrammes verticaux (Figure 5) de la proportion d'argile, de grès argileux et de grès présentent un palier plus ou moins bien marqué vers une cinquantaine de pas, suivi d'une nouvelle croissance au-delà de 80 pas, le champ total étant de 174 lignes. Le faciès moyen, cumulé sur les 3 163 colonnes présente la même allure.

Latéralement (Figure 6), la proportion d'argile est stationnaire sur les 1 000 premiers pas. Le grès argileux présente deux paliers, à relier aux dents de scie bien séparées visibles sur la figure 7. La proportion de grès est également stationnaire au-delà des 1 100 premiers pas; si l'on s'intéresse à la proportion relative de grès (ou, ce qui revient au même, de grès argileux) par rapport au grès total, le variogramme présente un palier net vers 500 pas. L'écart à la stationnarité apparaît vers 950 pas. Toutefois, le rapport des deux variables peut être assez instable.

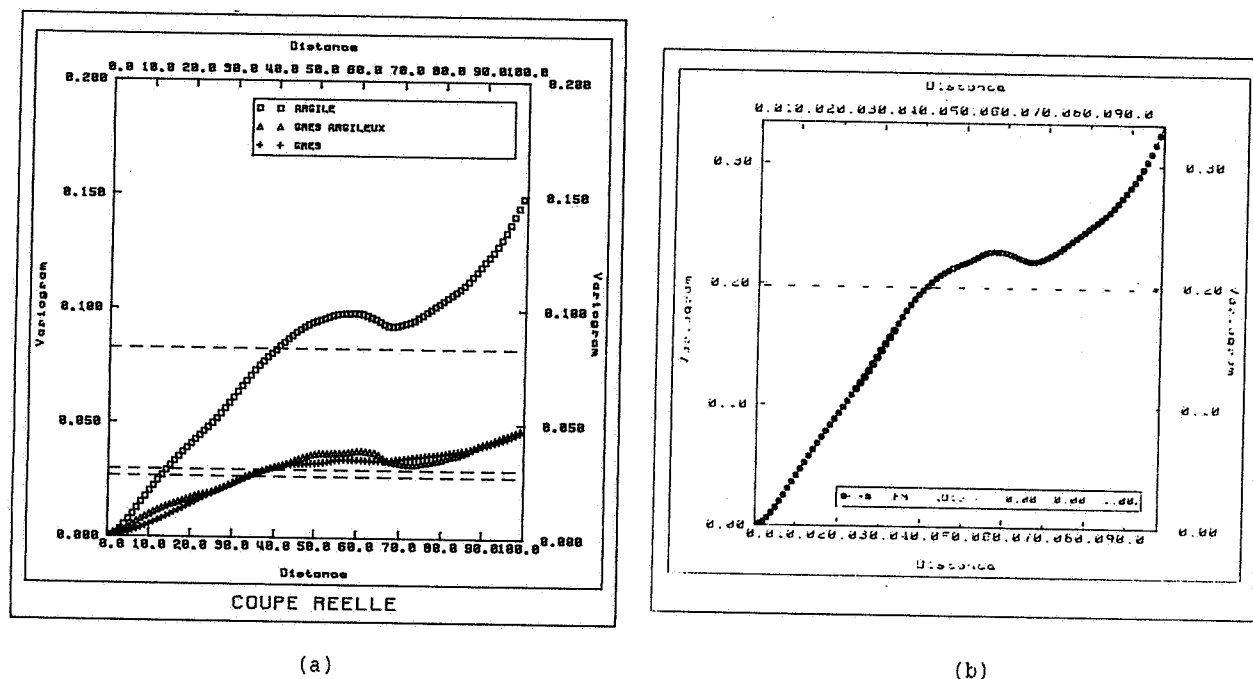


Figure 5. Variogrammes verticaux des faciès.

a) Proportions moyennées sur les 3 163 colonnes b) Faciès moyen calculé sur les 3 163 colonnes.

Nous faisons donc l'hypothèse que latéralement le phénomène est localement stationnaire: les proportions ont même espérance pour toutes les colonnes.

La stationnarité latérale permet de définir, pour chaque ligne, les deux seuils gaussiens par la relation A-7 (Figure 8) et l'anamorphose associée.

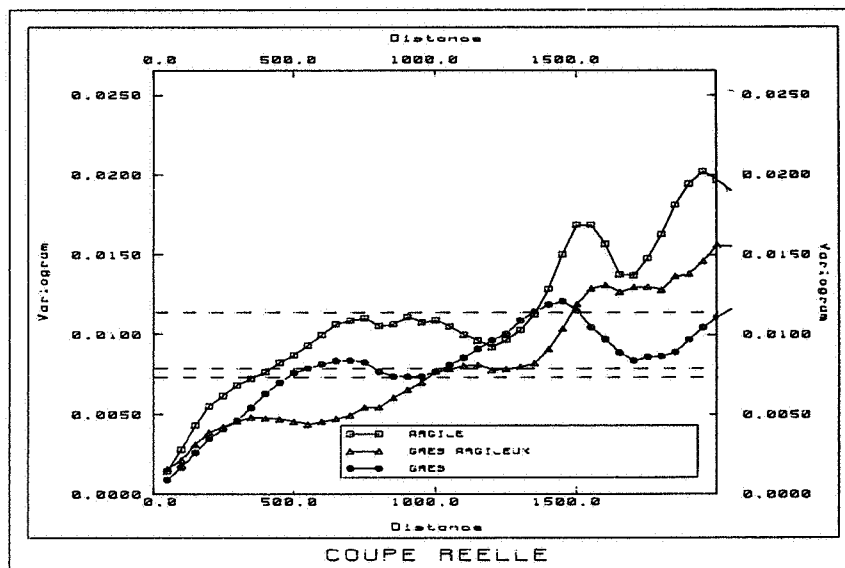
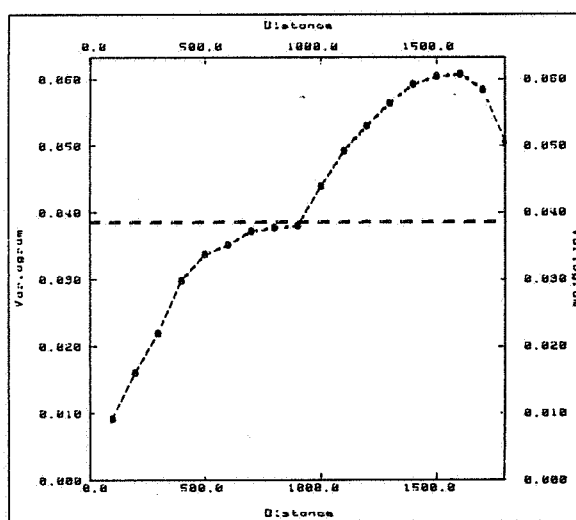


Figure 6. Variogrammes horizontaux des faciès.
a) Proportions calculées sur les 174 lignes.



b) Proportion relative de grès: $\text{grès}/(\text{grès} + \text{grès argileux})$

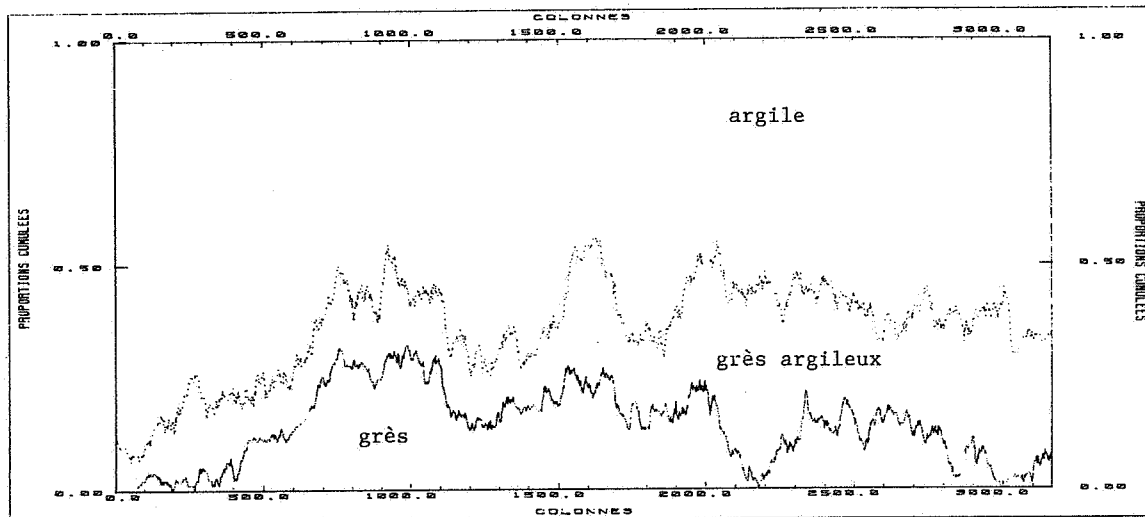


Figure 7. Proportions cumulées des trois faciès; direction horizontale.

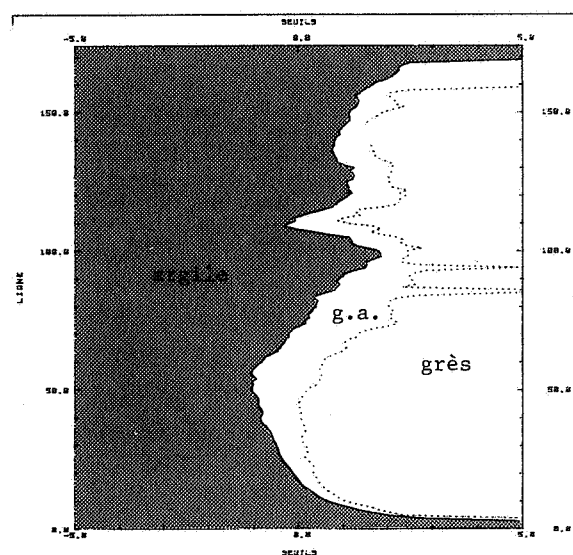


Figure 8. Seuils gaussiens en fonction de la cote verticale:
les deux seuils par ligne définissent les trois ensembles
(grès, grès argileux, argile)

2 - ANALYSE STRUCTURALE DE LA VARIABLE FACIÈS

La variable "numéro du faciès" n'étant pas stationnaire verticalement, les variogrammes ou les covariances dépendent de la ligne d'appui:

- pour chaque ligne, la covariance horizontale est stationnaire: $C_z(h_x)$
- la covariance verticale est non stationnaire, mais est identique pour toutes les colonnes: $C_{z_0}(z-z_0)$. Il en est de même pour les covariances transversales.

