POLYPUBLIE

Etude de la variabilité de la résistance in situ des roches d'un bassin sédimentaire

Carlos A. Baisre

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

Date	1996
Type	Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis Mémoire de maîtrise/Master's thesis
URL de PolyPublie **PolyPublie URL**	https://publications.polymtl.ca/8991/
Conditions d'utilisation **Terms of use**	© Tous droits réservés / All rights reserved
Référence **Citation**	Baisre, C. A. (1996). Etude de la variabilité de la résistance in situ des roches d'un bassin sédimentaire [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/8991/

Détails de la thèse
Thesis details

Directeurs de recherche **Advisors**	Denis Gill, & Jacques Ouellet
Programme **Program**	Non spécifié

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ DE LA RÉSISTANCE IN SITU DES ROCHES D'UN BASSIN SÉDIMENTAIRE

CARLOS A. BAISRE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MINÉRAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MINÉRAL)
NOVEMBRE 1996

© Carlos A. Baisre, 1996.

National Library of Canada
Acquisitions and Bibliographic Services
395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale du Canada
Acquisitions et services bibliographiques
395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-26450-5

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ DE LA RÉSISTANCE IN SITU DES ROCHES D'UN BASSIN SÉDIMENTAIRE

présenté par: BAISRE Carlos A.

en vue de l'obtenstion du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen de:

M. CORTHÉSY Robert, Ph. D., président

M. GILL Denis E, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. OUELLET Jacques, Ph. D., membre et codirecteur de recherche

M. MARCOTTE Denis, Ph. D., membre

à MA FAMILLE !!!

REMERCIEMENTS

Tout d'abord j'aimerais exprimer mes très sincères remerciements à mon directeur de recherche, M. Denis Gill, pour ses conseils techniques et pour ces moments toujours nombreux et bien appréciés d'amitié. Mes remerciements vont aussi à M. Jacques Ouellet, mon codirecteur, pour sa critique constructive.

Je voudrais remercier en la personne de Robert Corthésy, tous ceux qui ont été, d'une façon ou d'une autre, maintes fois "dérangés" par mes questions, y compris le personnel de la section. Je suis reconnaissant à Mustapha Asli et Pierre Groleau pour leur importante collaboration technique. La participation de Denis Marcotte est aussi très appréciée.

C'est un plaisir pour moi de remercier infiniment mes camarades du département, pour la collaboration dont j'ai été l'objet et aussi pour leur présence car les jours sont longs sans les amis.

Avec une émotion très spéciale je remercie ma famille par le merveilleux fait d'être là pendant mes études et parce qu'elle a eu la patience qu'une attente demande.

J'ai réservé l'espace final pour moi-même, car je veux me remercier de la jolie folie d'avoir voulu réaliser cette maîtrise.

RÉSUMÉ

Les essais index permettent d'évaluer approximativement les propriétés mécaniques des roches des massifs rocheux. Comparativement aux essais conventionnels en laboratoire ou in situ, ces essais index sont faciles d'exécution et relativement peu coûteux. C'est pourquoi il a été suggéré par plusieurs de les utiliser pour établir la variation spatiale des propriétés mécaniques lors de l'investigation de site. Des plans d'échantillonnage plus adéquats pourraient alors être conçus pour les travaux d'ingéniérie.

ENPASOL est un système qui mesure et stocke des données relatives au forage de la roche et qui permet de procéder à une diagraphie simultanément au forage. Les paramètres mesurés avec ce système sont combinés de différentes manières. Le plus souvent, ils servent au calcul d'une résistance au forage qui est formulée de façon à être liée directement à la résistance en compression simple.

Dans le présent mémoire, cette résistance au forage est perçue comme étant le résultat d'un essai index en "continu" avec lequel on cherche à connaître la variabilité spatiale des propriétés mécaniques des roches. Pour ce faire, des données produites par le système ENPASOL lors de forages aux diamants dans les formations sédimentaires des Basses Terres du St-Laurent sont analysées par le biais de la géostatistique. Les analyses sont faites à l'aide de demi-variogrammes des données de résistance au forage.

Des demi-variogrammes propres à des segments spécifiques de forages se situant dans une seule lithologie (soit un shale, un calcaire et un grès) sont d'abord analysés. La première étape de cette analyse consiste à décrire ces derniers à l'aide d'une combinaison modèle sphérique-modèle exponentiel. L'ajustement est fait en ignorant les effets de trou et donne les portées des segments. Puis, appliquant la méthode utilisée entre autres par Pineau et Thomas, les

caractéristiques dimensionnelles des couches à propriétés mécaniques différentes sont déterminées en acceptant que les effets de trou en découlent.

Dans un deuxième temps, en utilisant les données des mêmes segments que précédemment, il est montré que les moyennes et les variances expérimentales se comportent de façon typique avec l'accroissement de la dimension du support. De plus, dans le cas des segments dont les demi-variogrammes originaux ne montrent pas d'effet de trou, les portées se conservent. De même, dans le cas des segments dont les demi-variogrammes originaux montrent des effets de trou, les caractéristiques dimensionnelles des couches se conservent.

En troisième lieu, en utilisant toujours les données des mêmes segments que précédemment, il est montré que les moyennes et les variances expérimentales se comportent de façon typique avec l'accroissement du pas d'échantillonnage. Comme dans le cas de l'accroissement de la dimension du support, les portées et les caractéristiques dimensionnelles des couches se conservent.

Finalement, à l'aide de simulations faites avec les mêmes segments et avec des données propres au gneiss qui constitue la socle rocheux sur lequel repose la série sédimentaire, il est montré qu'il est possible, dans certaines conditions, de détecter à une courte distance près, le passage d'une lithologie à une autre.

ABSTRACT

Mechanical properties of rocks can be approximately determined through index testing. Compared to laboratory or in situ conventional testing, index tests are easy and relatively cheap to conduct. This is why many authors have suggested to use them to establish the spatial variation of rock mechanical properties throughout rock masses as the site investigation proceeds. Better sampling layouts can then be designed for any engineering works.

ENPASOL is a system that measures and stocks rock drilling data and which allows logging simultaneously to drilling. The parameters measured with this system may be combined in different ways. Most often, they are used to calculate a drilling resistance which is defined in such a way that it is directly related to the unconfined compressive strength of the rock drilled.

In the present memoir, this drilling resistance is considered as the result of a "continuous" index testing with which one tries to determine the spatial variability of the mechanical properties of rocks. To achieve this, data obtained with the ENPASOL system from diamond drill holes performed in the sedimentary formations of the St-Lawrence Lowlands are analysed using geostatistics. These analyses are achieved through semi-variograms of drilling resistance.

Semi-variograms of specific drill hole segments involving a single lithology (a shale, a limestone and a sandstone) are first analysed. The first step of these analyses consists in describing the formers using a spherical model-exponential model combination, ignoring the hole effects. This allows to determine the span of each segment. The second step consists, using a method already suggested by Pineau and Thomas among others, to detect, within a given lithology, beds of different mechanical properties if one accepts that hole effects are generated by such an alternance.

Using the same data as previously, it is subsequently shown that both the experimental averages and experimental variances evolve as expected when the dimension of the support is increased. But, the spans, in the case of original semi-variograms not showing a hole effect, as well as bed average thicknesses and spacings in the case of original semi-variograms showing a hole effect, remain constant.

Thirdly, using again the same data, it is subsequently shown that both the experimental averages and experimental variances evolve as expected when the spacing of the measurements is increased. But, the spans, in the case of original semi-variograms not showing a hole effect, as well as bed average thicknesses and spacings in the case of original semi-variograms showing a hole effect, remain constant.

Finally, through simulations made using data obtained from the gneiss upon which the sedimentary series rest as well as the previous data, it is shown that it is possible under certain conditions to detect within a short distance, an interface between two lithologies.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT viii

LISTE DES TABLEAUX xiii

LISTE DES FIGURES xiv

LISTE DES SYMBOLES xviii

CHAPITRE I : INTRODUCTION 1

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 4

2.1 La géostatistique et les propriétés mécaniques des roches 4

2.2 Le système ENPASOL numérique 10

CHAPITRE III : ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE 15

3.1 Mise en situation 15

3.2 Environnement géologique 16

CHAPITRE IV : MÉTHODOLOGIE 19

4.1 Préambule 19

4.2 Description de la méthodologie 19

4.2.1 Obtention des demi-variogrammes 19

4.2.2 Modélisation des demi-variogrammes 20

4.2.3 La détection des couches à l'intérieur d'une même lithologie 20

4.2.4 Les effets du changement de dimension du support 21

4.2.5 Les effets du changement de l'espacement....21
4.2.6 La structure géologique....21
4.2.7 La détection des changements de lithologie....21

CHAPITRE V : LES RESULTATS....22
5.1 Préambule....22
5.2 L'allure des demi-variogrammes....23
5.3 La modélisation des demi-variogrammes....23
5.3.1 La combinaison modèle sphérique-modèle exponentiel....23
5.3.2 Les modèles d'effet de trou....26
5.4 Les dimensions des couches et leurs espacement....28
5.5 Le changement de support....30
5.6 Le changement de l'espacement....34
5.7 La structure géologique....37
5.8 Les changements de lithologie....39

CHAPITRE VI : DISCUSSION....92
6.1 Les données....92
6.2 Les resultats....94
6.2.1 Adéquation des dimension des champs....94
6.2.2 La modélisation....95
6.2.2.1 Le modèle combiné sphérique-exponentiel....95
6.2.2.2 Les effets de trou....96
6.2.3 Le changement de support....97
6.2.4 Le changement de l'espacement....99
6.2.5 La structure géologique....99
6.2.6 Le changement de lithologie....100

CHAPITRE VII : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 114

7.1 Conclusions 114

7.1.1 L'allure générale des demi-variogrammes 114

7.1.2 Les effets de changement de dimension du support 115

7.1.3 Les effets de changement de l'espacement 117

7.1.4 La structure géologique 118

7.1.5 La détection des changements de lithologie 119

7.2 Recommandations 120

RÉFÉRENCES 122

LISTE DES TABLEAUX

3.1: Caratéristique générale des forages et des roches....17

5.1: Résultats de la modélisation....25

5.2: Valeurs des amplitudes relatives des effets de trou....27

5.3: Valeurs utilisées pour le calcul de l'amplitude relative dans les cas des DV G3 et DV G6....28

5.4: Les épaisseurs moyennes des couches et la grandeur moyenne des périodes....29

5.5: Changement du support et de l'espacement....32

5.6: Paramètres variographiques des DV G1 mx....33

5.7: Évolution du coefficient α avec le changement de support....33

5.8: Paramètres variographiques des DV G1mx....36

5.9: Évolution du coefficient α avec le changement de l'espacement....36

5.10: Analyse des structures géologiques....38

5.11 Analyse lithologique....39

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1. Figure tirée du rapport ENPASOL 14
Figure 5.1. Demi-variogramme G1 45
Figure 5.2. Demi-variogramme G2 46
Figure 5.3. Demi-variogramme G3 46
Figure 5.4. Demi-variogramme G4 47
Figure 5.5. Demi-variogramme G6 47
Figure 5.6. Demi-variogramme G7 48
Figure 5.7. Demi-variogramme G8 48
Figure 5.8. Demi-variogramme G9 49
Figure 5.9. Demi-variogramme G10 49
Figure 5.10. Demi-variogramme G11 50
Figure 5.11. Demi-variogramme G5 50
Figure 5.12. Demi-variogramme G12 51
Figure 5.13. Demi-variogramme G13 51
Figure 5.14. Demi-variogramme G14 52
Figure 5.15. Demi-variogramme G15 52
Figure 5.16a et b. Demi-variogramme G1 53
Figure 5.17a et b. Demi-variogramme G2 54
Figure 5.18a et b. Demi-variogramme G3 55
Figure 5.19a et b. Demi-variogramme G4 56
Figure 5.20a et b. Demi-variogramme G6 57
Figure 5.21a et b. Demi-variogramme G7 58
Figure 5.22a et b. Demi-variogramme G8 59
Figure 5.23a et b. Demi-variogramme G9 60
Figure 5.24a et b. Demi-variogramme G10 61

Figure 5.25a et b. Demi-variogramme G11 62
Figure 5.26a et b. Demi-variogramme G5 63
Figure 5.27a et b. Demi-variogramme G12 64
Figure 5.28a et b. Demi-variogramme G13 65
Figure 5.29a et b. Demi-variogramme G14 66
Figure 5.30a et b. Demi-variogramme G15 67
Figure 5.31a. Demi-variogramme G3 68
Figure 5.31b. Demi-variogramme G6 68
Figure 5.32. Demi-variogramme G1m3 69
Figure 5.33. Demi-variogramme G1m9 69
Figure 5.34. Demi-variogramme G1m12 70
Gigure 5.35. Demi-variogramme G1m20 70
Figure 5.36. Demi-variogramme G1m25 71
Figure 5.37. Demi-variogramme G3m5 72
Figure 5.38. Demi-variogramme G3m10 72
Figure 5.39. Demi-variogramme G3m15 73
Figure 5.40. Demi-variogramme G3m20 73
Figure 5.41. Demi-variogramme G1u3 74
Figure 5.42. Demi-variogramme G1u9 74
Figure 5.43. Demi-variogramme G1u12 75
Figure 5.44. Demi-variogramme G1u20 75
Figure 5.45. Demi-variogramme G1u25 76
Figure 5.46. Demi-variogramme G3u5 77
Figure 5.47. Demi-variogramme G3u10 77
Figure 5.48. Demi-variogramme G3u15 78
Figure 5.49. Demi-variogramme G3u20 78
Figure 5.50. Demi-variogramme G7-13a 79
Figure 5.51. Demi-variogramme G7-13b 79

Figure 5.52. Demi-variogramme G7-13c 80
Figure 5.53. Demi-variogramme G7-13d 80
Figure 5.54. Demi-variogramme G7-13e 81
Figure 5.55. Demi-variogramme G7-13f 81
Figure 5.56. Demi-variogramme G7-13g 82
Figure 5.57. Demi-variogramme G7-13h 82
Figure 5.58. Demi-variogramme G7-13i 83
Figure 5.59. Demi-variogramme G5 Ba 84
Figure 5.60. Demi-variogramme G5 a 84
Figure 5.61. Demi-variogramme G5d1 85
Figure 5.62. Demi-variogramme G5d2 85
Figure 5.63. Demi-variogramme G5d3 86
Figure 5.64. Demi-variogramme G5d4 86
Figure 5.65. Demi-variogramme G5d5 87
Figure 5.66. Demi-variogramme G5d6 87
Figure 5.67. Demi-variogramme G5d7 88
Figure 5.68. Demi-variogramme G5d8 88
Figure 5.69. Demi-variogramme G5d9 89
Figure 5.70. Demi-variogramme G5d10 89
Figure 5.71. Demi-variogramme G5 c 90
Figure5.72. Demi-variogramme G5 e 90
Figure 5.73. Demi-variogramme G7-13-7 91
Figure 6.1. Demi-variogramme G3-1 102
Figure 6.2. Demi-variogramme G3-2 102
Figure 6.3. Demi-variogramme G3-3 103
Figure 6.4. Demi-variogramme G3-4 103
Figure 6.5. Demi-variogramme G3-5 104
Figure 6.6. Demi-variogramme G3-6 104

Figure 6.7. Demi-variogramme G3-7 105
Figure 6.8. Demi-variogramme G3-8 105
Figure 6.9. Demi-variogramme G3-9 106
Figure 6.10. Demi-variogramme G3-10 106
Figure 6.11. Demi-variogramme G3-11 107
Figure 6.12. Demi-variogramme G3-12 107
Figure 6.13. Demi-variogramme G3-13 108
Figure 6.14. Demi-variogramme G3-14 108
Figure 6.15. Demi-variogramme G3-15 109
Figure 6.16. Demi-variogramme G3-16 109
Figure 6.17. Demi-variogramme G3-17 110
Figure 6.18. Demi-variogramme G3-18 110
Figure 6.19. Demi-variogramme G3-19 111
Figure 6.20. Demi-variogramme G3-20 111
Figure 6.21. Demi-variogramme G3-21 112
Figure 6.22. Demi-variogramme G3-22 112
Figure 6.23a et b. Schéma de sédimentation simple et complexe..... 113

LISTE DES SYMBOLES

a	: Portée du demi-variogramme
a'	: Portée pratique du demi-variogramme lorsque le modèle exponentiel est utilisé
a	: Espacement moyen des couches, m
b	: Épaisseur moyenne des couches, m
C	: Variance, $(kg/cm^2)^2$
C(h)	: Valeur minimum de la covariance
C(0)	: Effet de pépite, $(kg/cm^2)^2$
D	: Diamètre de l'outil (7,62 cm)
DV	: Demi-variogramme
F	: Résistance au forage (kg/cm^2)
h	: Distance (cm)
K	: Constante caractéristique du terrain
P	: Poussée nette en tonnes
V_t	: Vitesse d'avancement en mm/s
W	: Vitesse de rotation en tr/mn

CHAPITRE I
INTRODUCTION

Les propriétés mécaniques des roches des massifs rocheux sont l'objet d'études plus ou moins approfondies de la part des ingénieurs selon l'importance du projet qu'ils entreprennent. Il faut greffer à ces dernières les résultats de rélevés structuraux, ceux des mesures de contraintes préalables et ceux des études hydrogéologiques afin de compléter la banque de données géomécaniques, quel que soit le type d'ouvrage en cause.

Conventionnellement, les éprouvettes servant à la détermination des propriétés mécaniques des roches sont préparées à partir d'échantillons prélevés à même les carottes de forage. Ces essais conventionnels sont relativement laborieux et coûteux et la tendance est d'en commander le plus petit nombre possible. De plus, il arrive parfois que certains problèmes empêchent ou limitent l'obtention d'échantillons. Ce sont des problèmes liés au forage, à la roche ou au massif rocheux, etc.

Les propriétés mécaniques des roches peuvent aussi être obtenues indirectement par le biais de plusieurs essais dits essais index, qui sont tous à la portée des ingénieurs. Les divers essais de dureté et les essais de résistance en pointes (double poinçonnement) sur les carottes de forage, les essais de poinçonnement de parois latérales de trous de forage, pour ne nommer que ceux-là, sont des essais de cette catégorie parmi les plus utilisés. Ils s'effectuent rapidement et sont peu coûteux. De plus, les essais index du type poinçonnement de parois latérales de trous de forage sont aussi des essais palliatifs lorsqu'il y a absence de carottes de forage ou lorsque ces dernières ne permettent pas la préparation d'éprouvettes d'essais conventionnels. Dans l'ensemble, les essais index sont utilisés en fonction des objectifs visés lors de l'investigation du site, de la précision recherchée alors et de l'importance de l'ouvrage.

Par ailleurs, il est reconnu que la variation spatiale des phénomènes naturels peut être avantageusement décrite à l'aide de la théorie des variables régionalisées qu'on identifie maintenant par le terme géostatistiques (Davis 1986). Pour appliquer ces théories aux propriétés mécaniques des roches dans les massif rocheux, il faut disposer d'un grand nombre de résultats d'essais. Il est extrêmement rare de réaliser sur un même site un nombre d'essais conventionnels suffisamment grand pour étudier la variation spatiale des propriétés mécaniques des roches. C'est pourquoi plusieurs auteurs ont proposé d'utiliser les essais index à cette fin. Après avoir caractérisé, rapidement et économiquement, la variabilité spatiale à l'aide de ces derniers, il est alors subséquemment possible, s'il est jugé nécessaire, de réaliser un programme d'échantillonnage pour la conduite d'essais mécaniques conventionnels en laboratoire ou de sélection de points d'exécution d'essais in situ.

D'autre part, des systèmes plus ou moins élaborés d'obtention de données ont été développés pour saisir les caractéristiques du terrain au fur et à mesure que le forage se réalise. Bien qu'ayant une certaine popularité en Europe, ces systèmes d'instrumentation de foreuses et de perforatrices sont peu utilisés en Amérique du Nord. Parmi ces systèmes, ENPASOL serait dans l'ensemble le plus populaire. Bien que les données saisies par ce système sont fort nombreuses et peuvent être de grande qualité, elles ne sont pas habituellement traitées de façon à définir la structure spatiale des caractéristiques mécaniques de la roche du massif foré.

D'après Pineau et Thomas (1983), la variation de la résistance des roches est l'expression d'hétérogénéités intrinsèques à la matière qui les constituent (pétrographie, porosité primaire) et d'hétérogénéités liées aux transformations induites par la tectonique au cours des temps géologiques (microfissures, discontinuités). La plupart des travaux publiés sur la variation spatiale des propriétés mécaniques des roches portent principalement sur les effets du premier type d'hétérogénéités.

L'objectif du présent mémoire est d'analyser, par le biais de la géostatistique, des données produites par le système ENPASOL lors de forages aux diamants effectués dans une formation sédimentaire des Basses Terres du St-Laurent.

Cette analyse est réalisée à l'aide de demi-variogrammes directionnels d'un paramètre calculé des données saisies, paramètre appellé résistance au forage et perçu dans le présent document comme le résultat d'un essai index. Elle vise la caractérisation des structures spatiales liées aux deux types d'hétérogénéités. L'impact du support des échantillons et de l'espacement des prélèvements sur les caractéristiques des demi-variogrammes est aussi brièvement étudié.

Cette recherche a été faite dans le but d'explorer les points spécifiques suivants:

- possibilité de détecter les couches à propriétés mécaniques différentes dans une même lithologie;
- possibilité de détecter un changement de lithologie;
- évolution des paramètres variographiques avec l'accroissement des dimensions du support;
- évolution des paramètres variographiques avec accroissement du pas.

Il est supposé que le lecteur de ce document possède déjà une certaine connaissance de la théorie des variables régionalisées. La présentation des fondements de la géostatistique est jugée inutile.

CHAPITRE II
REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 La géostatistique et les propriétés mécaniques des roches

La dispersion des propriétés mécaniques des roches des massifs rocheux est notoire. Elle est maintenant reconnue par tous ceux qui oeuvrent en mécanique des roches et en contrôle des terrains. Traditionnellement, ce phénomène est pris en ligne de compte à l'aide de méthodes statistiques classiques des variables aléatoires. Mais, ces dernières ignorent le fait que deux mesures pour deux points voisins peuvent être auto-corrélées.

Dubart et Josien (1973) auraient été les premiers auteurs à publier des demi-variogrammes impliquant une propriété mécanique de roches. La propriété mécanique utilisée est une dureté (dureté CERCHAR, essai index typique) qu'ils ont démontré être reliée à la résistance en compression simple (compression uniaxiale). Les essais ont été effectués sur des carottes de forage provenant de différentes mines de charbon (dureté CERCHAR variant entre 0 et 125). Pour eux, la mesure de la dispersion des résultats est insuffisante pour décrire la variabilité des propriétés mécaniques des roches et il faut aussi caractériser la structure spatiale. Ils montrent les quatre modèles de demi-variagrammes suivants (pas de 5 cm):

- un demi-variogramme directionnel avec effet de pépite pur, la variance expérimentale étant 6,8;
- un demi-variogramme directionnel bien représenté par le modèle sphérique, la variance expérimentale étant 1,3, la portée, 60 cm et l'effet de pépite, 60%;

- un demi-variogramme directionnel dont le champ est de dimension trop petite pour caractériser la structure spatiale (modèle linéaire, non-stationarité), la variance expérimentale étant 14,9 et l'effet de pépite, 20%;
- un demi-variogramme directionnel montrant un effet de trou, la variance globale étant 6,4, l'épaisseur moyenne des couches, 80 cm et l'effet de pépite, 20%. La dimension du champ n'a pas permis d'établir la grandeur de la périodicité.

Même si les travaux précurseurs de Dubart et Josien remontent à presqu'un quart de siècle, il y a eu depuis, peu de travaux publiés sur le sujet.

Pretorius (1980) s'est intéressé à la variabilité de la résistance à la compression simple obtenue pas essais conventionnels. Les éprouvettes d'essais ont été produites à partir de carottes de forage de 2,17 cm, provenant de trois sondages orthogonaux. Il se limite à produire des demi-variogrammes directionnels avec un pas d'échantillonnage de 4,34 cm. Il affirme que 30% de la variance totale est dû aux erreurs expérimentales propres à la mesure de la résistance.

Lapointe (1981) rapporte des paramètres de modélisation de demi-variogrammes du module de Young (modèle sphérique), du coefficient de Poisson (modèle gaussien) et de la résistance en compression uniaxiale (modèle sphérique) d'une roche d'une formation de dolomite du Niagara de l'État du Wisconsin, USA. Malheureusement, il ne fournit aucun renseignement sur le volume des éprouvettes d'essais, ni sur le schéma d'échantillonnage. L'objet de ces analyses était d'incorporer la variation spatiale des propriétés dans des analyses de contraintes par méthodes numériques.

Pineau et Thomas (1983) ont analysé les résultats de 482 essais de compression simple exécutés sur des éprouvettes préparées à partir de carottes de forage provenant de trois blocs de minerai de fer différents. Dans les trois cas, les carottes provenaient de trous de

forage parallèles formant une maille régulière. Ils montrent, dans un premier temps, les trois modèles de demi-variogrammes qui suivent, valables chacun pour une rangée de trou (appelés par Pineau et Thomas, demi-variogrammes élémentaires), les dimensions des éprouvettes de 3,0 cm de diamètre et de 6,0 cm de hauteur:

- un demi-variogramme directionnel (pas de 3.63 cm) avec effet de trou, la variance expérimentale étant 10,5 MPa^2, l'épaisseur moyenne des couches, 20 cm et la périodicité, 50 cm;
- un demi-variogramme directionnel (pas de 4,07 cm) représenté par un modèle sphérique, la variance expérimentale étant 22,7 MPa^2, la portée, 50 cm et l'effet de pépite, 2,1 MPa^2;
- un demi-variogramme directionnel (pas de 3,86 cm) montrant un effet de pépite pur, la variance expérimentale étant 15,7 MPa^2.

Dans un deuxième temps, Pineau et Thomas proposent un demi-variogramme combinant les résultats d'essais effectués sur des éprouvettes provenant de 7 rangées de trous de forage (appelé par Pineau et Thomas, demi-variogramme moyen). Ce demi-variogramme présente des résultats d'essais effectués sur des éprouvettes de 3,0 cm de diamètre et de 6,0 cm de hauteur, le pas étant de 3,84 cm. Il s'étale sur 70 cm, montre d'abord un effet de pépite de 2,1 MPa^2, puis un premier palier dont la portée est environ 20 cm, palier se situant à un demi-variance de 23,3 MPa^2. Le demi-variogramme reste croissant par la suite, indiquant ainsi l'existence d'hétérogénéités d'échelle supérieure à 70 cm. La variance globale des données étant de 48,8 MPa^2, les hétérogénéités d'échelle supérieures à 70 cm introduisent donc une dispersion des résistances au moins égale à 25,5 MPa^2.

Dans un troisième temps, ces mêmes auteurs présentent un demi-variogramme moyen de résultats d'essais effectués sur des éprouvettes de 12,0 cm de diamètre et de 24,0 cm de hauteur, la roche étant la même que celle du demi-variogramme précédent. Le pas du demi-variogramme est de 15,6 cm et la variance globale est 30,0 MPa^2. Ce demi-

variogramme montre un effet de pépite est 6,3 MPa^2 et croît lentement sur 80 cm sans atteindre de palier. Pineau et Thomas affirment alors que les hétérogénéités de 20 cm de dimension détectées avec le demi-variogramme des éprouvettes de 3,0 cm de diamètre sont suffisamment englobées dans les éprouvettes de 12,0 cm de diamètre pour ne plus être discernées. Les hétérogénéités de dimensions supérieures à 70 cm sont aussi détectées par ce dernier demi-variogramme, introduisant une dispersion d'au moins 23,7 (30,0 - 6,3) MPa^2. Ces derniers résultats constituent la première illustration de l'impact de ce qui est appellée en mécanique des roches, une variation d'échelle d'essais sur les paramètres des demi-variogrammes.

Baecher (1983) s'est intéressé aux éléments structuraux qui peuvent être responsables de la non-stationnarité des propriétés mécaniques des roches dans les massifs rocheux. Il cite les failles, les zones de cisaillement, l'altération, le litage et les contacts lithologiques et affirme qu'il faut tenir compte de ces structures lors de l'analyse des résultats.

Afin d'illustrer de quelle façon la géostatistique peut être utilisée lors d'investigations de site réalisées dans le but d'effectuer des travaux d'ingéniérie, Buckley et al. (1986) présentent à titre d'exemples, des demi-variogrammes bidimensionnels horizontaux de la porosité de roches sédimentaires. Ces derniers sont décrits avec le modèle sphérique et sont utilisés par les auteurs pour procéder au krigeage.

Dans le but d'évaluer la profondeur de l'endommagement de la roche d'un massif rocheux dû au tir à l'explosif au pourtour d'une excavation souterraine, Ouellet et al. (1987) ont analysé les résultats de 640 essais dilatomètriques effectués à tous les 30 cm, dans des forages disposés de façon à former une grille tridimensionnelle. Le traitement géostatistique des modules de rigidité calculés (résultats conventionnellement obtenus avec l'essai dilatométrique) a montré que s'il y avait endommagement, il s'étendrait sur une profondeur inférieure à 30 cm.

La première tentative pour établir un lien entre les paramètres variographiques des résultats des essais index et ceux des essais conventionnels serait due à Ouellet et Gill. (1987). Utilisant 15 m de carottes provenant d'un forage EX dans le calcaire du Trenton supérieur (récupération relative de 100%), ces auteurs ont préparé le nombre maximal possible d'éprouvettes (132) de 2,25 cm de diamètre et de 5,5 cm de hauteur. Sur chaque éprouvette, 20 essais de dureté Shore (essai index, échelle variant de 0 à 120) ont été faits suivant une grille les répartissant uniformément sur leur surface latérale. Les éprouvettes ont ensuite été testées en compression simple avec mesure des déformations de façon à pouvoir obtenir le module de Young en plus de la résistance en compression uniaxiale.

Le modèle sphérique a été utilisé pour obtenir les paramètres variographiques des demi-variogrammes directionnels de la moyenne arithmétique des 20 résultats d'essai de dureté Shore par éprouvette et du module de Young de ces mêmes éprouvettes. Les portées se sont avérés les mêmes. Par ailleurs, le demi-variogramme de la résistance en compression simple montrant un effet de pépite pur, a été comparé à celui obtenu en considérant la valeur minimale parmi les 20 duretés Shore par éprouvette. Ce dernier montre aussi un effet de pépite pur. Les auteurs justifient cette façon de faire en invoquant que le module de Young découle de la déformabilité de l'ensemble de l'éprouvette et que le moyenne arithmétique des 20 essais de dureté réparties sur leur surface est une bonne évaluation de cette dernière. Quant au parallèle fait entre le demi-variogramme de la résistance en compression simple et celui de la valeur minimale des 20 essais de dureté, ils le justifient en référant aux mécanismes de rupture des roches du type théorie du maillon le plus faible.

Plus récemment, Rancourt (1996) a rapporté des résultats d'essais de poinçonnement de parois de forages effectués dans un granite, un basalte et un gneiss. Il représente les demi-variogrammes directionnels et omnidirectionnels qu'il a produits à partir de ses résultats à

l'aide du modèle sphérique, du modèle d'effet de trou et du modèle d'effet de pépite pur. Puisqu'à chaque site, des essais ont été effectués dans trois trous non parallèles, il a été possible de montrer l'existence d'une anisotropie ménanique. Au départ, l'objetif poursuivi par Rancourt était, en invoquant Ouellet et Gill. (1987), d'établir les paramètres de répartition spatiale du module de Young requis pour l'interprétation des résultats de mesure de contraintes in situ.

Dans la plupart de ces travaux, il a été postulé que la variable mesurée était une réalisation particulière d'une fonction aléatoire vérifiant une des hypothèses de stationnarité.

L'utilisation de la géostatistique a aussi cours dans les autres secteur de la géomécanique. En effet, on trouve dans la littérature un certain nombre de références sur l'analyse géostatistique des caractéristiques géométriques des discontinuités géologiques des massif rocheux (voir par exemple Miller 1979, Lapointe 1980, Hoerger et Young (1986), Barla et al. 1987). Comme autres exemples, citons Lapointe (1980) qui rapporte des demi-variogrammes de fréquences des fractures (intervalles de 3 m) et de valeurs du RQD ("Rock Quality Designation"), Barla et al. (1987) ont appliqué les techniques du krigeage au RQD, au RMR ("Rock Mass Rating", classification géomécanique de Bieniawski) et à la fréquence des fractures. Matar et al. (1986) l'ont aussi fait pour ce dernier paramètre. Par ailleurs, certains auteurs ont analysé les vibrations de sautage à l'aide de la théorie des variables régionnalisées (voir par exemple Adisoma et Daemen, 1988). Comme exemple de travaux en mécanique des sols, citons Soulié (1983) et Kulatilake et Southworth (1987) qui ont utilisé la geostatistique pour l'estimation des propriétés mécaniques des sols à partir d'essais divers y compris des essais dynamiques in-situ.

2.2 Le système ENPASOL numérique

Cette section du mémoire décrit sommairement le système ENPASOL numérique. Pour plus de détails sur ce système, le lecteur est invité à consulter Girard et al. (1986).

ENPASOL numérique est le nom commercial d'un système de mesure et de stockage informatisé de données reliées au forage des roches qui permet de procéder à une diagraphie instantanée. Il a été mis au point par la société française SOLÉTANCHE ENTREPRISE (ENregistrement des PAramètres SOLétanche) en 1981. Ce système a été créé pour les foreuses rotary. Le deuxième système connu au Canada est un autre système européen conçu pour les perforatrices (système LUTZ, Carter et al. 1988).

Une telle instrumentation d'une foreuse tire profit des changements de caractéristiques du terrain que le trépan rencontre au cours du forage, permettant, pour ainsi dire, une "lecture" en continu de ces dernières. Le système standard capte et stocke sur une cassette huit paramètres différents et une cassette peut contenir les données obtenues sur 100 m de forage. Durant le forage, le système permet de produire un enregistrement graphique en continu de la vitesse d'avancement et de trois des huit paramètres saisis. Les huit paramètres habituellement captés par le système sont:

- la pression de sortie du fluide de forage;
- le couple de rotation appliqué à la tête du train de tiges;
- la poussée appliquée au trépan;
- la vitesse d'avancement;
- la vitesse de rotation du trépan;
- la force de retenue;
- les vibrations réfléchies dans le train de tiges;
- le temps de forage pour 5 mm de pénétration.

