

CHOIX DES LIGNES DE CORRELATION STRATIGRAPHIQUE POUR LES SIMULATIONS CONDITIONNELLES DE LITHOFACIES

C.de FOUQUET *, A. IKONOMI *, H. BEUCHER * et Groupe HERESIM **

TABLE DES MATIERES

RESUME	89	1. Brève description géologique	99
ABSTRACT	89	2. Division de la simulation suivant les deux zones	100
ZUSAMMENFASSUNG	89	3. Calcul des courbes de proportions	100
A - INTRODUCTION	90	a. Unité A5	103
B - LIMITES DE RESERVOIRS ET LIGNES DE CORRELATION STRATI- GRAPHIQUE : UN EXEMPLE TYPE .	90	b. Unité A4	103
1. Bref rappel des paramètres des simulations	93	4. Variogramme horizontal	104
2. Principales unités lithostratigraphiques de Long Nab	93	a. Unité A5	104
3. Simulations	95	b. Unité A4	104
4. Conclusion	99	5. Variogrammes verticaux	109
C - CHOIX DES LIGNES DE CORRELA- TION STRATIGRAPHIQUE PAR L'ETUDE GEOSTATISTIQUE	99	D - QUELQUES SIMULATIONS	109
		1. Comparaison de quelques coupes verticales	109
		2. Statistiques sur plusieurs simulations ..	115
		E - CONCLUSION	117
		BIBLIOGRAPHIE	117

* Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre de Géostatistique - 35, rue Saint-Honoré,
77305 FONTAINEBLEAU (FRANCE)

** HERESIM : Nom de l'association de l'Institut Français du Pétrole et du Centre de Géostatistique
de l'Ecole des Mines de Paris concernant l'étude des réservoirs hétérogènes.

ILLUSTRATIONS

Figure B-1 : Géométrie des dépôts et des surfaces limites	91
Figure B-2 : Affleurement à Long-Nab. Représentation discrétisée en 4 lithofaciès	91
Figure B-3-0 : Transformation de la zone inférieure pour reproduire la géométrie des contacts	91
Figure B-3-1 : Affleurement à Long-Nab. Géométrie des dépôts après transformations	92
Figure B-3-2 : Proportions des lithofaciès calculées le long de la verticale	92
Figure B-3-3 : Simulation conditionnée par 3 puits	94
Figure C-1 : Carte géologique schématique de Vendburimi A	96
Figure C-2 : Présence-absence des argiles	97
Figure C-3 : Limite des deux couches	97
Figure C-4 : Courbes de proportions de l'unité A5	98
Figure C-5 : Courbes de proportions dans le plan horizontal	101
Figure C-6 : Courbes de proportions de l'unité A4	102
Figure C-7 : Comparaisons des courbes de proportions des deux zones de A4 après élimination des argiles de la base	102
Figure C-8 : Courbes de proportions de l'unité A4 au complet	105
Figure C-9 : Variogrammes de l'indicateur des argiles de l'unité A5	106
Figure C-10 : Variogrammes de l'indicateur des argiles de l'unité A4	107
Figure C-11 : Variogrammes verticaux	108
Figure D-1 : Reconstitution de l'image réelle à partir de l'image brute	108
Figure D-2 : Coupes verticales Est-Ouest pour 3 simulations	110
Figure D-3 : Coupes verticales Sud-Nord pour 3 simulations	111
Figure D-4 : Probabilité de rencontrer des argiles, calculée pour 21 simulations sur des surfaces parallèles à la base érodée	112
Figure D-5 : Probabilité de rencontrer des argiles, calculée pour 21 simulations sur des plans horizontaux	114
Figure D-7 : Coupes verticales Est-Ouest. Images médianes des 21 simulations	116

RESUME

Les techniques de simulation des réservoirs hétérogènes peuvent facilement prendre en compte la division d'un réservoir en plusieurs unités lithostratigraphiques séparées par des niveaux repères. Des transformations géométriques simples permettent de reproduire différents types de contact, correspondant à différentes orientations relatives des dépôts à l'intérieur de l'unité par rapport aux limites.

On présente d'abord comme cas d'école la simulation d'un réservoir étudié en détail en affleurement. L'étude d'un gisement multicouches complexe montre comment l'analyse variographique détaillée aide à préciser la nature des contacts, à partir des seules données des lithofaciès aux puits. Sur les simulations effectuées, la probabilité empirique d'appartenance à un faciès est ensuite calculée.

ABSTRACT

The simulation techniques of heterogeneous reservoirs can easily take into account the partition of a reservoir into several lithostratigraphic units which are separated by reference leads. Simple geometrical transformations make it possible to reproduce different types of contact, corresponding to different relative orientations of the deposits within the unit, in relation to the limits.

The first case study presents the simulation of a reservoir studied in detail on an outcrop. The study of a complex multilayered reservoir shows how the detailed variographic analysis helps specify the nature of the contacts, from the only data of the lithofacies to the wells. On the simulations carried out, the empirical probability of belonging to a facies is then calculated.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Aufteilung eines Erdölspeichers in mehrere Einheiten durch Markierungsflächen getrennt, kann auf einfache Weise in einer Simulationsmethode heterogener Vorkommen berücksichtigt werden. Elementare geometrische Transformationen erlauben es, unterschiedliche Kontakte wiedervorzugeben, welche verschiedenen relativen Ablagerungsrichtungen der Einheiten entsprechen.

Als Archetyp wird zuerst die Simulation eines im Einzelnen am Aufschluss studierten Speichers vorgestellt. Das Studium eines komplexen mehrschichtigen Speichers zeigt, wie eine detaillierte Variogrammanalyse es erlaubt, die Kontakten an Hand der Schichtenfolge in den Bohrungen besser zu beschreiben. Auf den Simulationen wird dann die empirische Wahrscheinlichkeit der Zugehörigkeit zu einer Schichteinheit berechnet.

A - INTRODUCTION

Les simulations conditionnelles de lithofaciès par la méthode des gaussiennes seuillées ont été utilisées à deux puis trois dimensions pour l'étude de différents réservoirs argilo-gréseux (pour la description de la méthode voir en particulier G. Matheron et al., 1988 ; C. Ravenne et al., 1988 et C. de Fouquet et al., 1989). Ces premières applications, de nature plus didactique, ont été effectuées en supposant le réservoir "remis à plat", c'est-à-dire quand le toit et le mur de la formation sont horizontaux, et les lignes de corrélation stratigraphique parallèles et elles-aussi horizontales.

Un réservoir réel coïncide rarement avec cette description. La paléosurface à la base des dépôts n'est pas nécessairement horizontale. Les unités lithostratigraphiques qui constituent le réservoir peuvent être déformées, compactées ou érodées. Les différents contacts observables sur le terrain ou répertoriés en stratigraphie sismique (discordances de divers types, concordance) se traduisent par différentes géométries des lignes de corrélation stratigraphique à l'intérieur des unités (P. Veil et al, 1977).

Ces lignes de corrélation peuvent être prises en compte très simplement par des homothéties et des translations opérant sur la simulation effectuée "à plat". Les limites érosives sont reproduites en masquant sur la simulation les parties extérieures au réservoir.

La simulation de la falaise de Long Nab sert ici d'exemple type pour présenter quelques configurations des limites d'unité et des lignes de corrélation stratigraphique.

Quand la sismique ou les études de terrain ne permettent pas de décider avec certitude de ces caractéristiques géométriques, l'analyse variographique peut se révéler un outil très précis permettant d'y suppléer ; c'est ce que montre l'étude géostatistique d'un gisement albanais, appelé ici "Vendburimi". Plusieurs surfaces de référence y sont a priori envisageables. Les surfaces retenues pour caler les simulations seront sélectionnées d'après les courbes de proportion et le meilleur ajustement des variogrammes expérimentaux. Sur les simulations associées, on retrouve par ailleurs le phénomène bien connu de l'influence prépondérante de la conditionnalisation quand les données sont nombreuses. Ceci permet une adaptation pragmatique à la non-stationnarité latérale aux grandes distances.

B - LIMITES DE RESERVOIRS ET LIGNES DE CORRELATION STRATIGRAPHIQUE : UN EXEMPLE TYPE

Nous reprenons d'abord comme exemple l'affleurement de Long Nab qui avait servi pour l'élaboration de la méthode de simulation conditionnelle des lithofaciès par les gaussiennes seuillées. Dans une première étape, les simulations avaient été effectuées sans tenir compte des limites du réservoir. Dans un cas réel, il est

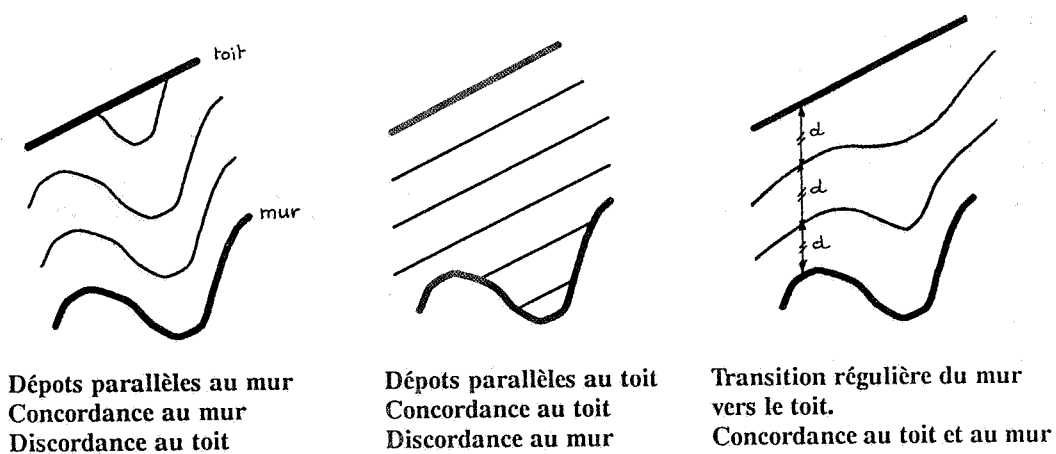


Figure B-1 : Géométrie des dépôts et des surfaces limites.

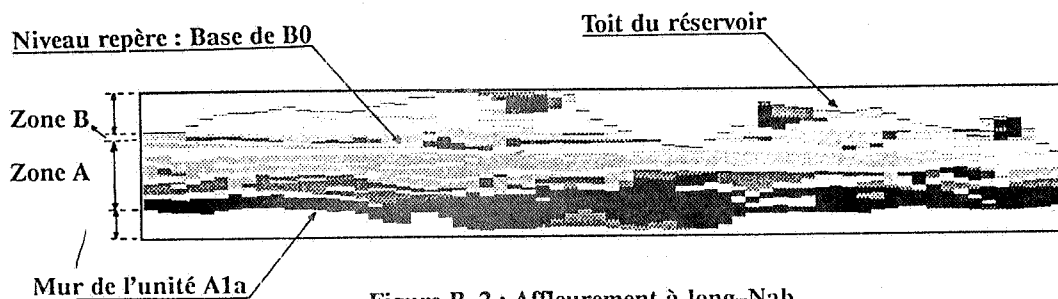


Figure B-2 : Affleurement à long-Nab
Représentation discrétisée en 4 lithofaciès.