On simulera une fonction aléatoire stationnaire gaussienne, le passage aux valeurs des faciès se faisant par l'anamorphose non-stationnaire. Pour l'analyse structurale, on choisit un modèle pour $\rho(h)$, covariance stationnaire des gaussiennes; $C_z(h)$ s'en déduit par la relation habituelle qui s'écrit ici:

$$C_{z_0}(h_x, z-z_0) = \sum_{i=1}^2 g(a_{i,z}) \sum_{j=1}^2 g(a_{j,z_0}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{H_{n-1}(a_{i,z_0}) H_{n-1}(a_{j,z})}{n!} \rho^n(h_x, h_z) \quad [B-1]$$

En se limitant à quatre directions, on aurait ainsi $4 \times 174 = 696$ variogrammes à ajuster!

Le variogramme des régularisés verticaux des faciès permet d'alléger considérablement l'analyse structurale: on choisit ρ_z pour retrouver la variance des régularisés des faciès (sous réserve de la stationnarité latérale), puis ρ_x pour obtenir la bonne portée suivant Ox (Figures 9 et 10).

$$C_M(h_x) = \frac{1}{L^2} \sum_{k=1}^L \sum_{i=1}^{N-1} g(a_{k,i}) \sum_{\ell=1}^L \sum_{j=1}^{N-1} g(a_{\ell,j}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{H_{n-1}(a_{k,i}) H_{n-1}(a_{\ell,j})}{n!} \rho^n(h_x, \ell-k)$$

L : nombre de lignes

N : nombre de faciès

On vérifie ensuite l'ajustement pour quelques lignes dans les différentes directions (Figures 11, 12 et 13). Pour simplifier la simulation, nous cherchons la covariance stationnaire des gaussiennes comme un produit d'exponentielles:

$$\rho(h_x, h_z) = e^{-h_x/a} e^{-h_z/b}$$

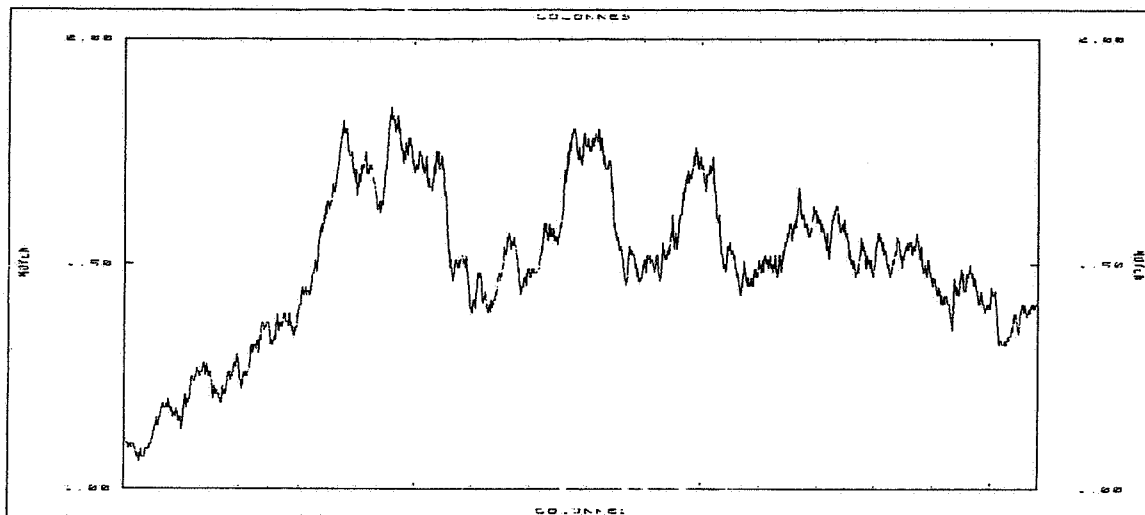


Figure 9. Valeur du faciès moyenné sur les 174 lignes.

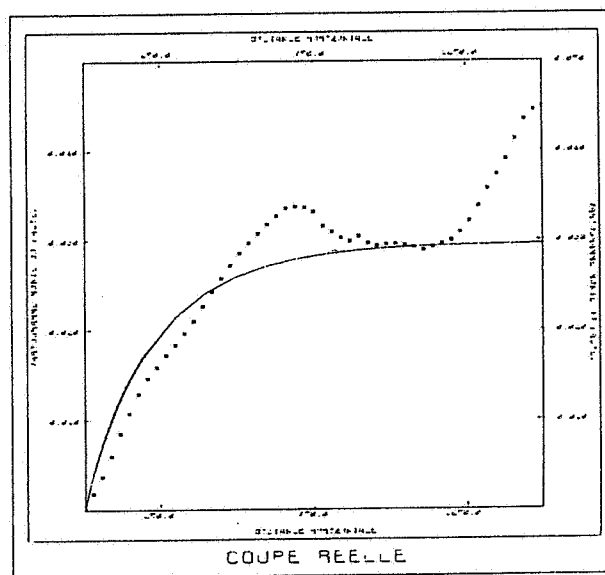
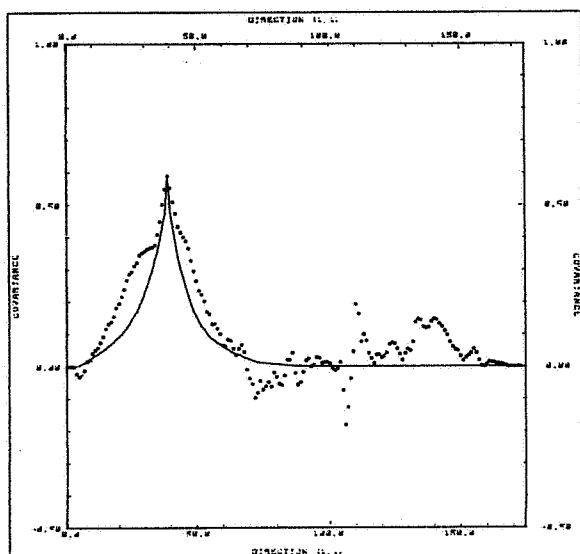
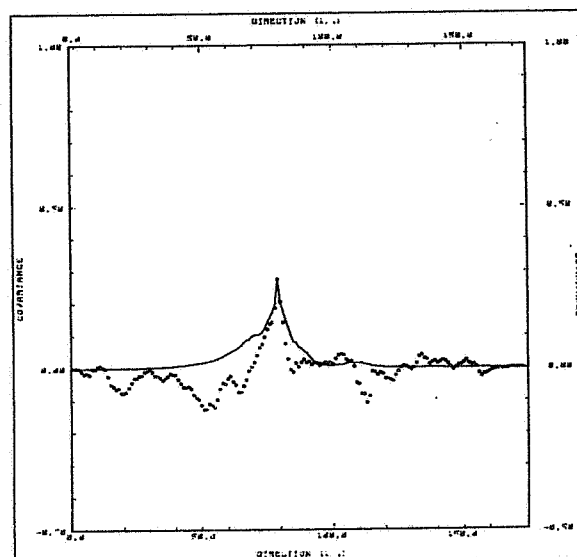


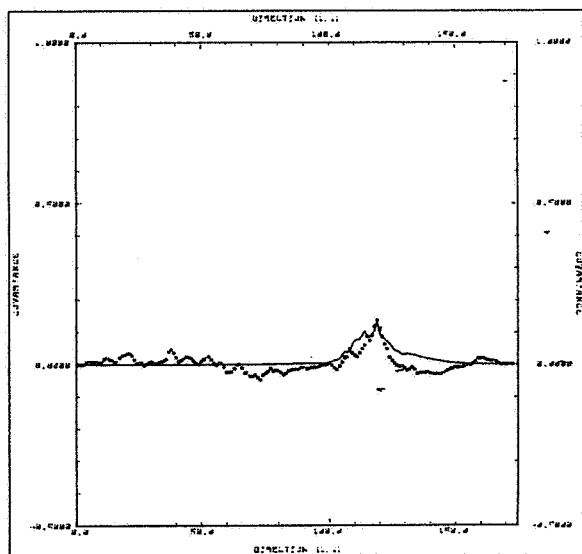
Figure 10. Variogramme horizontal de la valeur moyenne du faciès et ajustement.



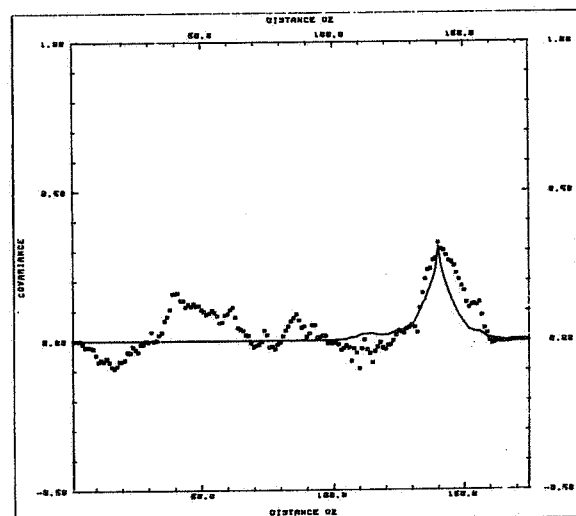
(a)



(b)



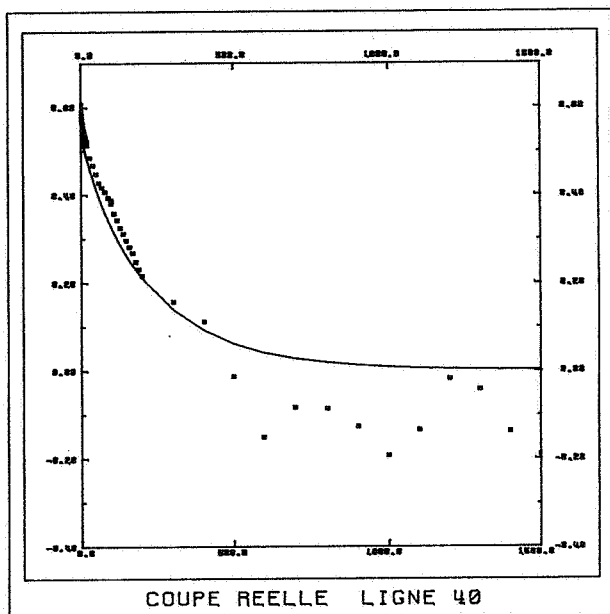
(c)