Pour un jeu d'équipements donné, ces huit paramètres peuvent être placés dans deux catégories:

a) Les paramètres reliés à l'opération de la foreuse, paramètres modifiables par le foreur, dans la mesure permise par la foreuse. Dans cette catégorie, il y a la vitesse de rotation du trépan, la retenue du train de tiges et la poussée sur le trépan.

b) Les paramètres découlant de la "réponse" du terrain, pour un ensemble de valeurs des paramètres de la première catégorie. Ces paramètres sont l'avancement du trépan calculé à partir du temps requis pour avancer de 5 mm, le couple de rotation, la pression de sortie du fluide de forage et les vibrations réfléchies.

S'il a bien des antécédents datant des années 70, le système sommairement décrit dans le présent document a été initialement mis au point pour connaître rapidement les caractéristiques des terrains mous avant et après traitement, comme par exemple un sol injecté.

Le développement ultérieur du système ENPASOL numérique (et des autres systèmes du même type) a fait qu'il est maintenant employé pour d'autre fins, comme la détection rapide des zones fracturées, des zones altérées et des cavités ainsi que l'analyse stratigraphique automatique (Girard et al. 1986, Carter et al. 1988). Il est aussi maintenant utilisé avec d'autres types de foreuses.

Les données utilisées dans le présent travail ont été obtenues avec un système ENPASOL numérique monté sur une foreuse à carottier. La figure 2.1 est un exemple de données tiré du journal de forage ENPASOL numérique dont disposait l'auteur. La première colonne est l'ordre des courses. La deuxième colonne est celle de la pression de sortie du

fluide de forage (bars). L'avancement est donné en mètres par heure et apparaît dans la troisième colonne. La poussée nette est donnée en tonnes et constitue la quatrième colonne. La cinquième colonne est celle de la vitesse de rotation en tours par minute. Le temps écoulé entre deux lectures de l'avancement se retrouve dans la sixième colonne. La dernière colonne du journal de forage est un paramètre appelé résistance au forage en kg/cm^2 et se calcule à l'aide des données des colonnes précédentes. Ce paramètre composé est, par définition (Girard et al. 1986):

$$F(RESIST) = K\frac{PW}{V_t D}$$

Dans cette équation, P est la poussée nette en tonnes, W est la vitesse de rotation en tours par minute, V_t est la vitesse d'avancement en mm par seconde et D est le diamètre du trou en cm. D'après les auteurs, K est une constante qui dépend de la roche forée. Conventionnellement, la valeur du paramètre K est fixée de façon à ce que la résistance au forage moyenne pour une lithologie donnée soit égale à la résistance en compression simple de la roche forée.

Les paramètres mesurés avec le système ENPASOL peuvent aussi être combinés de façons autres que celle conduisant à la résistance au forage définie ci-haut. Girard et al. (1986) rapporte le travail effectué par le couple de rotation, un indice d'altération (qui fait intervenir la poussée et la vitesse d'avancement) et la résistance au forage de Sormeton comme alternatives. Quelle que soit la combinaison, les résultats obtenus sont traditionnellement toujours analysés par examen visuel des profils de données.

Dans l'esprit de ce mémoire, le système ENPASOL numérique est donc perçu comme étant un système d'essais index en "continu", avec lequel on cherche à connaître la variabilité spatiale des propriétés des roches des massifs rocheux sans avoir recours aux essais conventionnels.

Le choix d'utiliser des données produites avec une foreuse à carottier instrumentée plutôt qu'avec un autre type de foreuse se justifie par le fait que l'obtention de carottes de forage permet d'établir clairement la lithologie et les caractéristiques de certain éléments de structure géologique. Ces connaissances ont été jugés indispensables compte tenu des objectifs poursuivis.

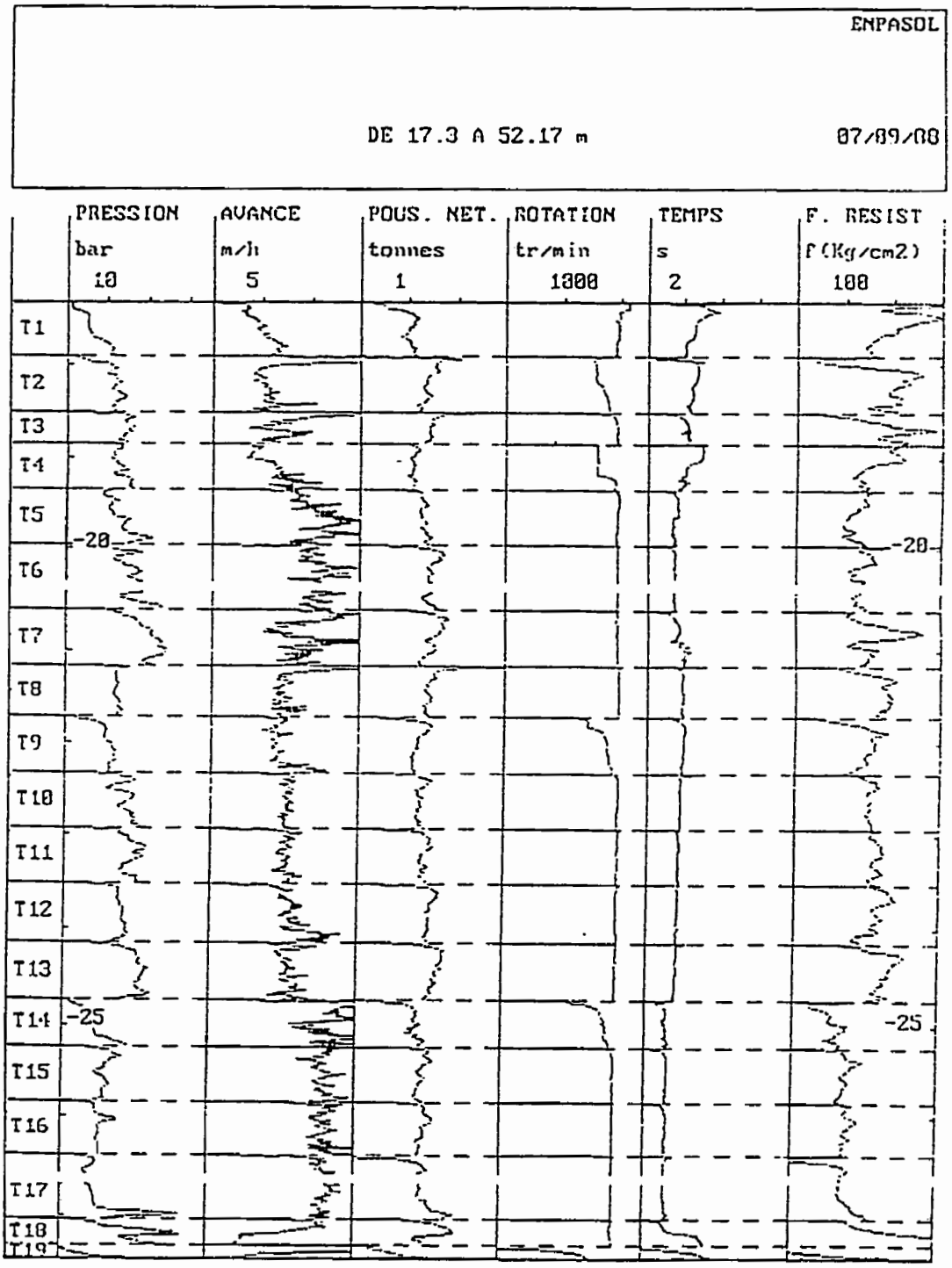


Figure 2.1: figure tirée du rapport ENPASOL

CHAPITRE III
ENVIRONNEMENT GÉOLOGIQUE

3.1 Mise en situation

Les données traitées dans le présent mémoire proviennent de segments de forages aux diamants réalisés dans les Basses Terres du Saint-Laurent, dans le cadre d'une investigation de site spécifique. Les critères qui ont mené au choix de ce site sont les suivants:

- les formations des Basses Terres du Saint-Laurent sont impliquées dans un grand nombre de travaux d'ingénierie civil étant donné qu'on y retrouve des centres urbains qui regroupent plusieurs millions d'habitants.
- les forages pour lesquels il y avait des données disponibles recoupaient les lithologies typiques des Basses Terres, d'où la possibilité d'une certaine généralisation des résultats de cette recherche.

Les segments de forage numérisés sont présentés de façon sommaire au tableau 3.1 (Annexe II). On y donne les numéros des forages et des demi-variogrammes, les profondeurs des segments qui ont été numérisés et analysés, la plongée des forages et l'orientation de cette dernière, le type de roche forée, le type de roche des segments numérisés et analysés, la valeur du RQD pour le forage, les angles de couche des plans de fracture et du litage.

3.2 Environnement géologique

Comme il est possible de le constater dans le tableau 3.1 (Annexe II), les forages ont révélé la présence de quatre lithologies: le gneiss (gn), le grès (gr), le calcaire (cal) et le shale calcaireux (sh).

D'après Globensky (1987), il y a, près du site investigué, une zone de faille qui sépare deux groupes lithologiques, soit le calcaire du Trenton au nord et les shales de Lorraine et d'Utica au sud. La faille principale de la zone est normale et montre un rejet estimé à plus de 160 mètres.

Elle a produit non seulement une fracturation adjacente (failles secondaires et autres fractures), mais aussi des plis de 15 degrés de pendage dans le calcaire et de 20 à 40 degrés dans le shale d'Utica. La zone de faille est recoupée par les forages G4, G8, G13 et G14.

À proximité de cette dernière, les roches sont cisaillées et comportent de nombreuses zones de brèches. Ailleurs, les forages montrent des roches très peu fracturées, hormis la présence de petites zones de cisaillement, surtout dans les mètres supérieurs de la séquence sédimentaire.

Le groupe Trenton est composé de calcaire fossilifère, le pendage des couches est faible et orienté vers le sud ou le sud-ouest. Son épaisseur est d'environ 90 mètres. À la base de ce groupe, on trouve le grès de Potsdam.

Tableau 3.1 Caractéristiques générales des forages et des roches

Forage/ Vario.	Prof. Numer. (m)	Roches du Forage	Roches Numer.	Plongée (°)	
G 1	19,53- 39,98	sh/cal/gr/gn	shale	53 N	
G 2	57,73- 78,32	sh/cal/gn	shale	62 N	
G 3	17,30- 40,60	shale	shale	90	
G 4	48,93- 82,31	sh/cal/gn	shale	62 N	
G 5	54,08- 65,90	cal/gr/gn	calcaire	60 N	
G 5A	66,05- 68,86	cal/gr/gn	grès	60 N	
G 5B	68,87- 76,53	cal/gr/gn	gneiss	60 N	
G 5C	54,09- 68,87	cal/gr/gn	cal/grès	60 N	
G 5D	66,05- 76,53	cal/gr/gn	grès/gneiss	60 N	
G 5E	54,08- 76,53	cal/gr/gn	cal/gr/gn	60 N	
G 6	22,56- 44,46	shale	shale	90	
G 7	59,64- 80,00	shale	shale	64 N	
G 8	19,99- 40,62	sh/cal/gr/gn	shale	50 N	
G 9	23,90- 45,80	shale -	shale	90	
G 10	39,95- 55,19	shale	shale	65 S	
G 11	30,89- 49,07	shale	shale	60 N	
G 12	114,4-124,4	sh/cal/gn	calcaire	62 N	
G 13	87,0-96,5	sh/cal/gn	calcaire	62 N	
G 14	63,82-73,6	sh/cal/gr/gn	calcaire	53 N	
G 15	75,0-80,68	sh/cal/gr/gn	grès	53 N	
G 1-5	7 m chaque		sh/cal		
G 3-14	7 m chaque		sh/cal		
G 7-13	7 m chaque		sh/cal		

Forage/ Vario.	R.Q.D >50	R.Q.D <50	ETAT GENERALE DE LA ROCHE Fractures (p/r axe forage)		Litage (p/r axe forage)	
G1		<	très(19-40m)	0-65/78-80	70-78	
G 2		<	45-60/0-17/22-55		80--88/62-75	
G 3	>	<	0/79-80/20/12-24/60.		68-77/90/40-45.	
G 4	>	<	68-77/0-65.		68-77/90/40-45.	
G 5	>		20-50.		60-65.	
G 5A	>		10-17.		grès grossier,sans litage.	
G 5B	>	<	60-70/10-38.			
G 6	>		20-33/77-80/80-81.		80-81/82-83.	
G 7	>		pas de fractures.		64	
G 8		<	très(20-25m)	0-70/70-75.	70-75.	
G 9	>		78/20/10-15/7-17/50-80.		78/78-80.	
G 10	>		35/61-63.		57-64/61-63.	
G 11	>		17/71-73.		71-73/72-75.	
G 12		<			84/20-40	
G 13		<	très(93-96)	50-70	60-70	
G 14	>			59-61	59-61	
G 15	>	<	35-55		51-53	

Quant au groupe Lorraine, il est composé de shale calcaireux. D'une épaisseur de 300 m, il renferme du gaz, des minéraux gonflants et des strates de grès d'épaisseur variable. Exposé à l'air, ce shale se délite facilement.

Le groupe Utica est composé de 140 mètres de shale argileux, les lits étant légèrement inclinés vers le sud.

La séquence sédimentaire repose en discordance sur le gneiss granitique qui est présent dans les forages G1, G2, G4, G5, G8, G12, G13, G14 et G15. L'état général de cette roche dans la zone recoupée par les forages est de qualité moyenne, sauf dans les deux ou trois premiers mètres, où elle est de mauvaise qualité.

CHAPITRE IV
METHODOLOGIE

4.1 Préambule

Les données traitées dans le présent mémoire proviennent de la numérisation de courbes de variation de la résistance au forage produites par le système ENPASOL (voir le profil dans la colonne à l'extrême droite de la figure 2.1). Des segments de profils appartenant à onze forages aux diamants différents (voir tableau 3.1) ont été numérisés. Les segments numérisés impliquent quatre lithologies: shale, calcaire, grès et gneiss.

Pour ne pas alourdir la lecture du présent mémoire, le mot demi-variogramme a souvent été contracté en DV dans la suite du texte. Par exemple, DV G3 signifie le demi-variogramme des résistances au forage calculés avec les données d'un segment spécifique du forage G3.

4.2 Description de la méthodologie

4.2.1 Obtention des demi-variogrammes

Les profils de la résistance au forage produits par le système ENPASOL ont été agrandis par photocopie et numérisées en prenant des lectures à tous les 1,0 cm d'avancement. Cet espacement a été choisi suite à des essais de numérisation préliminaires qui ont montré que des intervalles de lecture allant jusqu'à 1,0 cm ne changeait aucunement l'allure des DV mais avait l'avantage de réduire le nombre de données à traiter.

Les données résultant de la numérisation ont été traitées avec un logiciel qui tire profit des transformés de Fournier (Marcotte 1995). Ce logiciel, mis à notre disposition par le professeur Marcotte, a permis de calculer les DV en ayant au départ parfois plus de 3000 données.

4.2.2 Modélisation des demi-variogrammes

Compte tenu que les DV ainsi produits montraient un changement de pente brusque pour une certaine valeur de l'abscisse à proximité de l'origine, ils ont été décrits à l'aide d'une combinaison modèle sphérique-modèle exponentiel. L'ajustement des paramètres de ces modèles combinés a été fait par tâtonnements à l'aide du logiciel AJUST qui a aussi été mis à notre disposition par le professeur Marcotte. Lors de cette modélisation, les effets de trou ont été ignorés s'il y avait lieu et, dans ces cas, il a été supposé que les plateaux se situaient au sommet du premier cycle. Les paramètres variographiques résultant de cette modélisation ont été commentés et discutés.

Certains des effets de trou montrés par les DV ont été décrits à l'aide des modèles sinusoïdal et cosinusoïdal. Les amplitudes relatives de tous les effets de trou expérimentaux ont été caractérisées à l'aide du coefficient α et les tests de l'isotropie ont été faits. Les résultats de ces tests ont ausi été commentés et discutés.

4.2.3 La détection des couches à l'intérieur d'une même lithologie

Appliquant le principe qui veut que l'alternance de couches à résistance au forage élevée et de couches de plus faible résistance se traduise par l'effet de trou dans le DV expérimental, les épaisseurs moyennes de ces couches et leur périodicité moyenne ont été déterminées à l'aide de la méthode utilisée originalement pour les propriétés mécaniques des roches par Dubart et Josien (1973).

Les changements de dimensions de support ont été simulés en procédant à des moyennes arithmétiques des données individuelles sur diverses distances (sans chevauchement) le long des segments de forage. Les DV produits avec différentes dimensions de support ont été modélisés et analysés.

4.2.5 Les effets du changement de l'espacement

Les changements de pas ont été simulés en conservant une dimension de support de 1 cm, mais en variant la distance entre les points de mesure considérés le long des segments de forage. Les DV produits avec les différents pas ont été modélisés et analysés.

4.2.6 La structure géologique

La caractérisation des effets de la structure géologique sur les paramètres variographiques est faite à partir des DV des segments de forage impliquant le shale. Ces paramètres sont analysés en fonction des distances qui séparent les segments de forage d'une zone de faille bien localisée.

4.2.7 La détection des changements de lithologie

La mise en évidence des effets du passage d'une lithologie à une autre est faite par le suivi de l'évolution du DV au fur et à mesure que le forage progresse. Cette procédure, qui implique que le DV d'une première lithologie est connu et qu'il y a un certain contraste entre les données des deux lithologies, a été simulée dans le présent mémoire de la façon suivante: les données propres au premier mètre d'un segment de forage dans une lithologie donnée (calcaire, par exemple) sont ajoutées à celles utilisées pour établir le DV connu d'une première lithologie (shale, par exemple) et le nouveau DV est comparé à celui connu afin d'y découvrir une modification déterminante. Le processus est répété par la suite si besoin il y a.

CHAPITRE V
LES RÉSULTATS

5.1 Préambule

Ce chapitre présente d'abord les résultats d'analyses de quinze (15) DV directionnels produits à partir des données des forages présentées au tableau 3.1 de l'Annexe II. Ces DV sont illustrés aux figure 5.1 à 5.15 de l'Annexe III. Rappelons que dans toutes ces figures, $\gamma(h)$ est la demi-variance de la résistance au forage et h est l'espacement entre les paires de données utilisées pour le calcul de cette demi-variance.

Comme on peut le constater à partir du Tableau 3.1 de l'Annexe II, les segments de forages dont la courbe des résistances calculées a été numérisée pour conduire aux DV des figures 5.1 à 5.10 impliquent des shales.

Les figures 5.11 à 5.14 sont des DV propres à des segments de forages recoupant le calcaire. Finalement, la figure 5.15 est un DV obtenu d'un segment de forage dans le grès. Donc, les DV G1 à DV G15 n'impliquent individuellement qu'une seule lithologie.

Le nombre de données traitées, la moyenne arithmétique, la variance, l'écart type et le coefficient de variation propres à chacun des segments de forages impliqués dans les DV G1 à DV G15 sont présentés dans la portion supérieure du Tableau 5.1 de l'Annexe III. Dans la suite du texte, ces moyennes et ces variances sont appelées moyennes et variances expérimentales.

5.2 L'allure des demi-variogrammes

D'après Journel et Huijbregts (1978), un DV montre un effet de trou quand il croît de façon non monotone. Un tel DV peut ou non possèder un plateau. L'examen de l'allure générale des DV des figures 5.1 à 5.15 mène à la conclusion que seuls le DV G1 et le DV G12 ne montrent définitivement pas d'effet de trou. Cet examen révèle aussi que tous les DV avec effet de trou possèdent un plateau.

Aucun des DV ne montre d'effet de pépite. Ce phénomène est normal lorsque les données sont saisies en continu (Soulié 1983). Ce qui signifie dans notre cas que les mesures ont été prises avec un support de dimension inférieure à celles des hétérogénéités présentes dans la roche.

5.3 La modélisation des demi-variogrammes

5.3.1 La combinaison modèle sphérique-modèle exponentiel

Le modèle sphérique est celui qui a été le plus utilisé pour décrire les DV propres aux propriétés des roches, lorsque ces derniers montrent un plateau et/ou que les effets de trou sont ignorés. Ce modèle montre un comportement linéaire à l'origine. Dans le cas d'un DV directionnel, il répond à l'équation suivante (voir par exemple Nguyen et Baafi 1986):

$$\gamma(h) = C_o + C\left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2}\frac{h^3}{a^3}\right] , \; h \leq a$$

$$\gamma(h) = C_o + C , \; h > a$$

Dans ces équations, $\gamma(h)$ est la fonction du variogramme, C_0 est l'effet de pépite, $C_0 + C$ est la valeur de la variance, a est la portée et h est l'abscisse du DV.

Le modèle exponentiel montre aussi un comportement linéaire à l'origine, mais croît vers le plateau moins rapidement que le modèle sphérique. Dans le cas d'un DV directionnel, il répond à l'équation qui suit (voir par exemple Nguyen et Baafi 1986):

$$\gamma(h) = Co + C\left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right)\right]$$

Dans cette équation, les symboles ont la même signification que dans l'équation précédente. Contrairement au modèle sphérique qui fait que le plateau est atteint pour la valeur spécifique de h (la portée), le modèle exponentiel fait que le plateau est atteint asymptotiquement. C'est pourquoi, avec ce modèle, il est coutume de définir une portée pratique $a' = 3a$.

C'est une combinaison des deux modèles précédents qui a été utilisée pour décrire tous les DV des figures 5.1 à 5.15. L'ajustement des paramètres des deux modèles a été fait par tâtonnements à l'aide du logiciel AJUST.

Lors de cette modélisation, les effets de trou ont été ignorés et, dans ces cas, il a été supposé que les plateaux se situaient au sommet du premier cycle. Les résultats de cette première modélisation sont présentés dans la portion inférieure du tableau 5.1, sous le titre modèle A pour la portion modèle sphérique, et modèle B pour la portion modèle exponentiel.

Les grandeurs de portées rapportées pour ce dernier modèle sont les portées pratiques. Les lignes tiretées des figures 5.16 à 5.30 reproduisent ces résultats sous forme

Tableau 5.1 Résultats de la modélisation

Fichier	*N. Données*	*Moyenne*	*É. Type*	*Variance*	*CV*
				Expériment	
		(kg/cm2)		(kg/cm2)2	
G 1	1998	166,55	68,15	4644	0,409
G 2	2077	174,33	59,89	3587	0,343
G 3	2315	165,18	51,61	2663	0,312
G 4	3303	189,47	59,6	3552	0,314
G 5	1168	107,97	41,09	1689	0,380
G 6	2179	105,69	38,98	1519	0,369
G 7	1961	85,35	26,14	683	0,306
G 8	2056	178,2	59,74	3569	0,335
G 9	2183	136,13	54,23	2941	0,398
G 10	1473	151,28	34,15	1166	0,023
G 11	1800	161,58	43,13	1860	0,267
G 12	996	84,46	35,84	1284	0,424
G 13	700	161,8	58,39	3409	0,361
G 14	956	91,96	22,96	527	0,249
G 15	561	62,33	27,5	756	0,441
	Modèle A		Modèle B		
	Co / a	C1	a	C2	C0+C1+C2
	(m)	(kg/cm2)2	(m)	(kg/cm2)2	(kg/cm2)2
G 1	0 / 0,12	2124	6,3	2470	4594
G 2	0 / 0,11	2195	3,2	1700	3895
G 3	0 / 0,15	1000	3	2400	3400
G 4	0 / 0,12	1950	2,5	2030	3980
G 5	0 / 0,1	580	1,75	1330	1910
G 6	0 / 0,13	750	1,7	1010	1760
G 7	0 / 0,08	350	1	300	650
G 8	0 / 0,15	1620	1,1	2340	3960
G 9	0 / 0,12	850	1,3	2350	3200
G 10	0 / 0,07	380	2,6	1120	1500
G 11	0 / 0,08	530	1	1070	1600
G 12	0 / 0,13	800	2,5	630	1430
G 13	0 / 0,13	1650	1,1	2350	4000
G 14	0 / 0,07	380	1,6	220	600
G 15	0 / 0,14	230	1,3	600	830

graphique. Les figures dont les numéros comportent le suffixe "a" (comme 5.16a) sont à une échelle qui permet de bien visualiser la courbe du modèle sphérique-exponentiel alors que les figures dont les numéros comportent le suffixe "b" (comme 5.16b) mettent en lumière la courbe du modèle exponentiel (quand h>a, la contribution du modèle sphérique est constante). Dans tous les cas, les DV expérimentaux ont été ajoutés à ces mêmes figures pour fins de comparaison.

5.3.2 Les modèles d'effet de trou

Le modèle sinusoïdal permet de décrire des DV tridimensionnels montrant une périodicité (effet de trou). En utilisant le même symbolisme que précédemment, l'équation proposée par Journel et Huijbregts (1978) devient:

$$\gamma(h) = C_o + C\left[1 - \frac{\sin(2\pi h / a)}{2\pi h / a}\right]$$

Il implique que l'effet de trou s'attenue avec l'accroissement de *h*. L'amplitude relative d'un effet de trou peut être mesurée. C'est la valeur minimale de la covariance divisée par la variance décrite par la composante périodique. Donc, par définition (Journel et Huijbregts 1978), on a:

$$\alpha = \frac{\max \gamma(h) - C}{C}$$

Pour le modèle sinusoïdal, $\alpha = 0{,}212$. D'après Journel et Huijbregts (1978), c'est la valeur maximale de l'amplitude relative d'un effet de trou isotrope dans les trois dimensions. Si en pratique, une amplitude relative supérieure à 0,212 est observée, il y a deux conclusions possibles:

- l'effet de trou n'est que le résultat d'une fluctuation du DV expérimental ou,
- l'effet de trou est directionnel.

Le modèle cosinusoïdal permet de décrire des DV montrant un effet de trou directionnel très marqué. En utilisant le même symbolisme que précédemment, l'équation proposée par Journel et Huijbregts (1978) dans un tel cas devient:

$$\gamma(h) = C_o + C[1 - \cos(2\pi h / a)]$$

Pour ce modèle, $\alpha = 1$.

Les amplitudes relatives (coefficients α) des DV des figure 5.2 à 5.11 et des figures 5.13 à 5.15, ont été calculées et sont présentées au Tableau 5.2 ci-après. L'examen de ce tableau permet de constater que des treize (13) DV montrant des effets de trou, on en dénombre huit (8) qui montreraient des effets de trou isotropes alors que cinq (5) montreraient des effets de trou directionnels.

Tableau 5.2 Valeur des amplitudes relatives des effets de trou

Demi-vario	Coefficient α	Effet de trou	Demi-vario	Coefficient α	Effet de trou
G1	0	aucun	G9	0,128	isotrope
G2	0,171	isotrope	G10	0,441	directionnel
G3	0,396	directionnel	G11	0,075	isotrope
G4	0,154	isotrope	G12	0	aucun
G5	0,185	isotrope	G13	0,320	directionnel
G6	0,185	isotrope	G14	0,311	directionnel
G7	0,100	isotrope	G15	0,190	isotrope
G8	0,206	isotrope			

L'application du modèle cosinusoïdal au DV expérimental G3 ($\alpha = 0,396$, donc supérieur à 0,212) a donné la ligne tiretée de la figure 5.31a. La ligne tiretée de la figure 5.31b de la même Annexe représente l'application du modèle sinusoïdal au DV expérimental G6 ($\alpha = 0,185$, donc inférieur à 0,212).

Les valeurs qui interviennent dans le calcul du coefficient α dans le cas de ces deux exemples sont données au Tableau 5.3 qui suit. Il est montré aux figures 5.31a et 5.31b comment ces valeurs sont mesurées.

Tableau 5.3 Valeurs utilisées pour le calcul de l'amplitude relative dans les cas des DV G3 et DV G6

Demi-variogramme	Valeur Maximum $(kg/cm^2)^2$	Variance $(kg/cm^2)^2$	Coefficient α
G3	3717	2663	0,396
G6	1800	1519	0,185

5.4 Les dimensions des couches et leur espacement

Il est reconnu que les effets de trou, s'ils ne sont pas de simples oscillations, résultent de l'alternance de couches à caractéristiques différentes. L'obtention des épaisseurs moyennes de ces couches et leur périodicité moyenne peut se faire directement du variogramme expérimental comme le rapportent, entre autres, Dubart et Josien (1973), Journel et Huijbregts (1978) et Pineau et Thomas (1983); il n'est pas nécessaire de procéder à la modélisation de ce dernier.

Ainsi, pour les exemples des figures 5.31a et 5.31b, la distance *a* est l'espacement moyen et *b* est l'épaisseur moyenne des couches à haute résistance au forage différentes. Dans le

cas du DV G3 (figure 5.31a), l'épaisseur moyenne des couches serait de 3,40 m et leur périodicité, 6,35 m.

En appliquant cette approche aux treize DV expérimentaux montrant un effet de trou, on obtient les résultats présentées au Tableau 5.4. Dans le shale (DV G2, DV G3, DV G4, DV G6, DV G7, DV G8, DV G9, DV G10 et DV G11), les épaisseurs moyennes des couches varient de 1,15 à 3,80 m alors que les espacements moyens de varient de 2,10 à 6,35 m.

Dans le calcaire (DV G5, DV G13 et DV G14), les épaisseurs moyennes des couches varient de 1,20 à 3,00 m alors que les espacements moyens varient de 2,40 à 6,00 m. L'épaisseur moyenne des couches de grès est de 1,40 m alors que l'espacement moyen est de 2,40 m (DV G15).

Tableau 5.4 Les épaisseurs moyennes des couches et la grandeur moyenne des périodes

Demi-vario	Épaisseur moyenne (m)	Période moyenne (m)	Demi-vario	Épaisseur moyenne (m)	Période moyenne (m)
G1			G9	1,85	3,10
G2	3,80	6,30	G10	3,20	6,50
G3	3,40	6,35	G11	1,15	2,10
G4	3,00	5,00	G12		
G5	3,00	6,00	G13	1,20	2,40
G6	2,00	3,70	G14	1,50	2,50
G7	1,20	2,90	G15	1,40	2,40
G8	1,80	3,20			

5.5 Le changement de support

Pour simuler le changement de support à partir des données disponibles, des moyennes arithmétiques des données individuelles sur diverses distances (sans chevauchement) ont été soumises à l'analyse géostatistique. Cette procédure a été limitée, dans un premier temps, à deux segments de forage jugés représentatifs de l'ensemble, soit G1 et G3.

Dans un deuxième temps, la procédure a aussi été appliqué pour une distance donnée du segment G8. La figure 5.1 montre le DV G1 original (DV sans effet de trou). Il vaut, rappelons-le, pour des valeurs de résistance au forage prises à tous les centimètres le long du segment G1. Les figures 5.32 à 5.36 sont les DV des moyennes de résistances au forage calculées respectivement sur des distances de 3, 9, 12, 16, 20 et 25 cm le long du même segment.

La convention utilisée pour identifier les DV ainsi produits est la suivante: DV G1m3 réfère au DV calculé à partir des données du segment G1, en faisant des moyennes de ces données à tous les 3 cm. En comparant ces DV, nous constatons que l'allure générale du DV original et sa portée se conservent et qu'un effet de pépite apparaît, augmente puis diminue avec l'accroissement de la dimension du support.

La figure 5.3 illustre le DV G3 original (DV avec effet de trou). Elle vaut pour des valeurs de résistance au forage prises à tous les centimètres le long du segment G3. Les figures 5.37 à 5.40 sont les DV des moyennes de résistance au forage calculées respectivement sur des distances de 5, 10, 15 et 20 cm le long du même segment.

Rappelons que le DV G3m5 identifie le DV calculé à partir des données du segment G3, en faisant des moyennes de ces données à tous les 5 cm. La comparaison des DV de ce groupe nous amène à conclure que l'allure générale du DV original, que les épaisseurs

moyennes des couches et que les espacements moyens de ces dernières se conservent malgré l'accroissement de la dimension du support. De plus, un effet de pépite apparaît et augmente avec l'accroissement de la dimension du support.

La partie supérieure du tableau 5.5 montre, sous le titre Changement de support, un résumé des données produites par les simulations. On y constate, comme il fallait s'y attendre, que la moyenne arithmétique des données ayant servi à l'obtention de chaque DV ne montre pas de variations significatives malgré les changements faits à la dimension du support. Comme il fallait s'y attendre aussi, la variance de ces mêmes données diminue au fur et à mesure que la dimension du support augmente.

Les résultats de la modélisation des DV produits suite aux simulations de changements de support à partir des données du segment G1 (figures 5.32 à 5.36 sont présentés au Tableau 5.6 ci-dessous. Ceux obtenus du DV G1 (Tableau 5.1) avec le modèle combiné sphérique-exponentiel y sont aussi présentés.

Le modèle combiné sphérique-exponentiel s'est aussi bien ajusté aux DV G1m3 et DV G1m9 comme ça été le cas du DV G1. Toutefois, il a fallu utiliser uniquement le modèle exponentiel pour les ajustements des DV G1m12, DV G1m20 et DV G1m25. Les lignes tiretées superposées aux DV expérimentaux des figures 5.32 à 5.36 représentent les DV modèles.

Ces résultats montrent qu'au fur et à mesure que la dimension du support augmente, l'effet de pépite augmente jusqu'à ce que cette dimension atteigne 12 à 20 cm, puis diminue. Ces résultats montrent aussi que la variance totale diminue, au fur et à mesure que la dimension du support augmente comme il a été constaté antérieurement avec la variance expérimentale (voir Tableau 5.5).