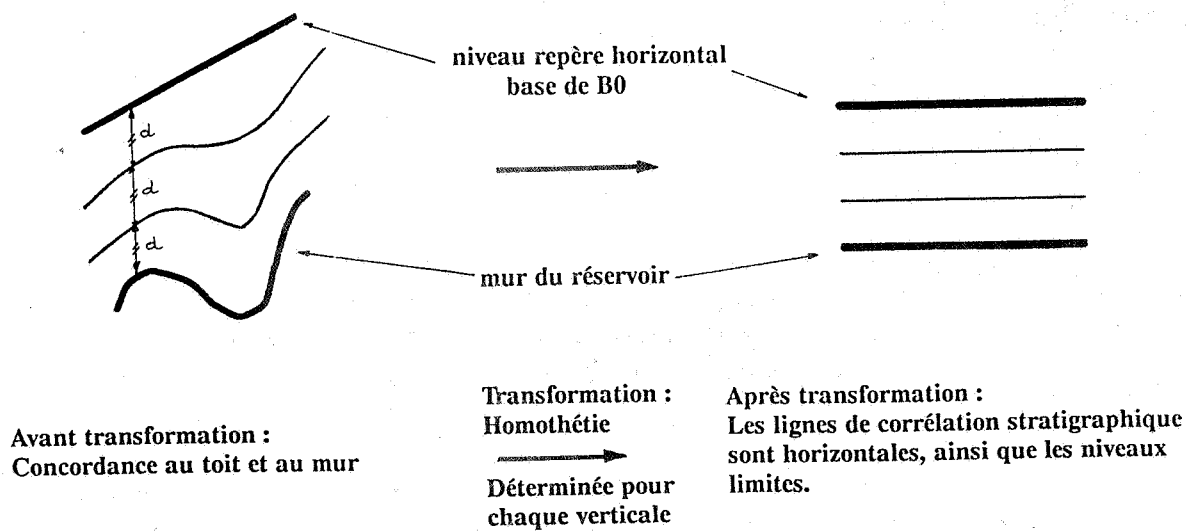
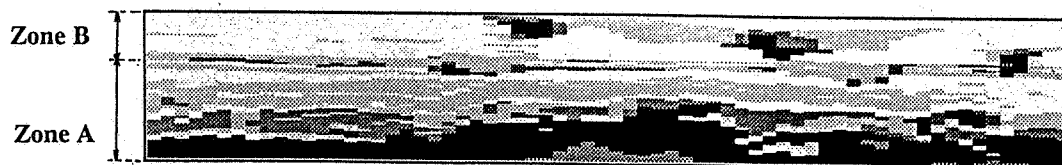


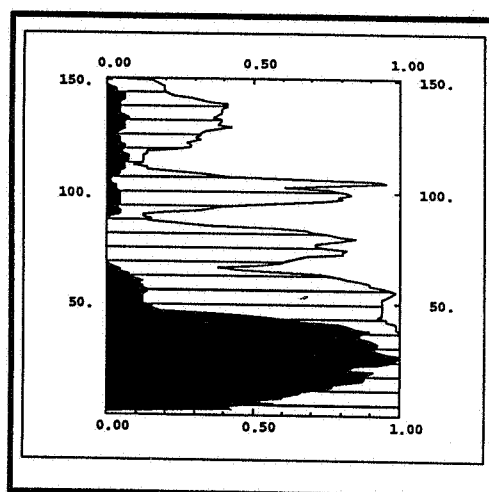
Figure B-3-0 : Transformation de la zone inférieure pour reproduire la géométrie des contacts.



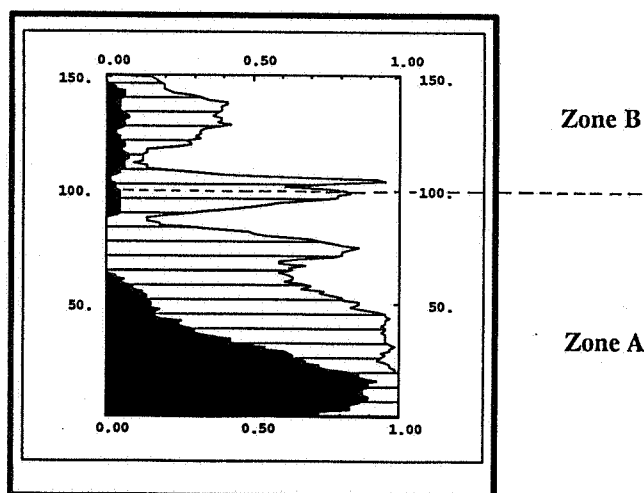
Zone A : Le mur est remis à l'horizontale,
les dépôts sont déformés par affinité.

Zone B : Les lignes de corrélations restent inchangées.

**Figure B-3-1 : Affleurement à Long-Nab
Géométrie des dépôts après transformation.**



a) Données brutes (en cotes réelles) au dessus du mur du réservoir



**b) Données transformées par affinité entre la base du réservoir et le niveau repère
(niveau B₀ horizontal correspondant à la cote 100)**

Figure B-3-2 : Proportions des lithofaciès, calculées le long de la verticale

évidemment nécessaire de représenter correctement les relations entre les diverses unités lithostratigraphiques qui constituent le gisement. L'affleurement de Long Nab présente plusieurs types de contacts qui ont été étudiés sur la falaise (C. Ravenne et al., 1987). Des opérations géométriques très simples vont permettre de décrire ces contacts, c'est-à-dire la géométrie des dépôts en relation avec les surfaces limites (figure B.1).

Cette étude est limitée au plan de la falaise, la simulation est donc effectuée à deux dimensions seulement. La simulation sera conditionnée par trois puits fictifs relevés sur la falaise et situés aux extrémités et au milieu de l'affleurement. Ces puits sont équidistants de 325 mètres.

1 – BREF RAPPEL DES PARAMETRES DES SIMULATIONS

Les simulations conditionnelles de lithofaciès font intervenir un nombre restreint de paramètres :

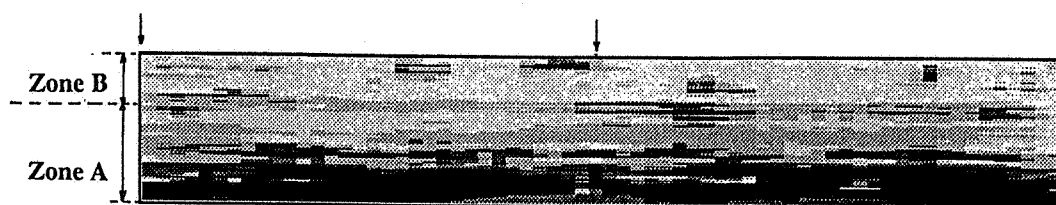
- les courbes des proportions des lithofaciès en fonction de la cote verticale :
(on suppose ici le dépôt stationnaire suivant les plans horizontaux). On restitue ainsi par simulation la séquence des dépôts observée.
- le variogramme des gaussiennes :
L'ajustement de ce variogramme se fait indirectement, via les variogrammes des indicatrices des lithofaciès, les seuls variogrammes qui soient accessibles expérimentalement.

Si l'on fixe le type d'anisotropie et le type de variogramme des gaussiennes, l'ajustement consiste à déterminer la portée suivant les trois axes d'anisotropie (un axe vertical et deux axes horizontaux).

Le calcul des proportions des lithofaciès en fonction de la cote et le calcul des variogrammes supposent que l'on a défini un repère, c'est-à-dire une ou plusieurs surfaces de référence pour les unités lithostratigraphiques. Pour la falaise, les limites sont observables in situ. Les surfaces de référence et le type de contact (relation géométrique entre les dépôts et les surfaces limites) sont donc ici connus.

2 – PRINCIPALES UNITES LITHOSTRATIGRAPHIQUES DE LONG NAB

Cet affleurement de type fluvio-deltaïque date du Jurassique Moyen. Il est situé dans le Yorkshire (Grande-Bretagne) (figure B.2).



a) Repère de travail



b) Retour aux limites réelles

Figure B-3-3 : Simulation conditionnée par 3 puits.

Dans une description simplifiée, on retient trois surfaces limites :

- le mur de l'unité A1a correspond à une discontinuité majeure lors de la sédimentation. Cette limite sépare un milieu de dépôts marins (Hummocks) d'un milieu de dépôts fluviaux (A1a) ;
- un niveau repère, à la base de l'unité B₀, qui peut servir de ligne de corrélation stratigraphique pour les niveaux supérieurs ;
- le toit du réservoir, qui est une surface d'érosion.

3 – SIMULATIONS

Ces surfaces délimitent deux zones dans lesquelles les relations entre les lignes de corrélation lithostratigraphiques et les limites de l'unité sont différentes :

- A la base, les dépôts sont plutôt de type concordant avec le mur du réservoir.

Entre ce mur et l'unité B₀, la hauteur du réservoir est donc variable. Les données réelles sont alors transformées linéairement pour ramener l'unité A à une "boîte rectangulaire" : après transformation, les lithofaciès sont rediscrétisés au pas de la grille de simulation (figures B.3.0. et B.3.1.– zone A).

En toute rigueur, il faut calculer les variogrammes expérimentaux dans ce nouveau repère, ce qui revient à les calculer suivant les lignes de corrélation stratigraphique. Dans cet exemple, nous avons conservé les ajustements effectués avec les données réelles initiales : la portée verticale des gaussiennes est égale à 10 mètres, la portée horizontale dans la direction Nord-Sud parallèle à la falaise est égale à 175 mètres.

Les proportions en fonction de la cote sont recalculées (figure B.3.2 – zone A).

Après simulation, le retour aux coordonnées réelles s'effectue simplement en restituant la cote réelle au mur du réservoir, et en déformant la simulation dans le rapport d'homothétie ainsi déterminé pour chaque verticale (figure B.3.3 – zone A).

- Au toit du réservoir, les couches géologiques sont érodées et sont donc tronquées par la limite supérieure.

Le toit de la formation sera simplement restitué par le masque des points situés hors du domaine.

Les couches n'étant affectées par aucune déformation, les proportions en fonction de la cote sont celles calculées dans le repère réel (figure B.3.1 et B.3.2 – zone B).

La simulation est effectuée sur la grille complète, puis masquée pour représenter l'érosion (figure B.3.3 zone B).