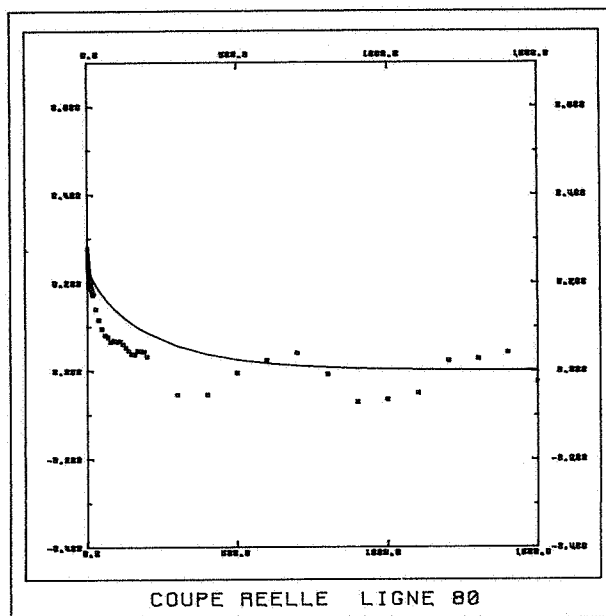
(d)

Figure 11. Covariances verticales non stationnaires et ajustement.

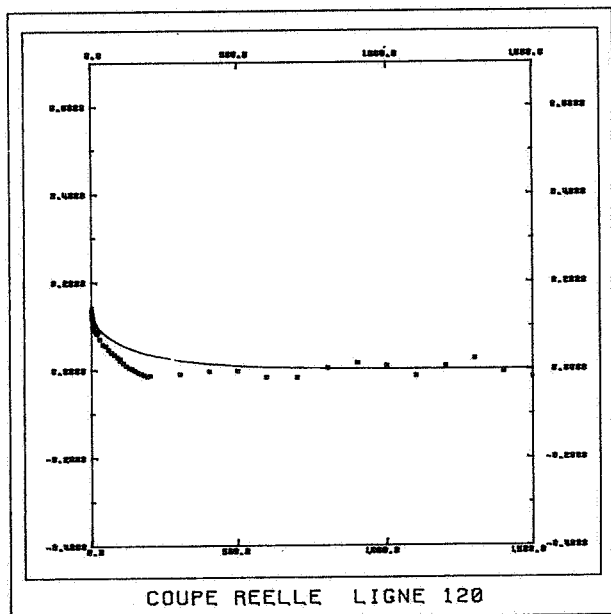
(a) ligne 40 (b) ligne 80
(c) ligne 120 (d) ligne 140



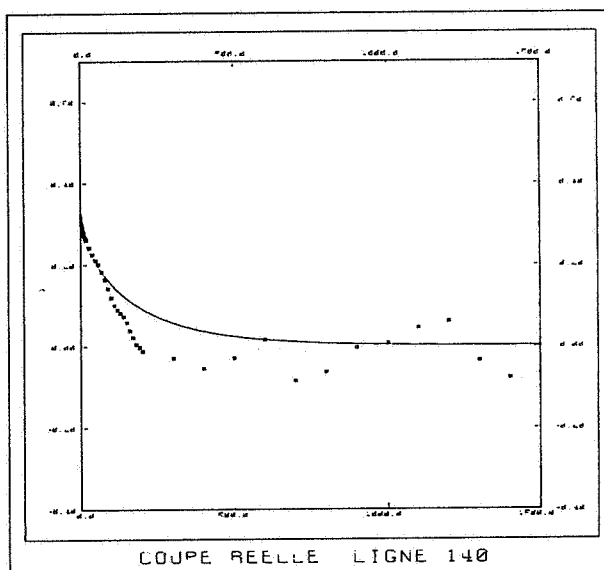
(a)



(b)



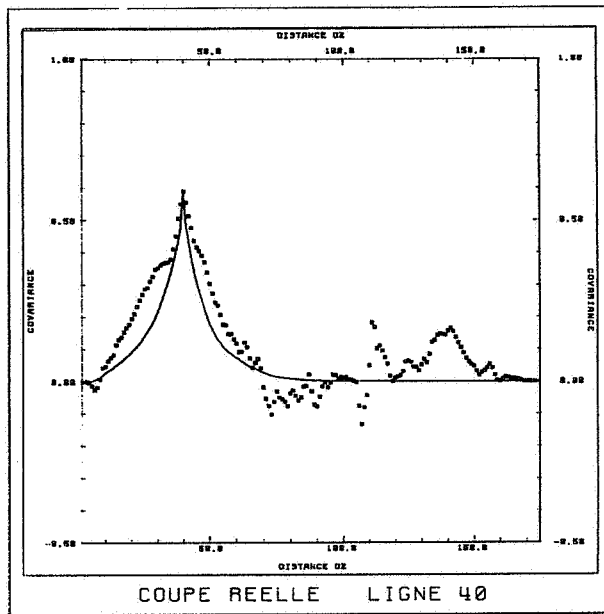
(c)



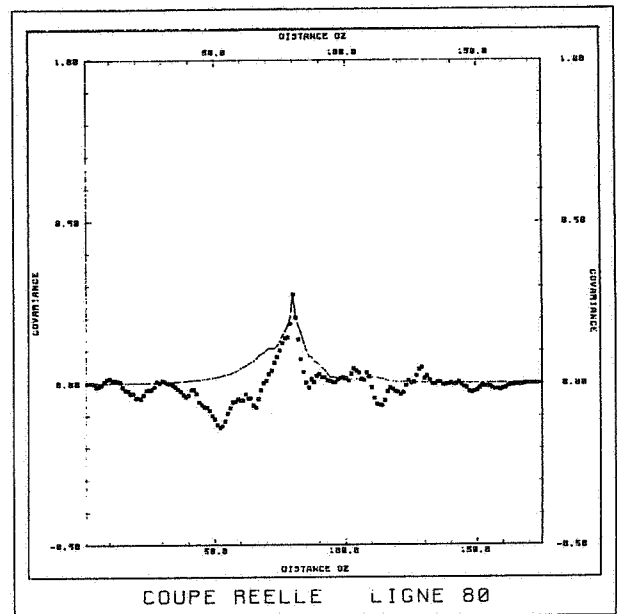
(d)

Figure 12. Covariances horizontales non stationnaires et ajustement.

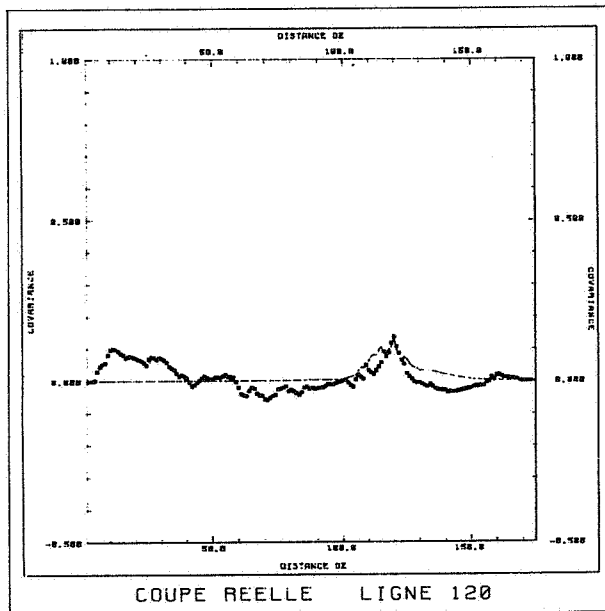
(a) ligne 40 (b) ligne 80
(c) ligne 120 (d) ligne 140



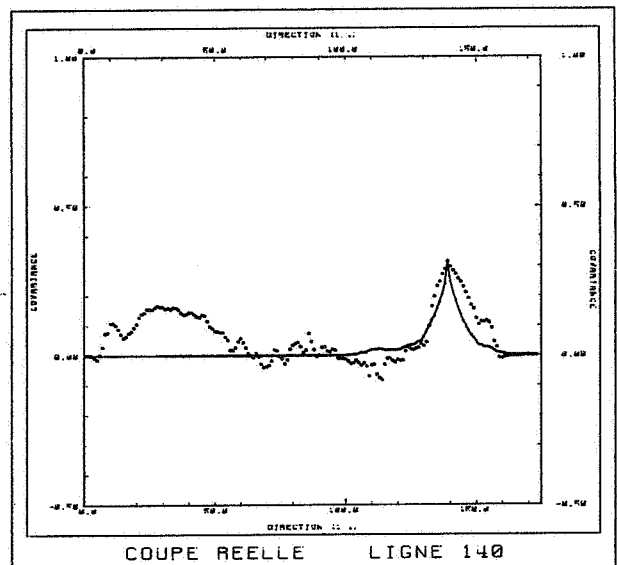
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 13. Covariances non stationnaires dans une direction intermédiaire et ajustement (direction: 1ère bissectrice).

L'ajustement est obtenu pour les portées suivantes:

horizontalement : $a = 249,5$ pas (portée pratique 748,5 pas)

verticalement : $b = 11,5$ pas (portée pratique = 35 pas)

Ceci donne la corrélation suivante entre deux points voisins:

horizontalement : $r = .996$

verticalement : $r = .917$

Les premières simulations sont effectuées avec ce modèle, qui devra être affiné par la suite.

D - SIMULATIONS

Dans cette première partie de l'étude, la covariance est connue seulement dans le plan vertical de la coupe. On fera l'hypothèse, qui sera nécessairement réétudiée par la suite, que la covariance se factorise en trois exponentielles suivant OX, OZ et OY, c'est-à-dire qu'elle reste similaire dans les plans perpendiculaires à la coupe.

1 - LES SIMULATIONS CONDITIONNELLES DE LA COUPE

Les simulations conditionnelles (Figure 14) reproduisent les principales caractéristiques de la coupe: forte continuité latérale du banc gréseux et gréso-argileux à la base, avec des amincissements locaux du grès, passées intermédiaires plus argileuses et argilo-gréseuses, chenaux gréseux épars vers le haut. L'allure générale des dépôts sédimentaires est bien restituée par la covariance utilisée. La répartition verticale des faciès est fixée par les variations verticales des seuils. Les simulations présentent des inclusions nombreuses, et des contours localement plus irréguliers que l'image de départ. Ceci résulte également du choix de la covariance, et est adapté au comportement réel à petite distance, la réalité ayant été volontairement lissée pour l'interprétation.