Tableau 5.5 Changement du support et de l'espacement

SUPPORT (Moyennes)					
Variogram.	N. Données	Moyenne (kg/cm2)	Variance (kg/cm2)2	É. Type	CV
G1	1998	166,55	4645	68,15	0,409
G1m3	666	166,55	4405	66,37	0,398
G1m9	221	165,97	3802	61,66	0,371
G1m12	166	166,16	3616	60,13	0,362
G1m16	124	165,67	3558	59,65	0,36
G1m20	99	165,49	3094	55,62	0,336
G1m25	79	165,31	2795	52,87	0,319
G3	2315	165,18	2663	51,61	0,312
G3m5	462	165,16	2504	50,04	0,303
G3m10	231	165,16	2304	48,01	0,29
G3m15	154	165,16	2177	46,66	0,282
G3m20	115	165,08	2076	45,56	0,276
ESPACEMENT (Unités)					
G1u3	666	166,18	4656	68,23	0,41
G1u9	221	166,48	4584	67,71	0,406
G1u12	166	166,39	4500	67,08	0,403
G1u16	124	169	4580	67,68	0,4
G1u20	99	163,45	4866	69,76	0,427
G1u25	79	165,55	4797	69,26	0,418
G3u5	462	165,2	2681	51,78	0,313
G3u10	231	164,6	2485	49,85	0,303
G3u15	154	162,71	2621	51,2	0,315
G3u20	115	165,08	2676	51,73	0,276

Finalement, l'accroisement des dimensions du support fait que les portées des deux composantes du modèle combiné varient peu.

Tableau 5.6 Paramètres variographiques des DV G1mx

Demi-vario	Effet pépite $(kg/cm^2)^2$	Variance Sph $(kg/cm^2)^2$	Portée (m)	Variance Exp $(kg/cm^2)^2$	Portée Exp (m)	Variance Total $(kg/cm^2)^2$	Modèles
G1	0	2124	0,12	2470	6,30	4594	Sph/Exp
G1m3	0	2200	0,21	2200	6,75	4400	Sph/Exp
G1m9	700	950	0,27	2200	5,85	3850	Sph/Exp
G1m12	1300			2400	6,00	3700	Exp
G1m20	800			2450	6,00	3250	Exp
G1m25	450			2500	5,75	2950	Exp

Tableau 5.7 Évolution du coefficient α avec le changement de support

Demi-variogramme	Valeur Maximum $(kg/cm^2)^2$	Variance $(kg/cm^2)^2$	Coefficient α
G3	3717	2663	0,396
G3m20	3100	2076	0,493
G8	4300	3569	0,206
G8m20	2800	2292	0,221

Bien que l'effet de trou se conserve malgré le changement de support, l'amplitude relative de ce dernier évolue. Comme on peut le constater en examinant le Tableau 5.7 ci-haut, le coefficient α calculé pour le DV G3 (support 1 cm) est de 0,396; ce dernier devient 0,493 quand la dimension du support atteint 20 cm. Afin de confirmer cette observation, les mêmes calculs ont été faits pour un autre demi-variogramme montrant un effet de trou, soit le DV G8. L'amplitude relative passe de 0,206 à 0,221.

5.6 Le changement de l'espacement

L'étude des effets du changement de l'espacement des points de mesure s'est aussi faite, dans un premier temps, à partir des données des segments de forage G1 et G3. La procédure suivie a consisté à conserver une dimension de support de 1 cm, mais de faire varier l'espacement. Dans un deuxième temps, cette procédure a aussi été appliquée pour un autre espacement au segment G8.

La figure 5.1 est celle du DV G1 original. Elle vaut pour des valeurs de résistance au forage prises à tous les centimètres le long du segment G1. Les figures 5.41 à 5.45 sont les DV des valeurs de résistance au forage prises à tous les centimètres mais pour des espacements respectifs de 3, 9, 12, 16, 20 et 25 cm le long du même segment.

La convention utilisée pour identifier les DV ainsi produits est la suivante: DV G1u3 réfère au DV calculé à partir des données du segment G1, en respectant un espacement de 3 cm. En comparant ces DV, nous constatons que l'allure générale du DV original se perd et évolue vers ce qui semble un effet de pépite pur avec l'accroissement de l'espacement des points de mesure.

La figure 5.3 illustre le DV G3 original. Elle vaut pour des moyennes de résistance au forage prises à tous les centimètres le long du segment G3. Les figures 5.46 à 5.49 sont les DV des valeurs de résistance au forage prises à tous les centimètres mais pour des espacements respectifs de 5, 10, 15 et 20 cm le long du même segment.

Rappelons que la convention utilisée pour identifier les DV ainsi produits est la suivante: DV G3u5 réfère au DV calculé à partir des données du segment G3, en respectant un espacement de 5 cm. du même segment.

La comparaison des DV de ce groupe nous amène à conclure que l'allure générale du DV original, que les épaisseurs moyennes des couches et que les espacements moyens de ces dernières se conservent malgré l'accroissement de l'espacement.

La partie inférieure du tableau 5.5 montre, sous le titre Changement d'espacement, un résumé des données produites par ce deuxième groupe de simulations. On y constate que la moyenne arithmétique des données ayant servi à l'obtention de chaque DV et leur variance ne montrent pas de variations significatives malgré l'accroissement de l'espacement des points de mesure.

Le Tableau 5.8 ci-après rapporte les résultats de la description des DV produits suite aux simulations de changements d'espacement à partir des données du segment G1 (figures 5.41 à 5.45) avec le modèle combiné sphérique-exponentiel.

Le modèle combiné sphérique-exponentiel s'est aussi bien ajusté aux DV G1u3. Quant aux DV G1u9, DV G1u12, DV G1u20 et DV G1u25, le modèle sphérique seul s'est avéré le plus adéquat. Les DV calculés à partir de ces modélisation sont tracés en lignes tiretées aux figures 5.41 à 5.45 et peuvent être comparées au DV expérimentaux correspondant.

Les résultats de la modélisation du Tableau 5.9 montrent que l'effet de pépite apparaît soudainement quand l'espacement entre les points de mesure passe de 3,0 cm à 9,0 cm puis oscille au fur et à mesure que le pas augmente. La variance totale varie irrégulièrement dans l'intervalle 4420 $(kg/cm^2)^2$ et 5230 $(kg/cm^2)^2$ lorsque le pas passe de 1,0 cm à 25,0 cm. L'effet de l'accroissement de l'espacement entre les points de mesure influence peu les portées.

Tableau 5.8 Paramètres variographiques des DV G1mx

Demi-vario	Effet pépite	Variance Sph $(kg/cm^2)^2$	Portée (m)	Variance Exp $(kg/cm^2)^2$	Portée (m)	Variance Total $(kg/cm^2)^2$	Modèle
G1	0	2124	0,12	2470	6,3	4594	Sph/Exp
G1u3	0	2450	0,18	2300	6,75	4750	Sph/Exp
G1u9	2300	2350	6,30			4650	Sph
G1u12	2150	2270	4,80			4420	Sph
G1u20	3050	1580	4,00			4630	Sph
G1u25	2650	2580	6,25			5230	Sph

L'amplitude relative de l'effet de trou varie d'une façon non significative avec l'accroissement du pas de mesure. En effet, comme le montrent les données du Tableau 5.9 qui suit, le coefficient α calculé pour le DV G3 (pas de 1,0 cm) est 0,396; ce dernier devient 0,401 lorsque le pas est 20,0 cm. Dans le but de confirmer cette observation, les mêmes calculs ont été faits pour un autre demi-variogramme montrant un effet de trou, soit le G8. Comme le montrent les données du Tableau 5.9, l'amplitude relative qui est 0,206 dans ce cas lorsque le pas est 1,0 cm, devient 0,200 lorsque ce dernier est 20.0 cm.

Tableau 5.9 Évolution du coefficient α avec le changement de l'espacement

Demi-vario	Valeur Maximum $(kg/cm^2)^2$	Variance $(kg/cm^2)^2$	Coefficient α
G3	3717	2663	0,396
G3u20	3750	2676	0,401
G8	4300	3569	0,206
G8u20	4200	3503	0,200

5.7 La structure géologique

Un certain nombre des trous de forage dont les données ENPASOL sont utilisées dans le présent mémoire se situent à proximité de la zone de faille à laquelle le texte du Chapitre III réfère. En se limitant aux segments de forage impliquant le shale, il a été possible de produire le Tableau 5.10.

Dans ce tableau, les segments de forage sont présentés en fonction de leur distance de la zone de faille, le segment G1 étant le plus près alors que le segment G7 est le plus éloigné. Ce tableau rapporte aussi les résultats de modélisation des DV des segments considérés (modèle combiné sphérique-exponentiel) et de calcul de variances et de moyennes expérimentales.

Pour des raisons de confidentialité, l'auteur ne peut pas produire de carte montrant la position des forages. Notons néanmoins que la distance qui sépare le forage G1 du forage G7 est de 2200 m et que les deux forages se situent du même côté de la faille.

D'une part, le fait le plus remarquable qui découle de l'examen de ce tableau est qu'en général la variance totale (variance obtenue de la modélisation) diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone de faille. Seuls le segments G9 et G3 font exceptions. Cette même tendance est montrée par les variances expérimentale. Dans ce cas, les exceptions sont G6 et G3.

Notons que la tendance montrée par la variance totale résulte surtout de la contribution de la variance liées au modèle A (sphérique) car celle liée au modèle B (exponentiel) est moins bien définie.

Tableau 5.10 Analyse des structures géologiques

Vario	MODELE A		MODELE B	
	a	variance	a	variance
	(m)	(kg/cm2)2	(m)	(kg/cm2)2
G 1	0,12	2124	6,3	2470
G 8	0,15	1620	1,1	2340
G 2	0,11	2195	3,2	1700
G 4	0,12	1950	2,5	2030
G 6	0,13	750	1,7	1010
G 9	0,12	850	1,3	2350
G 11	0,08	530	1	1070
G 3	0,15	1000	3	2400
G 10	0,07	380	2,6	1120
G 7	0,08	350	1	300

Vario	VARIANCE TOTALE (kg/cm2)2	VARIANCE EXPERIM. (kg/cm2)2	RESISTENCE MOYENNE (kg/cm2)	
G 1	4594	4645	166,55	
G 8	3960	3569	178,20	
G 2	3895	3587	174,33	
G 4	3980	3552	189,47	
G 6	1760	1519	105,69	
G 9	3200	2941	136,13	
G 11	1600	1860	161,58	
G 3	3400	2663	165,18	
G 10	1500	1166	151,28	
G 7	650	683	85,35	

Vario	Variance Modèle A (kg/cm2)2	Variance Experim. (kg/cm2)2	Variance Modèle D (kg/cm2)2	Différence (%)
G 1	2124	4645	2521	118
G 8	1620	3569	1949	120
G 2	2195	3587	1392	63
G 4	1950	3552	1602	82
G 6	750	1519	769	102
G 9	850	2941	2091	246
G 11	530	1860	1330	251
G 3	1000	2663	1663	166
G 10	380	1166	786	207
G 7	350	683	333	95

D'autre part, les moyennes expérimentale des résistances au forage rapportées aussi au Tableau 5.10 ne montrent aucune tendance particulière. Ce fait semble a priori contradictoire à la tendance montrée par les variances, d'autant plus que la moyenne expérimentale du segment G7, le segment le plus éloigné de la faille, est la moitié de celle du segment G1, le segment le plus près.

Quant aux portées des modèles, celles du modèle A suivent grossièrement une tendance similaire à celle des variances totales et expérimentales, si l'on exclut la portée du segment G3.

5.8 Les changements de lithologie

Les DV analysés jusqu'ici impliquaient chacun une lithologie parmi trois: un shale (DV G1, DV G2, DV G3, DV G4, DV G6, DV G7, DV G8, DV G9, DV G10 et DV G11), un calcaire (DV G5, DV G12, DV G13 et DV G14) et un grès (DV G15). La comparaison de ces derniers ne permet pas d'établir des liens entre leurs caractéristiques et les lithologie malgré que les moyennes expérimentale de résistance au forage sont différentes (voir le Tableau 5.1).

Cette section du mémoire fait aussi appel à une autre série de DV. Les données propres à ces derniers sont présentés au Tableau 5.11. Les caractéristiques des forages en cause et la lithologie correspondante sont incluses dans le Tableau 3.1.

Pour tenter de mettre en évidence les effets d'un changement de lithologie, on a réalisé des DV composés, c'est-à-dire, des DV qui chevauchent deux ou trois lithologies. De tels chevauchements correspondent à des successions lithologiques plausibles.

Tableau 5.11 Analyse lithologique

Variogram.	N. Données	Moyenne (kg/cm2)	É. Type	Variance (kg/cm2)2	CV
G 5	1168	107,97	41,09	1688	0,38
G 5A	281	94,37	44,55	1984	0,471
G 5B	757	158,03	97,93	9590	0,619
G 5C	1463	105,11	42	1764	0,399
G 5D	1037	140,82	91,27	8331	0,648
G 5E	2219	123,14	71,12	5058	0,577
G7-13a	700	78,9	21,15	447	0,268
G7-13b	700	161,8	58,39	3409	0,361
G7-13c	800	85,95	34,95	1221	0,406
G7-13d	900	94,35	43,75	1913	0,463
G7-13e	1000	103,66	53,12	2822	0,512
G7-13f	1100	106,9	52,66	2772	0,492
G7-13g	1200	113,69	57	3248	0,501
G7-13h	1300	115,02	58,76	3452	0,511
G 7-13i	1400	120,35	60,41	3649	0,502
G3-14-15	1961	110,18	53,54	2867	0,486
G7-13-7	2100	106,54	54,42	2962	0,511
Variogram.	Roche		Variogram.	Roche	
G 5	calcaire		G7-13a	shale/calc	
G 5A	grès		G7-13b		
G 5B	gneiss		G7-13c		
G 5C	calc/grès		G7-13d		
G 5D	grès/gneiss		G7-13e		
G 5E	calc/gr/gn		G7-13f		
			G7-13g		
G3-14-15	sh/calc/gr		G7-13h		
G7-13-7	sh/calc/sh		G 7-13i		

La première succession simulée fait appel aux données d'une portion de 7 m du segment G7 (shale) et de celles d'une portion de 7 m du segment G13 (calcaire). Les figures 5.50 et 5.51 représentent respectivement les demi-variogrammes de ces deux portion et ils sont identifiés DV G7-13a et DV G7-13b.

Afin de simuler l'évolution du demi-variogramme lorsque le passage d'une lithologie (shale) à une autre (calcaire) se fait durant un forage avec une foreuse sans carottier instrumenté, la procédure suivante a été appliquée. On a ajouté aux données propres au DV G7-13a (shale), les données du premier mètre du segment G13 (calcaire) et le demi-variogramme résultant a été calculé. Ce dernier, identifié DV G7-13c, constitue la figure 5.52.

Puis, les données du deuxième mètre du segment G13 ont été ajoutées à celles du DV G7-13c pour produire le DV G7-13d de la figure 5.53. Le processus a été répeté jusqu'à épuissement des données de la portion du segment G13. Les figures 5.54 à 5.58 sont tous les autres demi-variogrammes résultant de cette simulation; ces demi-variogrammes sont identifiées DV G7-13e, DV G7-13f, DV G7-13g, DV G7-13h et DV G7-13i.

L'examen des demi-variogrammes des figures 5.52 à 5.58, en comparaison avec la figure 5.50 de la même, permet de conclure qu'une modification majeure de l'allure générale du DV G7-13a apparaît dès l'addition du premier mètre de données provenant de la portion du segment G13 (DV G7-13b).

Cette modification, constituée d'une croissance du demi-variogramme à partir d'un premier plateau, se maintient au fur et à mesure que le forage se prolonge dans la formation de calcaire. Donc, il serait possible de détecter des changements de lithologie en suivant l'évolution du demi-variogramme calculé en "continu". Dans ce cas-ci, la

détection se ferait à 1 mètre près. Retenons qu'il y a un contraste marqué entre la variabilité du DV G7-13a et celle du DV G7-13b.

Toutefois, même si l'on ajoute à l'examen précédent le DV G7-13b de la figure 5.51, valable pour la portion calcaire seule, l'identification des lithologies dont on a pu détecter le changement ne semble pas possible.

La deuxième simulation d'une succession lithologique fait appel aux données des DV G5B (gneiss) et DV G5a (grès). Examinons d'abord ces données qui n'ont pas été présentées jusqu'à maintenant.

Le DV G5B qui est illustré à la figure 5.59 est celui du gneiss (données provenant d'un segment de 7 m) sur lequel reposent les formations sédimentaires de la série DV G1 à DV G15. Ce DV montre, pour la dimension du champ étudié, que la résistance au forage du gneiss est non-stationnaire. Les données montrent qu'elle augmente continuellement avec la profondeur du forage. Ce phénomène, observable avec tous les forages qui pénètrent dans ce gneiss, résulterait d'une altération décroissante avec la profondeur d'ailleurs rapportée dans le journal de forage.

Quant au DV G5a, c'est celui d'un grès (données provenant d'un segment de 3 m). Ce DV est présenté à la figure 5.60. Il atteint rapidement un plateau. Cette deuxième simulation a permis de produire les DV des figures 5.61 à 5.70. La convention utilisée pour identifier ces DV est la suivante: le DV G5d1 (figure 5.61) est le demi-variogramme obtenu en ajoutant aux données du grès les données du premier mètre du gneiss.

L'examen des DV des figures 5.60 à 5.70 montre ici qu'il faut attendre l'addition de 5 m de données du gneiss pour conclure à un changement facilement percevable. Cette

simulation montre aussi qu'il est possible de détecter un changement de lithologie, mais cette détection se fait dans ce cas-ci à 5 m près.

Ce résultat est cohérent avec le fait que les données propres au gneiss croissent avec la distance le long du segment (à cause de l'altération décroissante) et que leur variabilité devient suffisamment contrastante par rapport à celle du grès uniquement lorsque la distance entre les paires atteint trois ou quatre mètres. L'identification des lithologies ne serait pas possible aussi dans ce cas-ci.

Une troisième simulation de succession lithologique a été réalisée avec les données du DV G5 (12 m de calcaire, voir figure 5.11) et celles du DV G5a (3m de grès). L'addition des données du grès à celles du calcaire ne fait qu'amoindrir l'effet de trou que montrait le DV G5. La figure 5.71 illustre le DV G5c qui resultent de la simulation. En comparant ce dernier au DV G5, le changement de lithologie ne semble pas facilement détectable.

La quatrième simulation de succession lithologique a impliqué l'addition des données du gneiss aux données de la succession calcaire-grès simulée en troisième lieu. L'allure du DV G5c (figure 5.71) a changé rapidement dès l'addition des premiers mètres de données du gneiss pour mener, après l'addition des 7 m de données, au DV G5e de la figure 5.72 où on constate la grande influence des données propres au gneiss.

La présente simulation a montré qu'il est possible de détecter le passage du grès au gneiss à quelques mètres près même si le passage antérieur du calcaire au grès ne l'a pas été. Mais encore dans ce cas-ci, il est impossible d'identifier ces lithologies même lorsqu'on dispose des DV originaux.

La méthode utilisée pour déterminer les épaisseurs moyennes des couches et leur périodicité moyenne peut être appliquée au cas d'une succession lithologique. Pour

illustrer ce fait, une succession de 7 m de shale (voir le DV de la figure 5.50), de 7 m de calcaire (voir le DV de la figure 5.51) et de 7 m de shale (voir le DV de la figure 5.50) a été simulée.

La figure 5.73 montre le DV resultant identifié G7-13-7. Il montre un effet de trou. L'épaisseur moyenne des couches à resistances au forage différentes (calcaire contre shale) qu'on peut y mesurer est bien 7 m et l'espacement moyen est supérieur à 11 m.

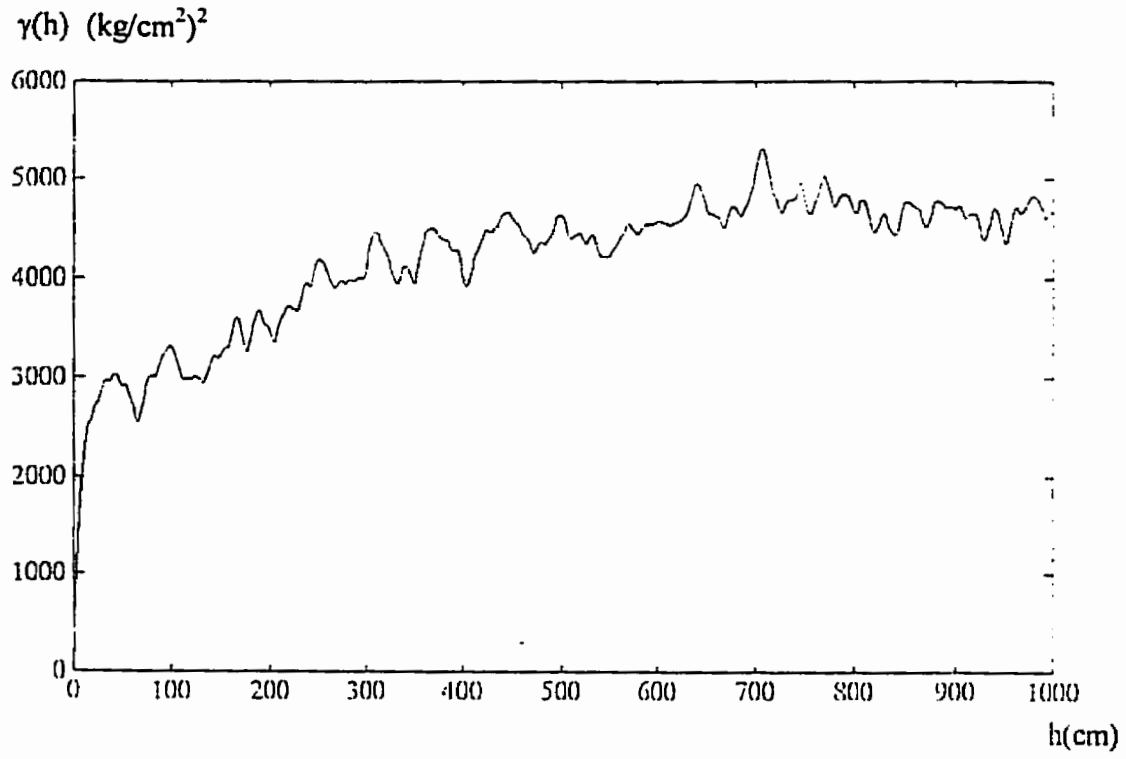


Figure 5.1: Demi-variogramme G1

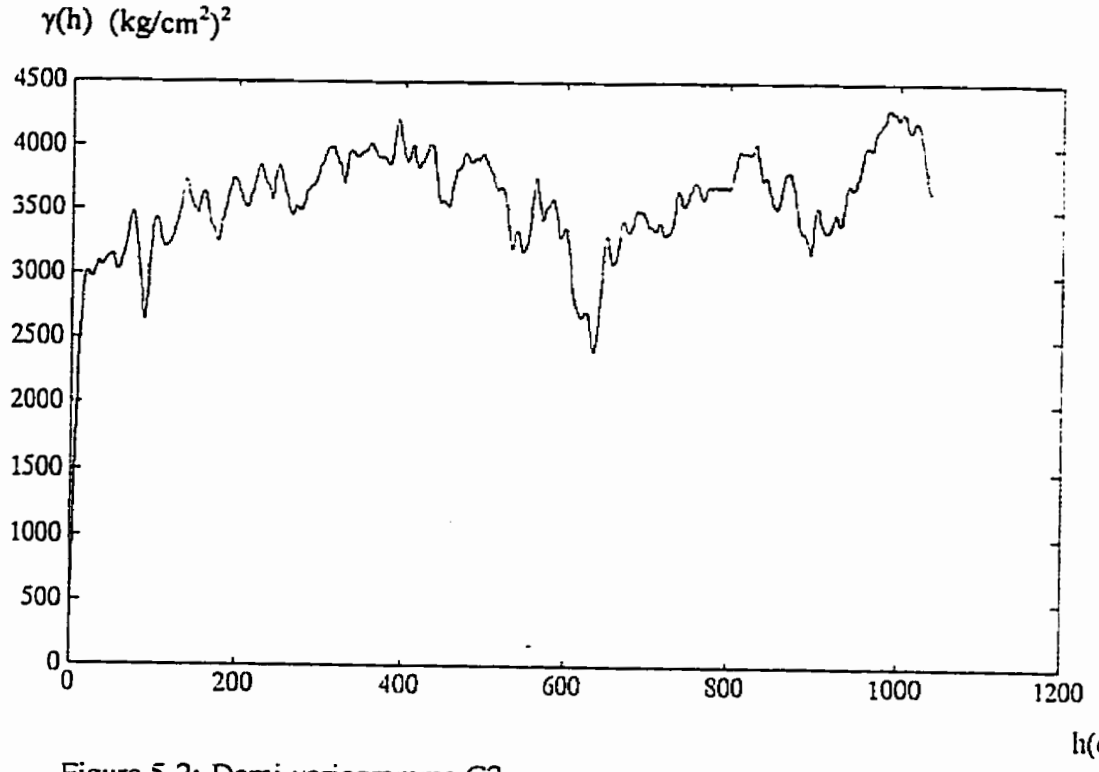


Figure 5.2: Demi-variogramme G2

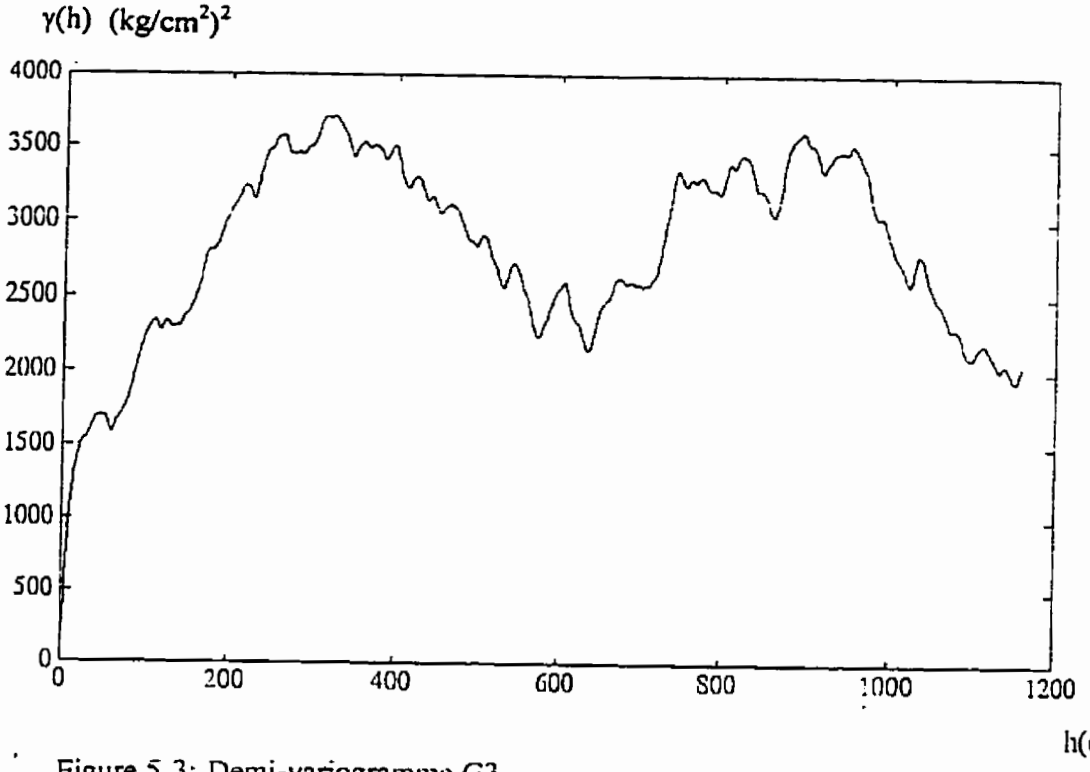


Figure 5.3: Demi-variogramme G3.

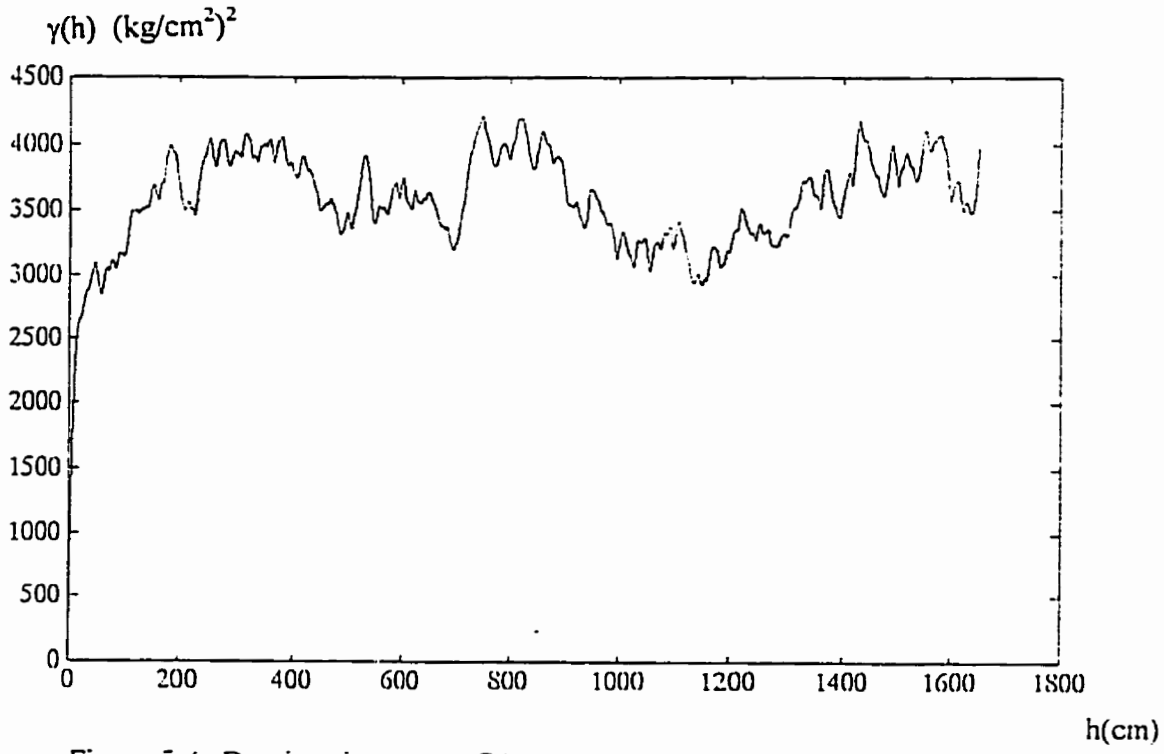


Figure 5.4: Demi-variogramme G4.

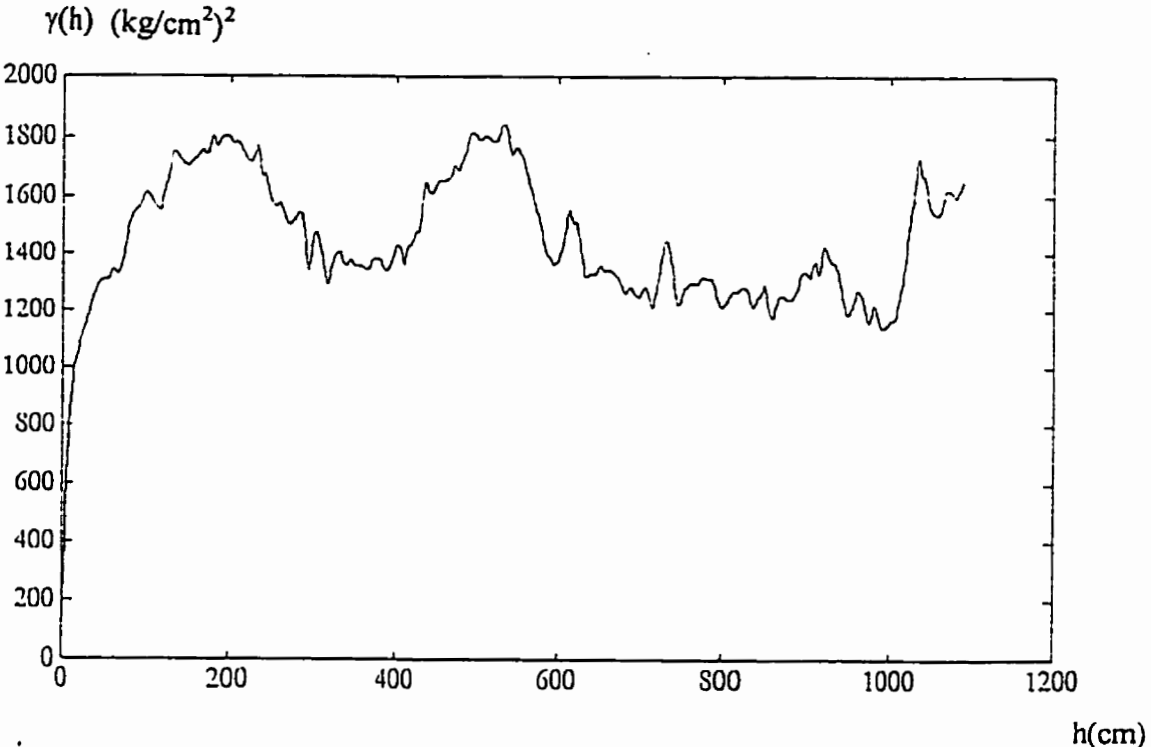


Figure 5.5: Demi-variogramme G6.

