

# **Prelucrarea statistică a datelor geofizice și a datelor din sonde pentru caracterizarea zăcămintelor de hidrocarburi**

---

**Doctorand:**  
**Ing. Liviu Robertino Grindei**

**Conducători științifici:**  
**Prof. Dr. Ing. Mihai Pascu COLOJA**  
**Prof. Dr. Ing. Constantin POPA**

## **REZUMAT**

Sunt foarte des întâlnite situațiile când sunt constatate deficiențe în cadrul exploatării de hidrocarburi datorate descrierii inadecvate a rezervoarelor. Există situații când sunt forate sonde de dezvoltare între sondele deja existente, iar proprietățile rezervoarelor traversate de aceste sonde de dezvoltare nu prezentau valorile medii ale sondelor din jur, sau au existat situații când chimicalele injectate în anumite sonde apăreau în locuri neașteptate, agentul de înlocuire canalizându-se spre sondele de producție prea devreme, iar producția de țiței fiind cu mult sub așteptări. Acest fapt impune utilizarea unor metode mult mai complexe pentru descrierea rezervoarelor de hidrocarburi. Începând cu anii '80 au început să fie folosite metodele moderne de descriere a rezervoarelor.

Complexitatea sub care se prezintă natura ne obligă să folosim statistica pentru caracterizarea ei.

Lucrarea de față își propune să studieze aplicații ale metodelor statistice pentru prelucrarea diagramei de sonde și distribuția proprietăților din sonde în cadrul modelului de rezervor. Au fost cercetate și elaborate fluxuri noi de procesare a acestor date pe baza algoritmilor geostatistici în vederea reducerii gradului de incertitudine al măsurătorilor indirecte și a distribuției spațiale a lor.

Teză este structurată în șapte capitole după cum urmează:

În *primul capitol* al tezei de „**Introducere**” este descris impactul analizelor rezervoarelor de hidrocarburi prin metode statistice și un scurt istoric al aplicării lor în industria minieră și cea petrolieră.

În *ce de-al doilea capitol* intitulat „**Metode de investigare geofizică**” sunt prezentate metodele de investigare geofizică de suprafață și din foraje. Un accent mai mare a fost acordat metodelor de investigare geofizică din sonde și al principalelor parametri determinați cu ajutorul lor.

În al *treilea capitol* cu numele „**Atribute seismice**” este prezentată o clasificare a atributelor seismice generate pe baza datelor seismice 2D și 3D, a modului de calcul al acestora, precum și principale aplicații ale lor.

*Capitolul patru* intitulat „**Relațiile spațiale între date – estimare și modelare**” descrie principalele metode de interpolare statistică a datelor folosind algoritmi Kriging (Kriging simplu, Kriging ordinar, Cokriging și Kriging universal). Tot în această parte este descris modul de construcție al variogramelor și parametrii ce o caracterizează.

În al *cincilea capitol* intitulat „**Prelucrarea statistică a diagrafiilor de sondă**” sunt analizate curbele diagrafiilor de sondă prin metode statistice. Am elaborat o nouă metodă de obținere a curbei de porozitate efectivă finală prin analiza statistică a curbelor de porozitate efectivă calculate pe baza diagrafiilor curbelor acustice, de densitate și neutronice. Scopul acestei metode este de a obține o curbă finală de porozitate efectivă cu gradul cel mai înalt de corelare la nivel de eșantion. Metoda nu se rezumă doar la calculul curbelor de porozitate, ea fiind aplicabilă atunci când curbele finale se obțin pe baza a cel puțin trei curbe intermediare ale aceleași proprietăți.