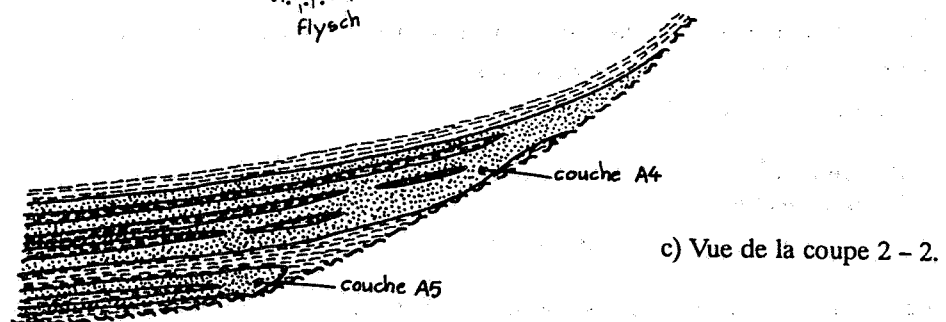
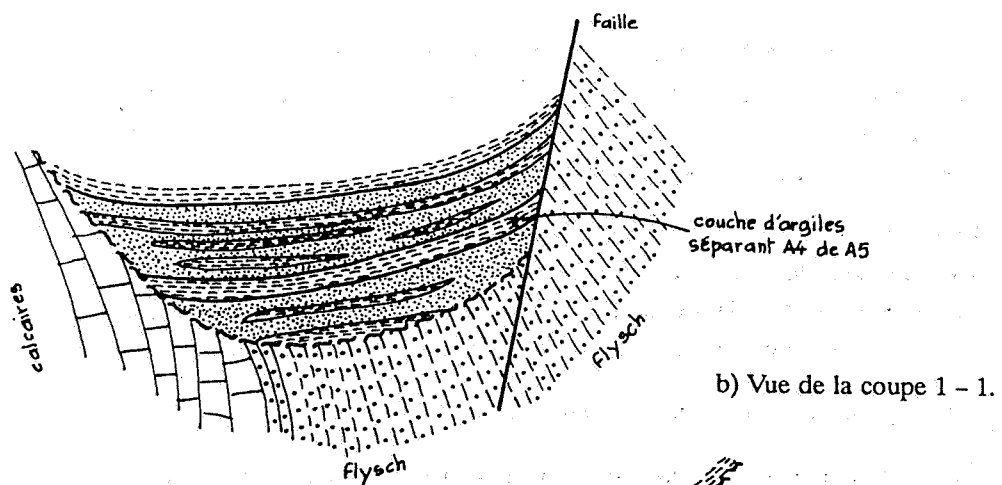
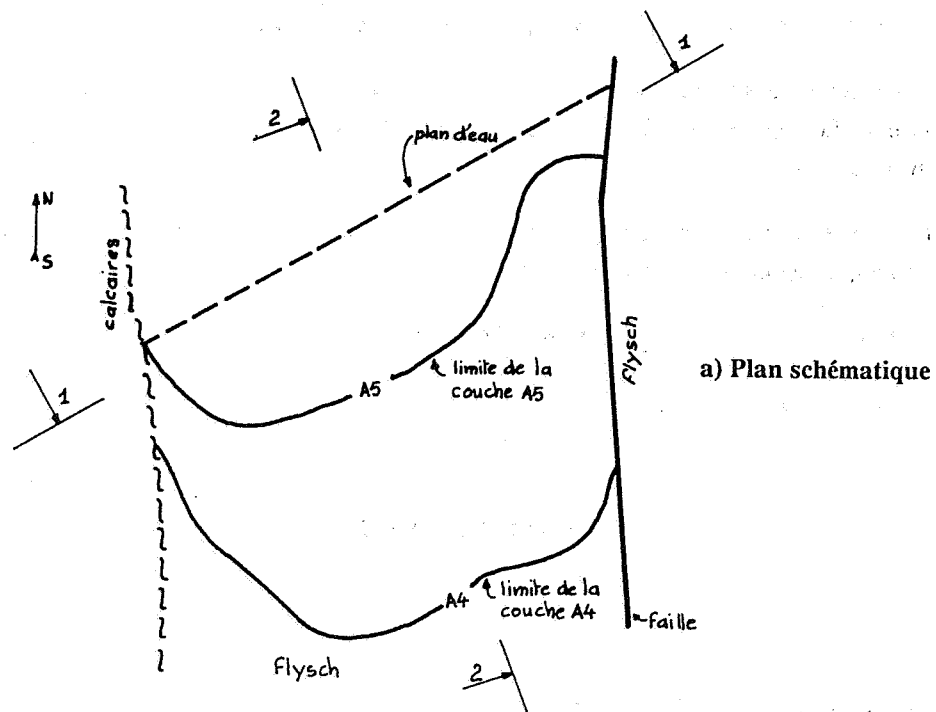
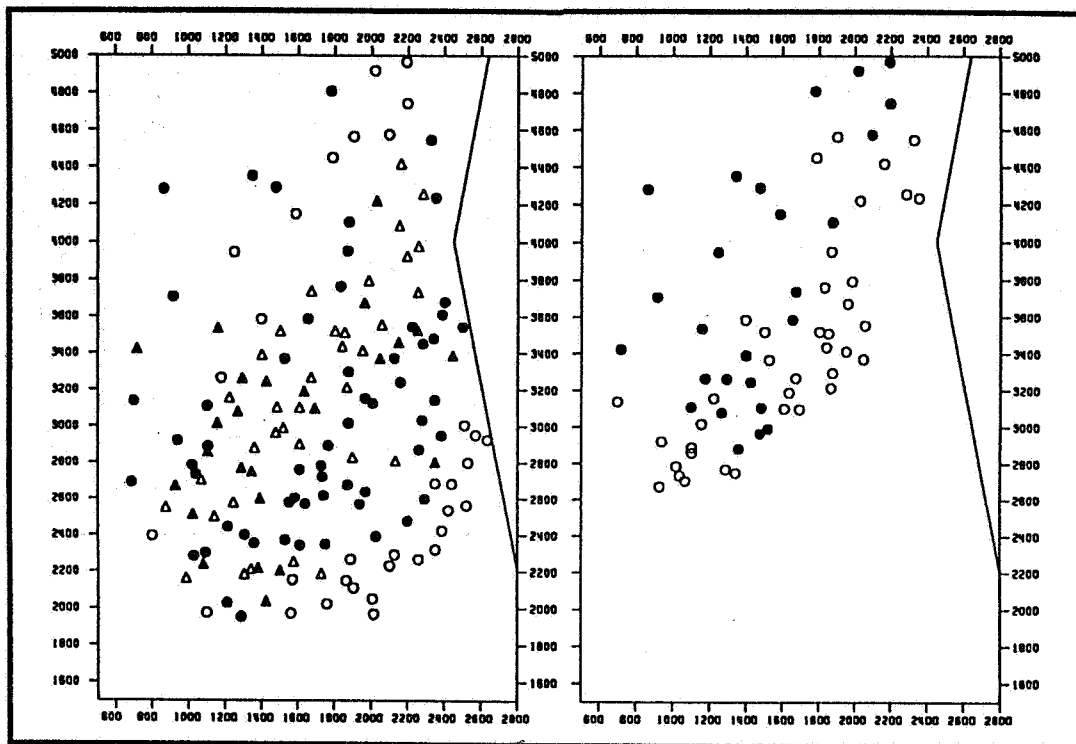


Figure C-1 : Carte géologique schématique de Vendburimi A



a) Couche A4

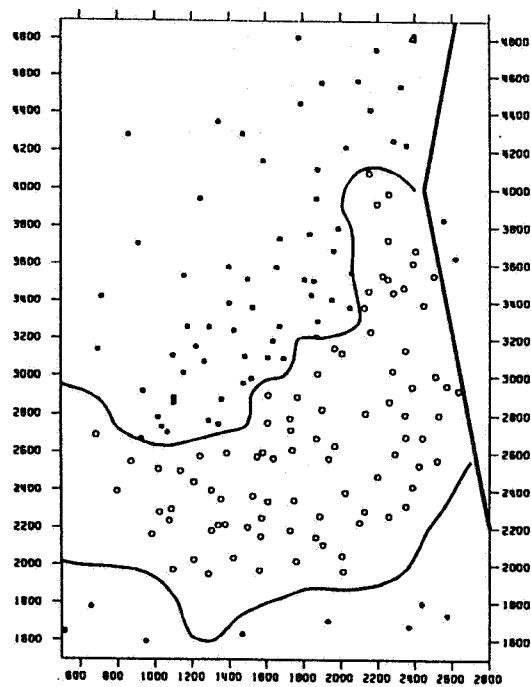
b) Couche A5

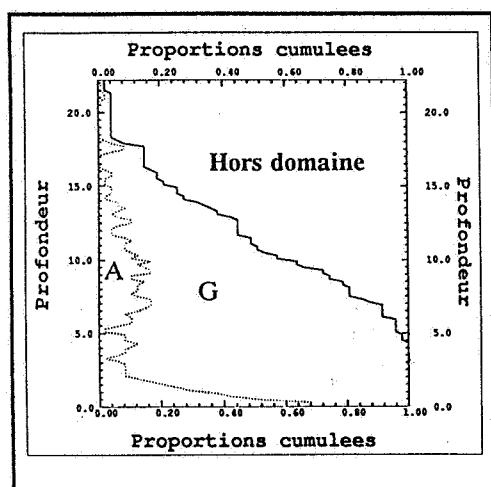
Figure C-2 : Présence-absence des argiles

- puits sans argile
- puits ne rencontrant qu'un niveau
- ▲ puits rencontrant 2 niveaux
- △ puits rencontrant 3 niveaux

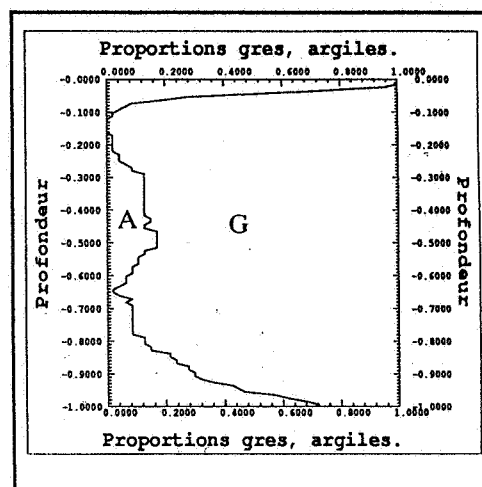
Figure C-3 : Limite des deux couches

- Puits intersectant A4 et A5
- Puits intersectant A4 seule

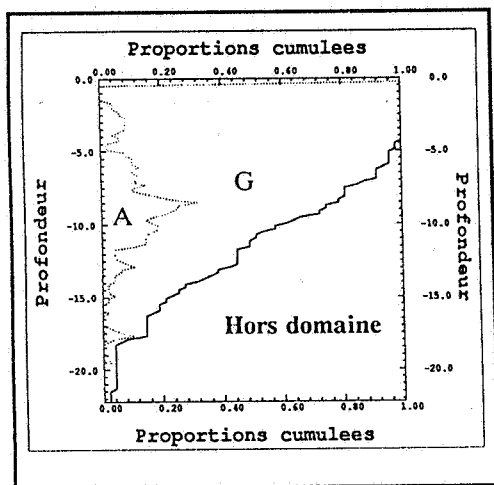




a)



b)



c)

Figure C-4 : Courbes de proportions de l'unité A5

- a) Calage à la base érodée
- b) En relatif
- c) Calage au toit de l'unité

4 – CONCLUSION

Ces deux types de transformation (troncature et déformation par homothétie sur chaque verticale) permettent de restituer la majeure partie des contacts en limite d'unité lithostratigraphique dans les réservoirs.