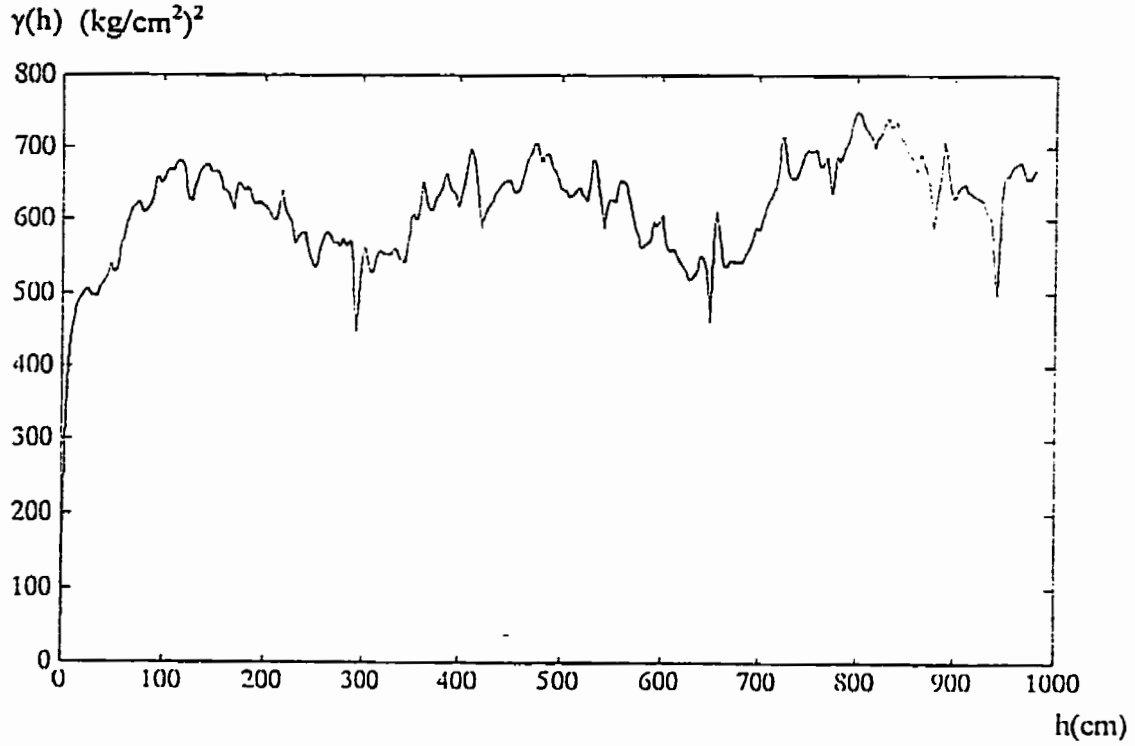


Figure 5.6: Demi-variogramme G7

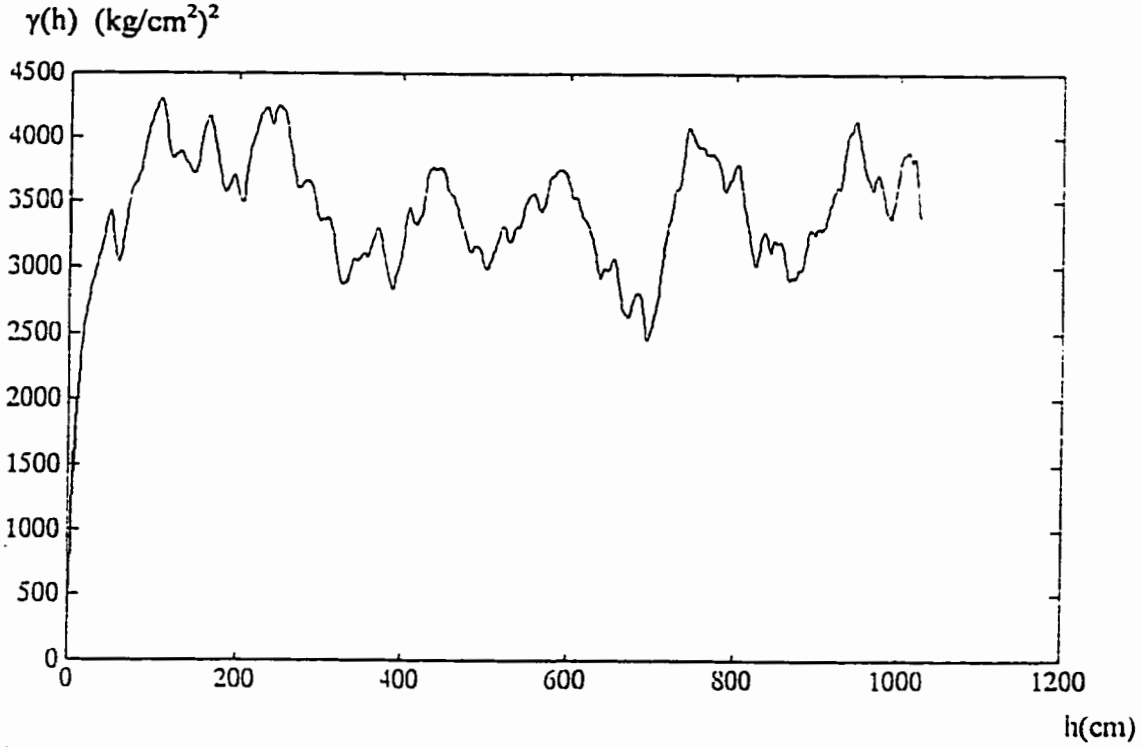


Figure 5.7: Demi-variogramme G8.

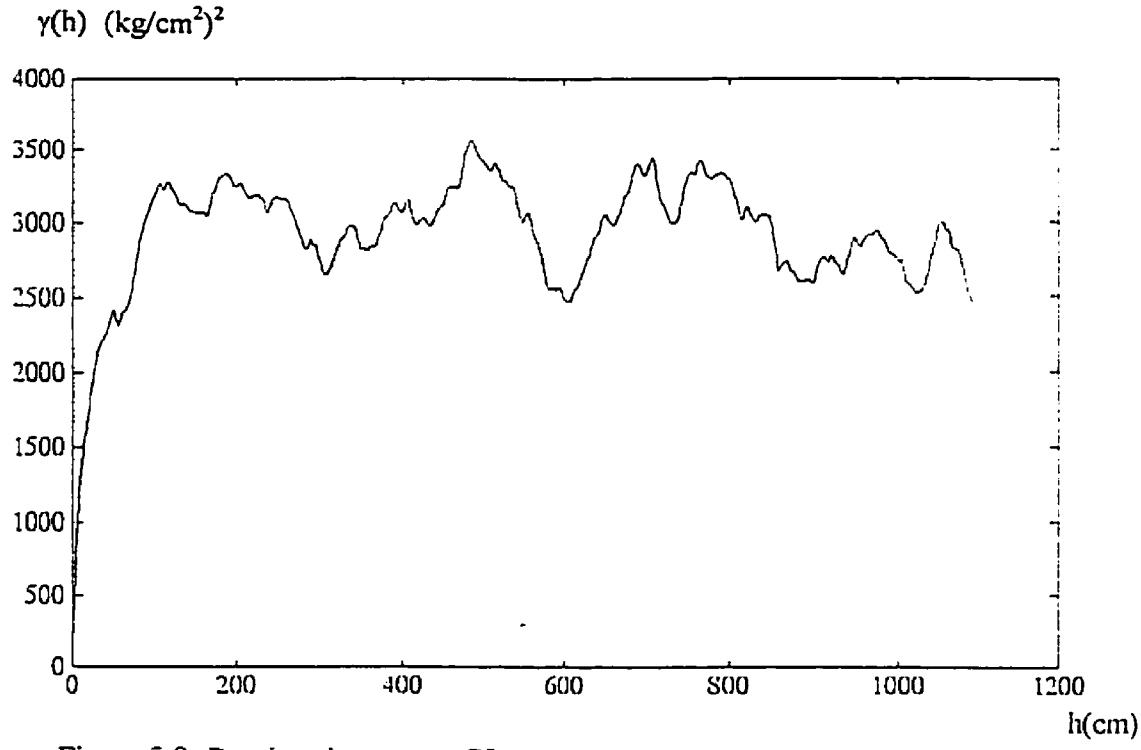


Figure 5.8: Demi-variogramme G9

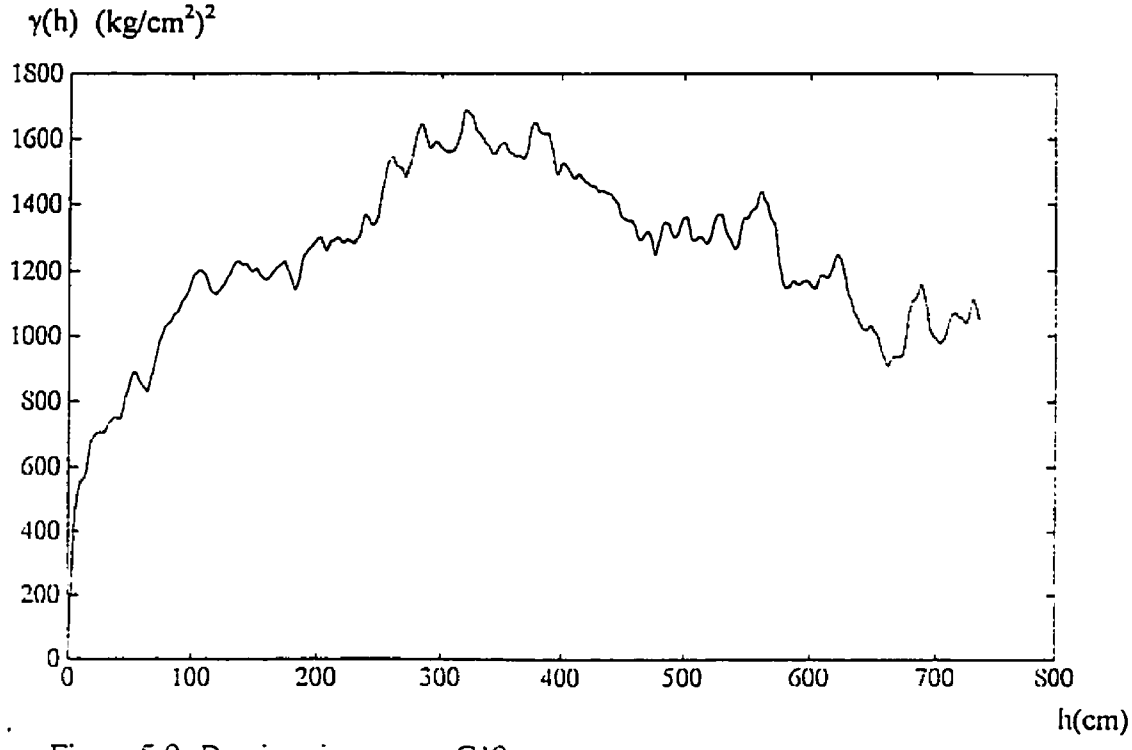


Figure 5.9: Demi-variogramme G10.

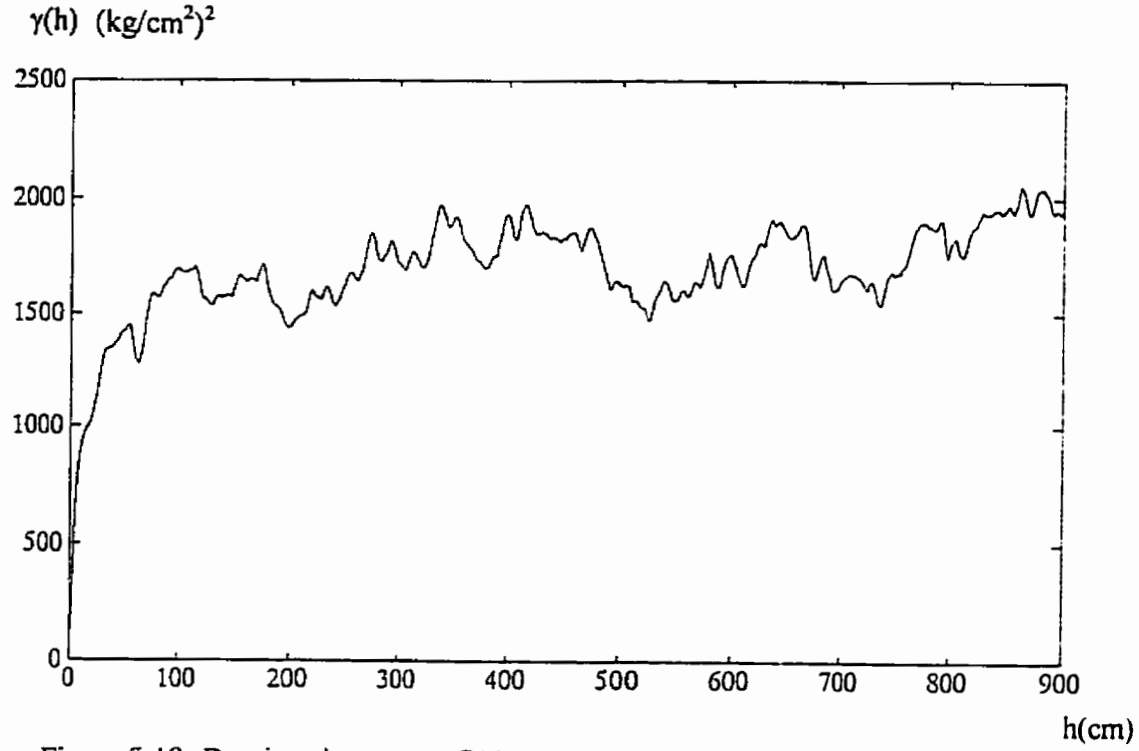


Figure 5.10: Demi-variogramme G11

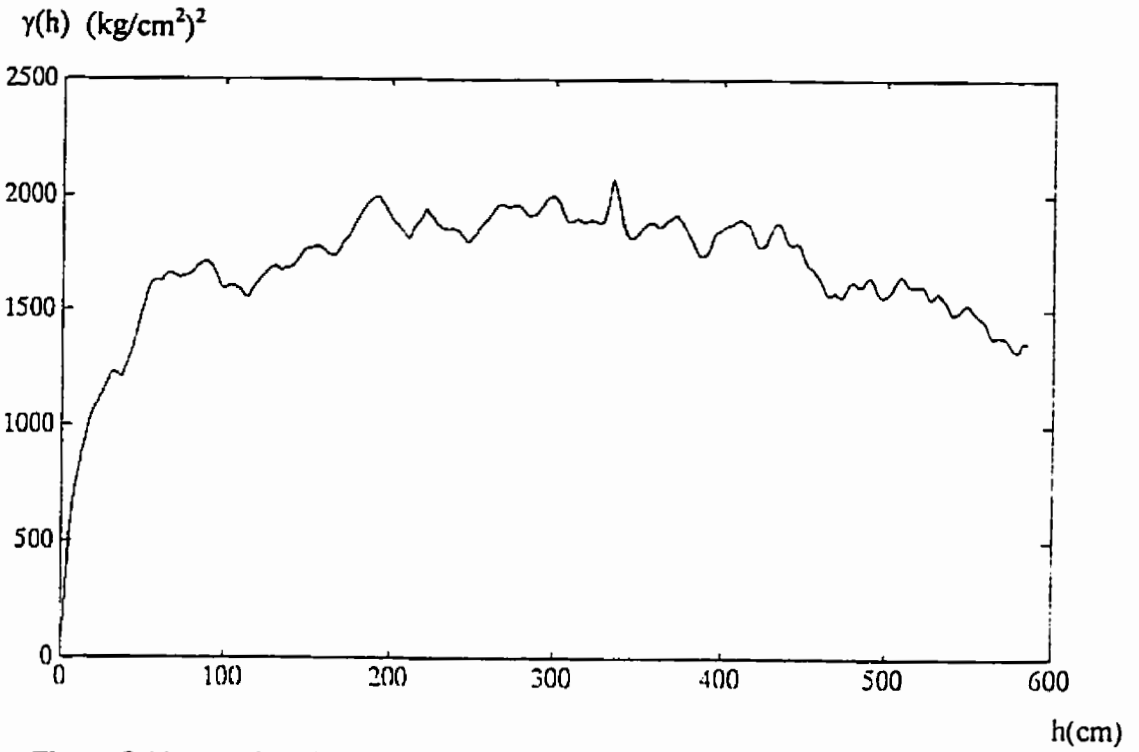


Figure 5.11: Demi-variogramme G5.

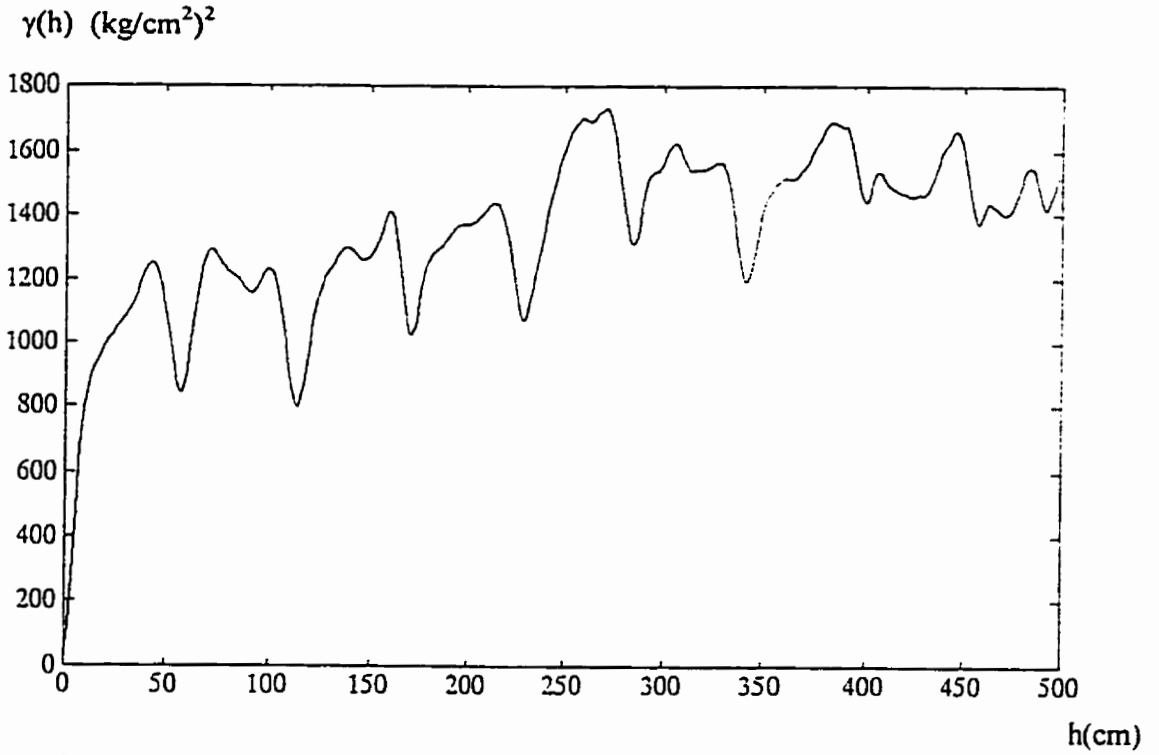


Figure 5.12: Demi-variogramme G12

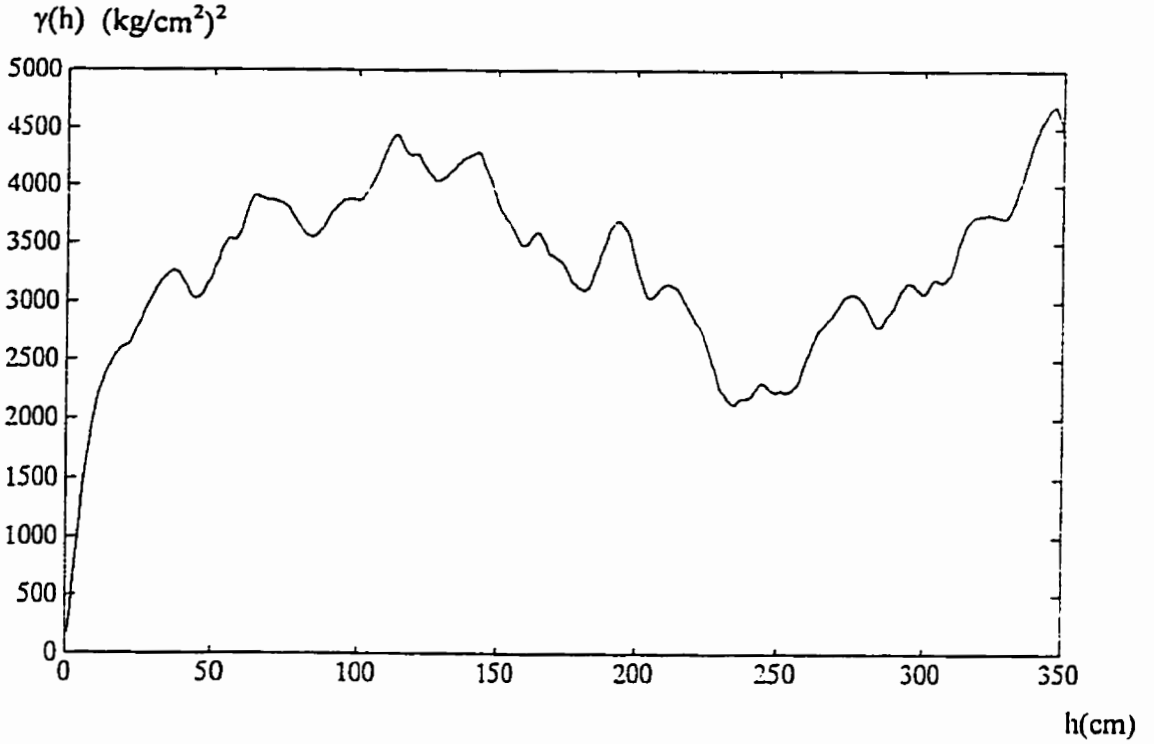


Figure 5.13: Demi-variogramme G13.

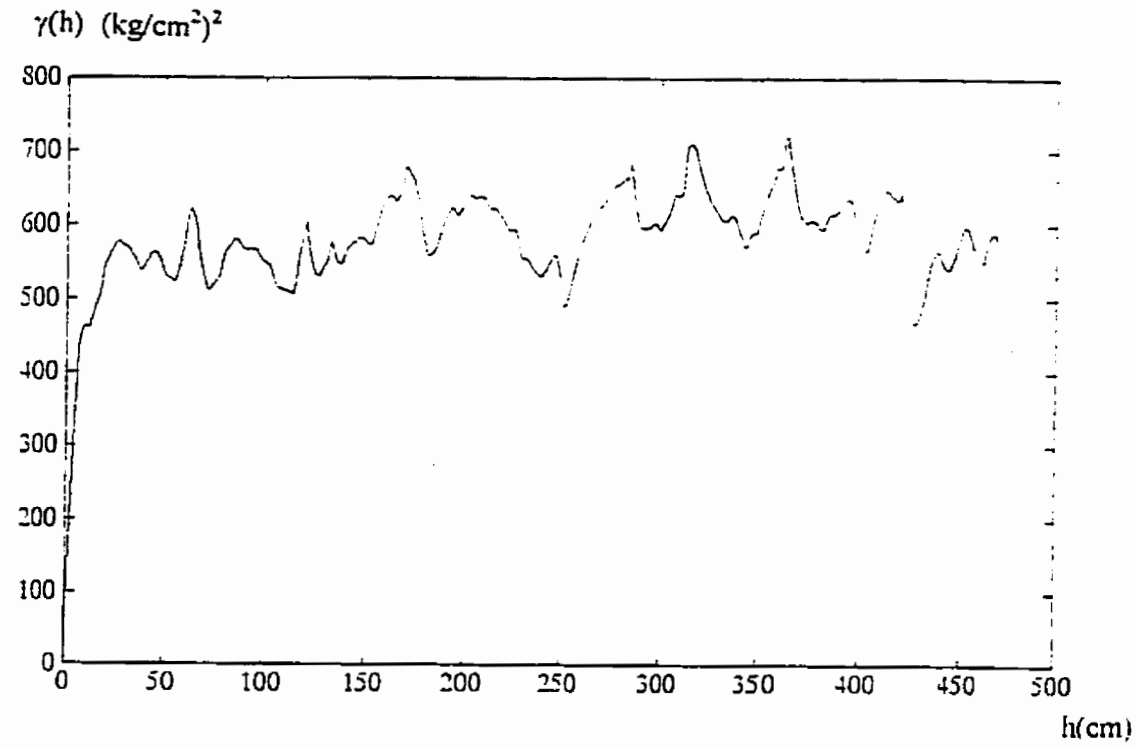


Figure 5.14: Demi-variogramme G14

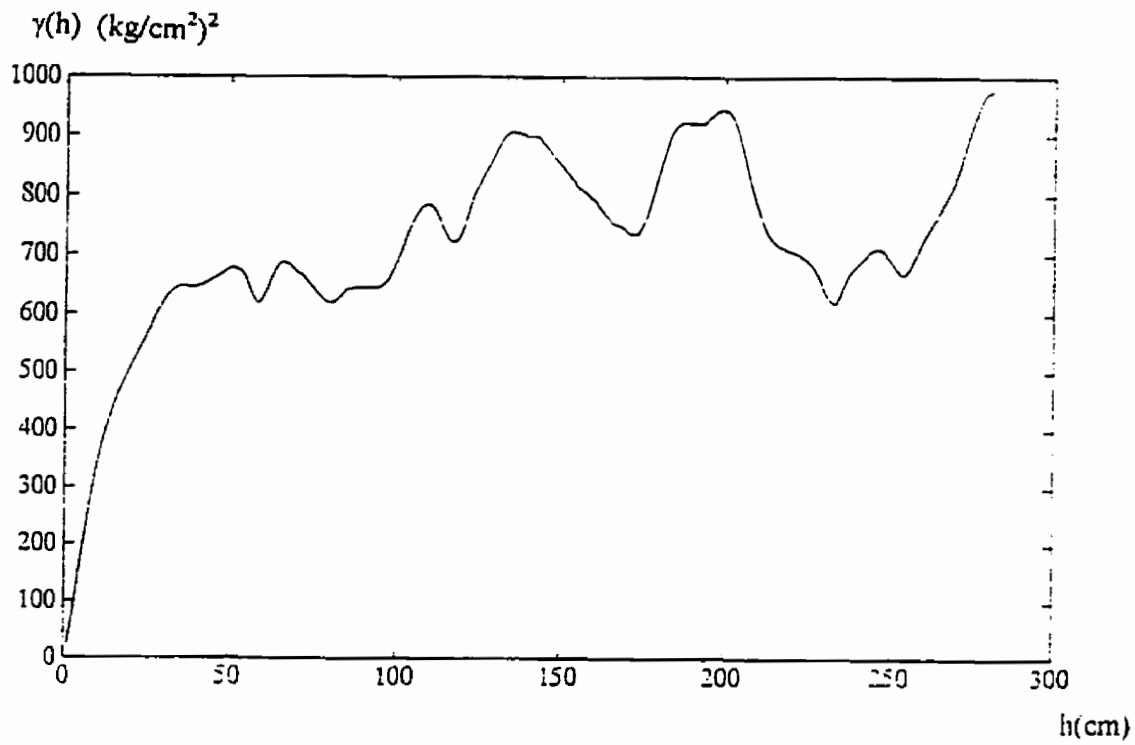


Figure 5.15: Demi-variogramme G15.

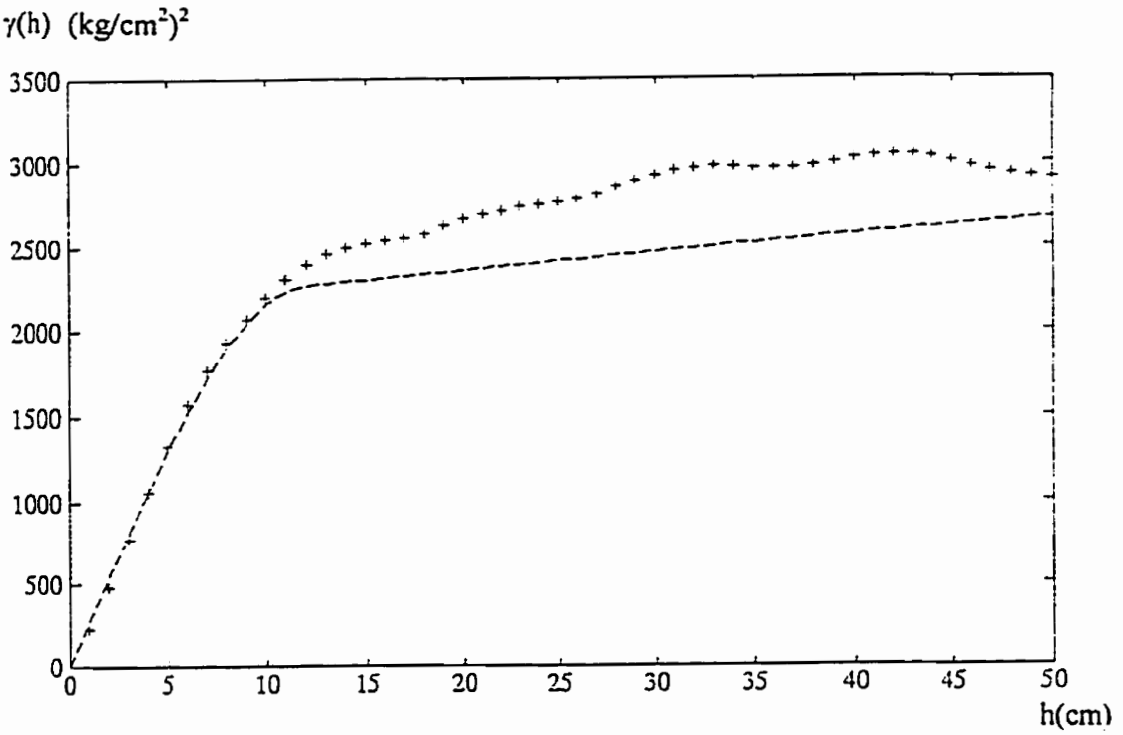


Figure 5.16 a: Demi-variogramme G1.

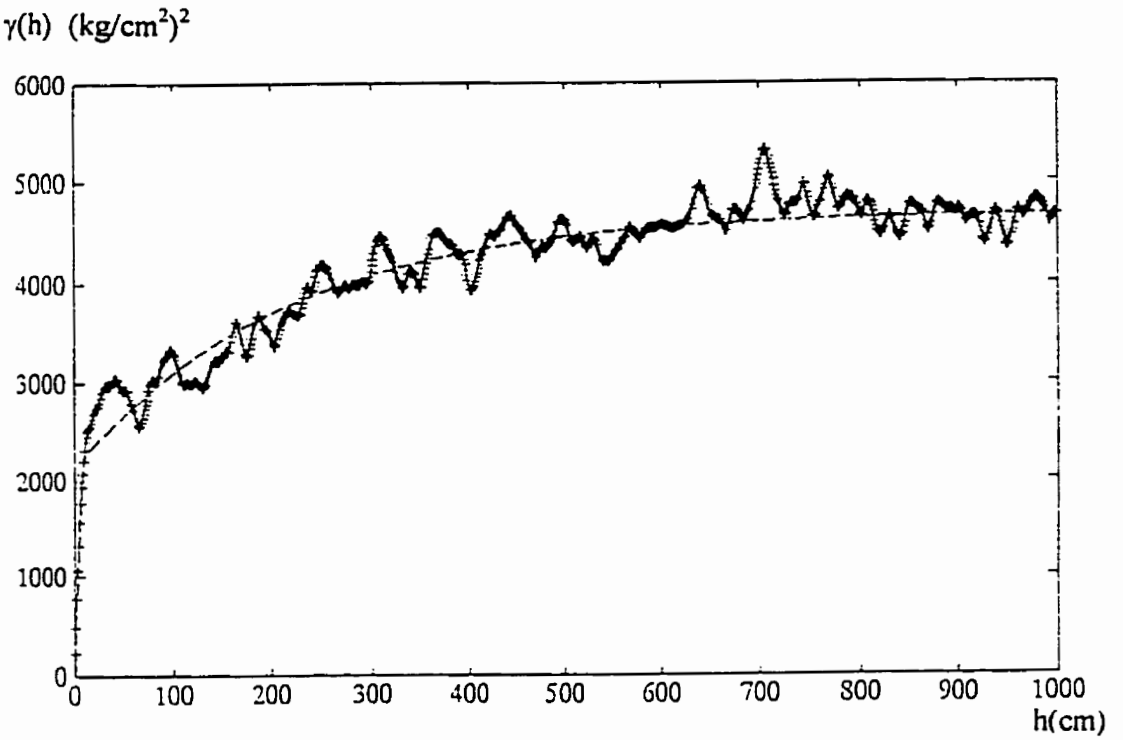


Figure 5.16 b: Demi-variogramme G1.

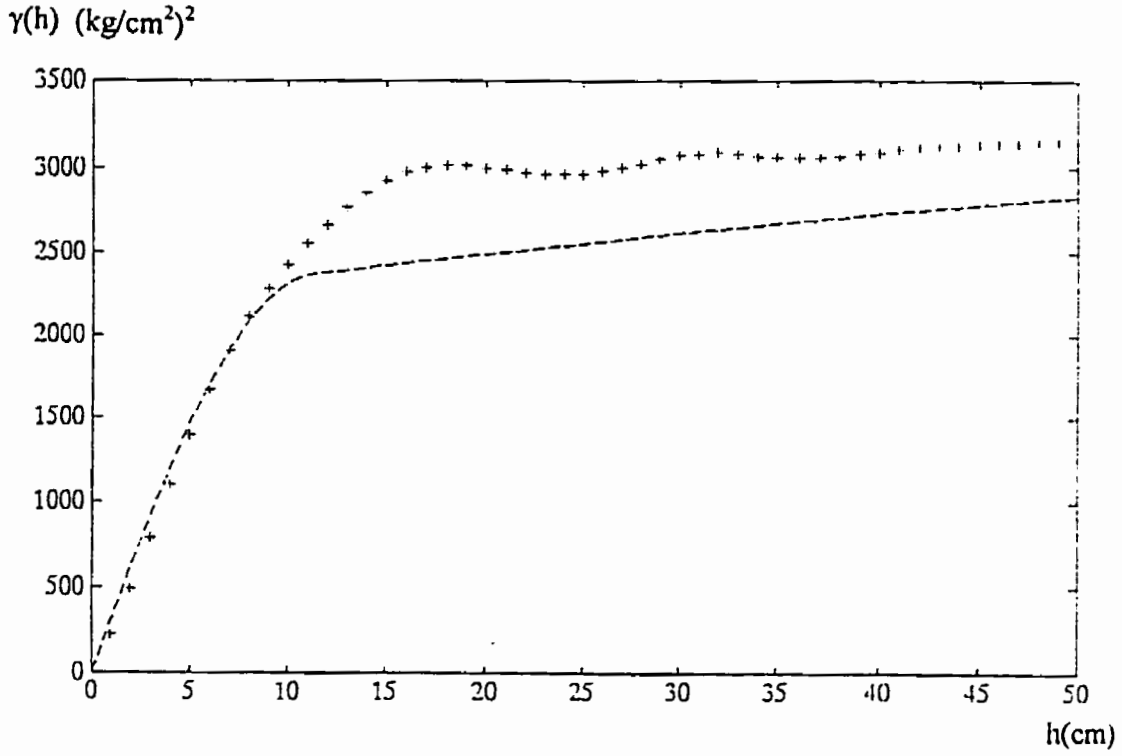


Figure 5.17 a: Demi-variogramme G2.