*Capitolul șase* având numele „**Optimizarea co-variabilei utilizate de algoritmi Kriging**” prezintă un flux de calcul original dezvoltat de autor pentru optimizarea variabilei secundare din interpolarea Cokriging a datelor din sonde. Ca variabilă secundară sunt folosite hărți de atribute seismice. Parametrii de interpolare sunt aleși în urma unei analize detaliate a impactului lor asupra interpolării, totodată fiind evidențiat impactul lor asupra rezultatului final. Pentru a se putea alege variabila secundară optimă a interpolării Cokriging a fost necesară analiza unui număr suficient de mare de atribute seismice. Noua metodă propusă constă în determinarea unei valori de eroare medie a interpolării pentru fiecare atribut seismic considerat. Această eroare medie a fiecărui atribut seismic luat în calcul este determinată în urma unei analize complexe a erorii de interpolare în punctele cu valori determinate din sonde. Pentru aceasta sunt necesare interpolări repetate folosind aceiași parametri de gridare Cokriging, dar cu omiterea consecutivă a sondelor analizate. Atributul seismic optim ce va fi folosit ca variabilă secundară în cadrul interpolării Cokriging a fost ales pe baza clasificării erorilor medii ale atributelor seismice luate în calcul. Totodată a fost pus în evidență faptul că prin folosirea algoritmului Cokriging pentru interpolarea datelor din sonde (având variabila secundară un atribut seismic) în locul celor fără covariabilă (Kriging simplu sau ordinar) gradul de incertitudine scade semnificativ.

*Capitolul șapte* al tezei cuprinde „**Concluzii și recomandări**” pe care autorul le-a desprins din analiza complexă a problemelor științifice decurgând din tema tezei de doctorat. Totodată sunt sugerate direcții noi de cercetare pentru aprofundarea temei.

# Cuprinsul tezei de doctorat

1.	Introducere.....	6
1.1.	Scurt istoric al dezvoltării geostatisticii în industria petrolieră.....	6
2.	Metode de investigare geofizică.....	10
2.1.	Măsurători de suprafață.....	10
2.1.1.	Prospecțiunea electrică.....	11
2.1.2.	Prospecțiunea gravimetrică.....	13
2.1.3.	Prospecțiunea magnetică.....	14
2.1.4.	Prospecțiunea seismică.....	15
2.1.5.	Prospecțiunea radiometrică.....	19
2.1.6.	Prospecțiunea geotermică.....	20
2.2.	Măsurători în gaura de sondă.....	21
2.2.1.	Carotajul electric.....	21
2.2.2.	Carotajul radioactiv.....	33
2.2.3.	Carotajul magnetic.....	38
2.2.4.	Carotajul acustic.....	41
2.2.5.	Metode de studiere a stării tehnice a sondelor.....	47
2.2.6.	Carotajul termic.....	48
3.	Atribute seismice.....	50
3.1.	Clasificarea atributelor seismice.....	50
3.1.1.	Clasificare atributelor după datele de intrare.....	51
3.1.2.	Clasificarea după conținutul informațional.....	52
3.1.3.	Clasificarea după relația lor cu geologia.....	52
3.1.4.	Clasificarea după originea evenimentului seismic.....	53
3.1.5.	Clasificare procedurală.....	54
3.2.	Metode de clasificare și calibrare.....	54
3.2.1.	Clasificare pe baza experienței interpretatorilor.....	54

3.2.2.	Geostatistică – statistica atributelor seismice .....	55
3.2.3.	Discriminatorii liniari.....	55
3.2.4.	Clasificări și calibrări nesupervizate .....	55
3.2.5.	Antrenament supervizat–clasificare după–Rețele Neuronale	56
3.3.	Metode de calcul.....	56
3.3.1.	Calculul în domeniul de frecvență.....	56
3.3.2.	Calculul discret în domeniul timp.....	57
3.3.3.	Descompunerea Gabor-Morlet .....	58
3.4.	Calculul atributelor seismice de bază .....	58
3.4.1.	Forma trasei (envelope) .....	58
3.4.2.	Rata de schimbare (prima derivată) a formei trasei.....	59
3.4.3.	A doua derivată a formei trasei.....	60
3.4.4.	Faza instantanee.....	61
3.4.5.	Cosinusul fazei .....	62
3.4.6.	Frecvența instantanee.....	62
3.4.7.	Accelerația instantanee .....	64
3.4.8.	Lungimea de bandă instantanee.....	64
3.4.9.	Frecvența dominantă instantanee.....	65
3.4.10.	Factorul de calitate Q instantaneu.....	66
3.4.11.	Impedanța acustică relativă .....	67
3.5.	Atribute ale formei de undă.....	68
3.6.	Atribute geometrice .....	69
3.6.1.	Calculul atributelor geometrice .....	71
3.6.2.	Atribute complexe calculate prin scanare aprofundată .....	73
4.	Relațiile spațiale între date – estimare și modelare .....	78
4.1.	Ipoteza de staționaritate .....	78
4.2.	Covariația .....	78
4.3.	Coeficientul de corelare .....	79