La topographie des surfaces limites ou des surfaces de référence peut soit être estimée, soit simulée avec la sismique ou les données des forages. Le type de contact sera en général précisé par l'étude géologique.

Le choix du niveau repère et la définition des lignes de corrélation lithostratigraphique peuvent, en l'absence d'indications géologiques, être effectués très précisément lors de l'analyse structurale, comme nous allons le voir dans l'étude suivante.

C – CHOIX DES LIGNES DE CORRELATION STRATIGRAPHIQUE PAR L'ETUDE GEOSTATISTIQUE

1 – BRÈVE DESCRIPTION GÉOLOGIQUE

Le gisement albanais "Vendburimi A" est constitué de deux couches monoclinales désignées de bas en haut par A5 et A4, séparées par un niveau argileux continu d'épaisseur moyenne d'environ 5 mètres (figures C.1. à C.2.). La couche inférieure A5 a une extension inférieure à celle du niveau supérieure A4.

Ces deux unités stratigraphiques sont formées par des dépôt de type plage, dans un environnement détritique de plate-forme. Elles ont été formées sous une mer transgressive et sur une surface érodée, qui constitue un marqueur sismique. Les deux unités sont en discordance stratigraphique et angulaire avec les sédiments plus anciens.

Là où les deux couches sont présentes, les directions principales des apports ont une orientation Nord-Nord-Est vers Sud-Sud-Ouest. Dans la zone où A4 apparaît seule cette orientation est plutôt d'Est en Ouest.

Au moment de l'étude le gisement est reconnu par 152 puits (figure C.3.) et a déjà produit. 88 puits n'ont rencontré que l'unité A4; ils sont symbolisés par un cercle vide sur la figure. Les 64 autres puits ont rencontré A4 et A5. Ils sont symbolisés par un cercle noir.

Deux lithofaciès sont retenus, le grès et l'argile.

2 – DIVISION DE LA SIMULATION SUIVANT LES DEUX ZONES

Trois surfaces distinctes délimitent les unités dans le gisement. Ce sont de bas en haut : la paléosurface de la base, le toit de l'unité A5 et le toit de l'unité A4. A5 est limitée à la base par la surface érodée. A4 est limitée à la base par cette même surface là où A5 est absente, et par le toit de A5 sur lequel elle repose en concordance, là où A5 est présente. La base de A4 est "pliée" suivant l'intersection du toit de A5 avec la surface érodée.

Il a été mis en évidence que les argiles sur le toit de A5 forment une couche continue empêchant toute connexion de A4 et A5. On a donc décidé d'étudier séparément les deux unités. Pour A4 on distingue 2 zones: A4 seule et A4 sur A5. Le mieux serait donc de simuler A4 en tenant compte explicitement de ces deux parties, avec les courbes de proportions (et éventuellement les variogrammes des gaussiennes) associées. Ceci revient à une simulation non stationnaire à la fois verticalement et latéralement.

En fait on peut se contenter de simuler A4 en une fois, en s'appuyant sur le nombre important des puits pour reproduire grâce à la conditionnalisation les aspects locaux de la géométrie.

Le toit de A5 est une surface concordante à la fois pour A4 et A5. On cherchera donc à l'utiliser comme surface de référence. Une autre surface fiable est le niveau gréseux au toit de A4.

Remarque: Pour retrouver la discordance avec la surface érodée là où A4 est seule, on pourrait extrapoler le toit de A5, et tronquer la simulation à la surface érodée sous A4 quand A5 est absente. Cette extrapolation a paru dangereuse, car elle concerne un domaine trop grand: plus de la moitié des puits.

3 – CALCUL DES COURBES DE PROPORTIONS

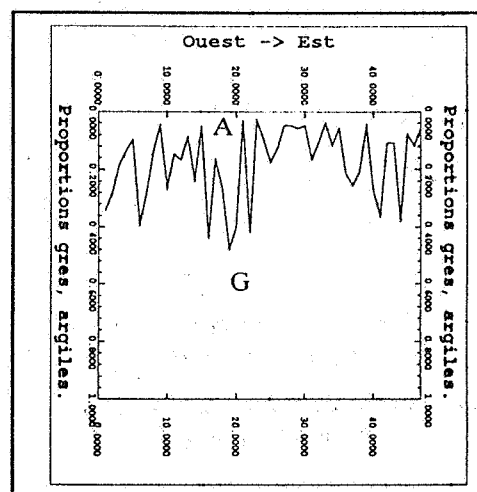
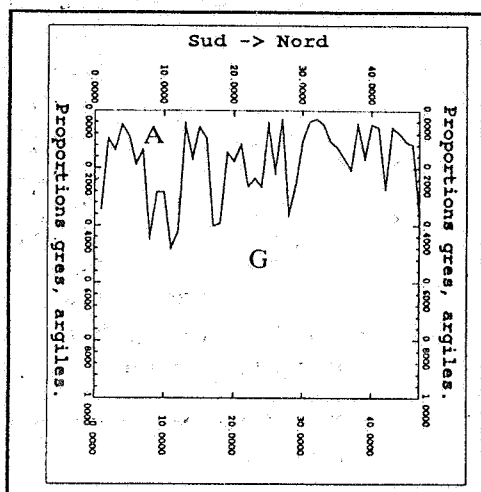
Deux hypothèses sont envisagées pour la géométrie des surfaces de corrélation stratigraphique :

–épaisseur "absolue"

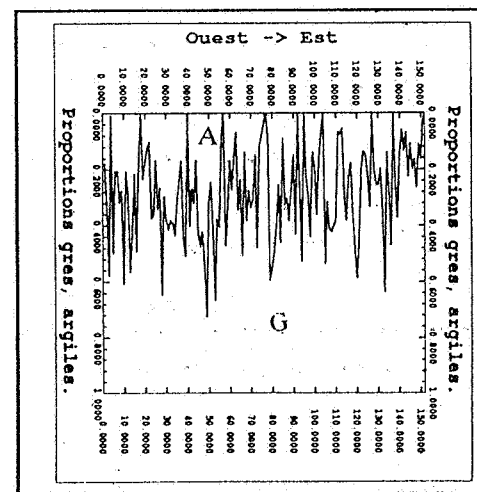
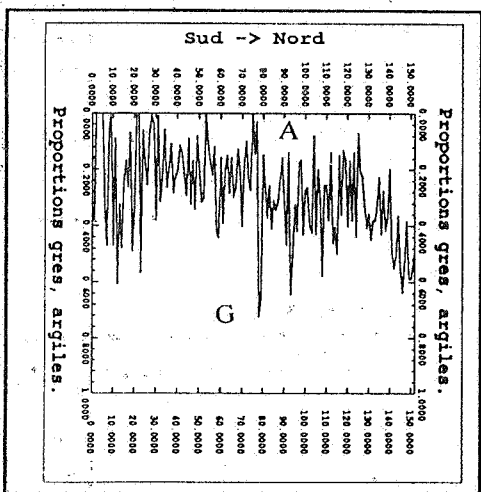
Les surfaces de corrélations sont parallèles à la surface de référence constituée par le toit de A5 prolongé par la surface érodée. Cette surface est donc remise à l'horizontale pour le calcul des proportions et des variogrammes. L'épaisseur des zones n'est pas modifiée pour le processus de simulation.

–épaisseur "relative"

Pour chaque unité, une deuxième surface limite est définie: mur de A5 et toit de A4. Les deux surfaces limites de chaque zone sont remises à l'horizontale, ce qui revient à prendre comme unité l'épaisseur de chaque zone (il suffit d'effectuer une homothétie par verticale au moment de la simulation).



a)

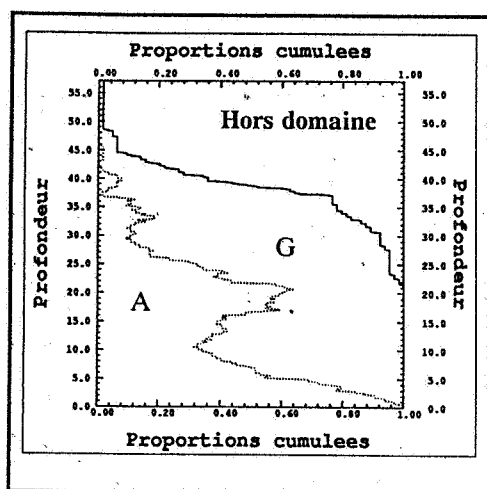


b)

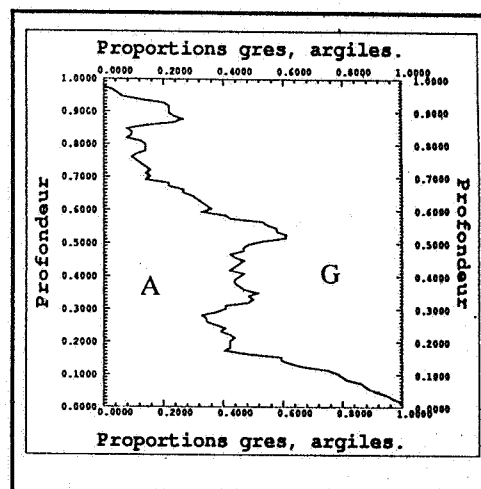
Figure C-5 : Courbes de proportions dans le plan horizontal