La première simulation est conditionnée par deux verticales distantes de 3 000 pas (environ 500 mètres, soit presque toute la largeur de la coupe), les suivantes par deux verticales distantes de 1 500 pas, la portée pratique étant d'environ 750 pas. Dans la pratique, les forages sont rarement, sinon jamais, aussi resserrés. Dans les trois cas, le banc gréseux inférieur présente une discontinuité locale; la présence de passées gréseuses sur les sondages n'implique donc pas nécessairement une bonne corrélation. Les niveaux intermédiaires sont plus gréseux dans le dernier cas que pour les deux premiers: malgré un resserrement des deux verticales conditionnantes, il reste des fluctuations importantes. En resserrant la conditionnalisation à 60 mètres environ, on se rapproche de l'allure locale. Mais là encore, des fluctuations non négligeables sont possibles.

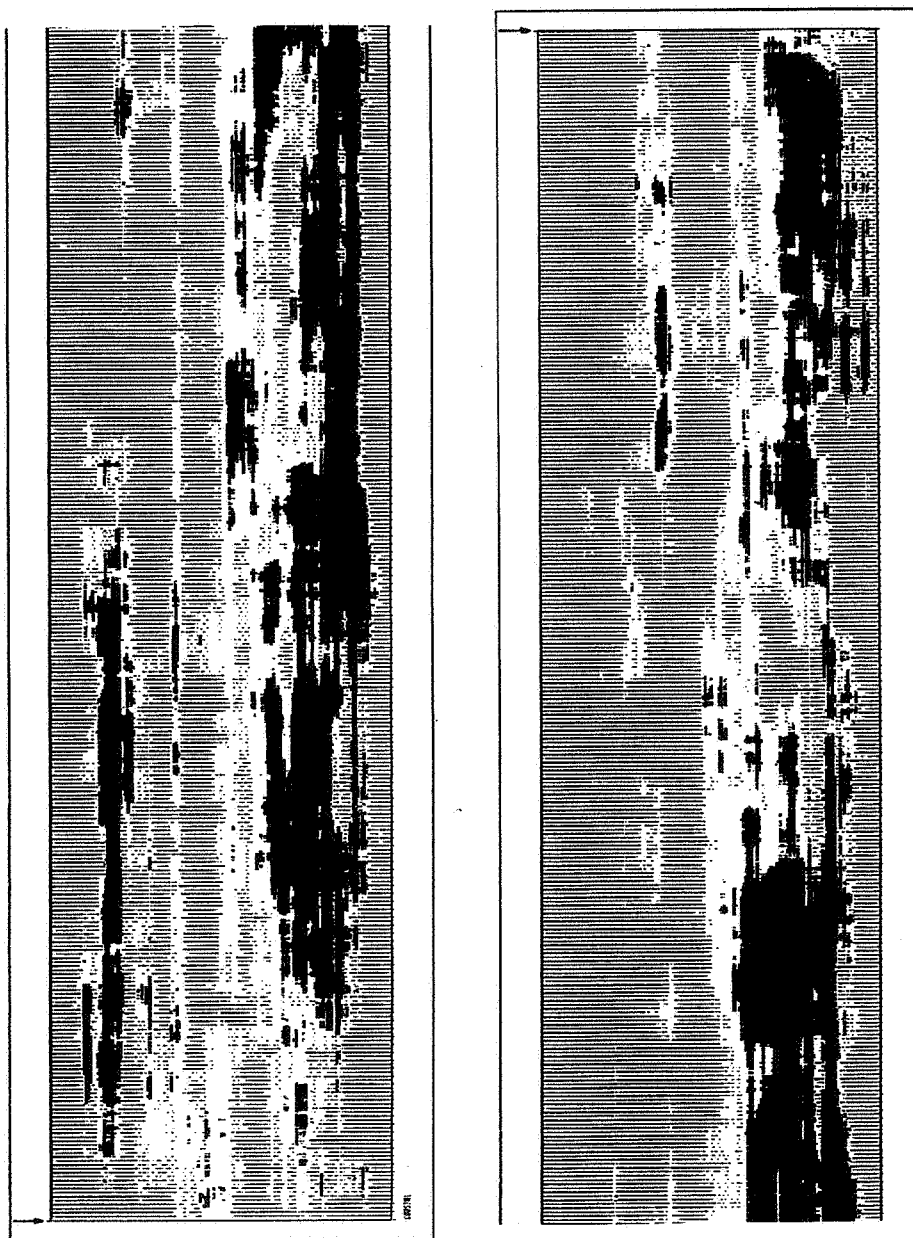


Figure 14. Simulations conditionnelles de la coupe verticale
(échelle horizontale/échelle verticale ≈ 3).

(a) 2 colonnes conditionnantes aux extrémités espacées de 3 000 pas
(hauteur ≈ 30 mètres, longueur ≈ 500 mètres)

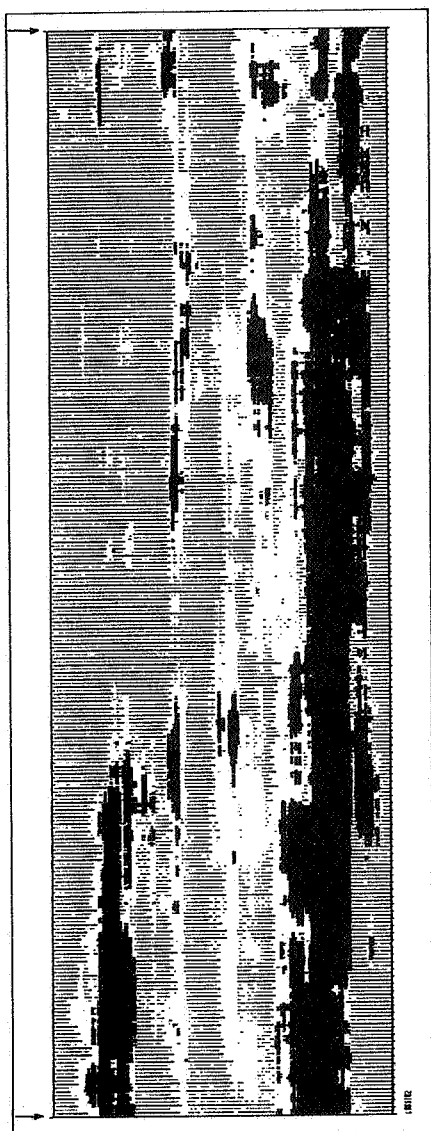


Figure 14(b).

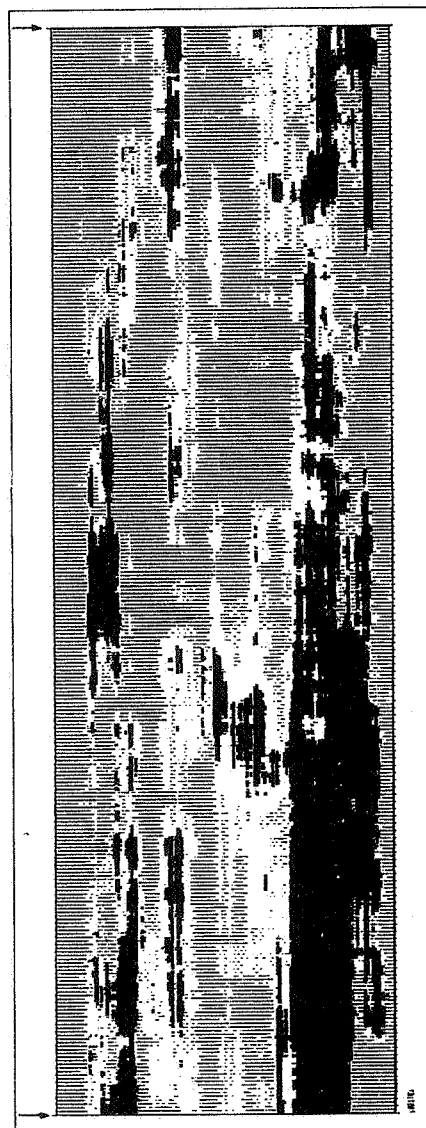


Figure 14(c).

2 colonnes conditionnantes espacées de 1 500 pas

(hauteur $\approx$ 30 mètres, longueur $\approx$ 250 mètres)

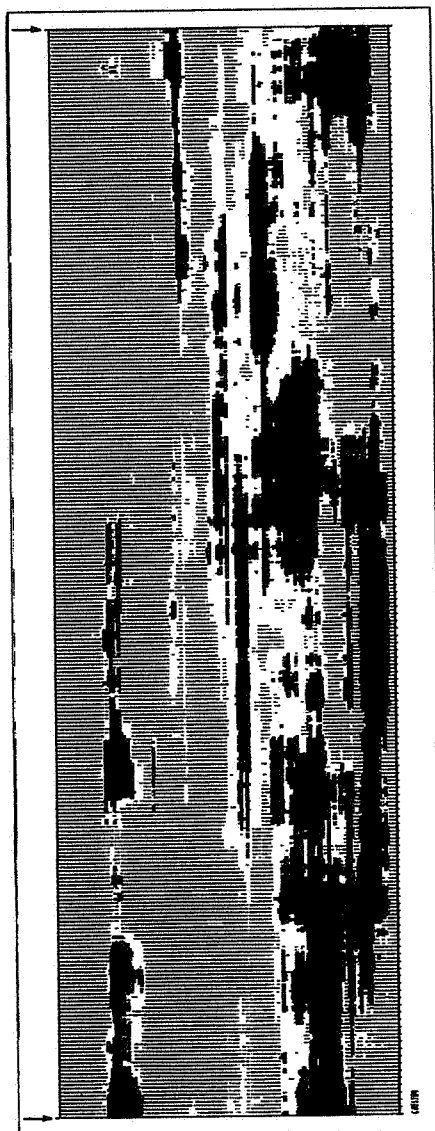
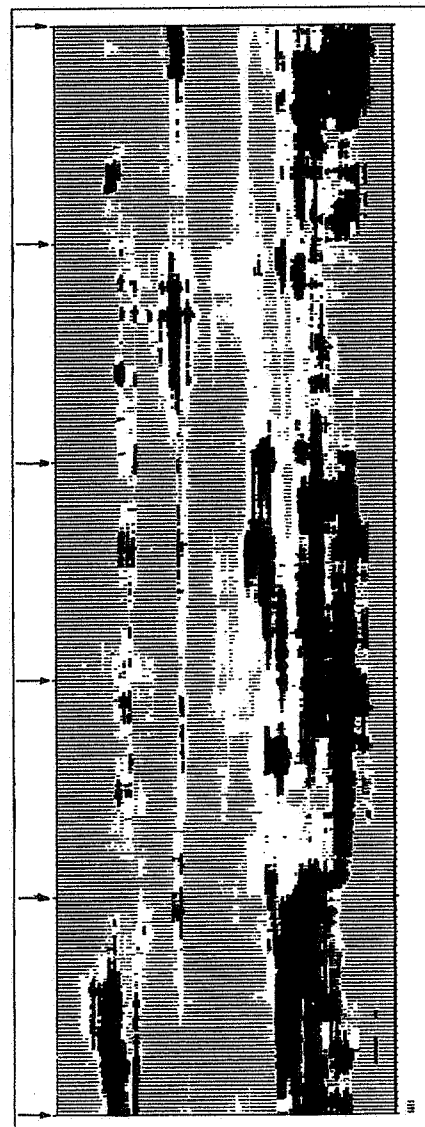


Figure 14(d).