4.4.	Variograma.....	80
4.4.1.	Estimarea variogramei .....	82
4.4.2.	Calculul variogramei.....	90
4.5.	Tehnici de estimare Kriging.....	96
4.5.1.	Noțiuni Kriging de bază.....	97
4.5.2.	Kriging simplu.....	99
4.5.3.	Kriging Ordinar .....	101
4.5.4.	Cokriging.....	103
4.5.5.	Kriging cu trend (Kriging universal) .....	106
5.	Prelucrarea statistică a diagrafiilor de sondă.....	110
5.1.	Determinarea volumului de argilă .....	110
5.2.	Determinarea porozității efective din diagramele de sondă.....	112
5.2.1.	Porozitatea din carotajul acustic .....	112
5.2.2.	Porozitatea din carotajul de densitate (gamma-gamma).....	113
5.2.3.	Porozitatea din carotajul neutronic .....	114
5.2.4.	Rezultatul calculului porozității efective .....	115
5.3.	Calculul statistic al porozității efective.....	117
5.3.1.	Calculul diferențelor dintre diverse curbe de porozitate.....	117
5.3.2.	Normalizarea diferențelor (calculul gradului de corelare) .....	119
5.3.3.	Calculul porozității finale.....	120
6.	Optimizarea co-variabilei utilizate de algoritmi Kriging.....	124
6.1.	Datele de intrare .....	125
6.2.	Determinarea parametrilor de interpolare Kriging.....	130
6.2.1.	Gama (range) variogramei .....	130
6.2.2.	Coeficientul de corelare .....	133
6.2.3.	Variabila secundară optimă.....	136
7.	Concluzii și propuneri.....	171
8.	Bibliografie.....	179

9.	Anexa .....	183
9.1.	Program software în limbaj R pentru calculul statistic al porozității efective .....	183
9.2.	Program software în limbaj R pentru extragerea valorilor de porozitate estimate în locațiile sondelor, din interpolările Cokriking .....	191

# Statistical processing of geophysical and wells data to characterize hydrocarbon reservoirs

---

**PhDc:**  
**M.Eng. Liviu Robertino Grindei**

**Supervisors:**  
**Prof. Dr. Eng. Mihai Pascu COLOJA**  
**Prof. Dr. Eng. Constantin POPA**

## ***ABSTRACT***

Are very common situations when was notice a deficiency in exploiting of hydrocarbon reservoirs due to inadequate description. There are many situation when development wells drilled between existing wells had reservoir properties not average values of nearby wells, or there were situations when certain chemicals injected into wells appear in unexpected places, channeling of the replacement agent is too early on production wells and the oil production is below the expectations. This requires the use of more complex methods to describe the reservoirs. Since the '80s modern methods began to be used to describe the reservoirs.

The nature complexity forces us to use statistics to characterize it.

This thesis aims to study applications of statistical methods for well logs processing and distribution of the wells properties in the reservoir model. New data processing approaches have been researched and developed based on geostatistical algorithms in order to reduce the uncertainty of indirect measurements and spatial distribution.

The thesis is divided into seven chapters as follows:

The *first chapter* "**Introduction**" describes the significant of reservoirs studies using statistical methods and shows a brief history of their application in mining and oil industry.

The *second chapter* "**Geophysical investigation methods**" presents surface and borehole geophysical investigation methods. More emphasis has been granted to the borehole geophysical investigation methods and to the main parameters which have been defined using them.

The *third chapter* "**Seismic attributes**" presents the classification of the seismic attributes generated based on 2D and 3D seismic data, the methodology and the main applications of them.



The *fourth chapter* entitled "**Dataspatial relations -estimationand modeling**" describes data interpolation's main statistical methods using Kriging algorithms (Simple Kriging, Ordinary Kriging, Cokriging and Universal Kriging). Also in this section is described the variogram construction and its parameters.