a) Unité A5 : 1) Direction Sud-Nord
2) Direction Ouest-Est

b) Unité A4 : 1) Direction Sud-Nord
2) Direction Ouest-Est

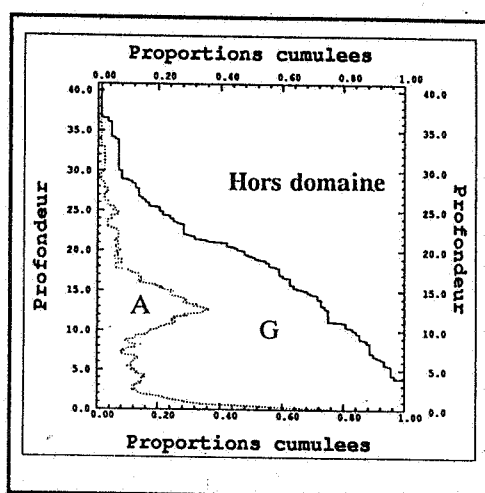


Calage à la base

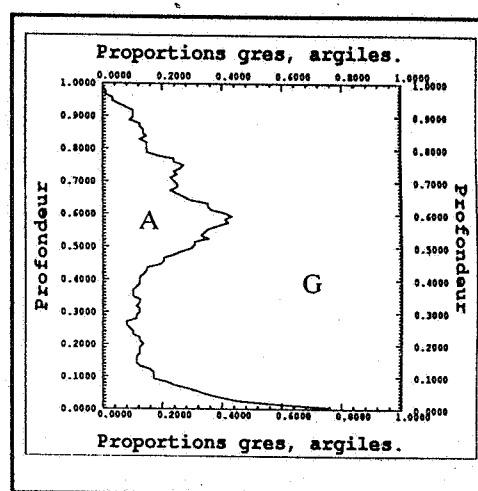


En relatif

a) Zone A4/A5



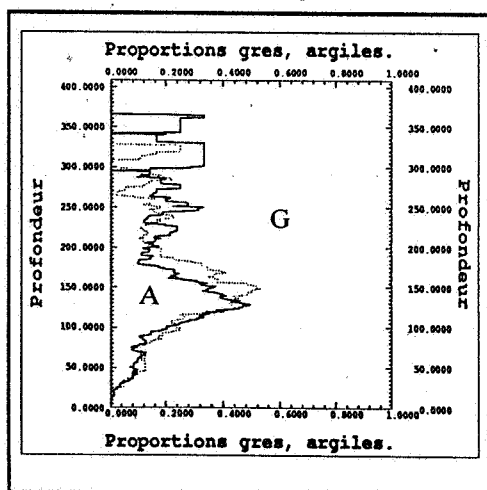
Calage à la base



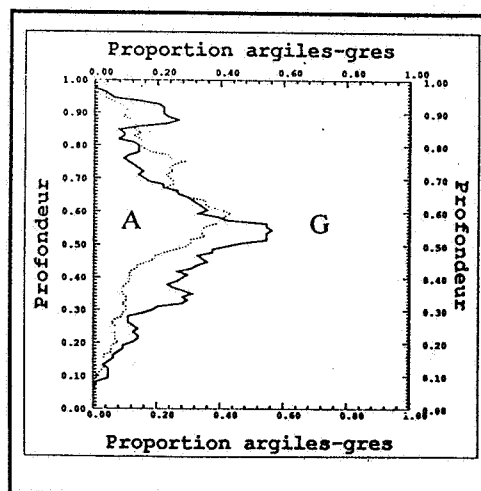
En relatif

a) Zone A4 seule

Figure C-6 : Courbes de proportions de l'unité A4



Calage à la base



En relatif

Figure C-7 : Comparaisons des courbes de proportions des deux zones de A4 après élimination des argiles de la base.

Remarque : La surface de référence a été décalée de 50 cm du toit de A5 de façon à passer dans les argiles continues du toit de A5, ce qui permet d'atteindre localement 100% d'argile. Sur les simulations, A4 et A5 seront donc séparés par un niveau argileux continu.

a – UNITÉ A5

Dans cette unité est inclus tout l'intervalle situé entre la surface érodée et la surface de référence.

Les proportions des faciès le long de la verticale sont calculées en se calant d'abord à la surface de référence puis à la paléosurface respectivement remises à plat (figure C.4). La proportion d'argile est forte à la base puis diminue. Elle reste à peu près stationnaire par calage à la base et présente un petit pic vers neuf mètres sous la référence par calage au toit. Puis un niveau gréseux apparaît sous les argiles continues du toit, ce qui est conforme à la description géologique.

En relatif, l'augmentation de la proportion d'argiles à la base et vers le toit est bien visible, ainsi que le niveau gréseux du toit. Un déficit local d'argiles est assez marqué, et des zones stationnaires apparaissent.

Latéralement on observe des fluctuations importantes mais qui ne remettent pas en cause l'hypothèse de stationnarité (figure C.5).

b – UNITÉ A4

Si on distingue les deux zones suivant la présence ou l'absence de A5, les courbes diffèrent nettement, aussi bien en relatif que par calage à la base (figure C.6). Mais après élimination des argiles à la base, les courbes coïncident presque, en relatif comme en absolu (figure C.7). Donc au-dessus des argiles situées sur le toit de A5 ou sur la surface érodée, la répartition verticale des lithofaciès est semblable dans les deux zones, à un facteur d'échelle près.

Les différences des courbes de proportions des deux zones viennent donc des argiles de la base et du fait que dans une zone elles sont concordantes avec la base et dans l'autre discordante.

On pourrait commencer par cartographier la limite supérieure des argiles à la base de A4, puis effectuer la simulation en une étape, en repère "absolu", et sur l'ensemble de A4. Il suffit alors de rajouter les argiles à la base.

Si on ne distingue pas les deux zones (figure C.8) on a en absolu et par calage au toit de A4 une proportion d'argiles stationnaire en dehors des limites (en tenant compte des puits incomplets au-delà de la surface érodée). En relatif, la courbe est similaire à celle de la zone sans A5.

Latéralement l'hypothèse de stationnarité est admissible au moins localement (figure C.5).

4 – VARIOGRAMMES HORIZONTAUX

a – UNITÉ A5

Les variogrammes horizontaux moyens sont calculés dans 4 directions, pour les trois calages: au toit, à la surface érodée et en relatif (figure C.9).

Par calage au toit le palier expérimental est mal ajusté; ceci signifie que le calage ne correspond pas aux lignes de corrélation, mais les recoupe.

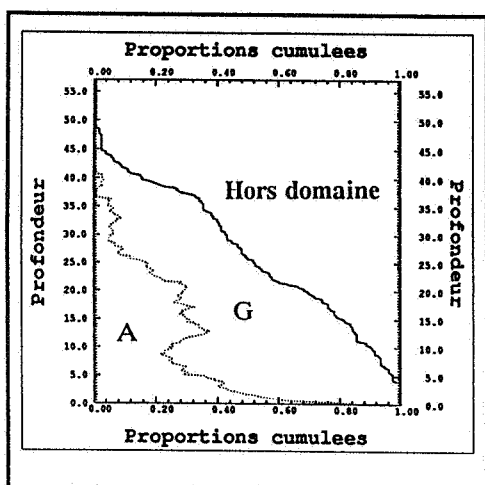
En relatif les variogrammes sont stationnaires dans deux directions (une direction ne permet pas de faire le calcul au-delà de 600 m). En Est-Ouest l'écart à la stationnarité apparaît au-delà de 400 mètres. L'ajustement proposé est effectué avec une anisotropie Nord-Sud, Est-Ouest; la plus longue portée pratique (480 mètres) est en Nord-Sud, ce qui correspond à la direction des apports pour cette unité. Perpendiculairement la portée est de 250 mètres.

Les mêmes portées pratiques pour les gaussiennes ajustent les variogrammes dans le calage à la surface érodée. On peut donc soit simuler A5 en absolu en se calant à la base, soit en relatif. Cette deuxième solution a été retenue :

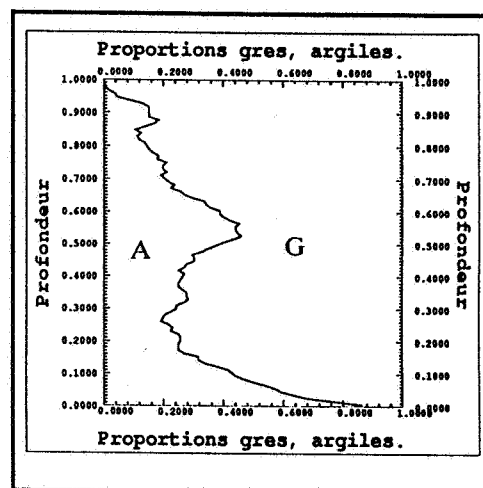
- les niveaux argileux deviennent ainsi progressivement parallèles au toit de A5.
- l'épaisseur des niveaux gréseux ou argileux variera comme l'épaisseur de l'unité A5, conformément à l'image géologique de départ. Ce choix comporte clairement une part d'arbitraire.

b – UNITÉ A4

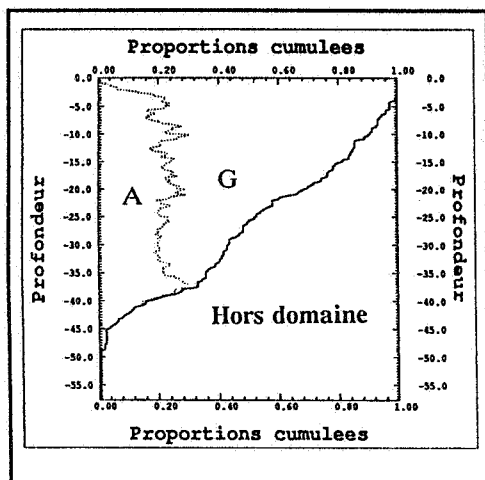
L'ajustement des variogrammes calculés en relatif sur l'ensemble de A4 met en évidence les mêmes directions principales d'anisotropie que pour A5. La plus grande portée pratique (600 mètres pour le



a



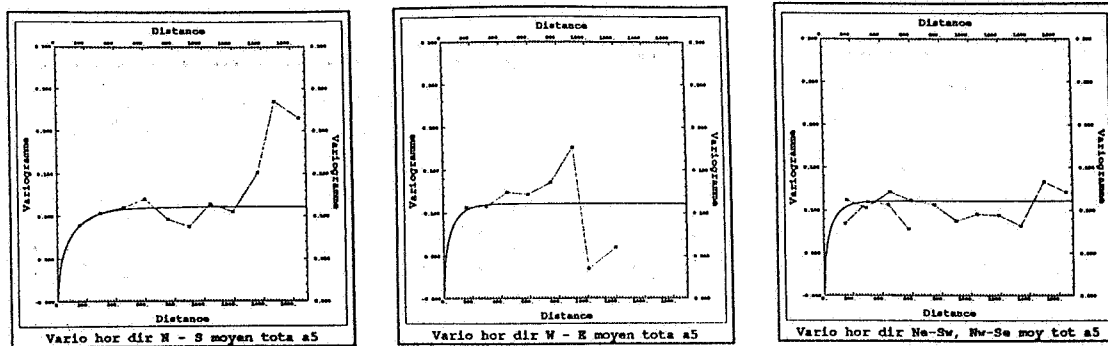
b



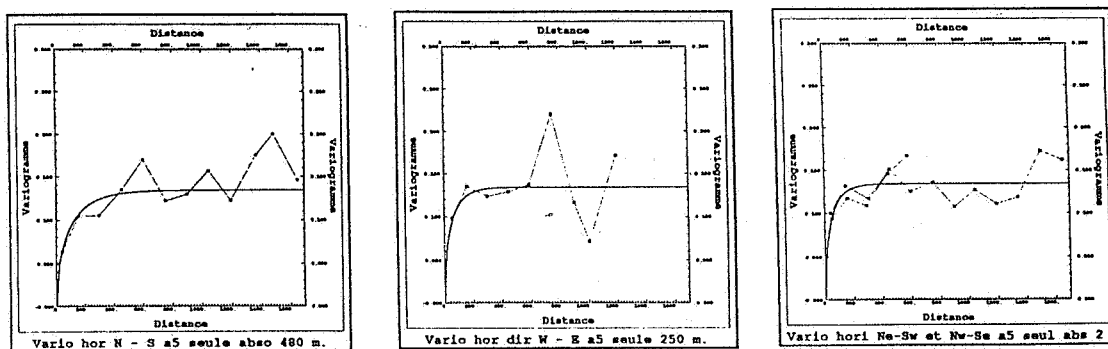
c

Figure C-8 : Courbes de proportions de l'unité A4 au complet

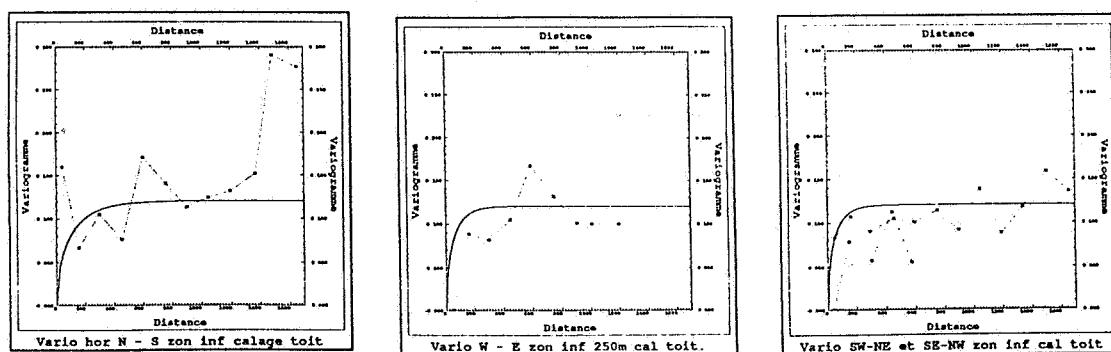
- a) Calage à la base
- b) En relatif
- c) Calage au toit