2 colonnes conditionnantes espacées de 1 500 pas



6 colonnes conditionnantes espacées de 300 pas

Figure 14(e).

2 - SIMULATIONS DANS UN PLAN VERTICAL PERPENDICULAIRE A LA COUPE

Nous ne connaissons pas la covariance dans ce plan. Nous faisons donc l'hypothèse qu'elle garde la même forme que dans le plan de la coupe; la direction OY perpendiculaire au plan de la coupe est considérée comme approximativement la direction des apports. Pour prendre en compte cette hypothèse, la portée pratique horizontale en OY est étendue de 750 à environ 1 000 pas. La figure 15 présente des simulations se calant aux colonnes 500, 1 000 et 1 500 de la coupe, réalisées indépendamment l'une de l'autre. On retrouve une continuité longitudinale importante des bancs gréseux pourvu que la trace gréseuse de la verticale conditionnante soit suffisamment épaisse. L'influence de la conditionnalisation est ici très nette, entre l'extrémité plus argileuse de la coupe (colonne 500), et le centre plus gréseux (colonne 1 500).

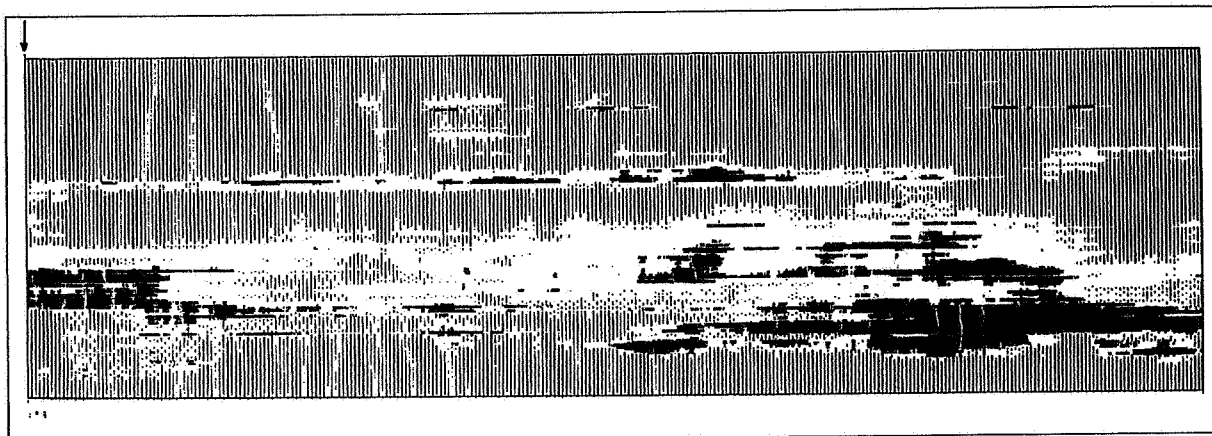
3 - SIMULATION DANS LE PLAN HORIZONTAL

En conservant la même covariance en OY, nous simulons indépendamment trois niveaux horizontaux, en nous calant aux lignes correspondantes de la coupe. Pour une simulation, les seuils gaussiens sont donc constants, et sont donnés par les proportions expérimentales pour la ligne choisie. Les simulations (Figure 16) dépendent fortement de la ligne retenue, suivant que le niveau est plutôt gréseux ou argileux. L'anisotropie des nappes gréseuses ou argileuses qui apparaissent dépend de la portée retenue pour la covariance. La géométrie met clairement en évidence le rôle des axes OX et OY; dans ce plan, un autre modèle de covariance, non nécessairement factorisée, devra probablement être recherché.

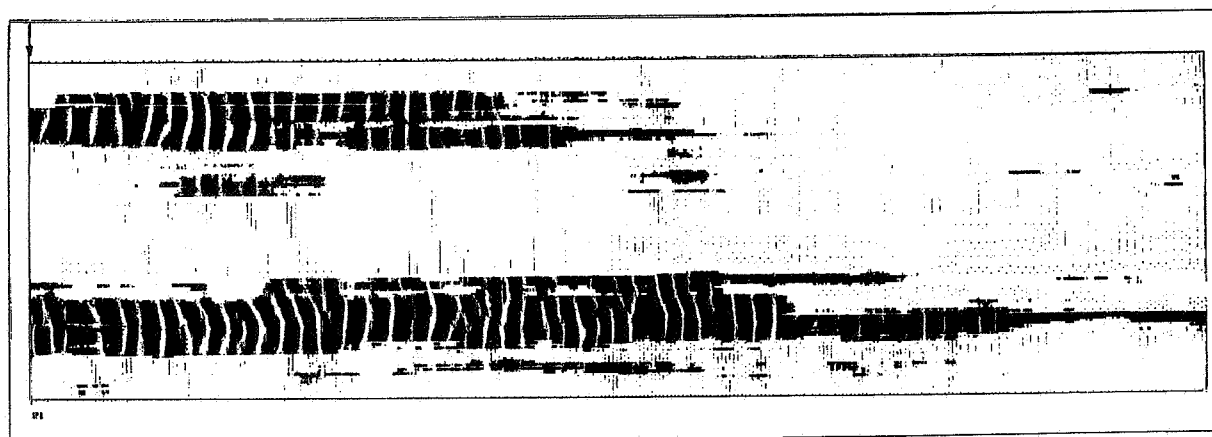
4 - SIMULATION DE COUPES EN ARRIERE DE LA FALAISE

Connaissant quelques "sondages" effectués dans la coupe, il est intéressant de simuler non seulement la géométrie possible entre sondages, mais aussi dans des coupes situées en arrière de la falaise. La figure 17 présente quatre coupes successives: la première est échantillonnée régulièrement à 300 pas, les coupes suivantes sont régulièrement espacées de 250 pas, soit environ 50 mètres. Il sera intéressant de reprendre ces simulations quand les sondages effectués en arrière de la falaise seront disponibles.

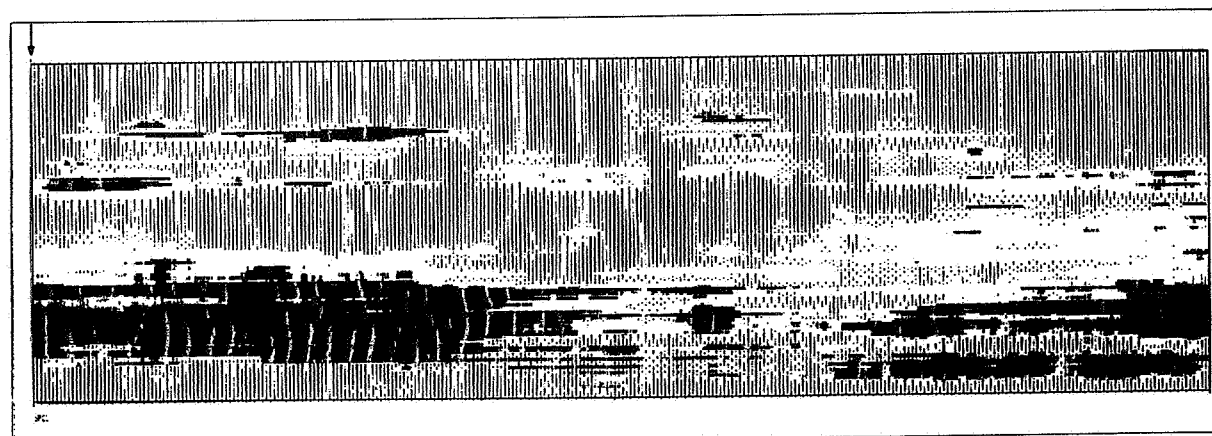
La géométrie dans la direction verticale diffère nettement de la géométrie dans le plan horizontal: celle-ci est supposée stationnaire, les portées y sont de 150 à 200 mètres environ, contre 7 mètres suivant la verticale. Ceci met en évidence les problèmes de reconnaissance habituellement rencontrés pour la caractérisation des réservoirs pétroliers.