The *fifth chapter* "**Statistical processing of well logs**" analyzed the well logs using statistical methods. It has been developed a new method in order to obtain the final effective porosity curve using statistical analysis of effective porosity curves, using acoustic, density and neutron logs. The main goal of this new method is to obtain a final effective porosity curve with the highest correlation at the sample level. This new method is not limited only to the porosity estimation, also it can be used to estimate any kind of final log based on minimum three input logs of the same attribute or propriety.

The *sixth chapter* "**Co-variable optimization used by Kriging algorithms**" presents the original workflow developed by the author to optimize the secondary variable from Cokriging interpolation of well data. A secondary variable are used seismic attributes maps. Interpolation parameters are chosen following a detailed analysis of their impact on interpolation, all is revealed on their impact on the final result. In order to choose the optimal co-variable of Cokriging interpolation was necessary to analyze as sufficient number of seismic attributes. The new method proposed consists in determining an average interpolation error values for each seismic attribute considered. The average error of each seismic attribute is determined after a comprehensive analysis of interpolation errors in points with values determined from wells. This requires repeated interpolations using the same gridding parameters but omitting consecutive values from analyzed wells. The optimal seismic attribute that will be used as a secondary variable in Cokriging interpolation was chosen based on the average error ranking of seismic attributes considered. It was also demonstrate that by using Cokriging algorithm to interpolate wells data from (seismic attribute as secondary variable) instead of an interpolation algorithm without covariates (simple or ordinary Kriging) uncertainty decreases significantly.

The *seventh chapter* of the thesis includes "**Conclusions and Recommendations**" which author has extracted from the analysis of complex scientific issues arising from this doctoral thesis. However new research directions are suggested to deepen the subject.

# Thesis table of contents

1.	Introduction .....	6
1.1.	Brief history of geostatistics in the oil industry .....	6
2.	Geophysical investigation methods .....	10
2.1.	Surface measurements .....	10
2.1.1.	Electrical survey .....	11
2.1.2.	Gravimetric survey .....	13
2.1.3.	Magnetic survey .....	14
2.1.4.	Seismic survey.....	15
2.1.5.	Radiometric survey.....	19
2.1.6.	Geothermal survey.....	20
2.2.	Borehole measurements.....	21
2.2.1.	Electrical logs.....	21
2.2.2.	Radioactive logs .....	33
2.2.3.	Magnetic logs .....	38
2.2.4.	Acoustic logs .....	41
2.2.5.	Casing integrity logs .....	47
2.2.6.	Thermic logs.....	48
3.	Seismic attributes.....	50
3.1.	Seismic attributes classification .....	50
3.1.1.	Classification based on input data .....	51
3.1.2.	Classification based on informational content .....	52
3.1.3.	Classification based on geology relationship .....	52
3.1.4.	Classification based on seismic event origin.....	53
3.1.5.	Procedural classification .....	54
3.2.	Classification and calibration methods.....	54
3.2.1.	Classification based on interpreter experience .....	54

3.2.2.	Geostatistic – seismic attributes statistics .....	55
3.2.3.	Linear discriminatory.....	55
3.2.4.	Unsupervised classifications and calibration .....	55
3.2.5.	Supervised training – neural network classification.....	56
3.3.	Computing methods.....	56
3.3.1.	Frequency domain computing .....	56
3.3.2.	Discrete time domain calculation .....	57
3.3.3.	Gabor-Morlet decomposition .....	58
3.4.	Computing of basic seismic attributes .....	58
3.4.1.	Envelope.....	58
3.4.2.	Envelope first derivate .....	59
3.4.3.	Envelope second derivate.....	60
3.4.4.	Instantaneous phase .....	61
3.4.5.	Cosines of phase .....	62
3.4.6.	Instantaneous frequency.....	62
3.4.7.	Instantaneous acceleration.....	64
3.4.8.	Instantaneous bandwidth.....	64
3.4.9.	Instantaneous dominant frequency .....	65
3.4.10.	Instantaneous Q factor .....	66
3.4.11.	Relative acoustic impedance .....	67
3.5.	Waveform attributes .....	68
3.6.	Geometrical attributes.....	69
3.6.1.	Geometrical attributes computation.....	71
3.6.2.	Complex attributes computed by complex scan.....	73
4.	Spatial relationships between data – modeling and estimation.....	76
4.1.	Hypothesis of stationarity .....	76
4.2.	Covariance .....	78
4.3.	Correlation coefficient .....	79