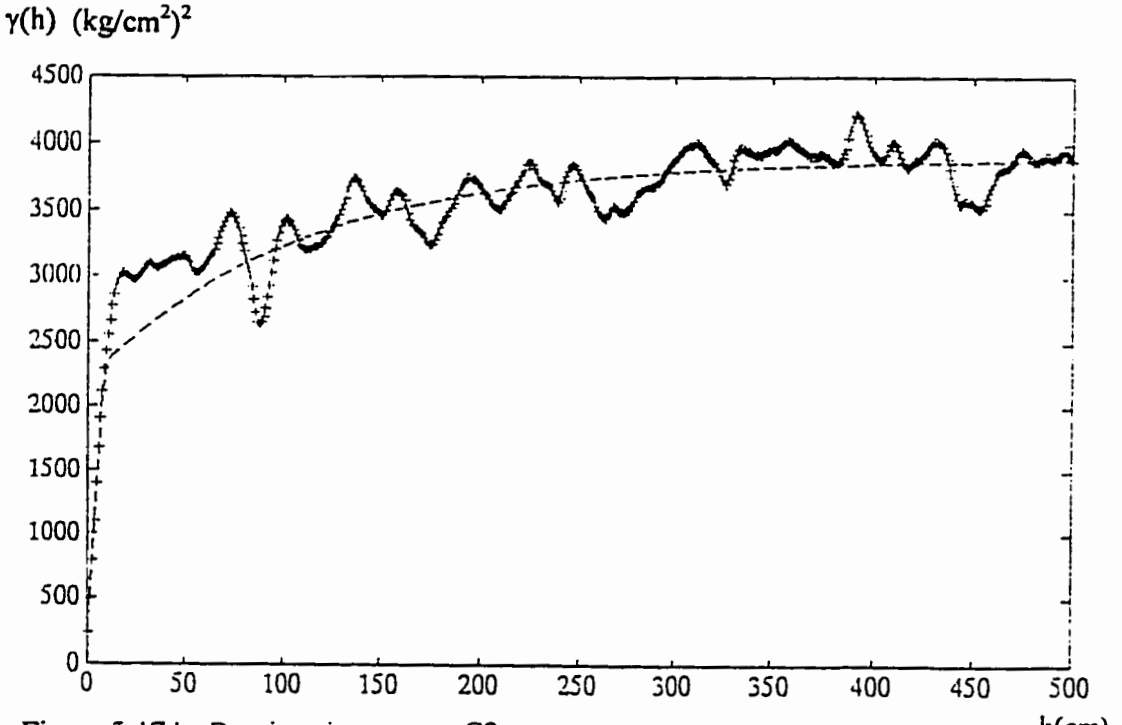


Figure 5.17 b: Demi-variogramme G2.

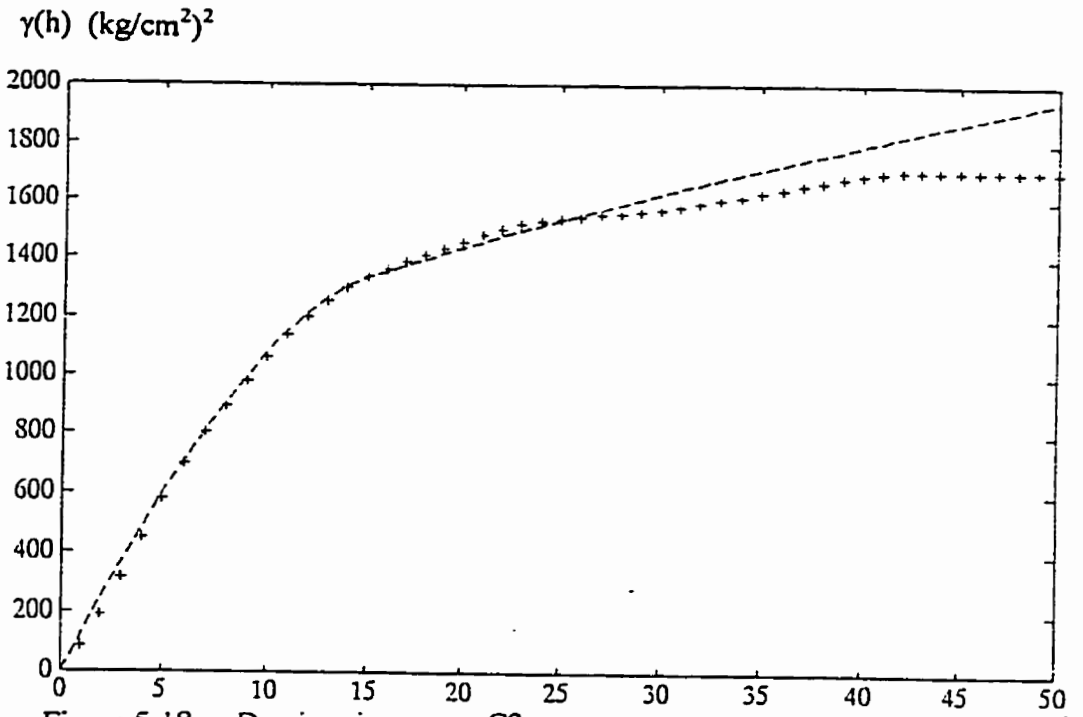


Figure 5.18 a: Demi-variogramme G3.

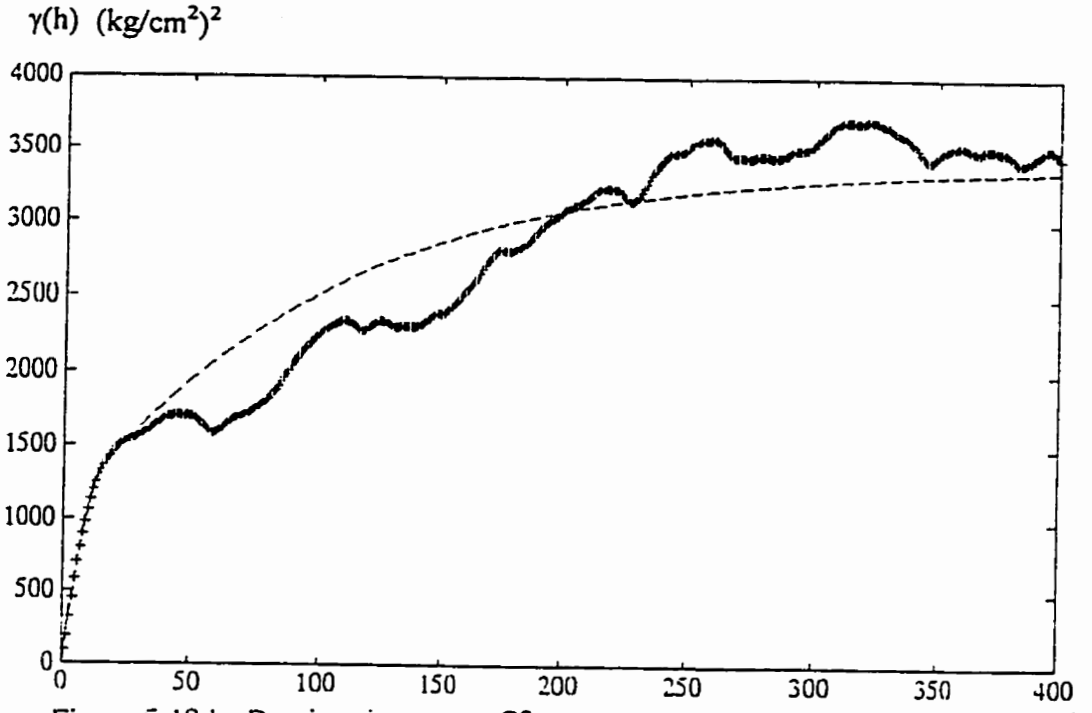


Figure 5.18 b: Demi-variogramme G3.

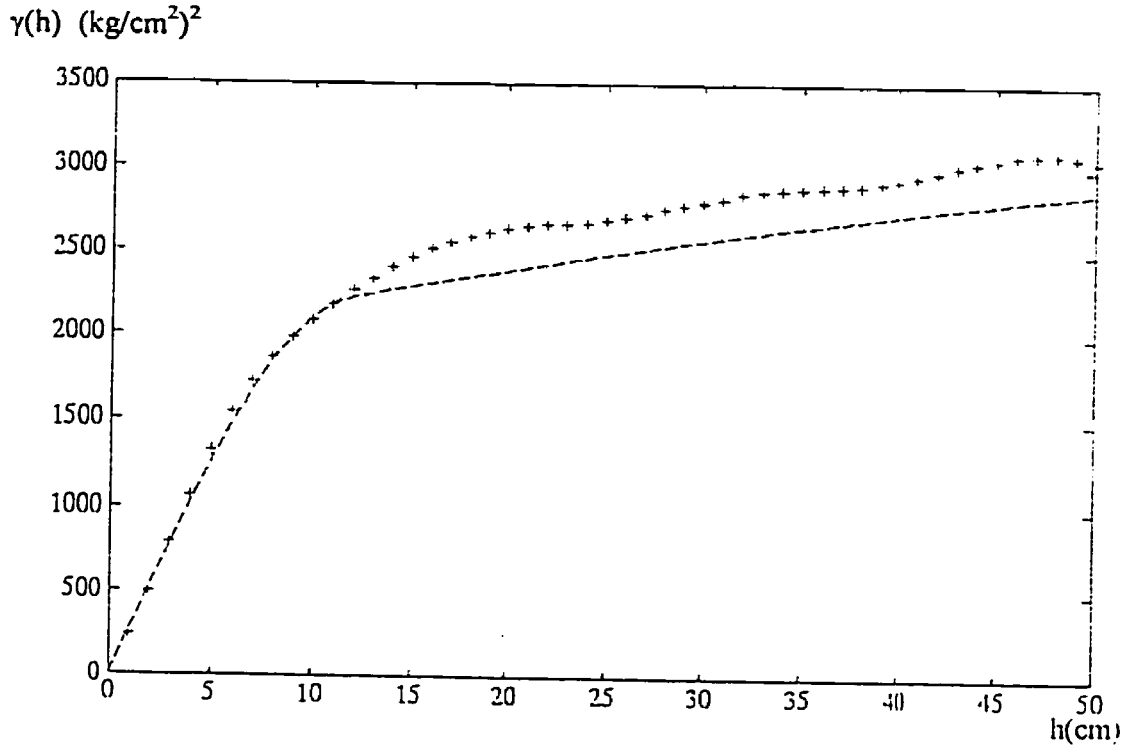


Figure 5.19 a: Demi-variogramme G4.

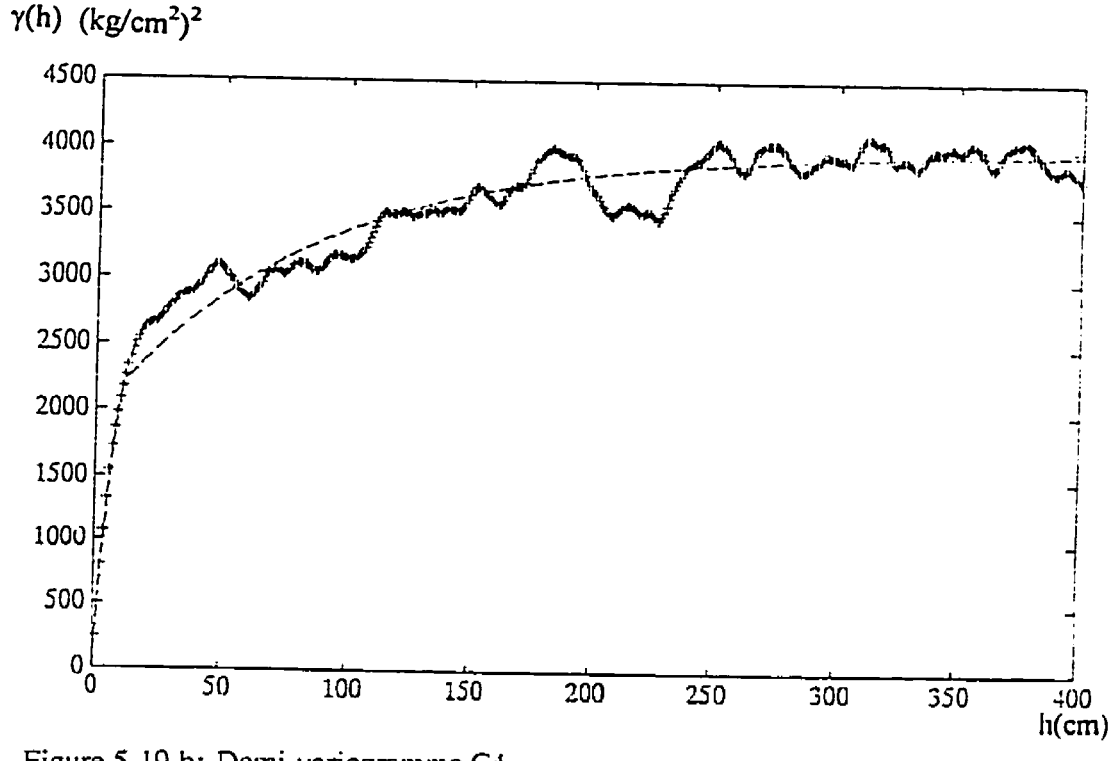


Figure 5.19 b: Demi-variogramme G4.

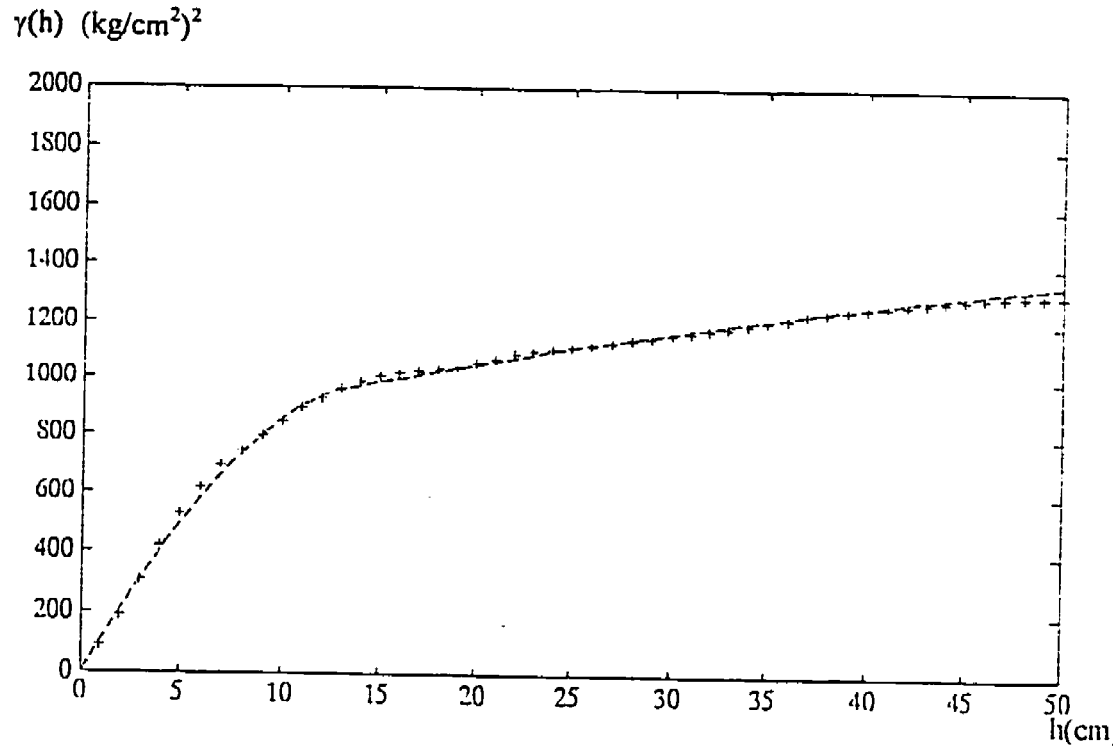


Figure 5.20 a: Demi-variogramme G6.

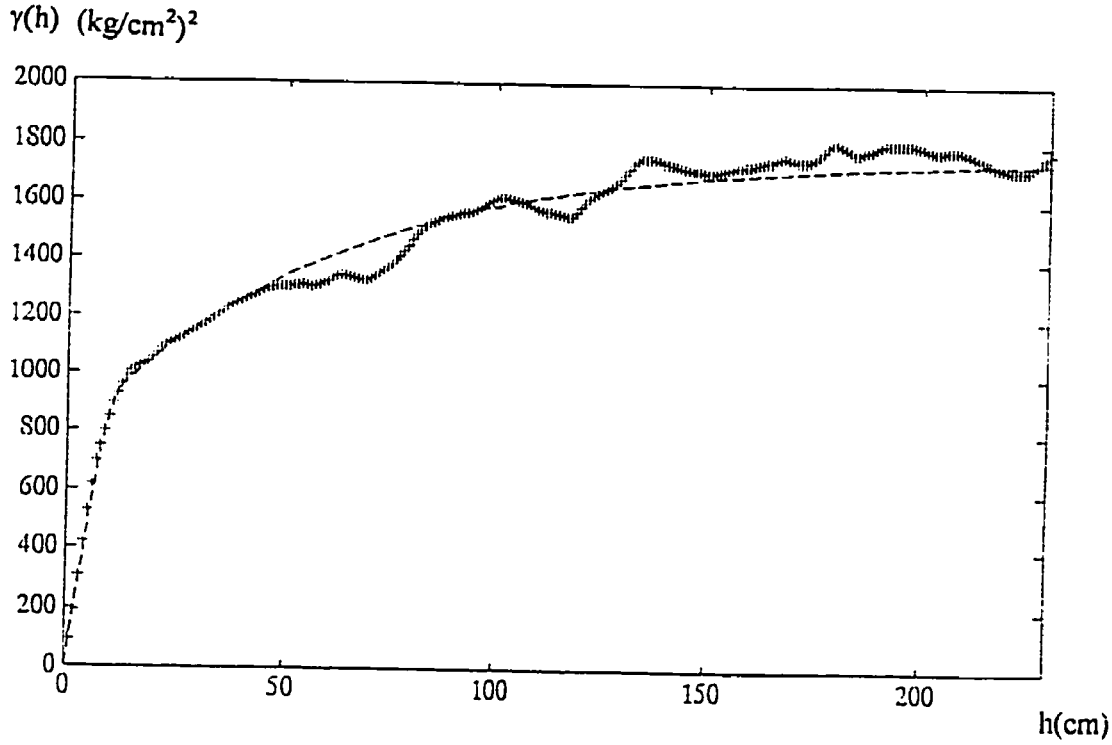


Figure 5.20 b: Demi-variogramme G6.

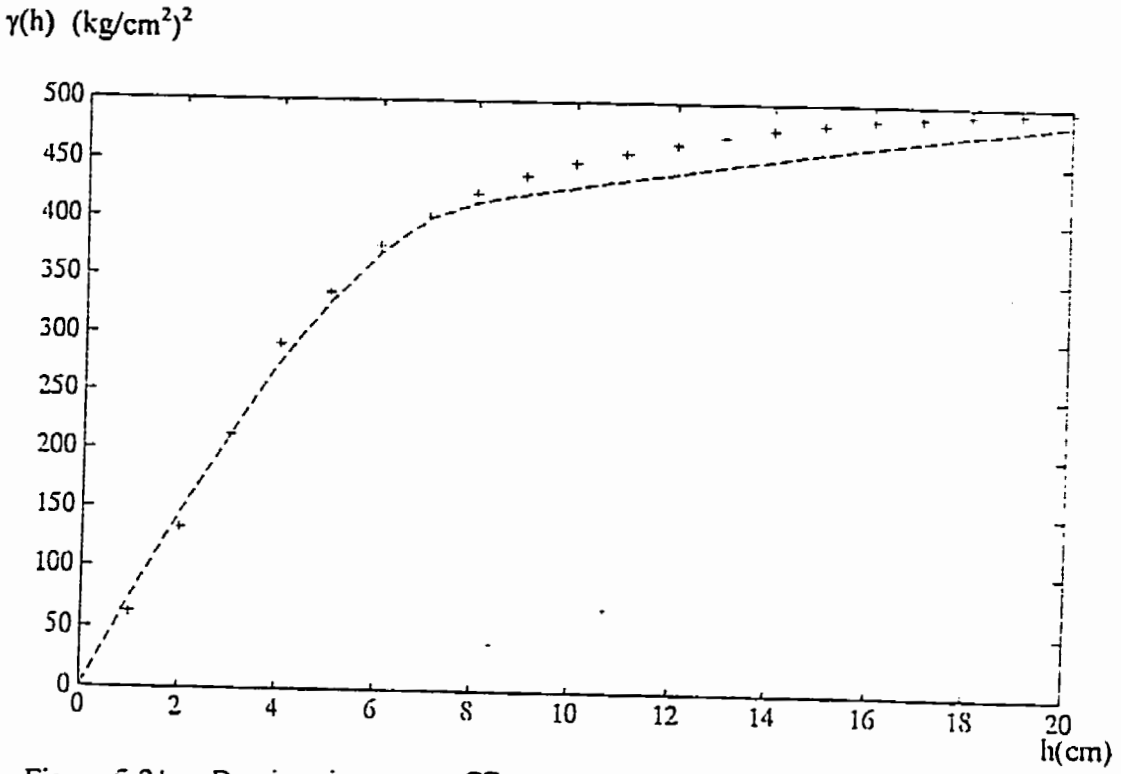


Figure 5.21 a: Demi-variogramme G7.

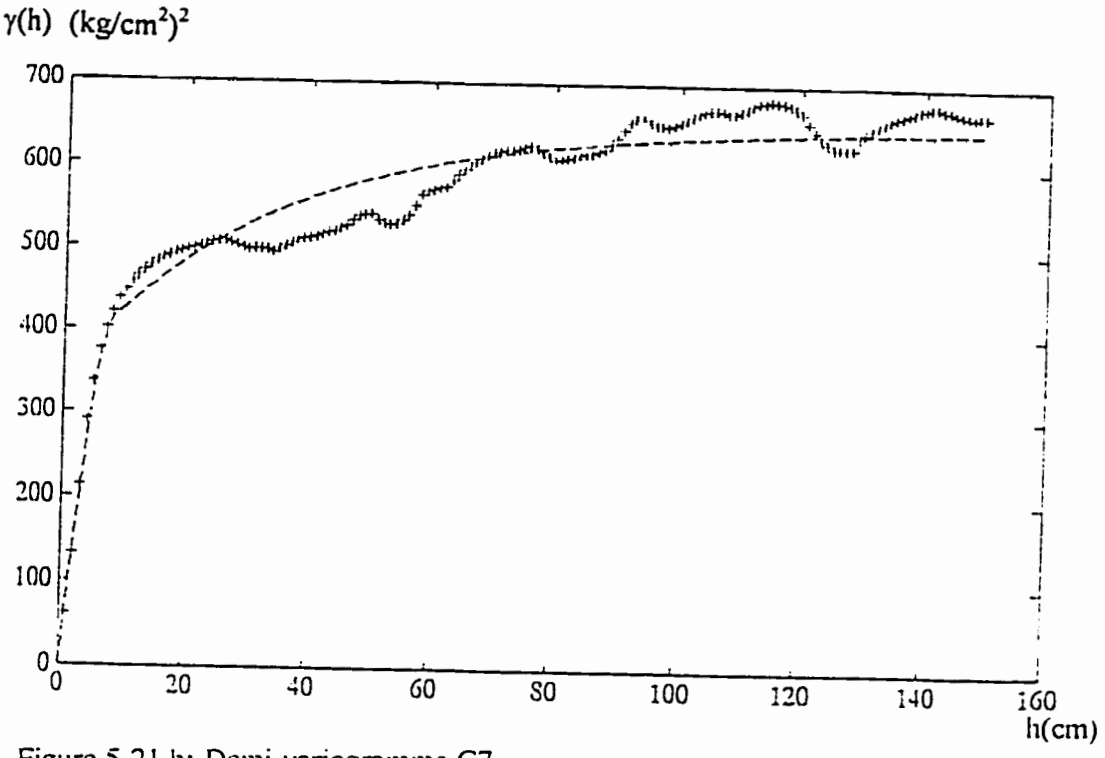


Figure 5.21 b: Demi-variogramme G7.

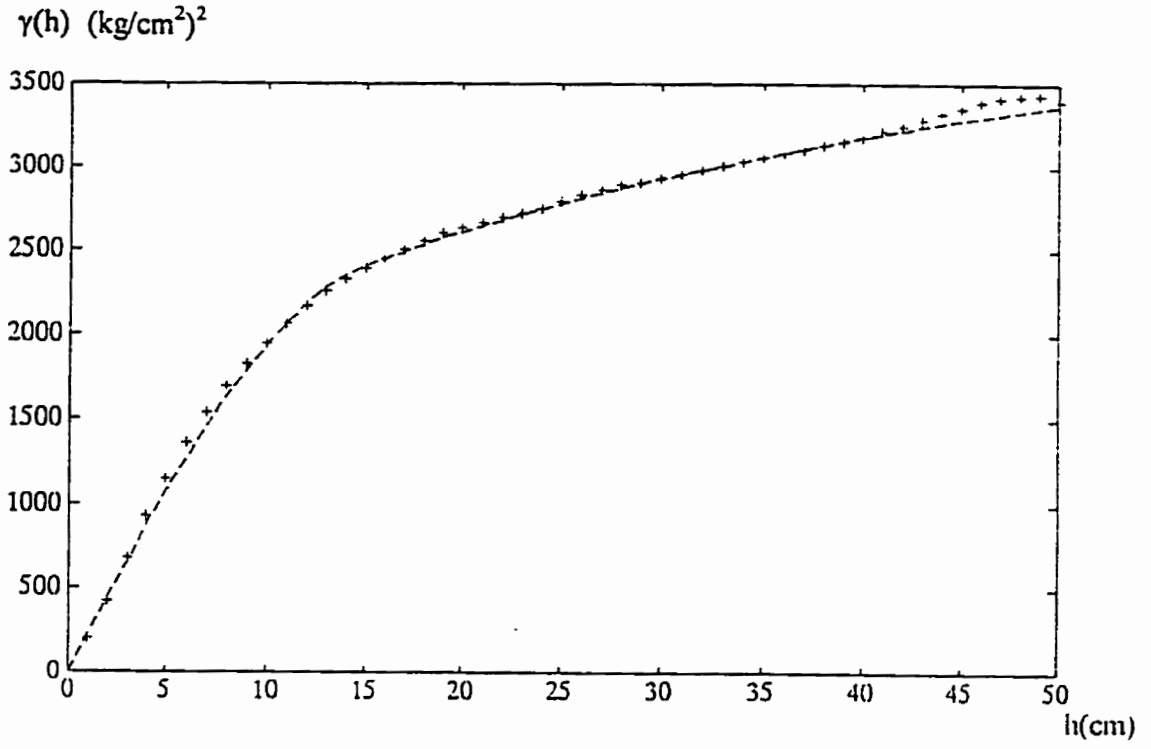


Figure 5.22 a: Demi-variogramme G8.

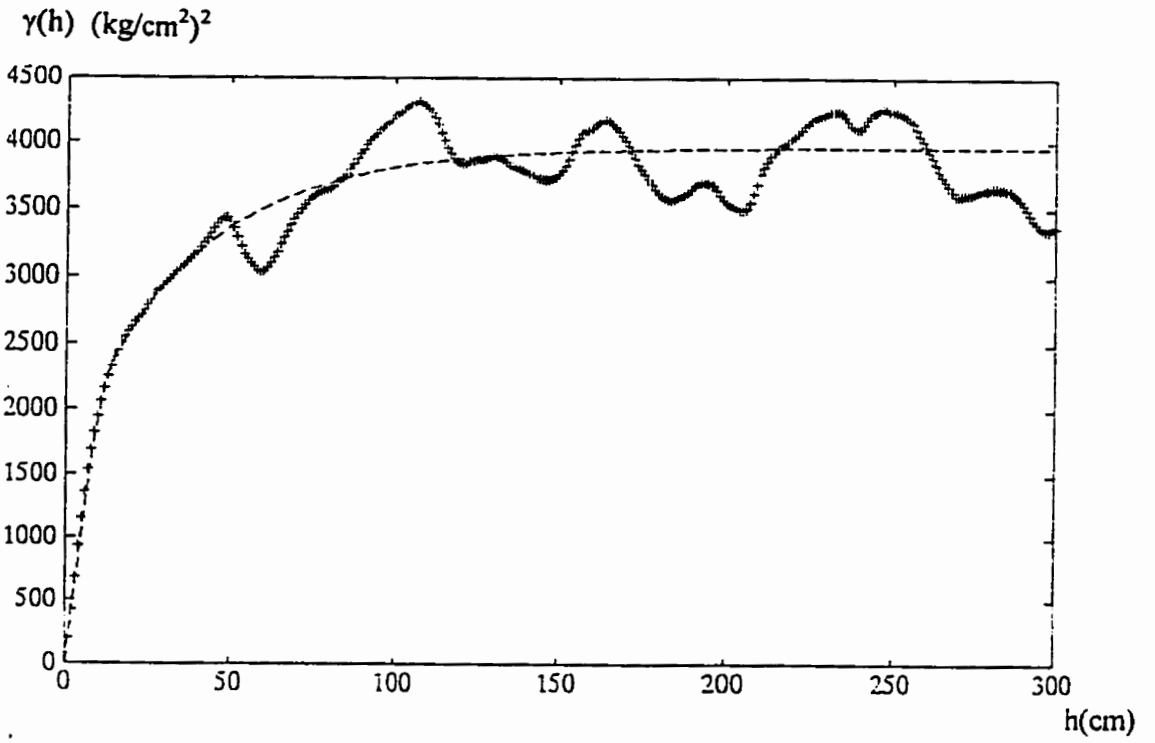


Figure 5.22 b: Demi-variogramme G8.

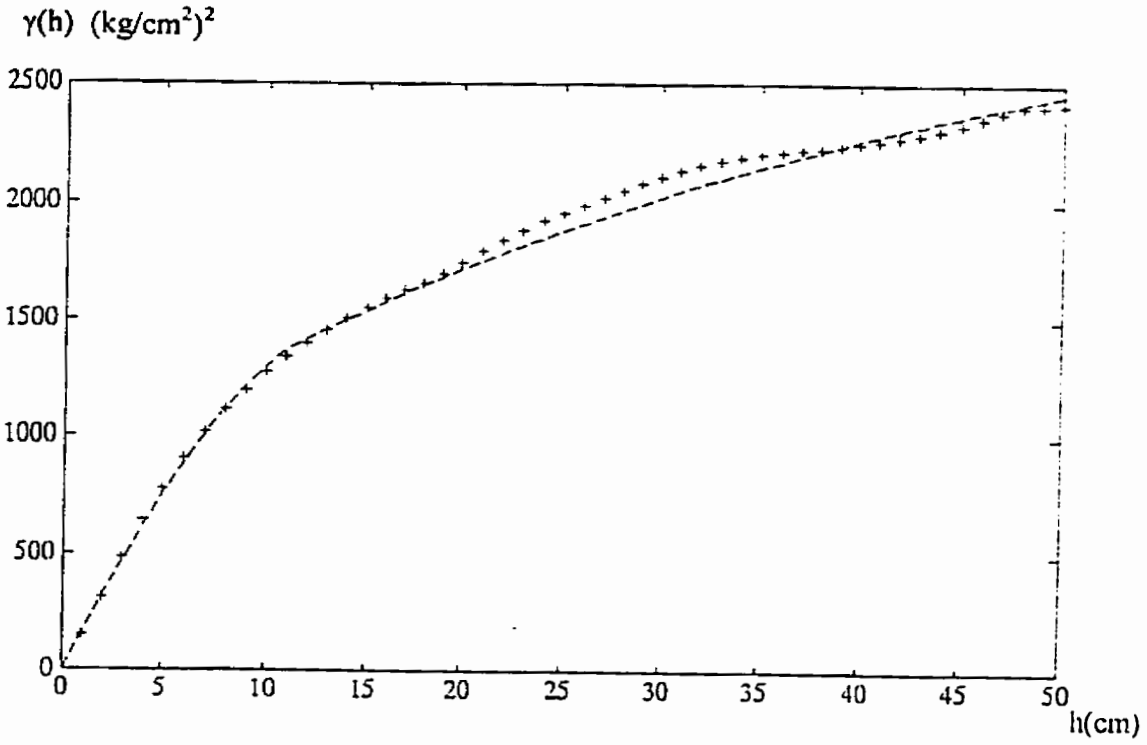


Figure 5.23 a: Demi-variogramme G9.

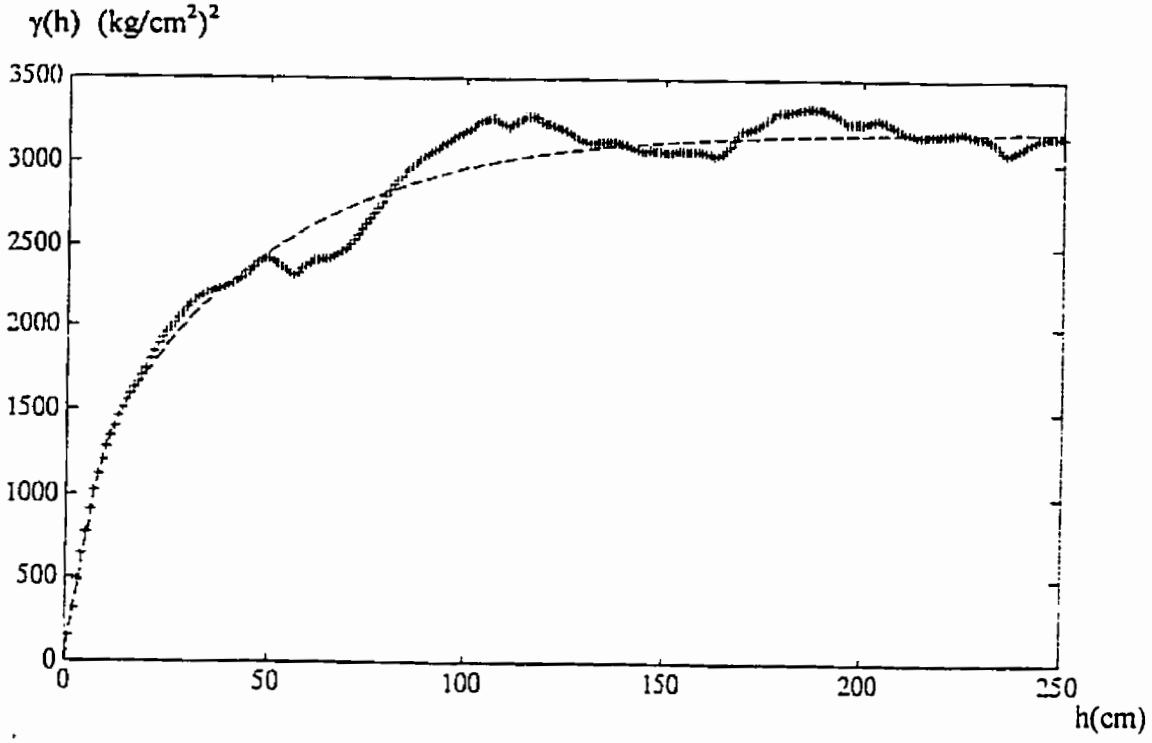


Figure 5.23 b: Demi-variogramme G9.