(a) Calage à la colonne 500



(b) Calage à la colonne 1 000



(c) Calage à la colonne 1 500

Figure 15. Simulation: coupe verticale perpendiculaire à la falaise
(échelle verticale/échelle horizontale ≈ 3).
(hauteur ≈ 30 mètres, longueur ≈ 250 mètres)

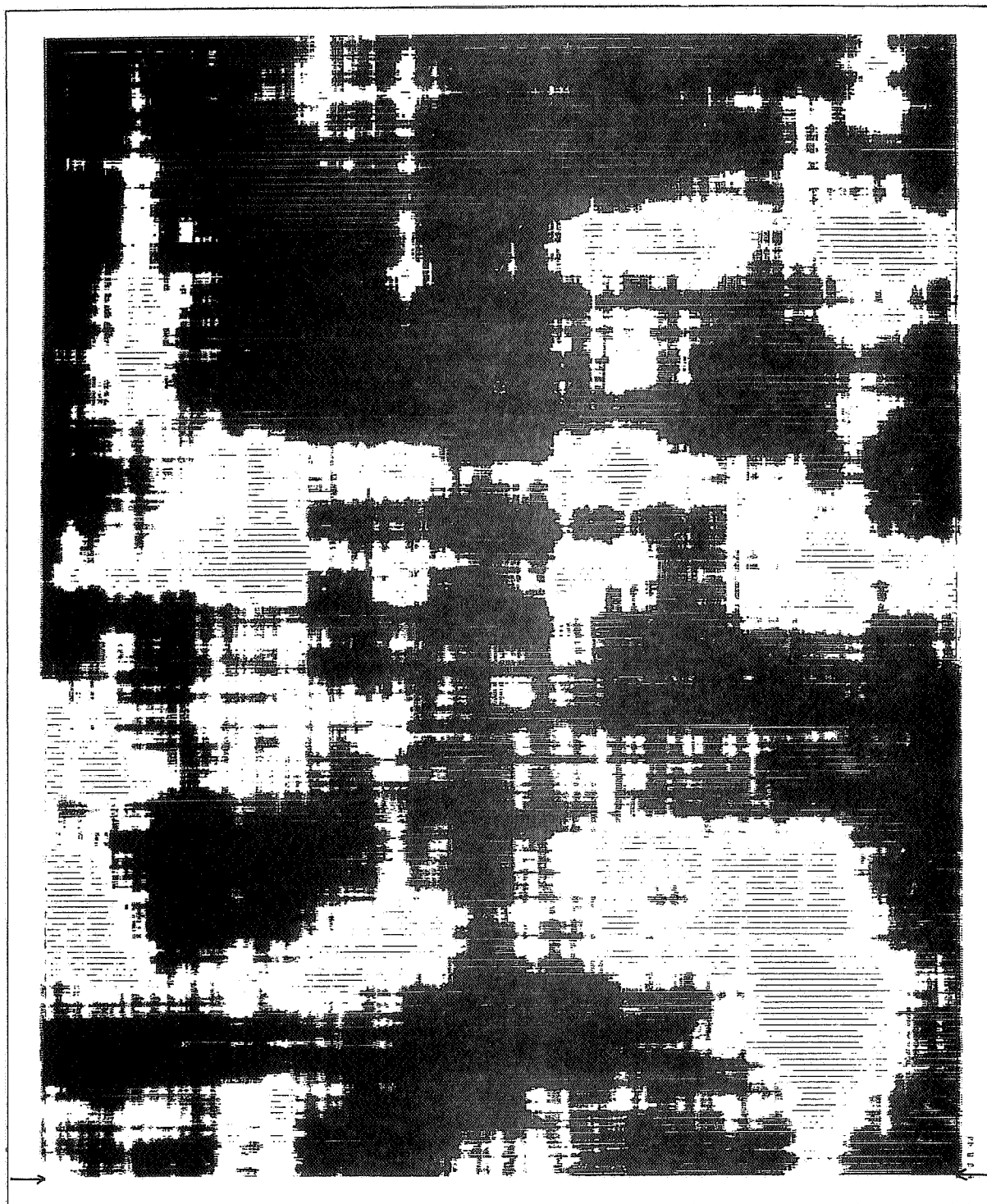


Figure 16. Simulation: coupe horizontale perpendiculaire à la falaise
(rapport des échelles ≈ 1).

(a) Base: calage à la ligne 40 (A=: 19%, GA: 33%, G: 48%).

(longueur ≈ 250 m, profondeur ≈ 330 m)



Figure 16.

(b) Calage à la ligne 60 (A: 20%, GA: 51%, G: 29%).



Figure 16.

(c) Calage à la ligne 80 (A: 65%, GA: 33%, G: 2%).



Figure 16.

(d) Banc supérieur: calage à la ligne 110 (A: 41%, GA: 45%, G: 14%).

E - EXEMPLES

Nous présentons maintenant quelques simulations, dans un esprit un peu plus académique. Le but est de montrer l'importance de l'information sur l'image du réservoir que l'on construit.

1 - REPARTITION VERTICALE DES FACIES

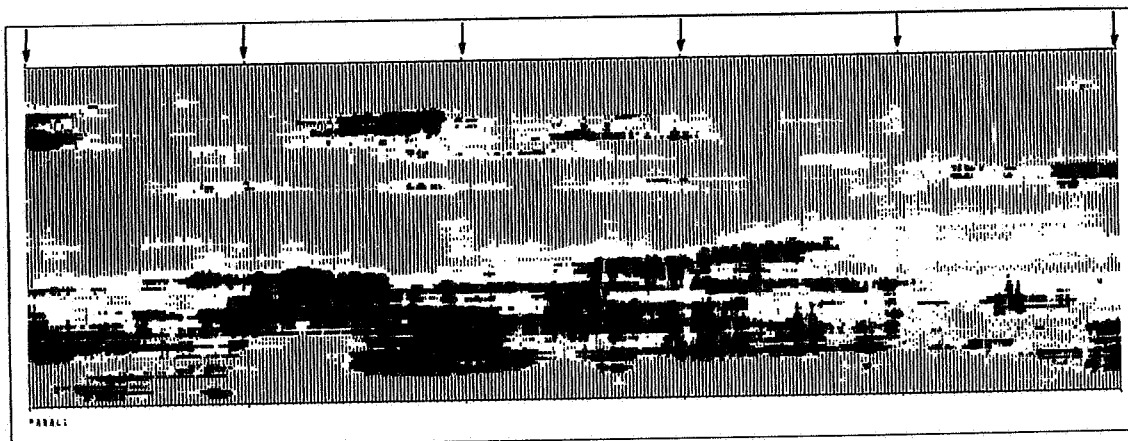
Supposons que nous connaissions seulement les proportions moyennes d'argile, de grès argileux et de grès, et non plus leur répartition verticale. Alors, la figure 18 montre que les simulations conditionnelles présentent un tout autre aspect, bien que la même covariance stationnaire ait été conservée. La continuité du banc gréseux de la base n'est plus assurée. La figure 19 montre la sensibilité des images aux valeurs des proportions.

2 - INFLUENCE DE LA COVARIANCE

Dans une exploitation réelle, on ne disposera en général que de quelques puits éloignés les uns des autres. La covariance horizontale à petite ou même moyenne distance est inconnue. La figure 20 montre différentes simulations, la portée pratique de la covariance stationnaire horizontale variant de 25 à 2500 mètres environ. La covariance verticale, ainsi que la répartition verticale des faciès restent inchangées.

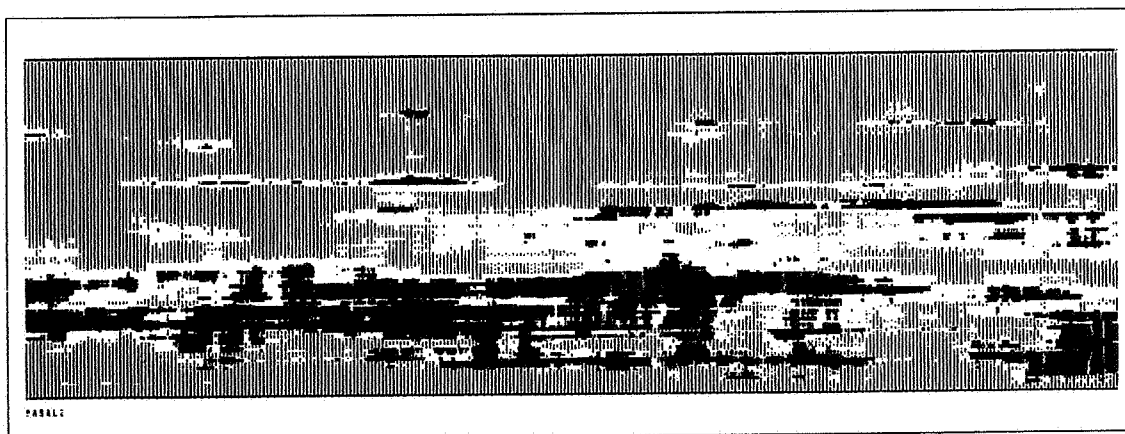
F - CONCLUSION

Notre objectif est de montrer ici les potentialités de la méthode, à travers la première application. Il est clair que de nombreux tests restent à effectuer; mais la validité "visuelle" des premières simulations est importante, même si des améliorations sont à prévoir: aspect très linéaire des bancs, à adapter à l'aspect plus ondulé de la base du banc réel. Plus importante est l'extension de la méthode de simulation à d'autres types de covariance, tout en cherchant à conserver une grande rapidité de calculs, pour garder un outil facilement adaptable aux besoins des géologues.



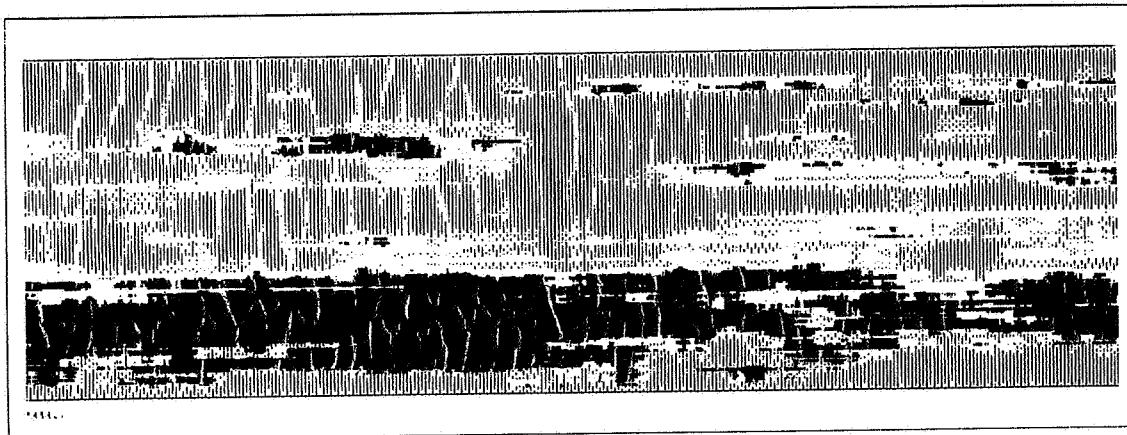
(a) 6 verticales conditionnantes - plan de la coupe