- a) En relatif : 1) Nord-Sud
2) Est-Ouest
3) NE-SW et NW-SE

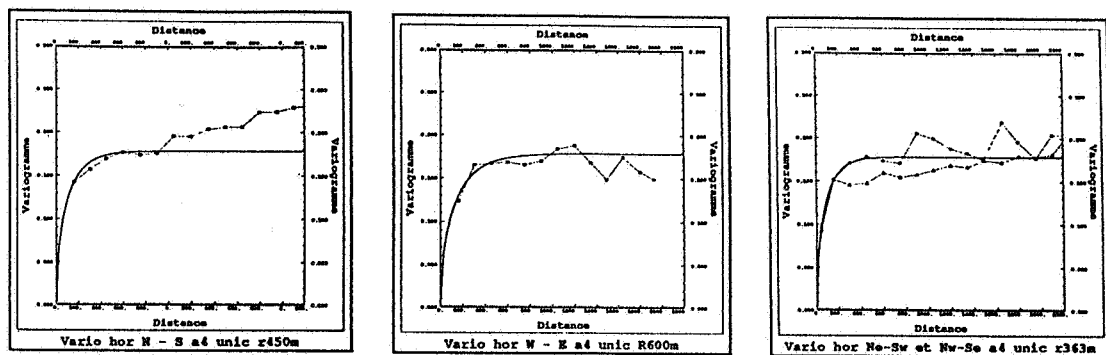


- b) Calage à la base : 1) Nord-Sud
2) Est-Ouest
3) NE-SW et NW-SE

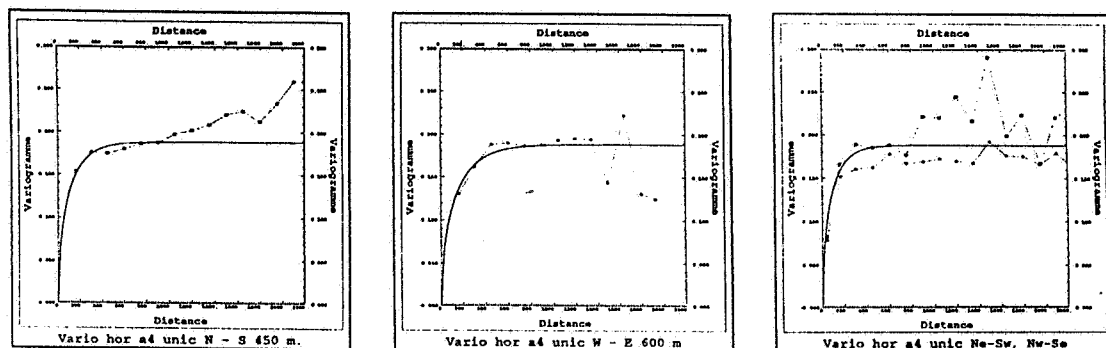


- c) Calage au toit : 1) Nord-Sud
2) Est-Ouest
3) NE-SW et NW-SE

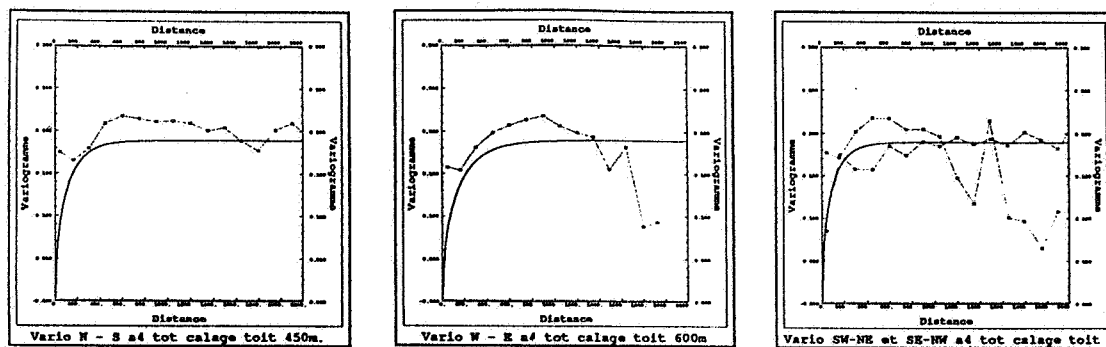
Figure C-9 : Variogrammes de l'indicateur des argiles de l'unité A5



- a) En relatif : 1) Nord-Sud
2) Est-Ouest
3) NE-SW et NW-SE

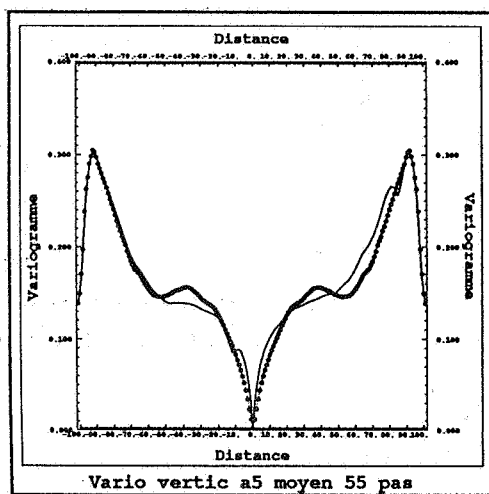


- b) Calage à la base : 1) Nord-Sud
2) Est-Ouest
3) NE-SW et NW-SE

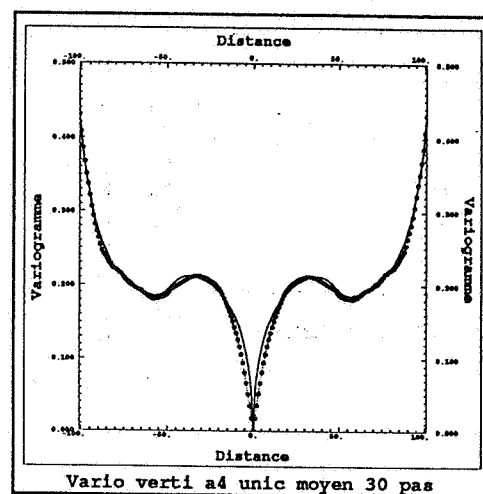


- c) Calage au toit : 1) Nord-Sud
2) Est-Ouest
3) NE-SW et NW-SE

Figure C-10 : Variogrammes de l'indicateur des argiles de l'unité A4



a) Unité A5



b) Unité A4

Figure C-11 : Variogrammes verticaux

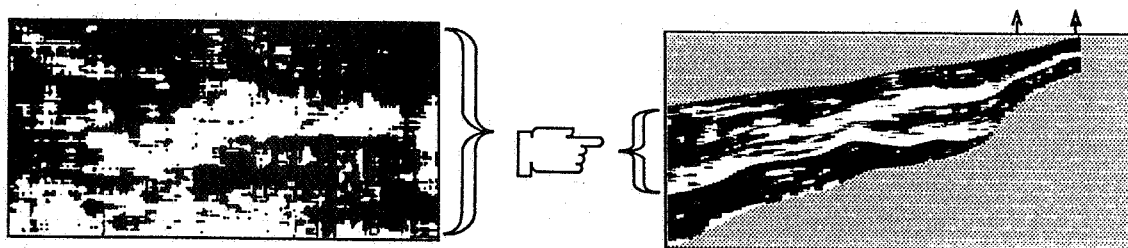


Figure D-1 : Reconstitution de l'image réelle à partir de l'image brute

variogramme des gaussiennes) est maintenant en Est-Ouest, et non plus en Nord-Sud (450 mètres). Ceci correspond au changement de direction des apports entre la formation de A5 et celle de A4. L'ajustement est assez bon jusqu'à 1000 mètres en Nord-Sud et 1800 mètres en Est-Ouest. Un écart entre le palier expérimental et le palier du modèle apparaît dans une direction intermédiaire (figure C.10).

Comme pour A5 cet ajustement reste valable pour un calcul en épaisseur absolue, et calage à la base (on retrouve d'ailleurs le même écart de palier).

En revanche le calage au toit n'est pas satisfaisant.

Compte tenu de la qualité des ajustements, il n'a pas paru nécessaire pour cette étude, plus qualitative que quantitative, de traiter séparément les argiles à la base de A4. Il s'agit donc d'une approximation, par rapport à l'étude plus détaillée faite sur les courbes de proportions.

5 – VARIOGRAMMES VERTICAUX

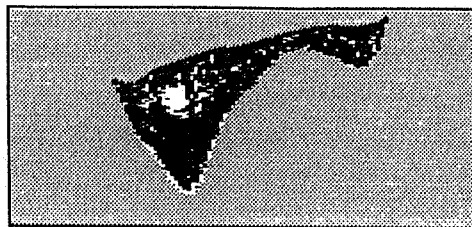
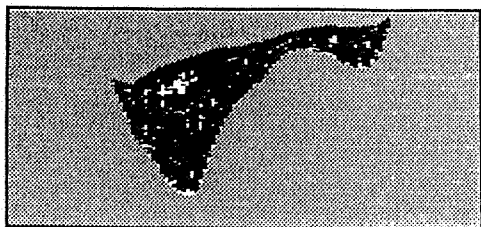
Les variogrammes moyens verticaux calculés en relatif, sont ajustés par une portée pratique de 30 pas pour A5 et de 55 pas pour A4 (figure C.11).