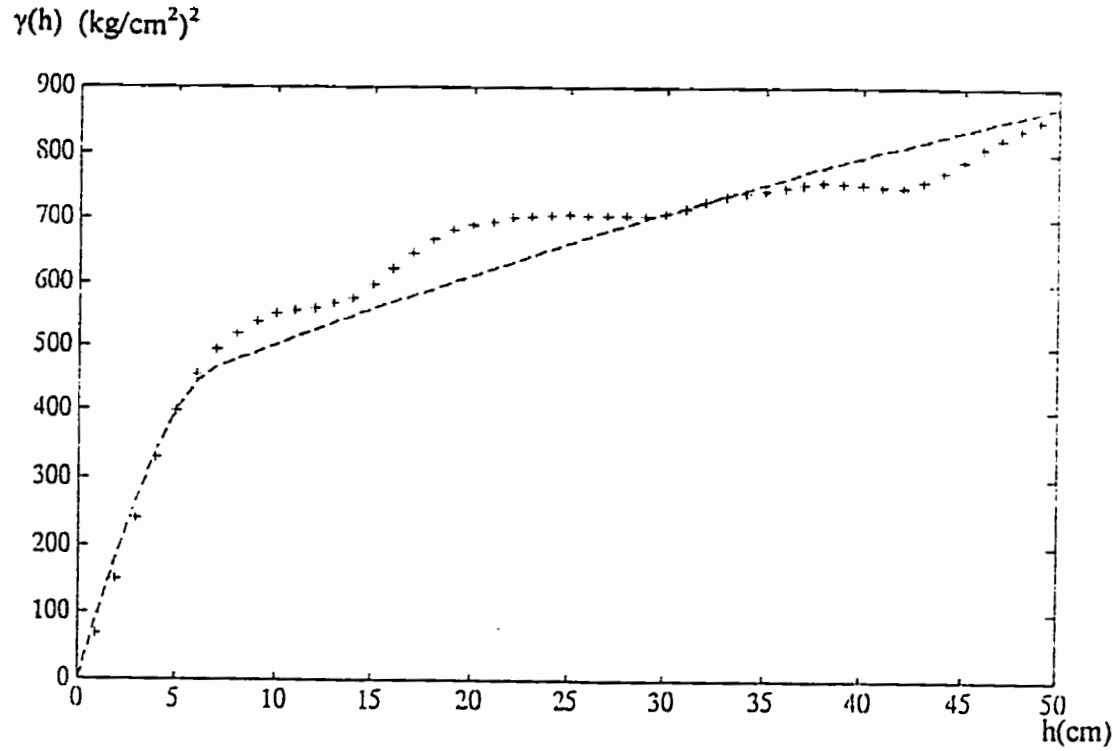


Figure 5.24 a: Demi-variogramme G10.

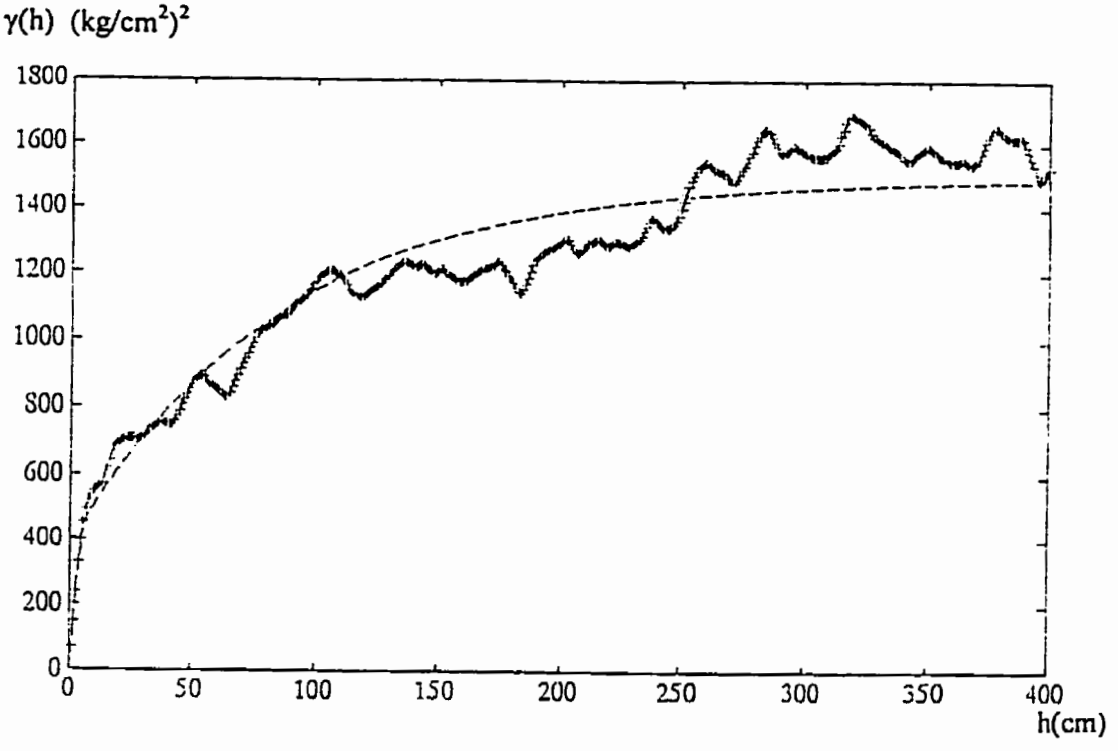


Figure 5.24 b: Demi-variogramme G10.

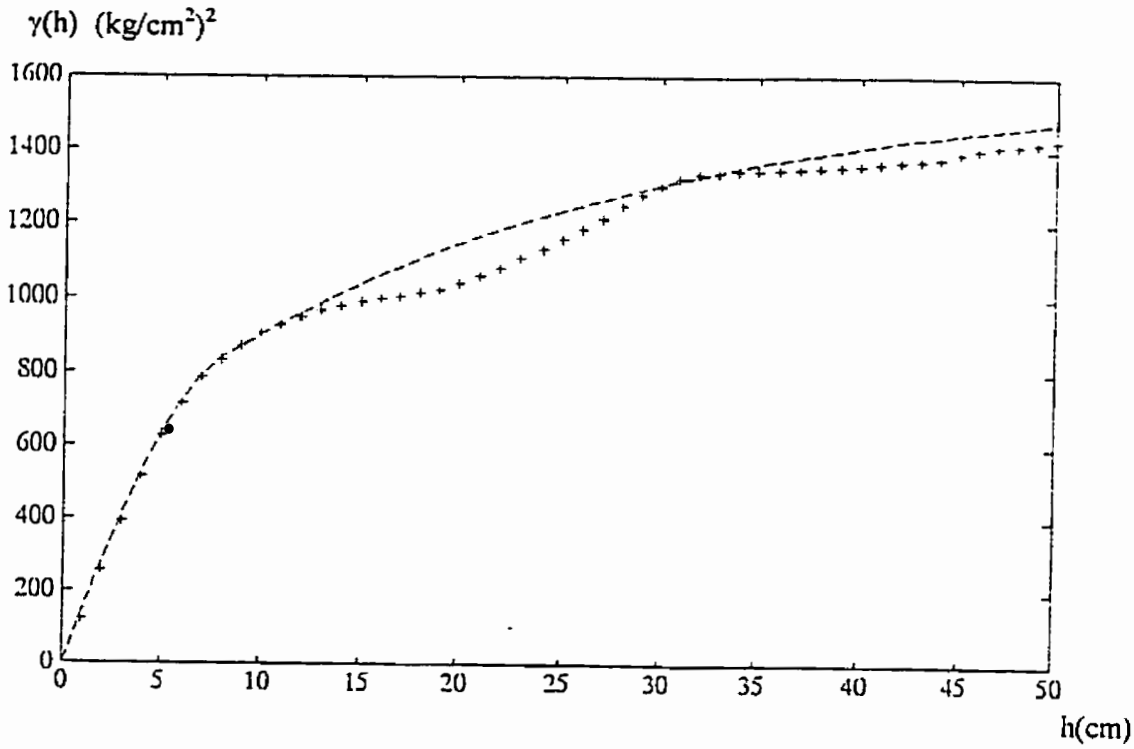


Figure 5.25 a: Demi-variogramme G11.

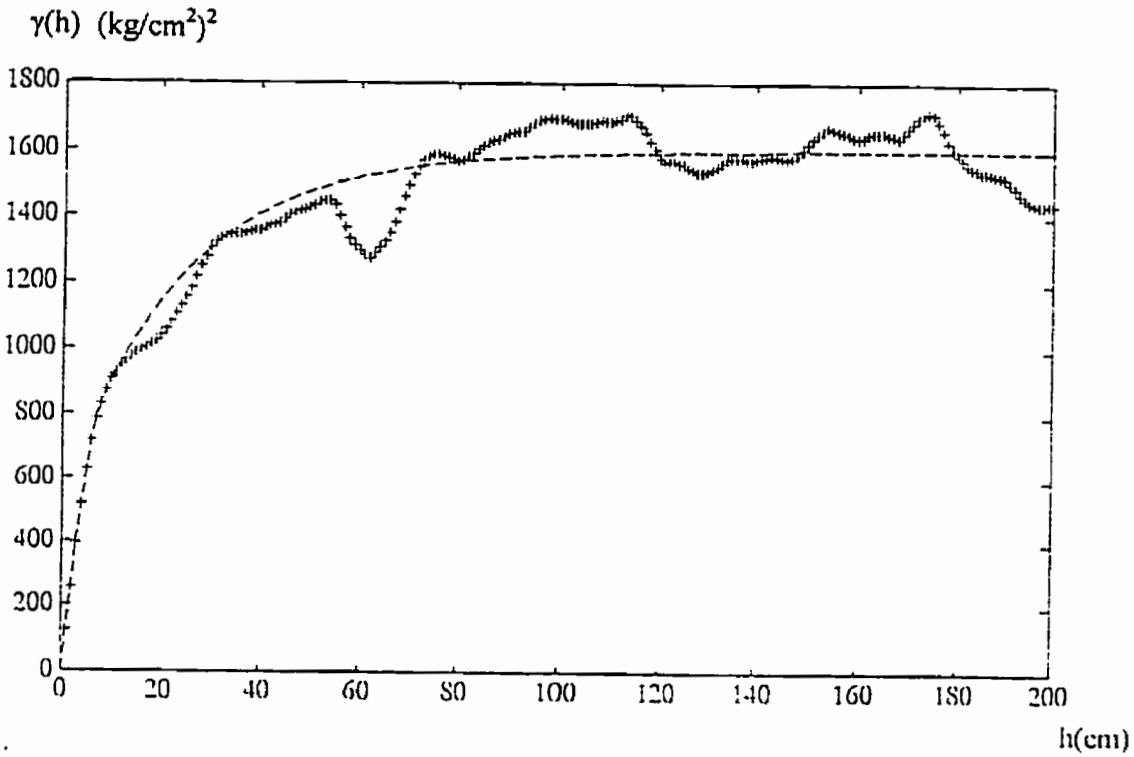


Figure 5.25 b: Demi-variogramme G11.

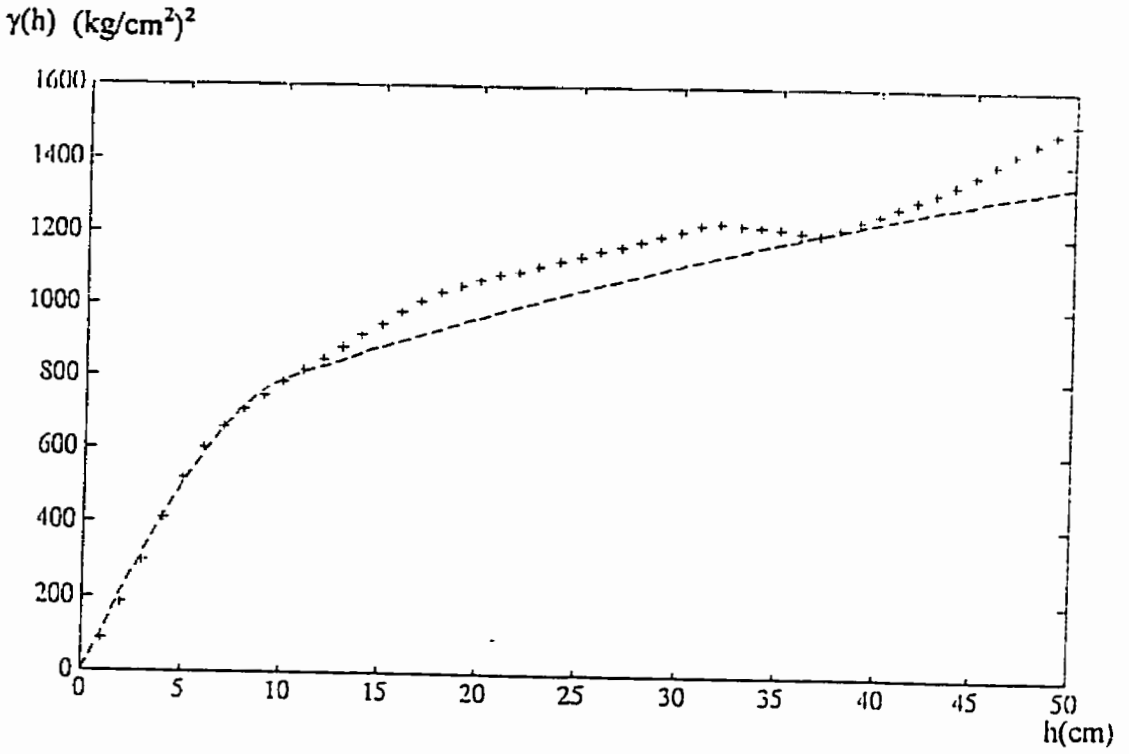


Figure 5.26 a: Demi-variogramme G5.

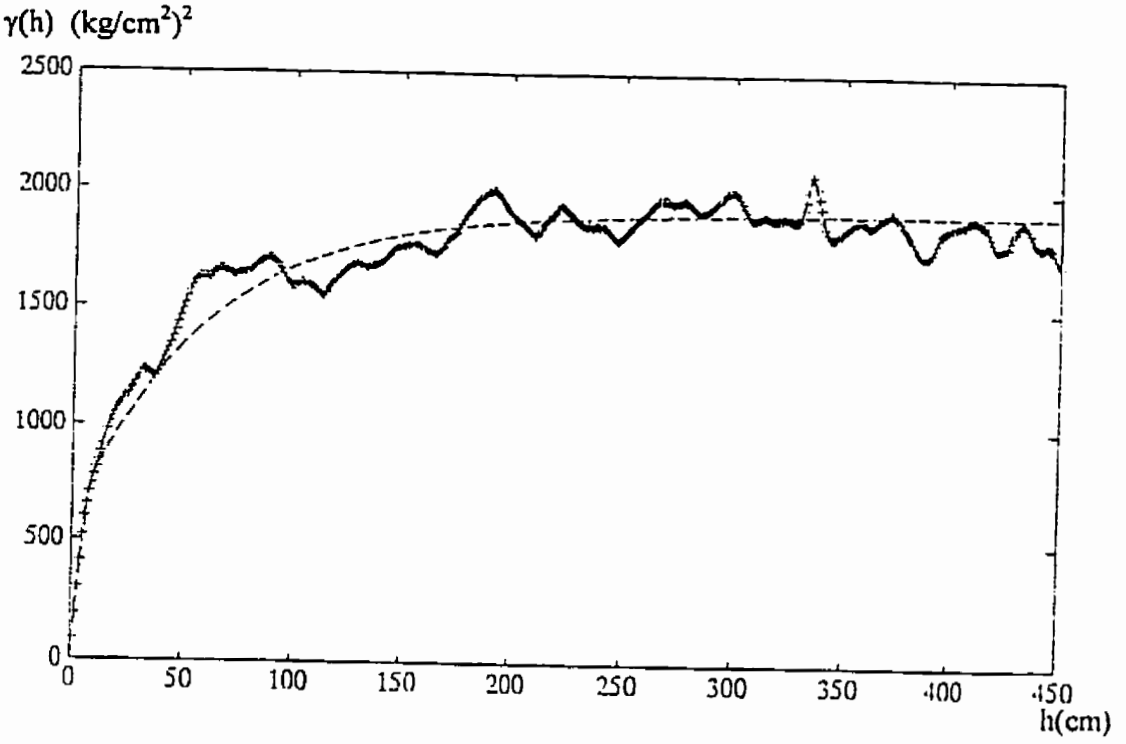


Figure 5.26 b: Demi-variogramme G5.

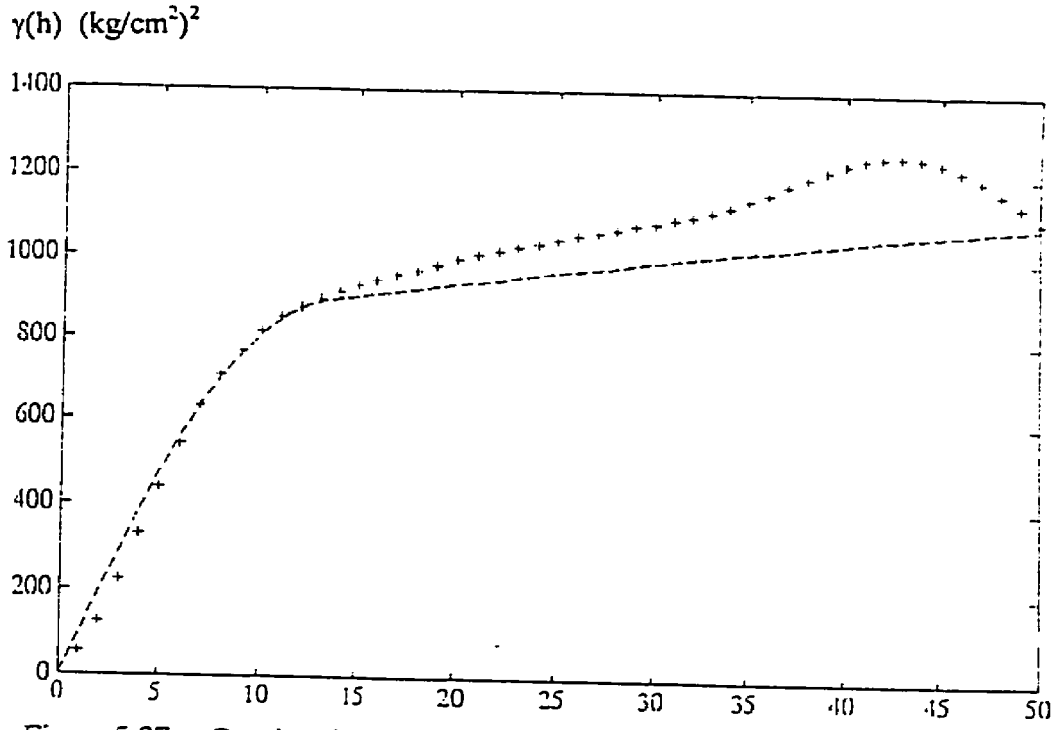


Figure 5.27 a: Demi-variogramme G12.

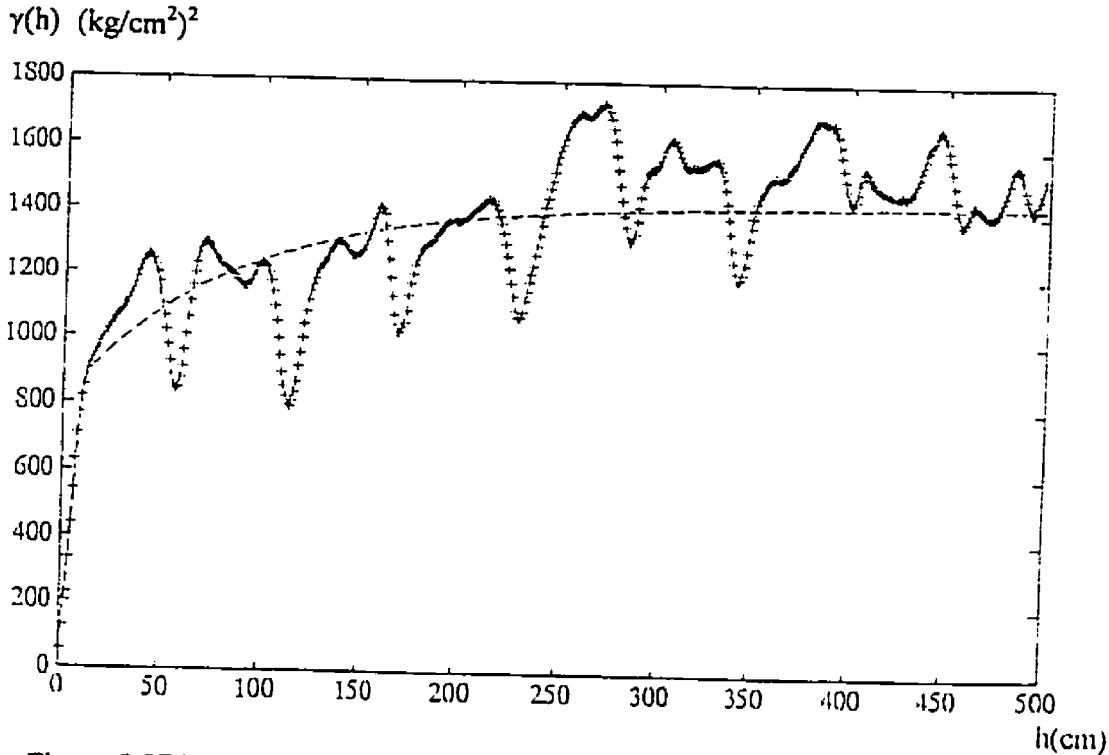


Figure 5.27 b: Demi-variogramme G12.

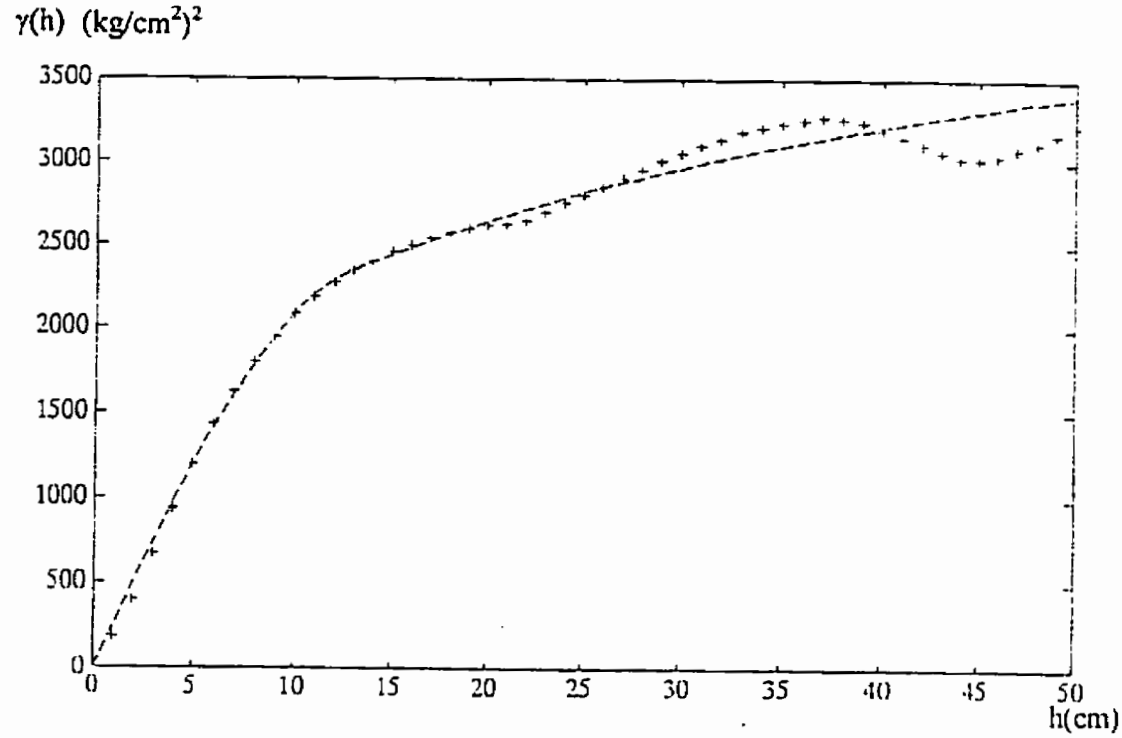


Figure 5.28 a: Demi-variogramme G13.

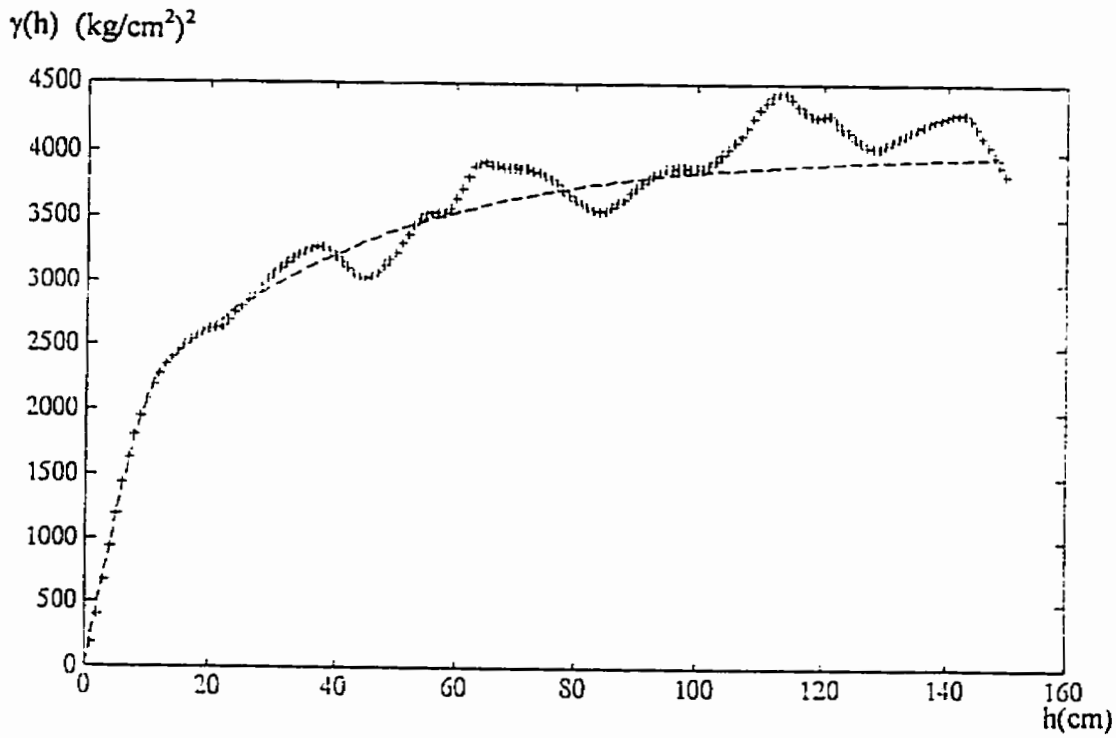


Figure 5.28 b: Demi-variogramme G13.

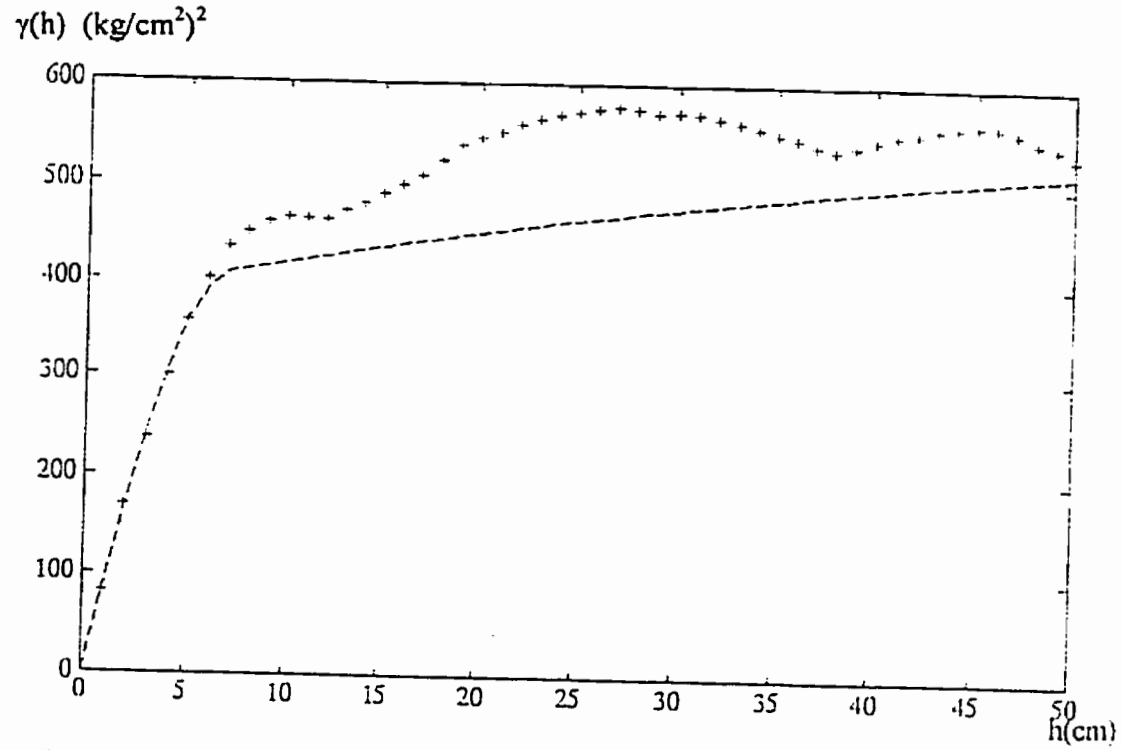


Figure 5.29 a: Demi-variogramme G14.

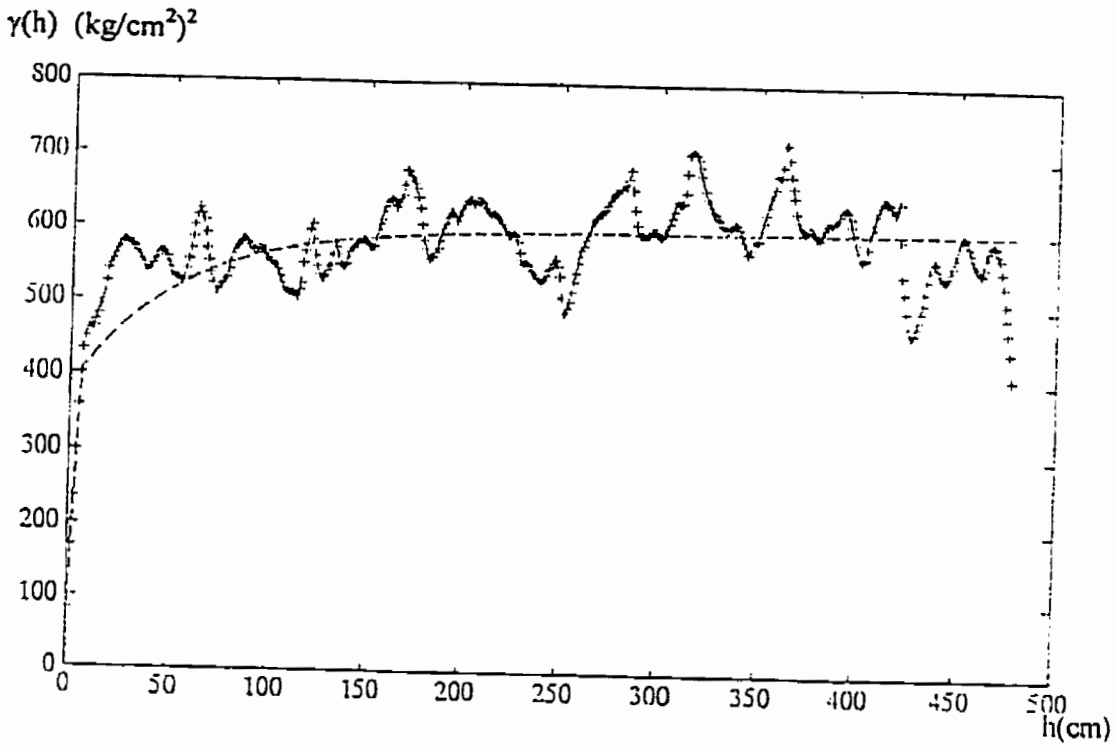


Figure 5.29 b: Demi-variogramme G14.