4.4.	Variogram .....	80
4.4.1.	Variogram estimation.....	82
4.4.2.	Variogram computing .....	90
4.5.	Kriging interpolation .....	96
4.5.1.	Basics of Kriging .....	97
4.5.2.	Simple Kriging .....	99
4.5.3.	OrdinaryKriging .....	101
4.5.4.	Co-kriging .....	103
4.5.5.	Krigingwith trend (Universal Kriging) .....	106
5.	Statistical processing of well logs.....	110
5.1.	Shale volume calculation .....	110
5.2.	Effective porosity computing using logs .....	112
5.2.1.	Porosity from acoustic log.....	112
5.2.2.	Porosity from density log (gamma-gamma).....	113
5.2.3.	Porosity from neutron log .....	114
5.2.4.	Results of effective porosity computation from logs.....	115
5.3.	Statistical computing of effective porosity .....	117
5.3.1.	Computing the porosity logs difference.....	117
5.3.2.	Difference normalization (computing of correlation degree).....	119
5.3.3.	Computing the final porosity log .....	120
6.	Co-variable optimization used byKriging interpolation .....	124
6.1.	Input data.....	125
6.2.	Kriging parameters define.....	130
6.2.1.	Variogram range .....	130
6.2.2.	Correlation coefficient .....	133
6.2.3.	Optimal secondary variable .....	136
7.	Conclusions and recommendations .....	171
8.	Bibliography.....	179

9.	Appendix .....	183
9.1.	R software program to compute effective porosity using statistical approach.....	183
9.2.	R software program to extract the porosity values estimated at wells locations, after Cokriging interpolation	191

# Le traitement statistique des données géophysiques et les données de sondes pour caractériser les réservoirs d'hydrocarbures

---

**Doctorant:**  
Eng. Liviu Robertino Grindei

**Directeurs de thèse:**  
Prof. Dr. Eng. Mihai Pascu COLOJA  
Prof. Dr. Eng. Constantin POPA

## RÉSUMÉ

Il arrive très fréquemment que, à cause des descriptions inadéquates des réservoirs, on constate des manquements dans l'exploitation des hydrocarbures. Il existe des situations où des sondes de développement sont installées parmi les sondes déjà existantes, les propriétés des réservoirs traversés par ces sondes n'ayant pas les valeurs moyennes des sondes autour, où encore des situations où les produits chimiques introduits dans certaines sondes apparaissaient dans des endroits inattendus, l'agent de remplacement se dirigeant trop tôt vers les sondes de production et la production de pétrole étant en dessous des attentes. Tout cela impose l'utilisation des méthodes plus complexes pour la description des réservoirs de hydrocarbures. A partir des années 80, des méthodes modernes de description des réservoirs commencent à être utilisées.

La complexité de la nature nous oblige à utiliser des statistiques pour la caractériser.

Cette thèse vise à étudier des applications des méthodes statistiques pour le traitement des diagrammes des sondes, ainsi que la distribution des propriétés des sondes dans le cadre du modèle du réservoir. Nous avons étudié et élaboré de nouveaux flux pour le traitement de ces données à partir des algorithmes géostatistiques en vue de réduire le degré d'incertitude des mesures indirectes et de leur distribution spatiale.

La thèse comprend six chapitres :

L'**Introduction** présente l'impact des analyses des réservoirs de hydrocarbures par des méthodes statistiques, ainsi qu'un historique de leur utilisation dans l'industrie minière et pétrolière.

*Le deuxième chapitre, „Méthodes d'investigation géophysique”, est consacré aux méthodes d'investigation géophysique de surface et de forage. Une attention particulière a été prêtée aux méthodes d'investigation des sondes et aux principaux paramètres enregistrés par ces méthodes.*

*Le troisième chapitre*, Caractéristique sismiques, contient une classification des caractéristiques sismiques générées par les données sismiques 2D et 3D, les modalités de calcul et leurs principales applications.