D – QUELQUES SIMULATIONS

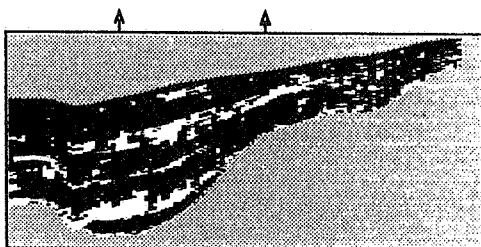
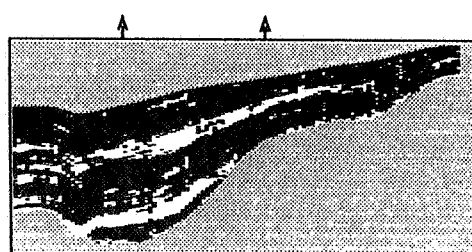
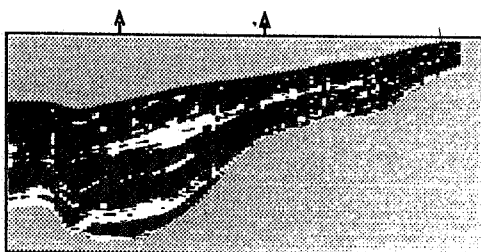
L'unité A4 est conditionnée dans les simulations par 152 puits et A5 par 47 puits. Les simulations effectuées en relatif pour les deux unités, sont ensuite déformées de façon inverse à la transformation effectuée aux puits avant simulation (figure D.1).

1 – COMPARAISON DE QUELQUES COUPES VERTICALES

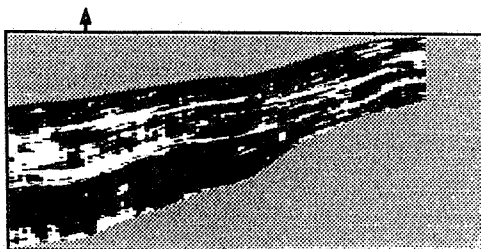
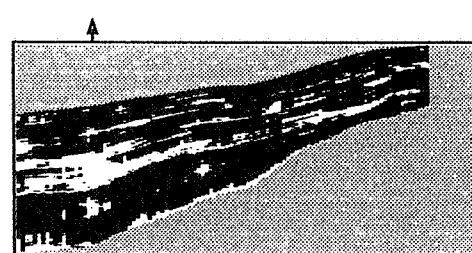
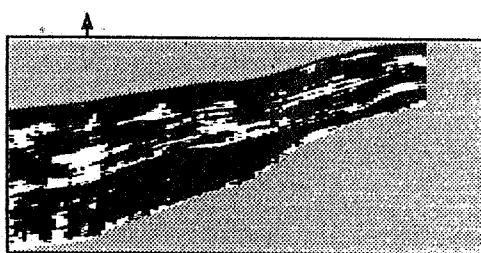
La figure D.2 présente des coupes verticales Est-Ouest, la figure D.3 des coupes verticales Nord-Sud, pour 3 simulations. Pour la représentation les distances horizontales ont été considérablement diminuées.



a) Coupe Y = 1960

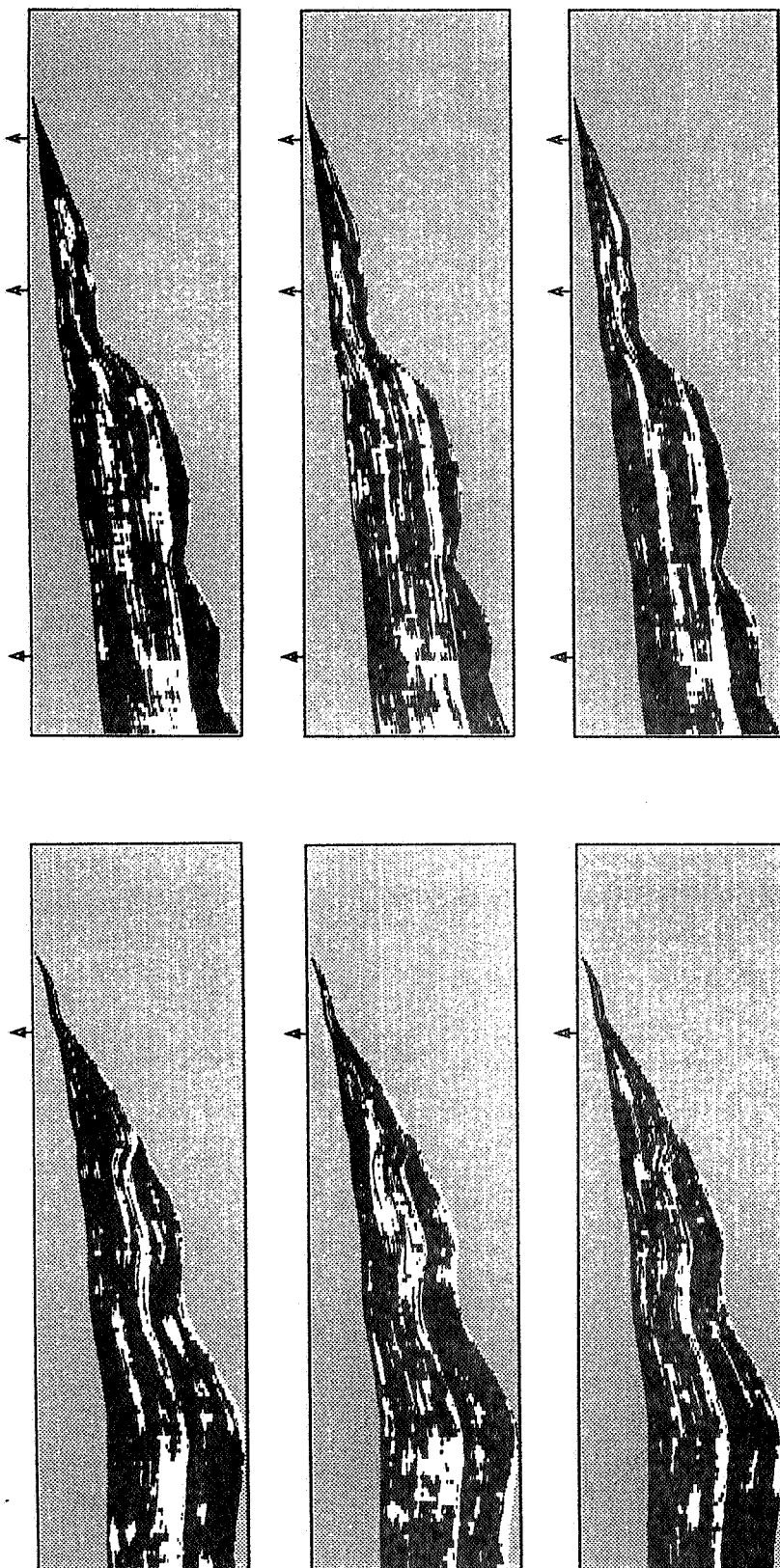


b) Coupe Y = 2780



c) Coupe Y = 4280

Figure D-2 : Coupes verticales Est-Ouest
pour 3 simulations



b) Coupe X = 1900

a) Coupe X = 800

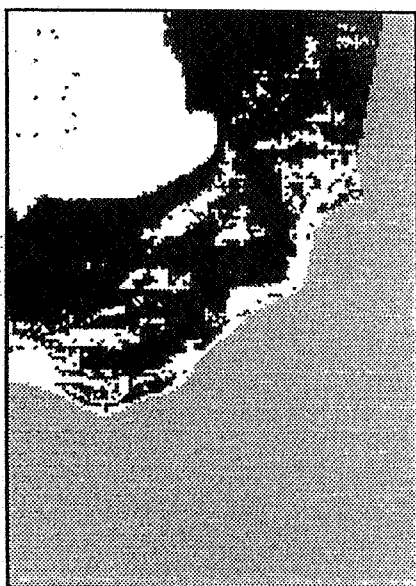
Figure D-3 : Coupes verticales Sud-Nord pour 3 simulations



a) Distance de la base 10 m

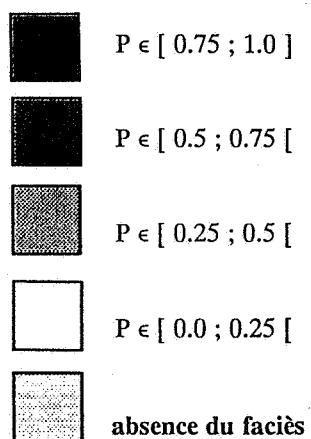


b) Distance de la base 20 m



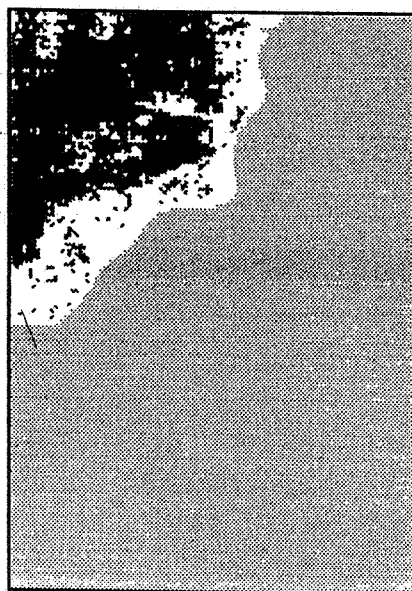
c) Distance de la base 30 m

Figure D-4 : Probabilité de rencontrer des argiles, calculée pour 21 simulations sur des surfaces parallèles à la base érodée

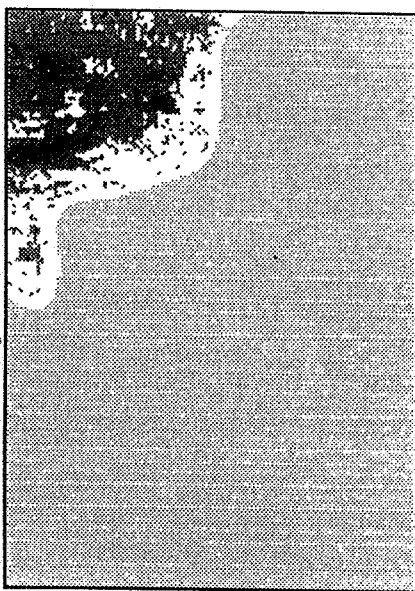




d) Distance de la base 40 m

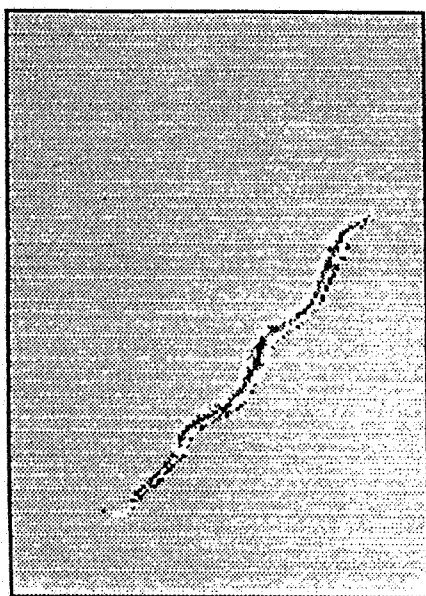


e) Distance de la base 60 m

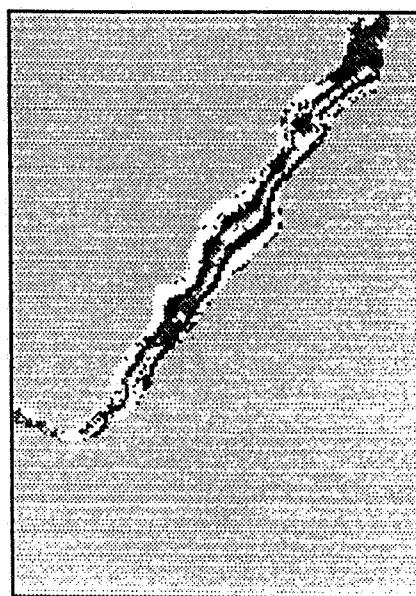


f) Distance de la base 70 m

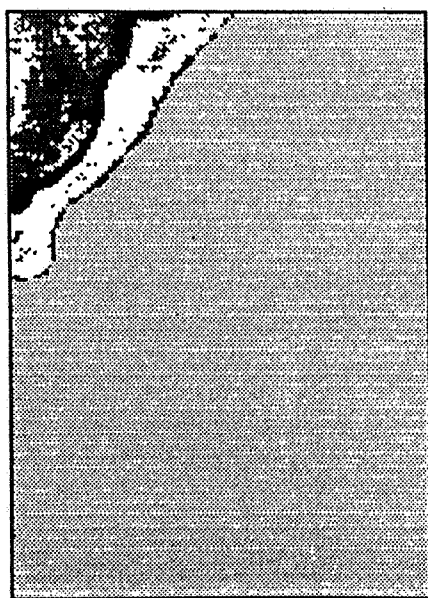
Figure D-4 : Suite



a) $Z = -1800$ m. Sur ce plan, on ne voit que l'unité A4.