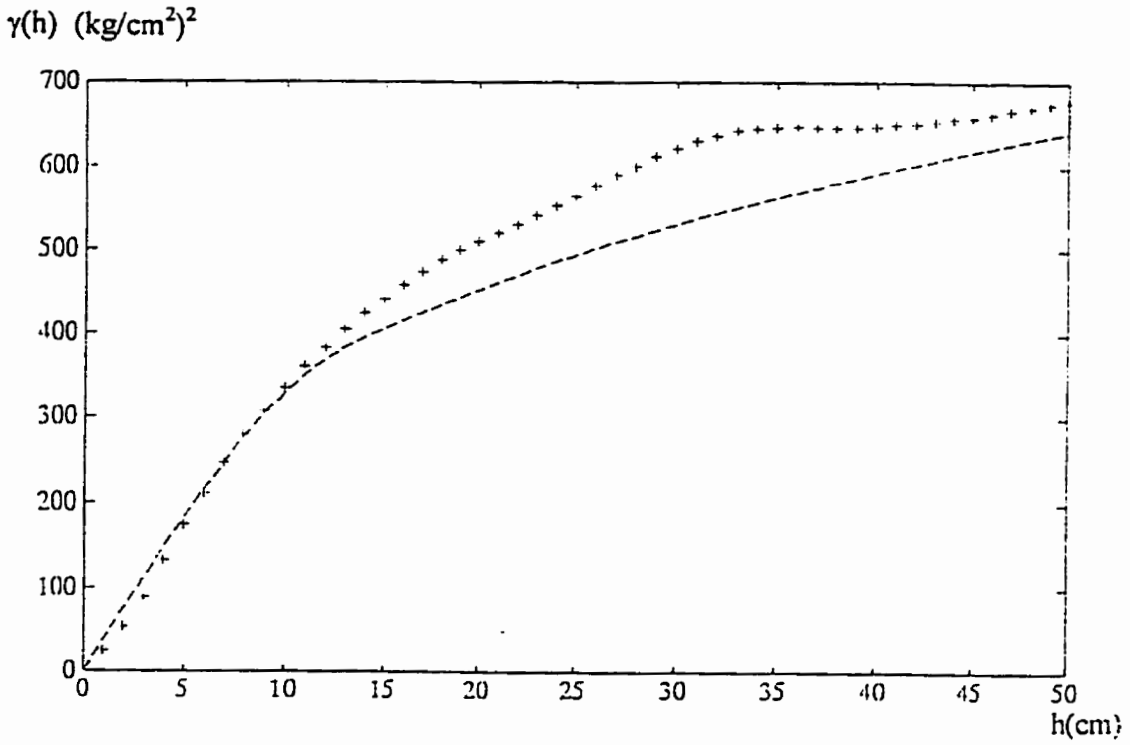


Figure 5.30 a: Demi-variogramme G15.

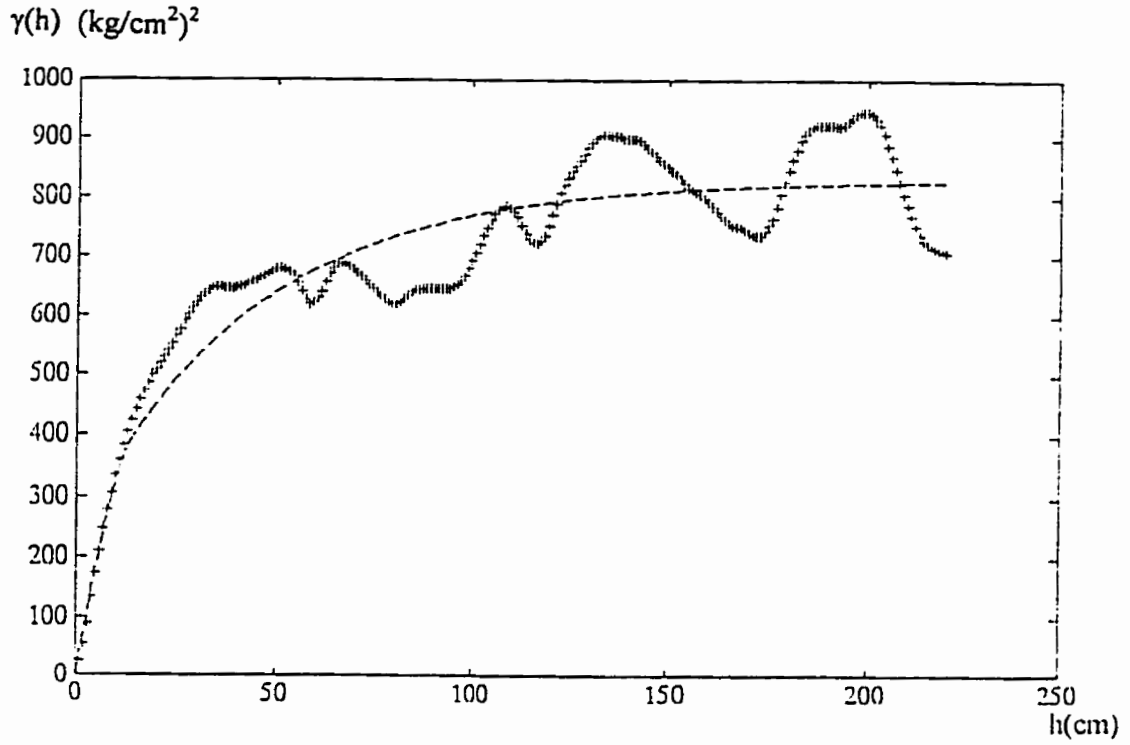


Figure 5.30 b: Demi-variogramme G15.

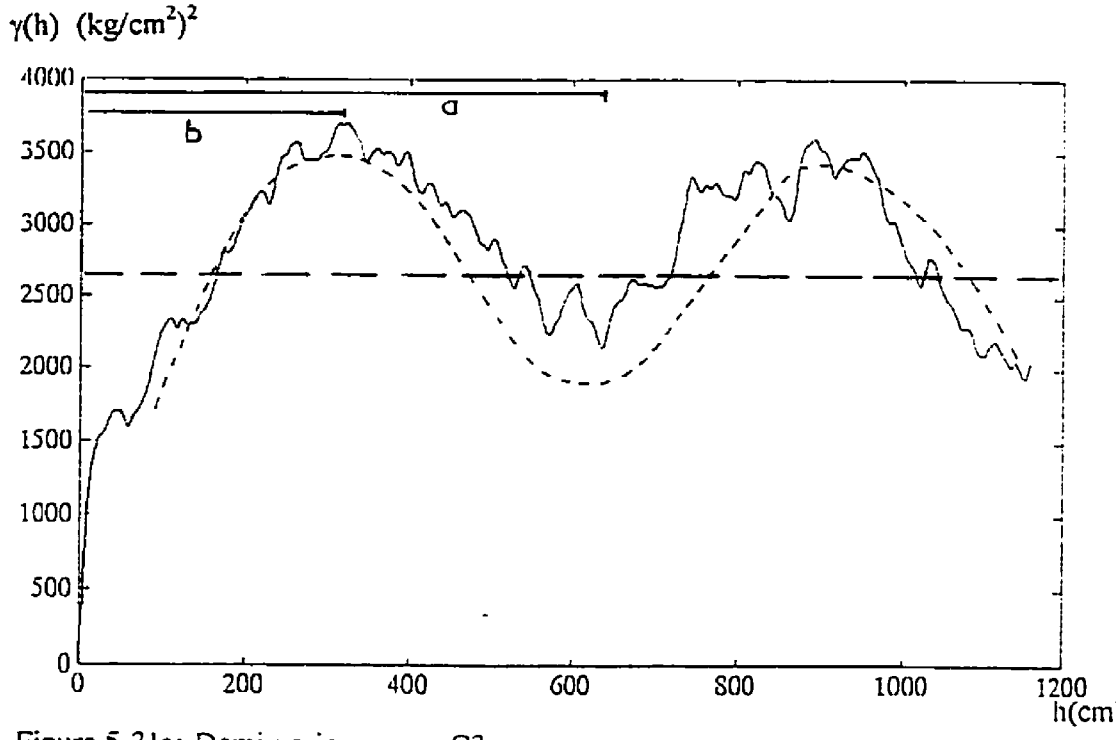


Figure 5.31a: Demi-variogramme G3.

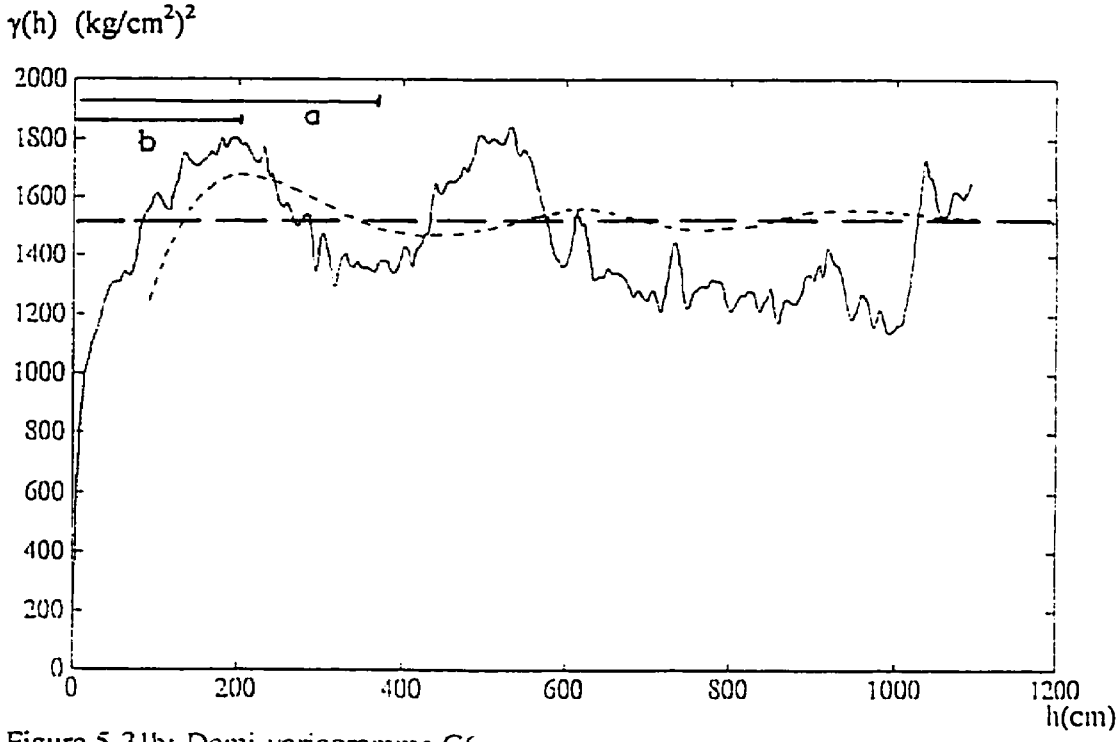


Figure 5.31b: Demi-variogramme G6.

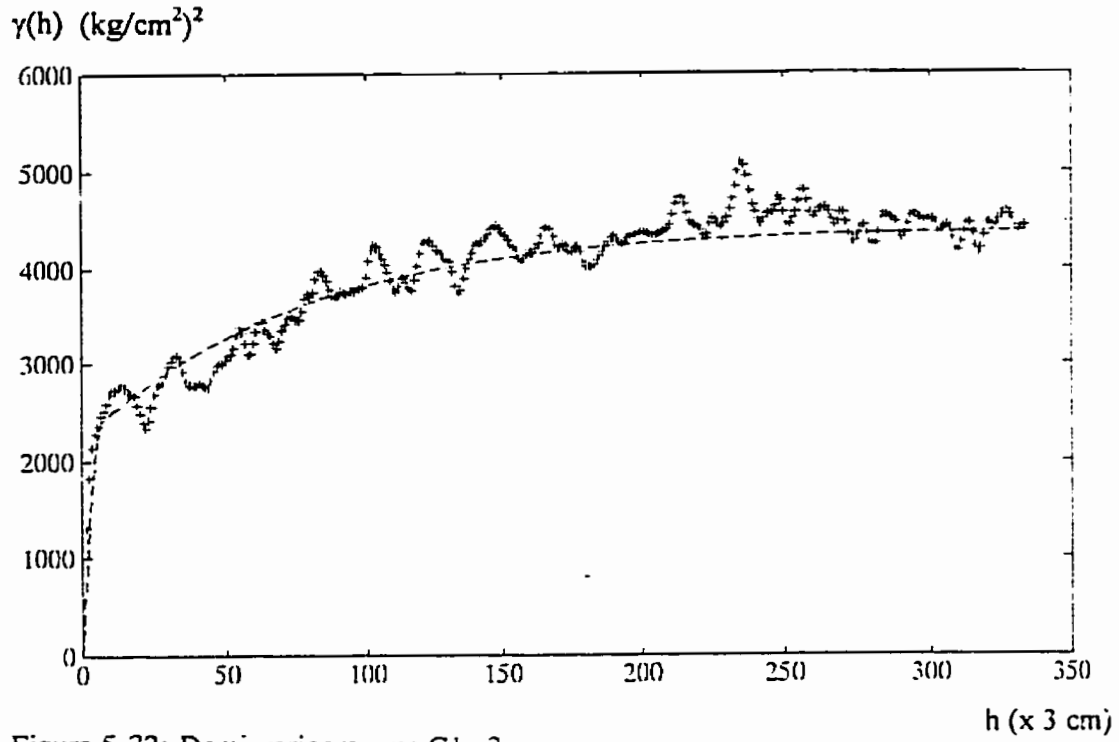


Figure 5.32: Demi-variogramme G1m3.

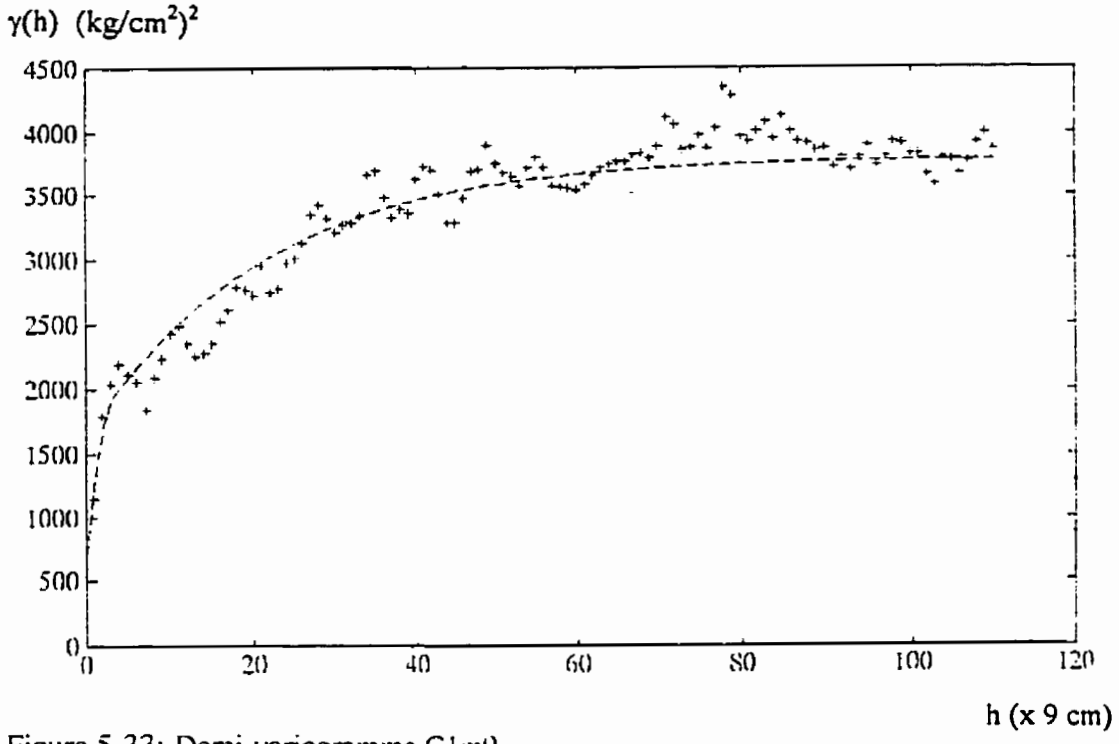


Figure 5.33: Demi-variogramme G1m9.

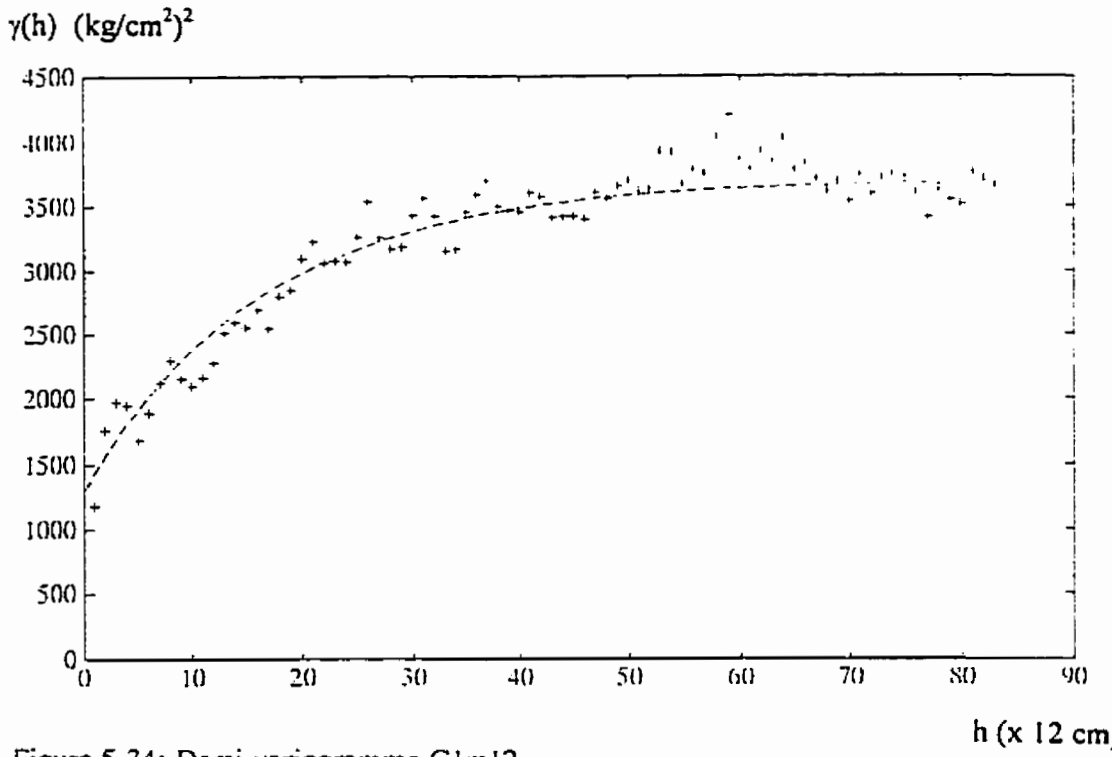


Figure 5.34: Demi-variogramme G1m12.

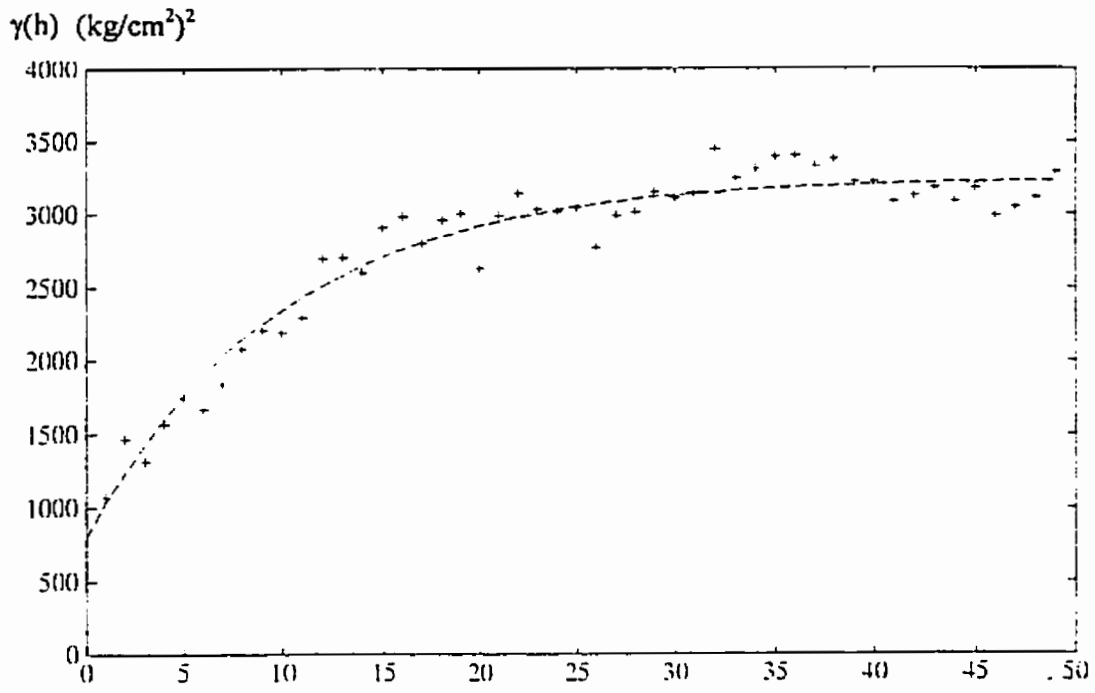


Figure 5.35: Demi-variogramme G1m20.

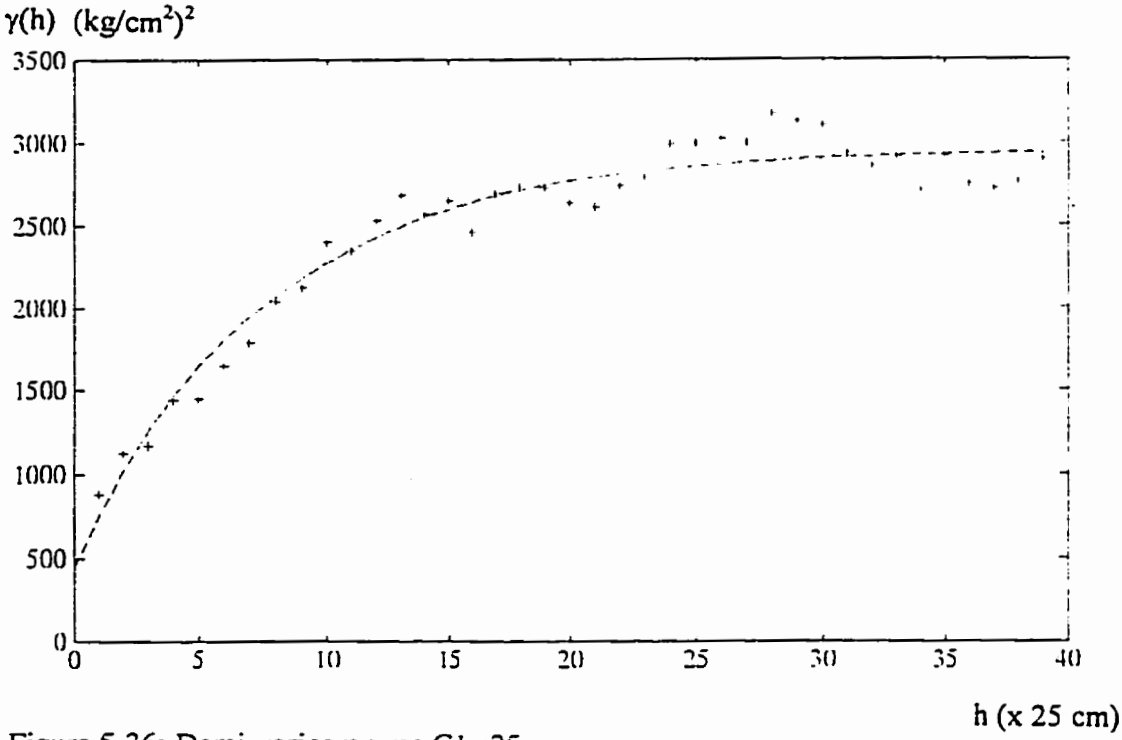


Figure 5.36: Demi-variogramme G1m25

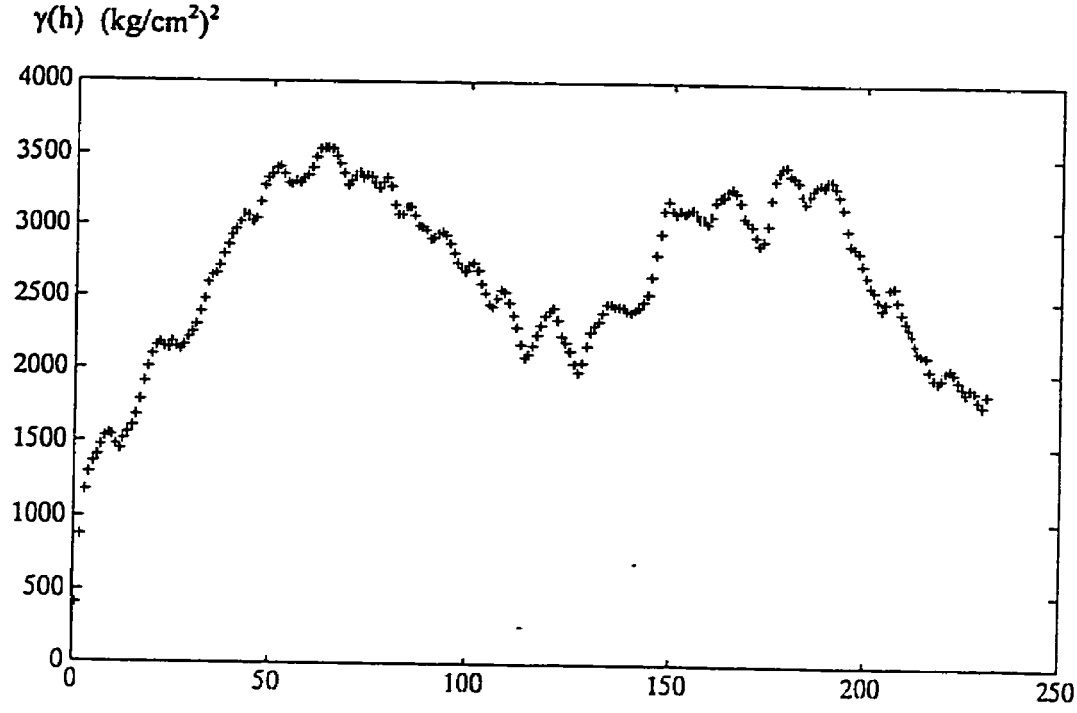


Figure 5.37: Demi-variogramme G3m5.

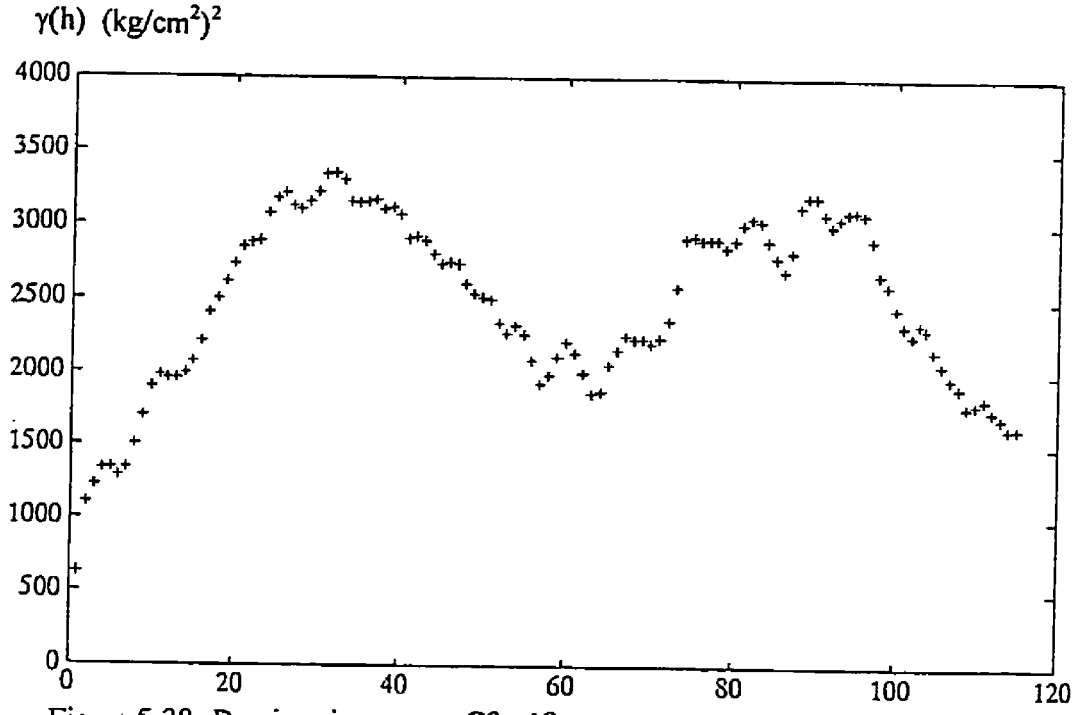


Figure 5.38: Demi-variogramme G3m10.

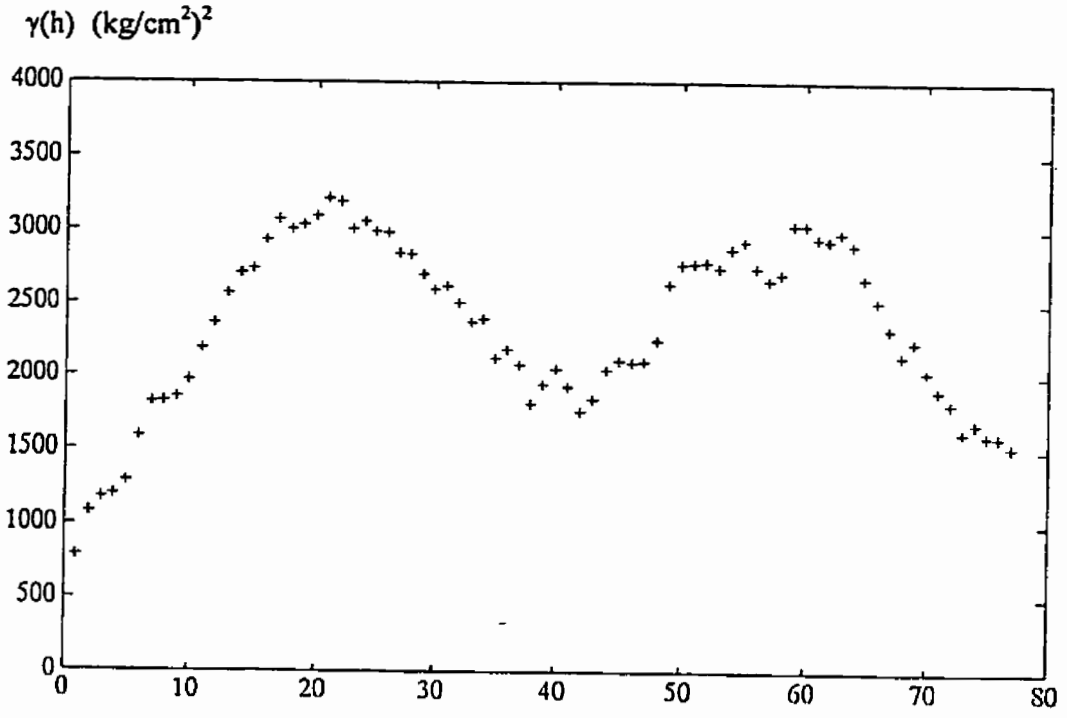


Figure 5.39: Demi-variogramme G3m15.

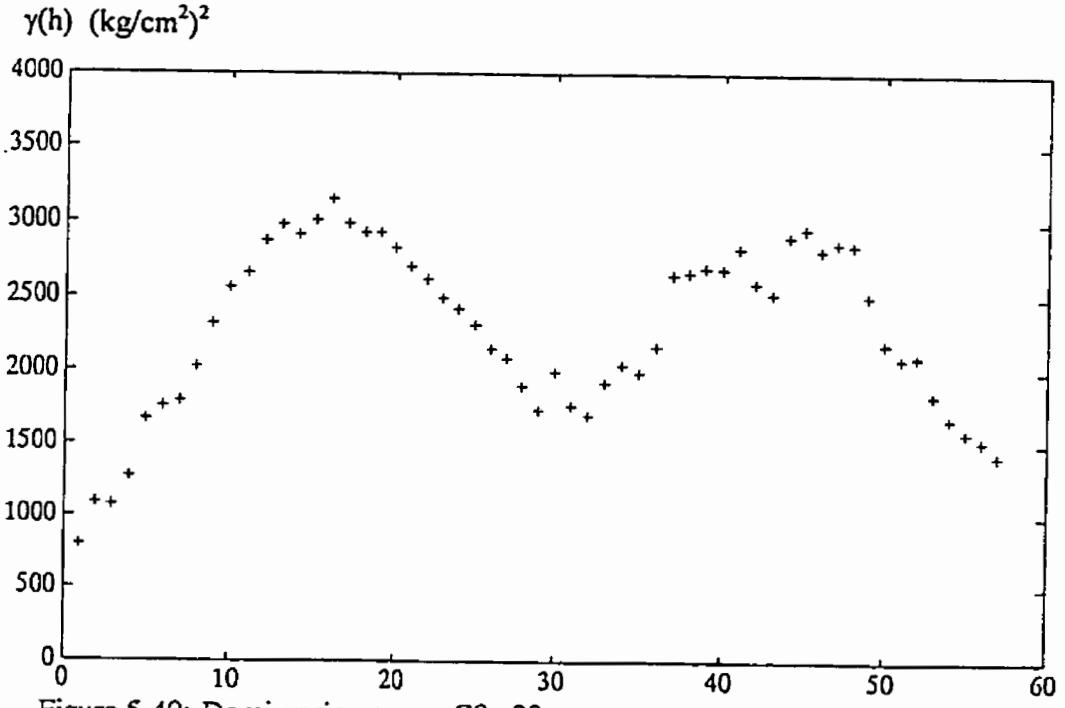


Figure 5.40: Demi-variogramme G3m20.