(hauteur $\approx$ 30 mètres, longueur $\approx$ 250 mètres)

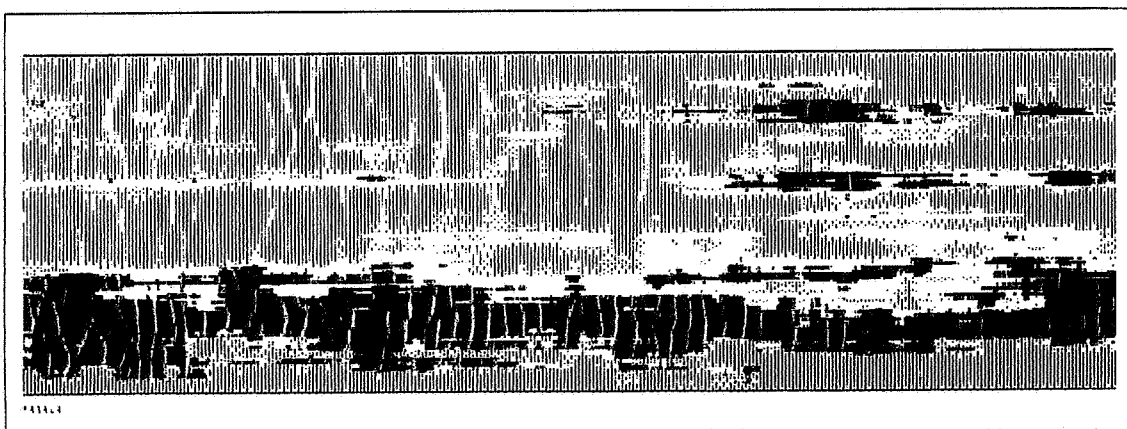


b) 250 pas en arrière de la falaise (environ 50 mètres)

Figure 17. Simulations: coupes verticales en arrière de la falaise
(échelle verticale/échelle horizontale $\approx$ 3).



(c) 500 pas en arrière de la falaise (environ 100 mètres)



(d) 750 pas en arrière de la falaise (environ 150 mètres)

Figure 17. Simulations: coupes verticales en arrière de la falaise
(échelle verticale/échelle horizontale ≈ 3).

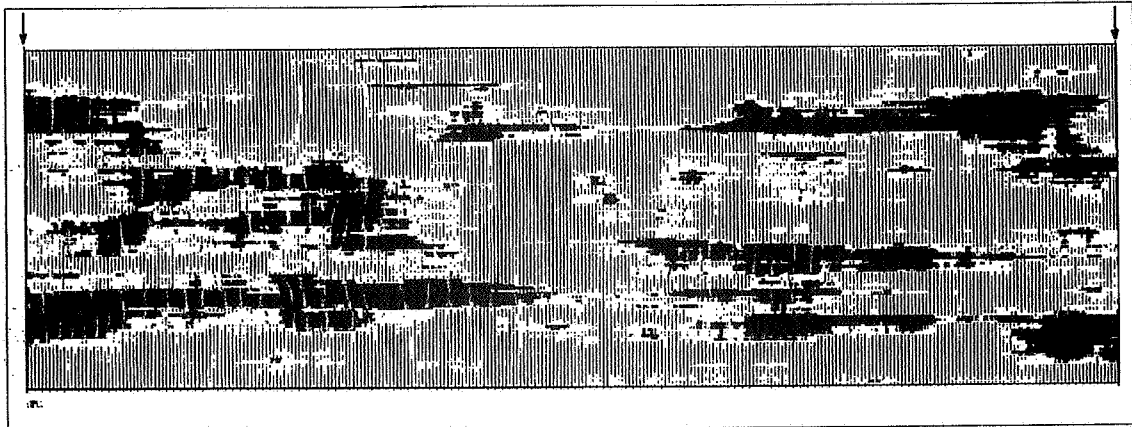


Figure 18(a).

(hauteur $\approx$ 30 mètres, longueur $\approx$ 250 mètres)

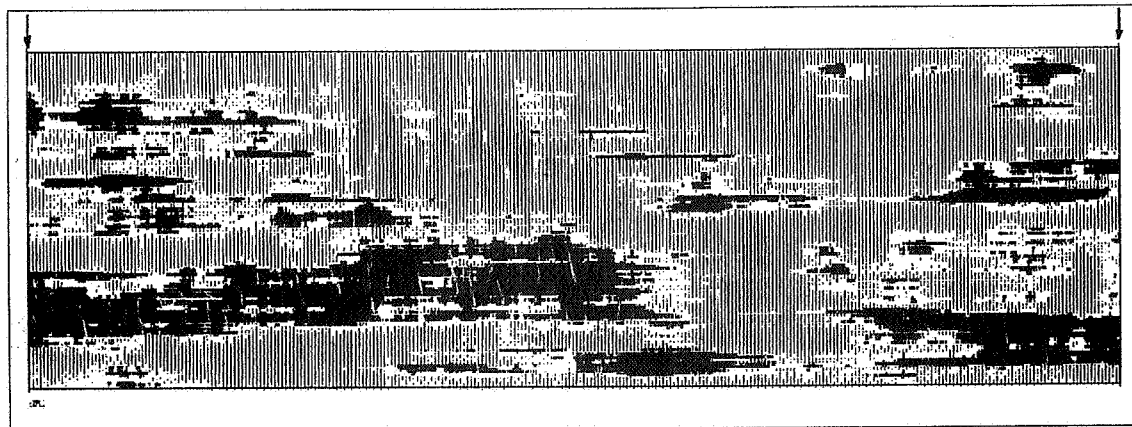


Figure 18(b).

Figure 18. Exemple de stationnarité de la répartition verticale des faciès -
Même covariance des gaussiennes (échelle verticale/échelle horizontale $\approx$ 3).

Référence: A:64%, GA: 22%, G: 14%

(a) et (b): Deux colonnes conditionnantes.

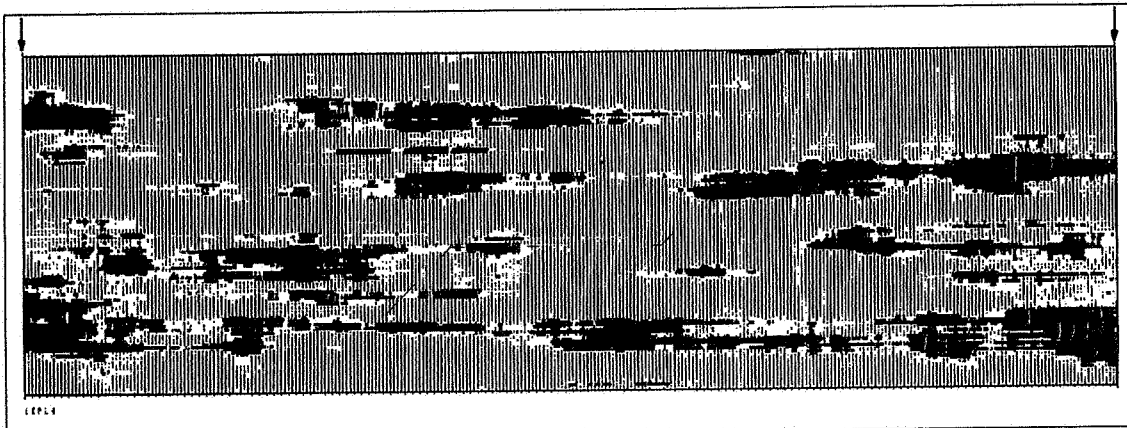


Figure 19(a).

(hauteur $\approx$ 30 mètres, longueur $\approx$ 250 mètres)

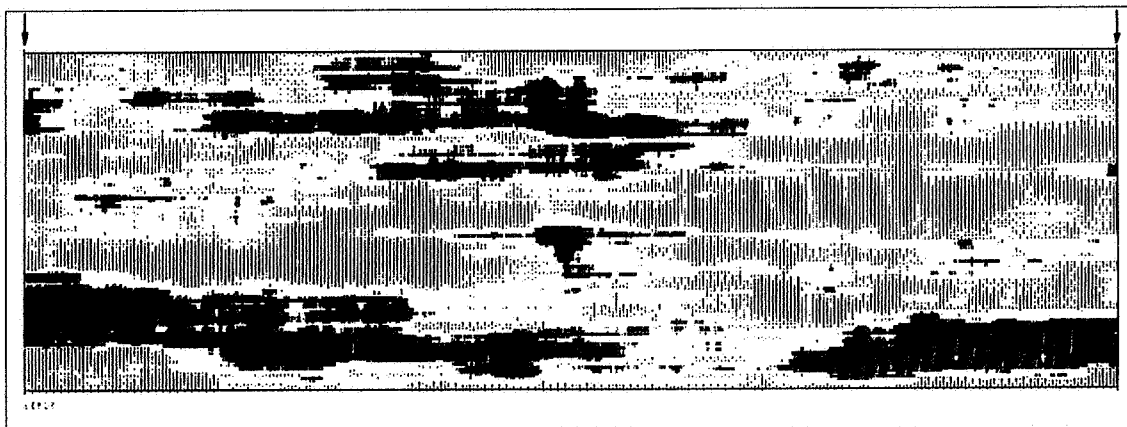


Figure 19(b).

Figure 19. Exemple: stationnarité de la répartition verticale des faciès -
Modification des proportions

Même covariance des gaussiennes (échelle verticale/échelle horizontale $\approx$ 3)

Deux colonnes conditionnantes.

(a) Augmentation de la proportion d'argile: A: 45%, GA: 15%, G: 10%

(Résultat: A: 69%, GA: 17%, G: 14%).