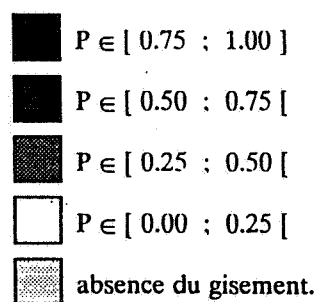


b) $Z = -1900$ m. Ce plan intercepte les deux unités (A4 et A5).



c) $Z = -2160$ m. Sur ce plan, on voit l'unité A5.

Figure D-5 : Probabilité de rencontrer des argiles, calculée pour 21 simulations sur des plans horizontaux



Remarque : L'épaisseur maximum de l'ensemble des deux unités A4 et A5 est de 100 mètres environ, alors que, sur le domaine à simuler, la cote du toit de A4 varie d'environ 430 mètres. Pour les visualisations, le pendage moyen a été atténué. Lors du calage des simulations au toit et au mur, les niveaux très fins suivent les ondulations dues aux surfaces limites. La continuité de ces niveaux peut ne pas être visible graphiquement, à cause de la discrétisation. De plus pour simplifier les images on a supprimé une colonne sur deux, ce qui altère également la continuité graphique des niveaux fins.

Le plan Est-Ouest 2780 montre deux niveaux argileux bien marqués: le toit de A5 et un niveau situé dans A5. Un fin niveau argileux intermédiaire apparaît sur certaines simulations. A5 varie peu d'une simulation à l'autre.

Le plan Est-Ouest 4280 montre également peu de variations pour A5. A l'Ouest les argiles sont épaisses. La séparation de A4 et A5 apparaît clairement, bien que les argiles au toit de A5 soit localement peu épaisses.

Le plan 1980 est situé dans une zone où A5 est absente. Une concentration locale de l'argile apparaît vers le haut, ainsi qu'un niveau fin à la base de A4. Les argiles de la base se retrouvent en général sur les autres plans.

La séparation A4/A5 est bien visible dans les plans Nord-Sud. Les argiles sont présentes vers les zones profondes du Nord (coupe 1900). Des variations locales importantes sont possibles (coupe 800).

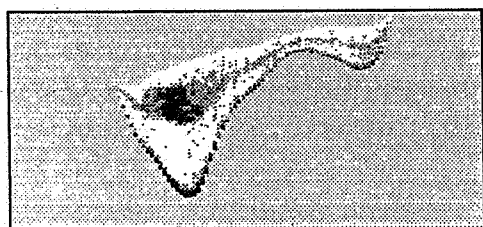
Sur ces images, les corps argileux ne sont parallèles ni à la base ni au toit des unités: les simulations redonnent une image conforme aux hypothèses géologiques sur lesquelles on s'est appuyé.

2 - STATISTIQUES SUR PLUSIEURS SIMULATIONS

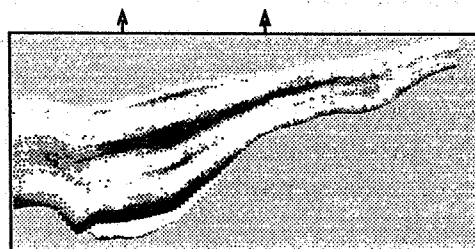
Pour préciser les traits communs aux simulations, on a calculé sur 21 tirages, les statistiques d'appartenance à un lithofaciès (en comptant le nombre de simulations où un point appartient par exemple aux argiles). On obtient une indication probabiliste du volume des roches imprégnées et de la répartition des argiles.

Parallèlement à la base érodée, les argiles suivent la zone côtière (figure D.4) et tendent à s'allonger parallèlement à la faille (ce qui semble en confirmer l'existence). A moins de 30 m de la base, on traverse des alternances d'argiles et de grès. Cette géométrie résulte de la position des corps argileux par rapport aux surfaces limites. A 40 mètres on rencontre des niveaux fortement argileux, puis en continuant à monter, de nouveau plus gréseux.

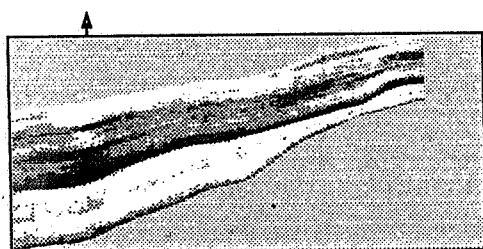
La figure D.5 montre la probabilité de trouver de l'argile dans des plans horizontaux (et non plus parallèles à la base érosive). Le plan 1900 intercepte les deux unités. La discordance des strates argileuses à la base est bien visible, alors que le toit est en concordance, de même que la limite entre les deux unités.



a) Coupe Y = 1980

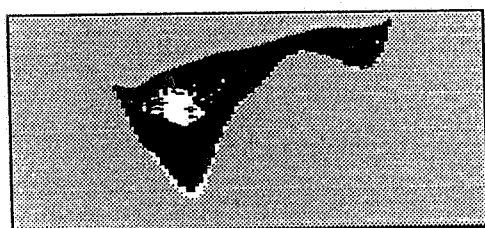


b) Coupe Y = 2780

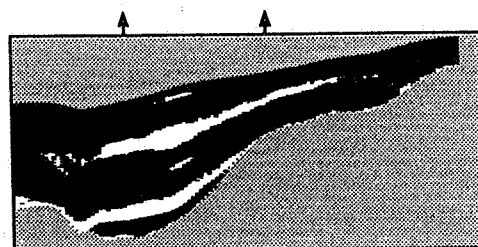


c) Coupe Y = 4280

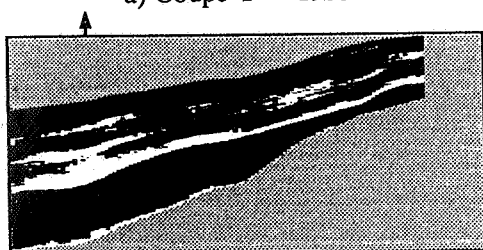
**Figure D-6 : Coupes verticales Est-Ouest.
Isoprobabilité d'après 21 simulations**



a) Coupe Y = 1980



b) Coupe Y = 2780



c) Coupe Y = 4280

**Figure D-7 : Coupes verticales Est-Ouest.
Images médianes des 21 simulations**

La figure D.6 montre la probabilité d'appartenance à l'argile dans des plans Est-Ouest. En se limitant à deux classe de probabilité, on obtient une image très contrastée (figure D.7), sur laquelle la couche des argiles séparatrices est bien restituée. A5 varie peu d'une simulation à l'autre. La couche argileuse au milieu de A4 apparaît nettement sur le plan 2780. Une plus grande diversité de A4 est à noter sur le plan 4280.

E – CONCLUSION

L'utilisation des surfaces de corrélation stratigraphique permet d'affiner l'étude structurale : choix des surfaces limites, définition des types de contact. A ce titre, l'étude variographique constitue une aide à l'interprétation géologique. La géométrie retenue pour l'enveloppe et le positionnement de la simulation peut correspondre à des hypothèses géologiques bien précises : subsidence différentielle, transport de matériel par exemple. Les simulations ainsi obtenues présentent un aspect graphique réaliste.

Quand aucune déformation n'est nécessaire, les courbes de proportions suffisent à évaluer les volumes moyens en place, sous réserve d'une pondération éventuelle en fonction de la disposition des puits. Dans les autres cas, le calcul de ces volumes sera effectué sur les simulations ; on aura alors une fourchette empirique en plus de la valeur moyenne.

Enfin, les modèles peuvent encore être enrichis : non stationnarité latérale des proportions; variations spatiales des portées, etc... Dans tous ces cas, la conditionnalisation reste possible. La limitation réside dans la possibilité d'inférence statistique des paramètres.

BIBLIOGRAPHIE

1. G. MATHERON, H. BEUCHER, C. de FOUQUET, A. GALLI et C. RAVENNE, Simulation conditionnelle à trois faciès d'une falaise de la Formation du Brent. Etudes Géostatistiques V – Séminaire CFSG sur la Géostatistique (15-16 juin 1987 – Fontainebleau, France), *Science de la Terre*, Série Informatique, Nancy, pp 213-249, 1988.
2. C. RAVENNE, H. BEUCHER et al., Recent Development in Description of Sedimentary Bodies in a Fluvio-Deltaic Reservoir and their 3D Conditionnal Simulations. 63rd Annual Technical Conference of the Society of Petroleum Engineers, Houston, Texas, october 2-5, 1988 (SPE 18310).
3. C. de FOUQUET, H. BEUCHER, A. GALLI et C. RAVENNE, Conditionnal Simulation of Random Setes – Application to an Argilaceous Sandstore Reservoir. Proceedings du 3ème Congrès International de Géostatistique, Avignon, Septembre 1988, *Geostatistics*, Vol. II, Kluwer Academic Publishers, 1989.

4. P. VEIL, R. MITCHUM, S. THOMSON, R. TODD, J. SANGREE, J. WIDMIER, N. BUBB et W. NATELID, Seismic Stratigraphy and Global Sea Level Changes, Mémoire de l'American Association of Petroleum Geologist, n°26, pp 49-216, 1977.
5. C. RAVENNE, R. ESCHARD et al., Heterogeneities and Geometry of Sedimentary Bodies in a Fluvio-Deltaic Reservoir, 62nd Annual Technical Conference of the Society of Petroleum Engineers, Dallas, Texas, september 27-30, 1987 (SPE 16752).
6. P. VEIL, Seismic Stratigraphy Interpretation using Sequence Stratigraphy – Part I : Seismic Stratigraphy Interpretation Procedure, A.W. Bally Eds, Atlas of Seismic Stratigraphy, Vol. I, AAPG Studies in Geology, Vol. 27, 1987.