*Le quatrième chapitre*, „**Les relations spatiales entre les données – l’estimation et la modélisation**”, décrit les principales méthodes d’interpolation statistique des données en utilisant les algorithmes de Krigage (Krigage simple, Krigage ordinaire, Cokrigage et Krigage universel). Ce chapitre contient aussi une description de la construction des variogrammes et de leurs paramètres.

Dans le *cinquième chapitre*, „**Traitement statistique des diagraphies de sonde**”, nous avons fait une analyse des courbes des diagraphies de sonde en utilisant des méthodes statistiques. Nous avons élaboré une nouvelle méthode pour obtenir la courbe de porosité effective finale par l’analyse statistique des courbes de porosité effective calculées sur la base des diagraphies des courbes acoustiques, de densité et neutroniques. Le but de cette méthode est d’obtenir une courbe finale de porosité effective avec le plus haut degré de corrélation au niveau de l’échantillon. La méthode ne se limite pas uniquement au calcul des courbes de porosité, mais elle est applicable aussi lorsque les courbes finales s’obtiennent à partir de trois courbes intermédiaires de la même caractéristique.

*Le sixième chapitre – „L’optimisation de la covariable utilisée par les algorithmes de Krigage”* - présente un flux de calcul original que nous avons développé pour l’optimisation de la variable secondaire de l’interpolation de krigage des données de sonde. Les cartes des caractéristiques sismiques sont utilisées comme variable secondaire. Les paramètres d’interpolation sont choisis suite à une analyse détaillée de leur impact sur l’interpolation, en soulignant en même temps leur impact sur le résultat final. Pour choisir la meilleure variable secondaire de l’interpolation de Cokrigage, l’analyse d’un nombre suffisant de caractéristiques sismiques a été nécessaire. La nouvelle méthode suppose l’identification d’une valeur d’erreur moyenne de l’interpolation pour chacune des caractéristiques sismiques analysées. Cette valeur d’erreur moyenne de chaque caractéristique sismique analysée est déterminée par une analyse complexe de l’erreur de l’interpolation dans les points à valeur déterminée des sondes. Dans ce but, des interpolations répétées sont nécessaires, en utilisant les mêmes paramètres de quadrillage de Cokrigage, mais avec l’omission consécutive des sondes analysées. La meilleure caractéristique sismique utilisée comme variable secondaire dans l’interpolation de cokrigage a été choisie sur la base de la classification des erreurs moyennes des caractéristiques sismiques analysées. En même temps, nous avons mis en évidence le fait qu’en utilisant l’algorithme de Cokrigage pour l’interpolation des données des sondes (ayant comme variable secondaire une caractéristique sismique) à

la place de ceux sans covariable (krigeage simple ou ordinaire), le degré d'incertitude baisse de manière significative.

*Le dernier chapitre* inclut les „**Conclusions et recommandations**” que nous avons tirées de l’analyse complexe des problèmes scientifiques qui découlent de la problématique de notre thèse. D’autres directions de recherche sont également suggérées pour approfondir le sujet.



# Table des matières de Thèse de doctorat

1.	Introduction .....	6
1.1.	Historique du développement géostatistique de l'industrie pétrolière .....	6
2.	Les méthodes géophysiques .....	10
2.1.	Les mesures de surface .....	10
2.1.1.	La prospection électrique .....	11
2.1.2.	La prospection gravimétrique.....	13
2.1.3.	La prospection magnétique .....	14
2.1.4.	La prospection sismique.....	15
2.1.5.	La prospection radiométrique.....	19
2.1.6.	La prospection géothermique .....	20
2.2.	Les mesures diagraphiques .....	21
2.2.1.	La mesure de compagne électrique.....	21
2.2.2.	La mesure de compagne radioactive.....	33
2.2.3.	La mesure de compagne magnétique.....	38
2.2.4.	La mesure de compagne acoustique .....	41
2.2.5.	Log d'Intégrité du cuvelage .....	47
2.2.6.	La mesure de compagne thermique .....	48
3.	Attributs sismiques .....	50
3.1.	Classification des attributs sismiques .....	50
3.1.1.	Attributs de classification à partir de données.....	51
3.1.2.	Attributs de classification à partir du contenu interprété .....	52
3.1.3.	Attributs de classification relative aux données géologiques.....	52
3.1.4.	Classification par événement origine sismique .....	53
3.1.5.	Classificationprocédurale.....	54
3.2.	Les méthodes de classification et d'étalonnage .....	54