(b) Augmentation de la proportion de grès argileux: A: 35%, GA: 50%, G: 15%

(Résultat: A: 37%, GA: 45%, G: 18%)

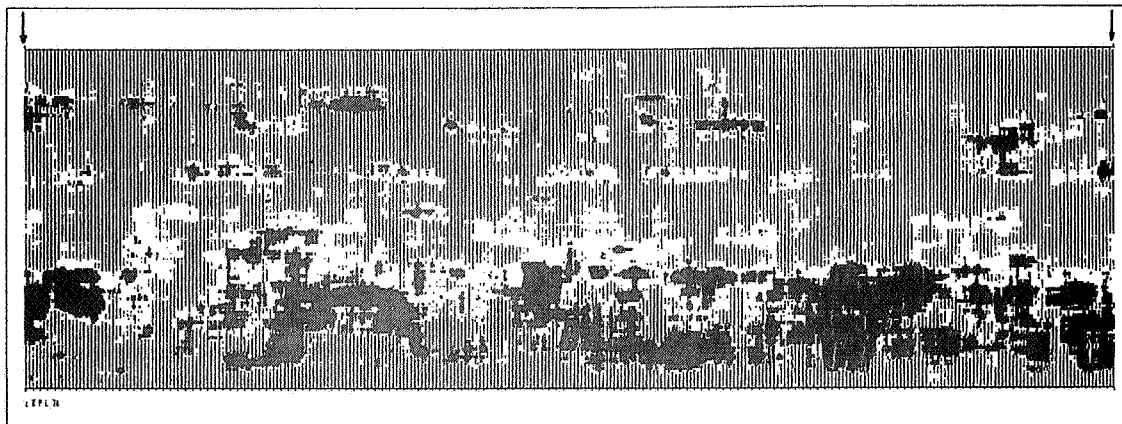


Figure 20(a). Portée pratique: $ap = 125$ pas - Deux verticales conditionnantes.

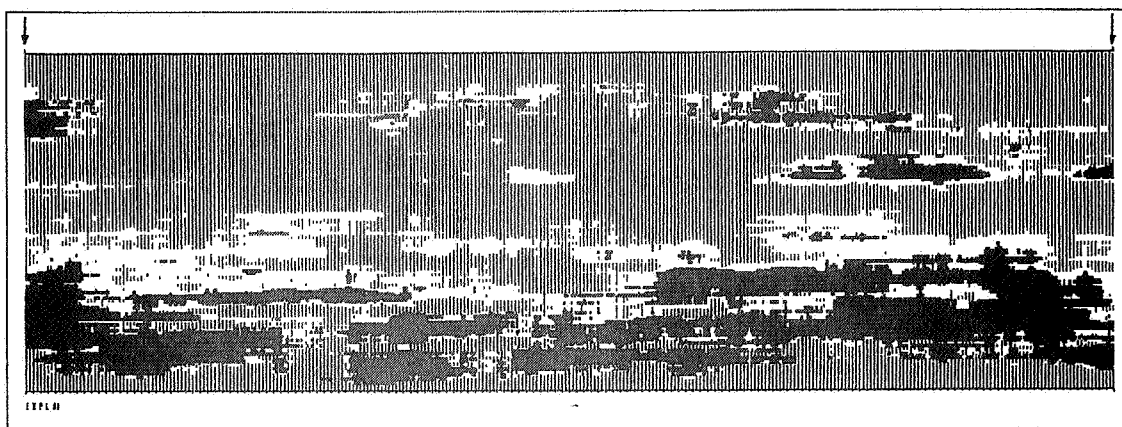


Figure 20(b). Portée pratique: $ap = 500$ pas.

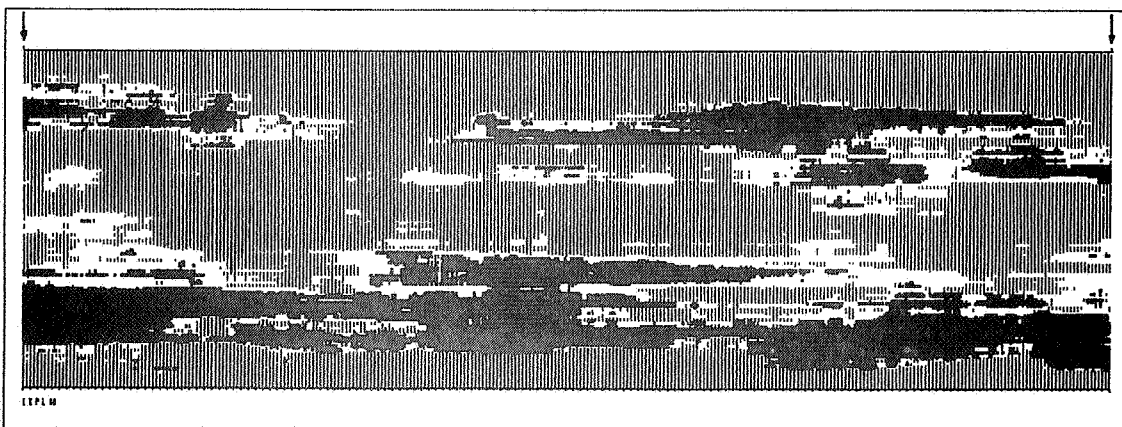


Figure 20(c). Référence - Portée pratique: $ap = 750$ pas - Deux verticales conditionnantes.

(hauteur ≈ 30 mètres, longueur ≈ 250 mètres)

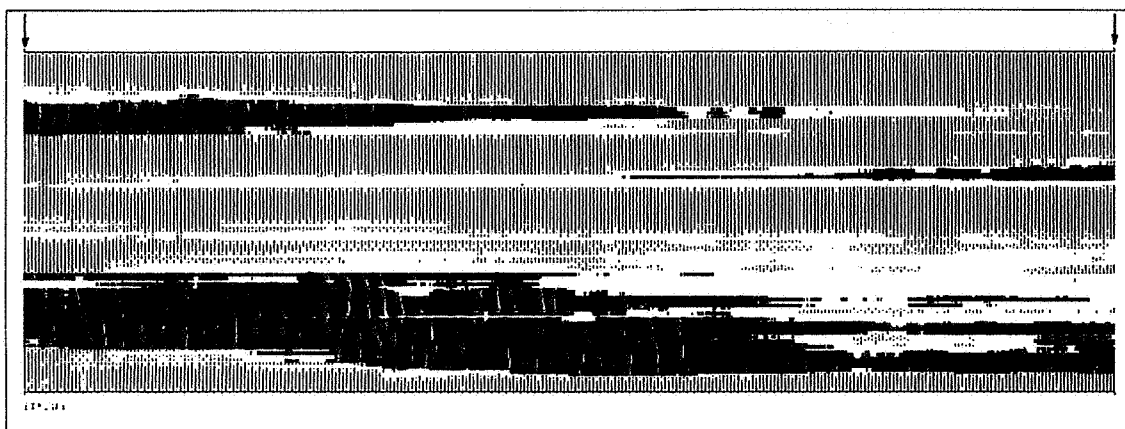


Figure 20(d). Portée pratique: $ap = 12\ 500$ pas - Deux verticales conditionnantes.

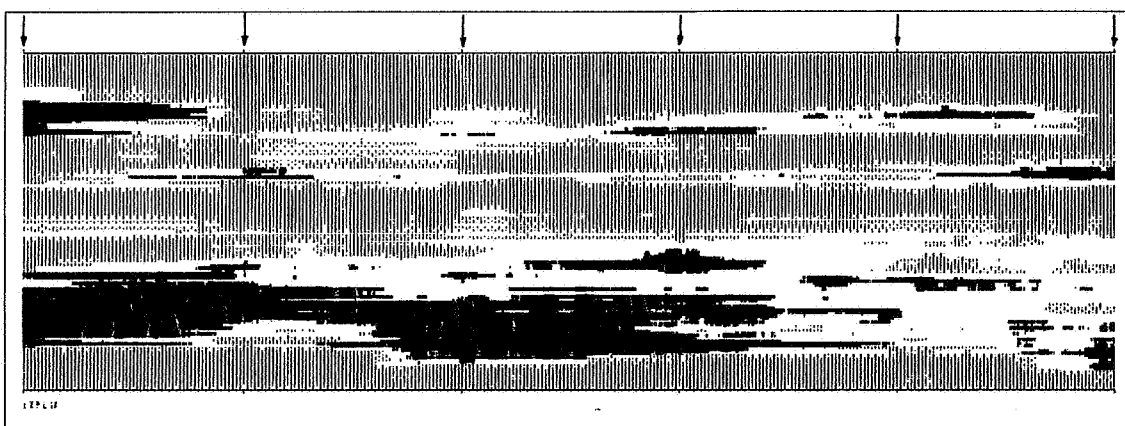


Figure 20(e). Portée pratique: $ap = 12\ 500$ pas - Six verticales conditionnantes.
(hauteur ≈ 30 mètres, longueur ≈ 250 mètres)

Figure 20. Exemple: Modification de la portée horizontale - Même répartition verticale -
Non stationnarité des faciès (échelle verticale/échelle horizontale ≈ 3)

REFERENCES

- MONTADERT L.- La sédimentologie et l'étude détaillée des hétérogénéités d'un réservoir. Application au gisement d'Hassi-Messaoud. Comptes rendus du Ier Colloque de l'A.R.T.F.P. Rueil-Malmaison, 10-14 juin 1963, Ed. Technip, Paris, 1963, p. 241-257.
- GROULT J. et al.- Reservoir Inhomogeneities Deduced from Outcrop Observations and Production Logging. Institut Français du Pétrole, Publication de la Division Géologie N° 122, Juillet 1966.
- TOMUTSA L. et al.- Geostatistical Characterization and Comparison of Outcrop and Subsurface Facies: Shannon Shelf Sand Ridges - Article SPE-15107, présenté au 56th California Regional Meeting in Oakland, L.A., April 2-4, 1986.
- RAVENNE C. et al.- Heterogeneities and geometry of sedimentary bodies in a fluvio-deltaic reservoir - Article SPE à paraître au 62nd Annual Conference in Dallas, Texas, Sept. 27-30, 1987.
- MATHERON G. et al.- Conditional simulation of the geometry of fluvio-deltaic reservoirs - Article SPE à paraître au 62nd Annual Conference in Dallas, Texas, Sept. 27-30, 1987.
- MATHERON G.- Les processus d'Ambarzoumian et leur application en géologie - Note interne, Centre de Géostatistique, ENSMP, Fontainebleau, 1969.
- JACOD J. et JOATHON P.- The use of random genetic models in the study of sedimentary processes - Journal of Association for Mathematical Geology, Vol. 3, N° 3, 1971.
- BOUCHET R.- Simulation d'une sédimentation fluvio-deltaïque - Centre de Géostatistique, ENSMP, Fontainebleau, 1985.
- MATHERON G.- La théorie des variables régionalisées et ses applications, Fasc. 5, Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique, Ecole des Mines de Paris, Fontainebleau, 1970.
- RIVOIRARD J.- Le comportement des poids de krigeage, Thèse de Docteur-Ingénieur, ENSMP, Fontainebleau, 1984.