3.2.1.	Classification basée sur l'expérience des interpréteurs .....	54
3.2.2.	Géostatistique – Statistiques des attributs sismiques .....	55
3.2.3.	Discrimination linéaire.....	55
3.2.4.	Classification non supervisée et étalonnage.....	55
3.2.5.	Formation supervisée – classification a partir des réseaux	
Neuronaux 56		
3.3.	Méthodes de calcul .....	56
3.3.1.	Calcul dans le domaine fréquentiel.....	56
3.3.2.	Calcul dans le domaine du temps discret .....	57
3.3.3.	Décomposition de Gabor-Morlet.....	58
3.4.	Calcul des attributs sismiques de base.....	58
3.4.1.	Enveloppe.....	58
3.4.2.	Dérivée premières de l'enveloppe .....	59
3.4.3.	Dérivée seconde de l'enveloppe.....	60
3.4.4.	Phase instantanée .....	61
3.4.5.	Cosinus de la phase.....	62
3.4.6.	Fréquence instantanée .....	62
3.4.7.	Accélération instantanée .....	64
3.4.8.	Bande passante instantanée .....	64
3.4.9.	Fréquence dominante instantanée.....	65
3.4.10.	Facteur instantané de qualité Q .....	66
3.4.11.	Impédance acoustique relative .....	67
3.5.	Les attributs de la forme d'onde .....	68
3.6.	Attributs géométriques.....	69
3.6.1.	Calcul des attributs géométriques.....	71
3.6.2.	Attributs complexes calculées à partir d'analyseur complexes.....	73
4.	Les relations spatiales entre les données – Modélisation et estimation.....	76
4.1.	Hypothèse de stationnarité .....	76

4.2.	Covariance .....	78
4.3.	Le coefficient de corrélation .....	79
4.4.	Variogramme.....	80
4.4.1.	Estimation de variogramme.....	82
4.4.2.	Calcul du variogramme .....	90
4.5.	Interpolation par Krigeage .....	96
4.5.1.	Concept de base du Krigeage .....	97
4.5.2.	Krigeage simple .....	99
4.5.3.	Krigeage ordinaire .....	101
4.5.4.	Co-Krigeage .....	103
4.5.5.	Krigeage utilisant la courbe de tendance (Krigeage universel).....	106
5.	Le traitement statistique des données diagraphiques.....	110
5.1.	Déterminer du volume d'argile.....	110
5.2.	Détermination de la porosité effective à partir de données diagraphiques.....	112
5.2.1.	Porosité à partir de données diagraphiques acoustiques .....	112
5.2.2.	Porosité à partir de données diagraphiques densité (gamma-gamma).....	113
5.2.3.	Porosité à partir de données diagraphiques neutrons.....	114
5.2.4.	Resultats de la porosité effective à partir de données diagraphiques.....	115
5.3.	Calcul statistique de la porosité effective .....	117
5.3.1.	Calcul des différences entre les diverses courbes de porosité.....	117
5.3.2.	Normalisation des différences (Calcul du degré de corrélation).....	119
5.3.3.	Calcul porosité finale .....	120
6.	Optimisation des paramètres covariants a partir de l'interpolation par Krigeage .....	124

6.1.	Données d'entrée.....	125
6.2.	Détermination des paramètres d'interpolation par Krigeage.....	130
6.2.1.	Plage du variogramme .....	130
6.2.2.	Le coefficient de corrélation.....	133
6.2.3.	Variable secondaire optimale .....	136
7.	Conclusions et recommandations .....	171
8.	Bibliographie .....	179
9.	Annexes.....	183
9.1.	Logiciel de calcul de la porosité effective utilisant une approche statistique.....	183
9.2.	Logiciel d'extraction des valeurs de porosité estimées aux puits, après interpolation par Co-Krigeage .....	191