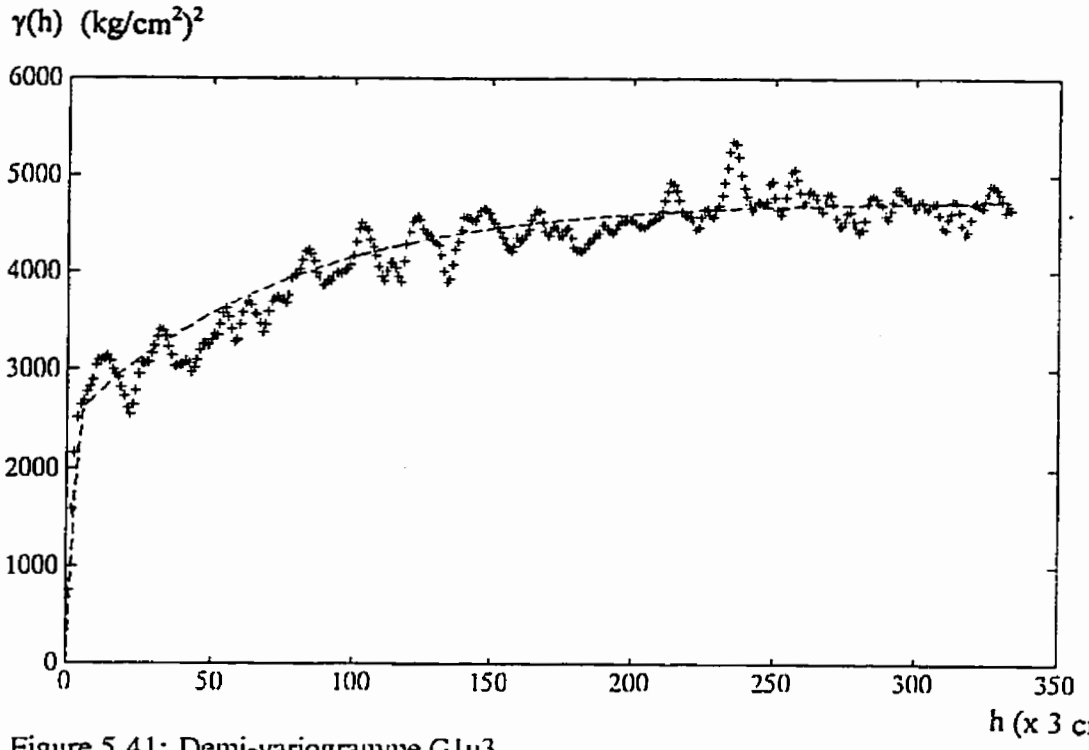


Figure 5.41: Demi-variogramme G1u3.

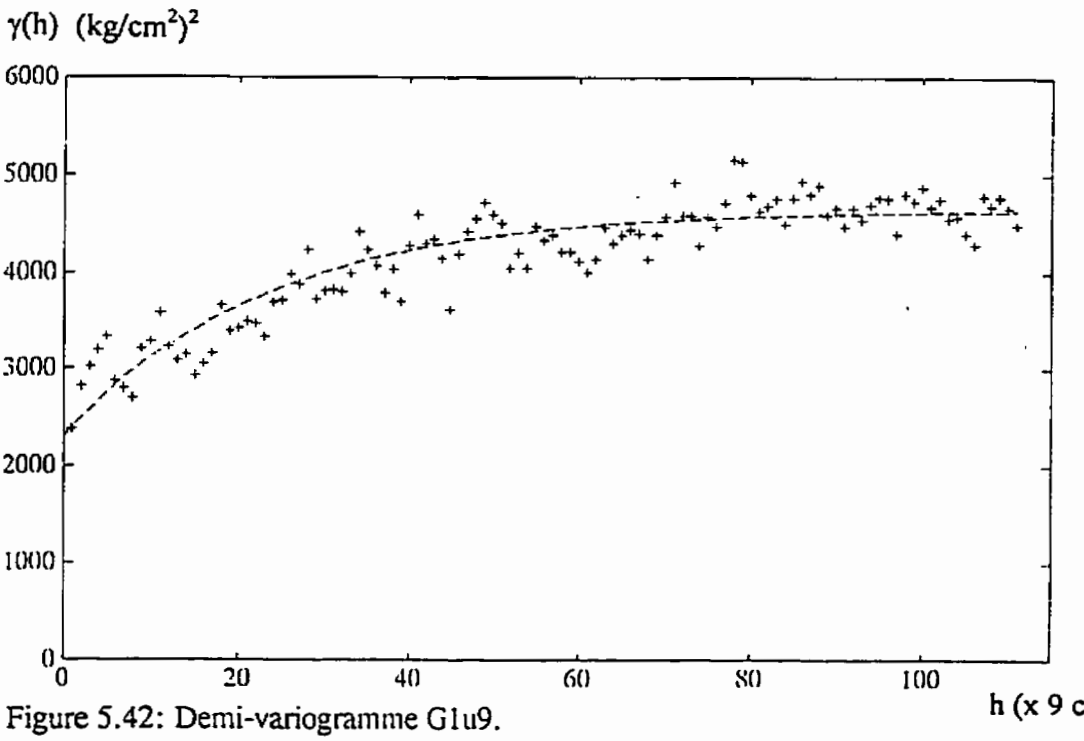


Figure 5.42: Demi-variogramme G1u9.

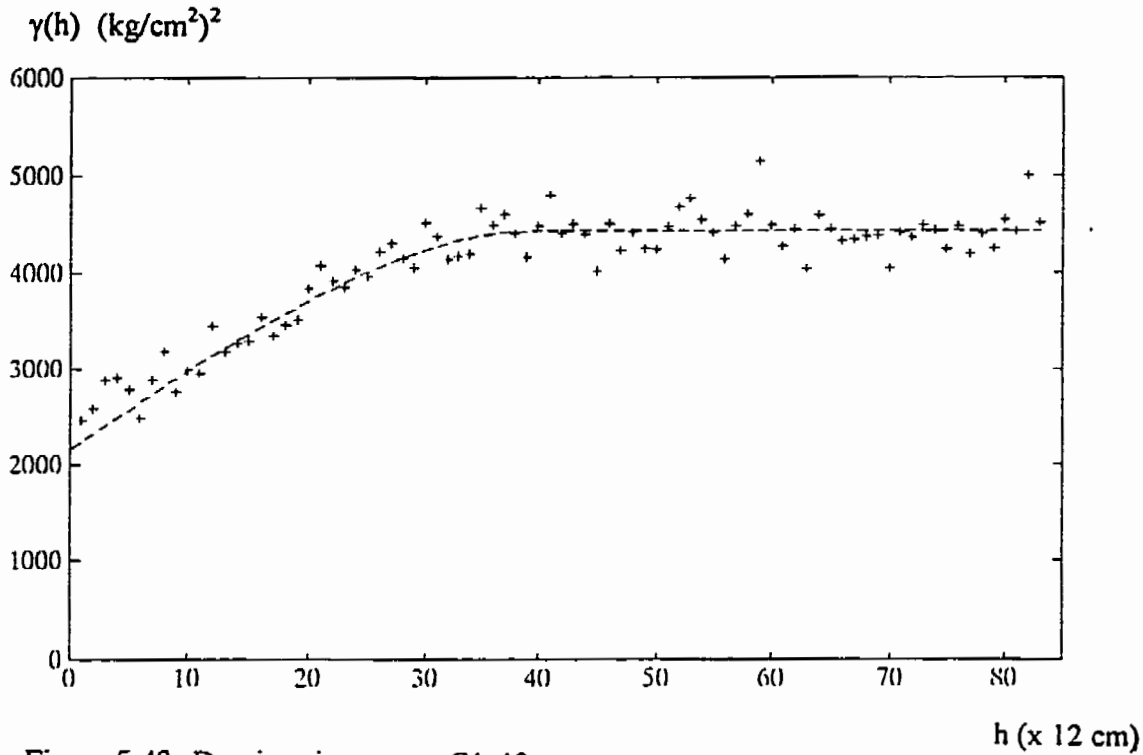


Figure 5.43: Demi-variogramme G1u12.

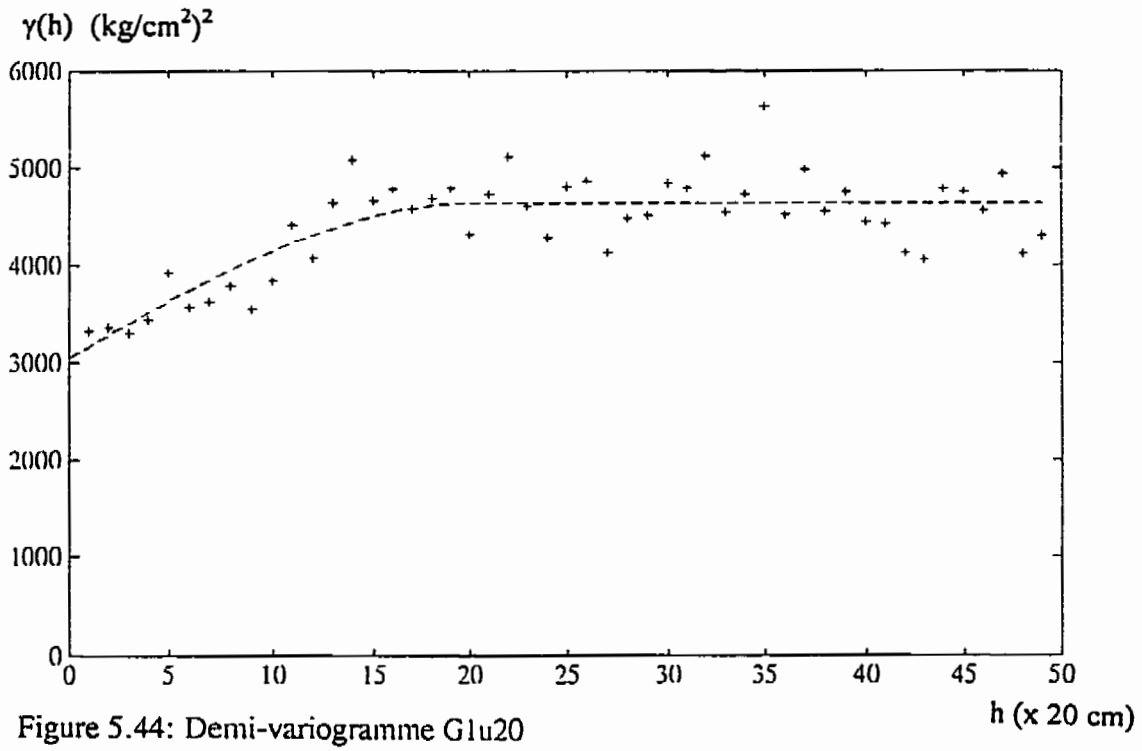
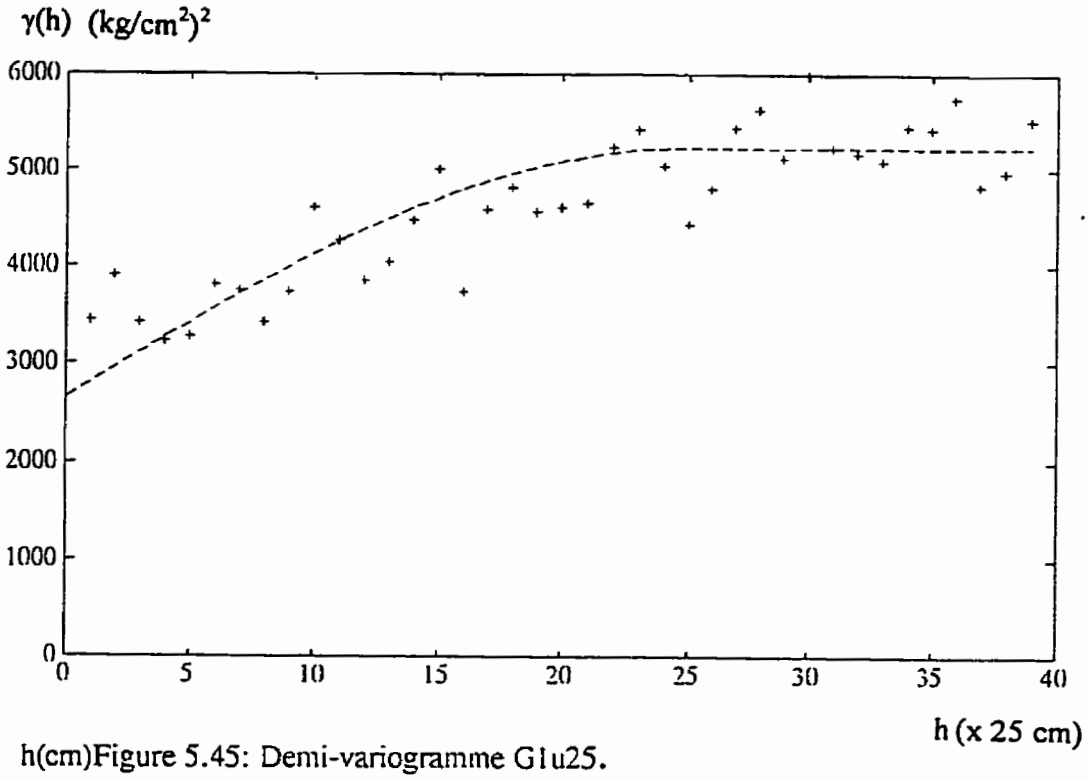


Figure 5.44: Demi-variogramme G1u20



h(cm)Figure 5.45: Demi-variogramme G1u25.

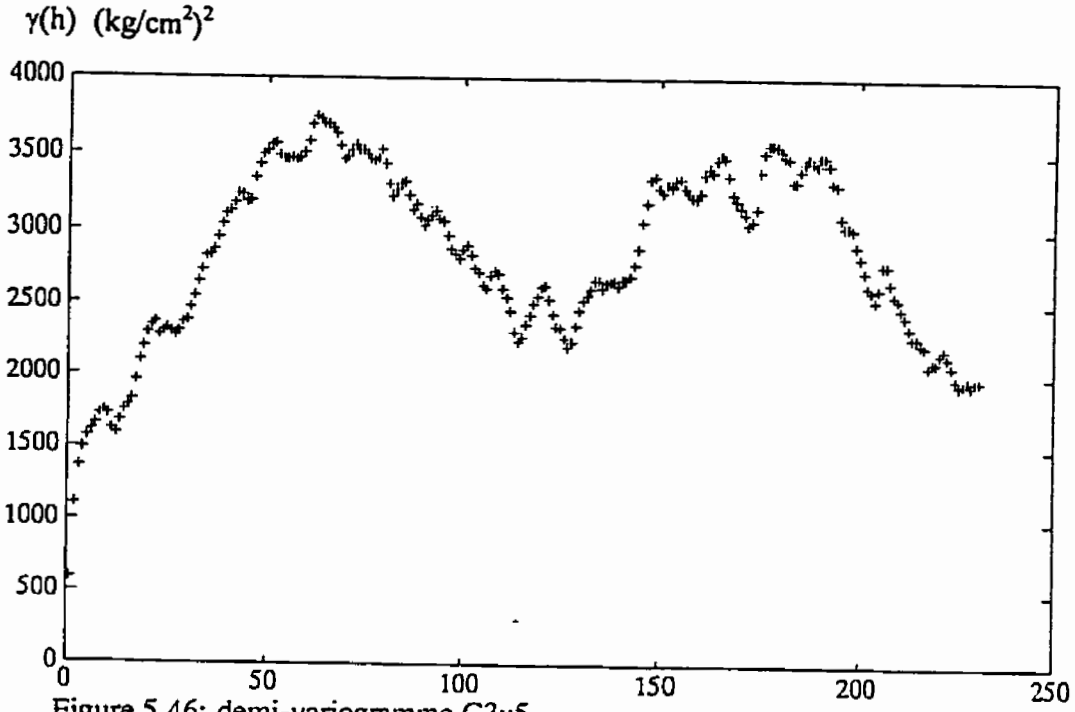


Figure 5.46: demi-variogramme G3u5.

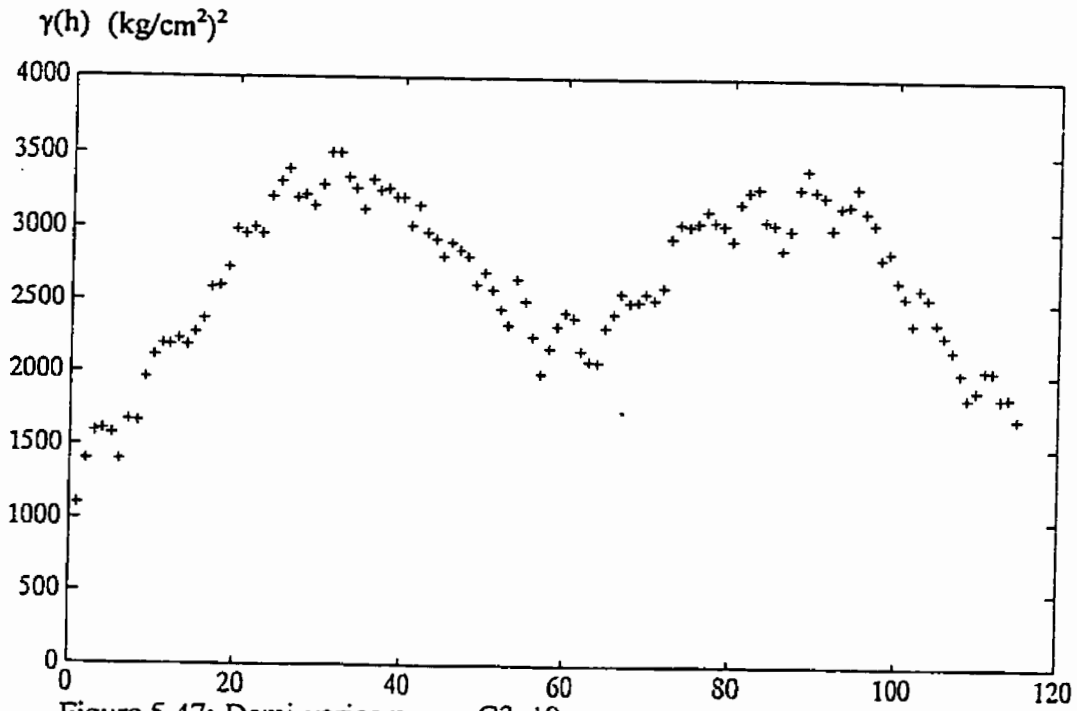


Figure 5.47: Demi-variogramme G3u10.

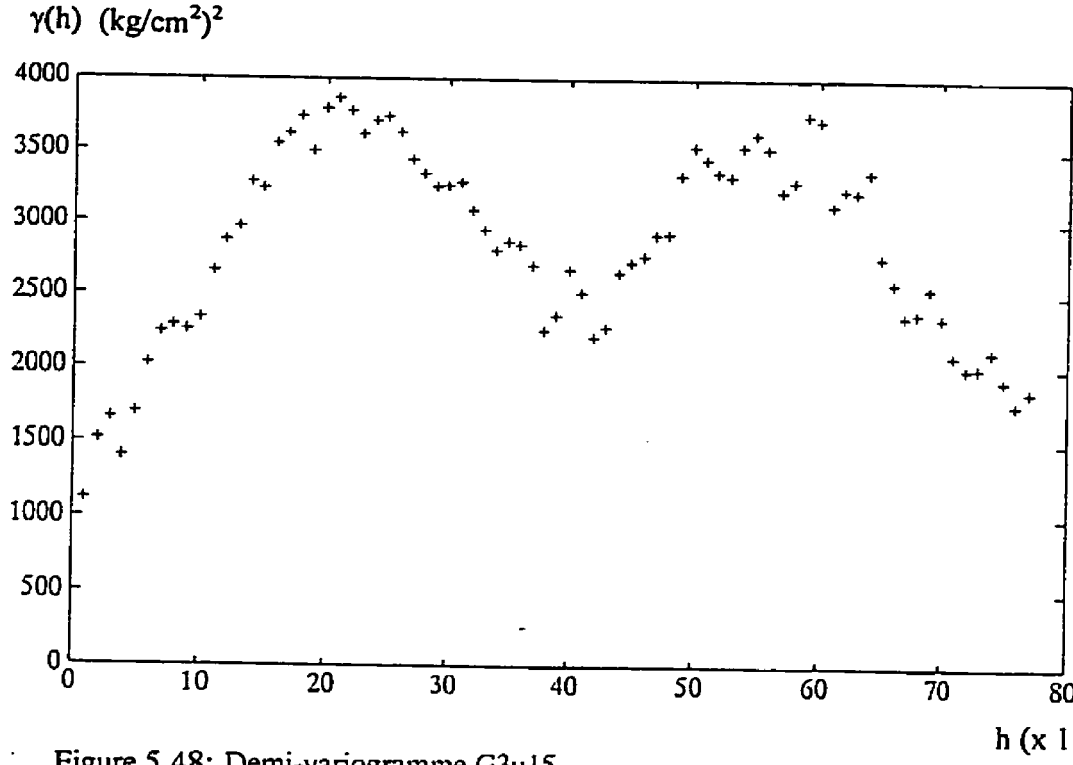


Figure 5.48: Demi-variogramme G3u15.

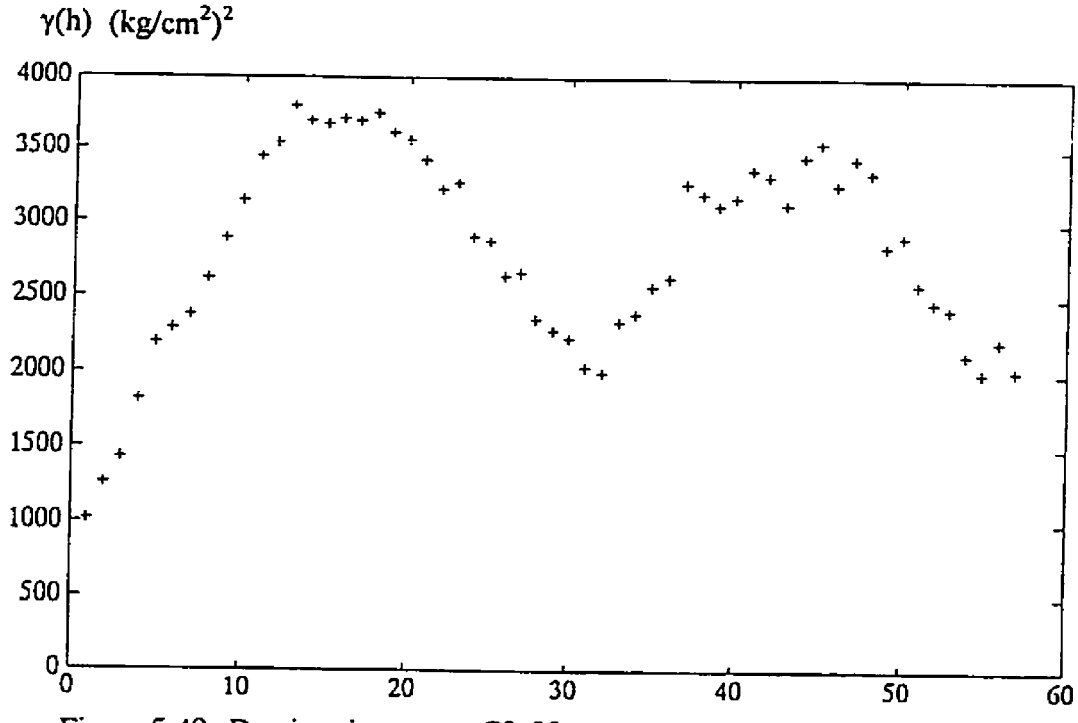


Figure 5.49: Demi-variogramme G3u20.

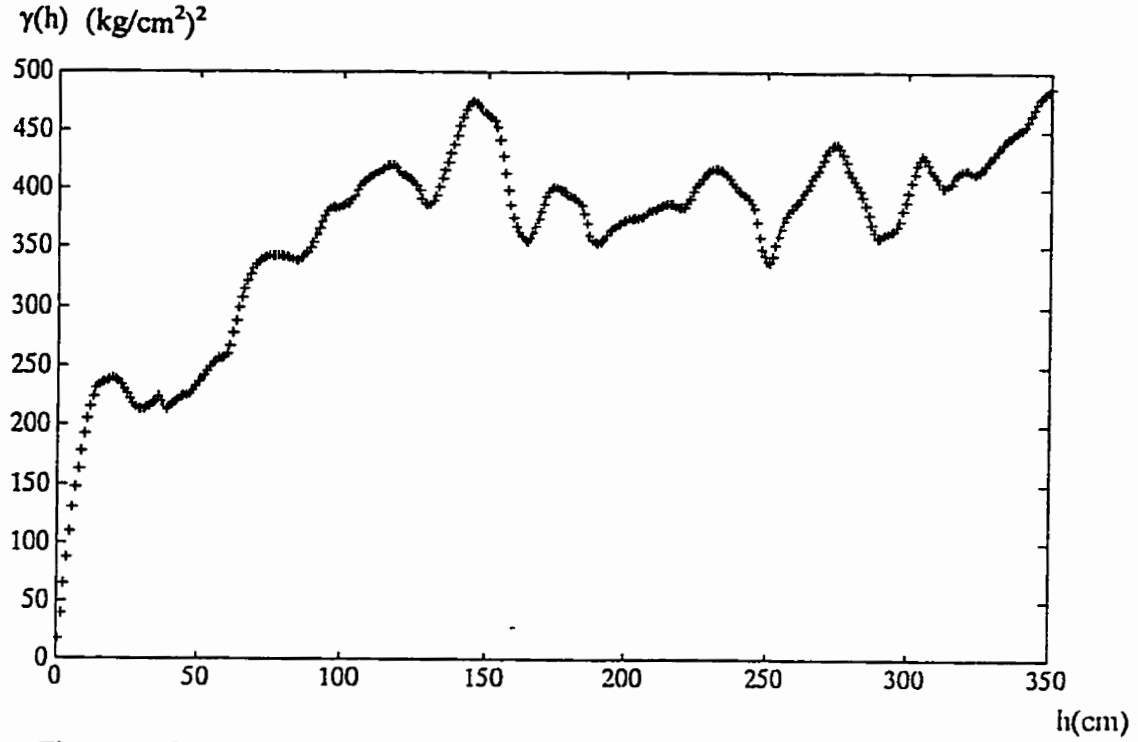


Figure 5.50: Demi-variogramme G7-13 a.

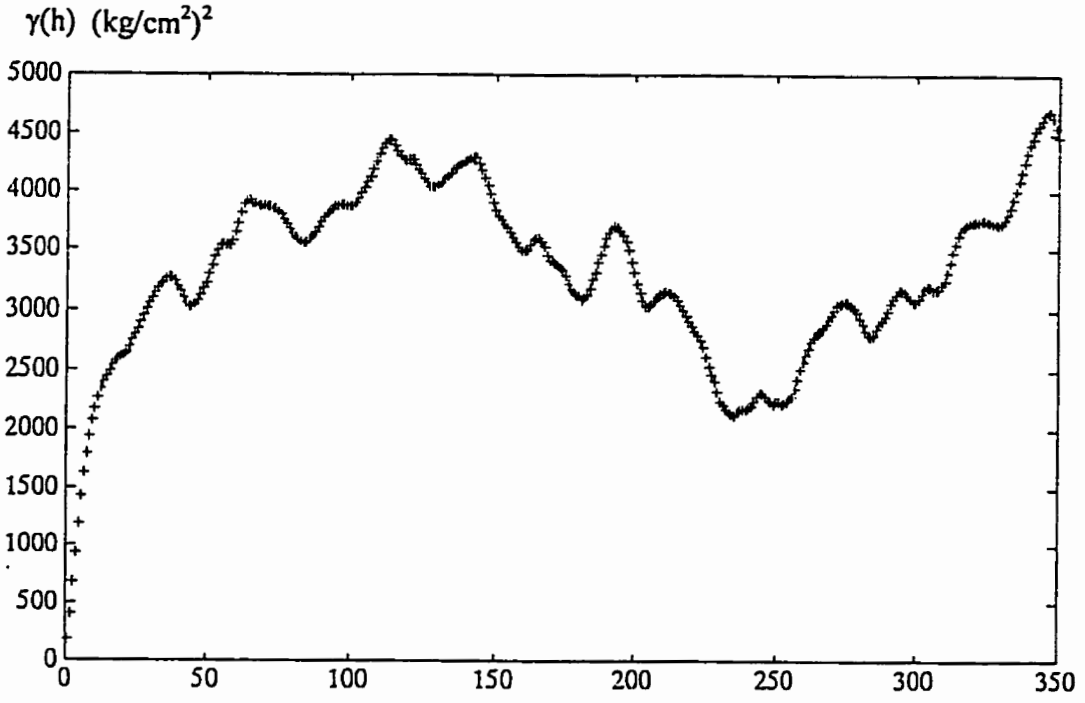


Figure 5.51: Demi-variogramme G7-13 b.

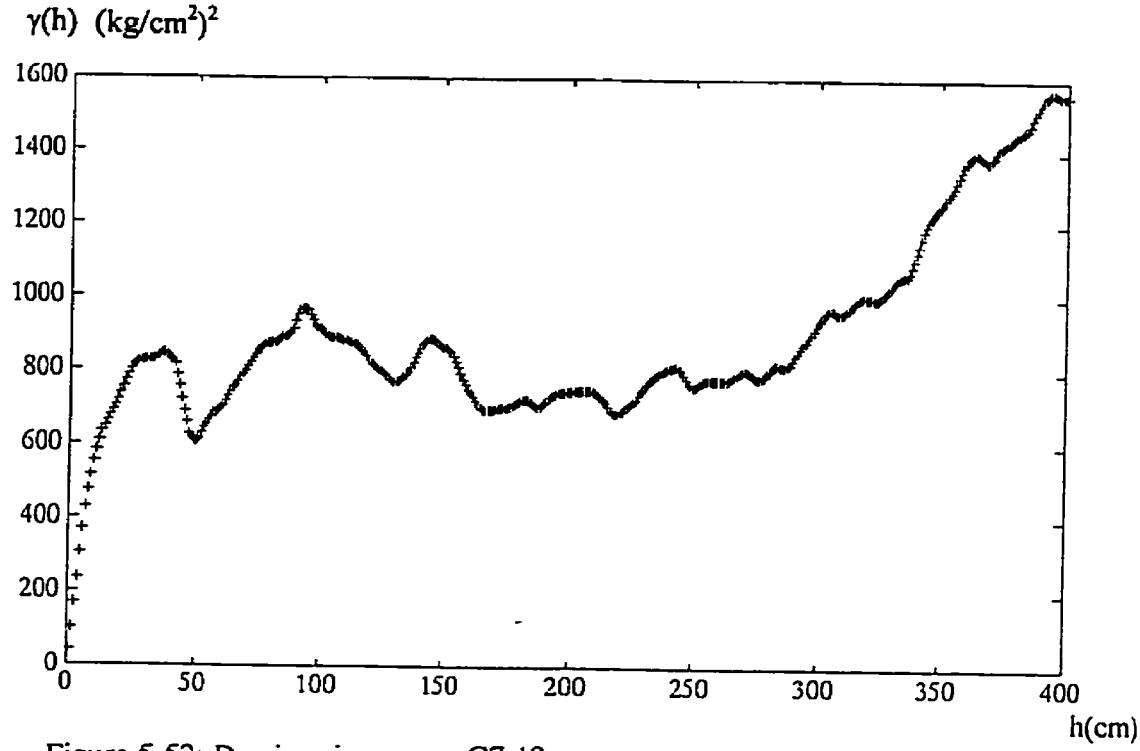


Figure 5.52: Demi-variogramme G7-13 c.

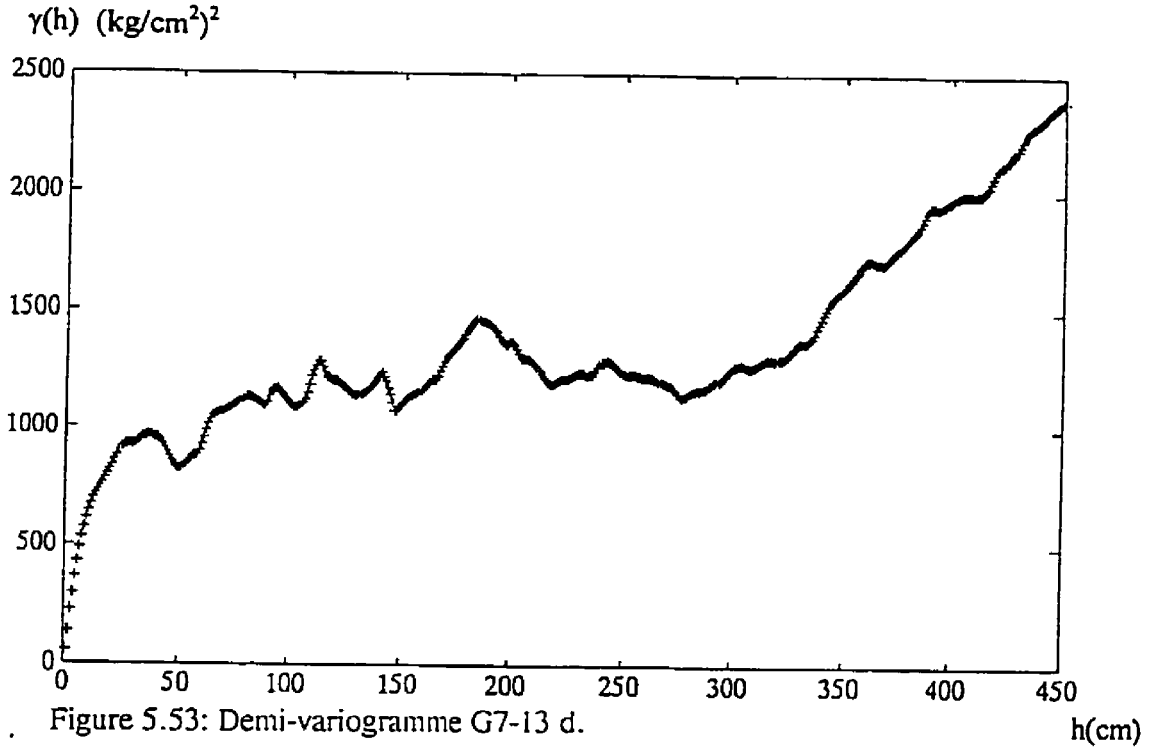


Figure 5.53: Demi-variogramme G7-13 d.

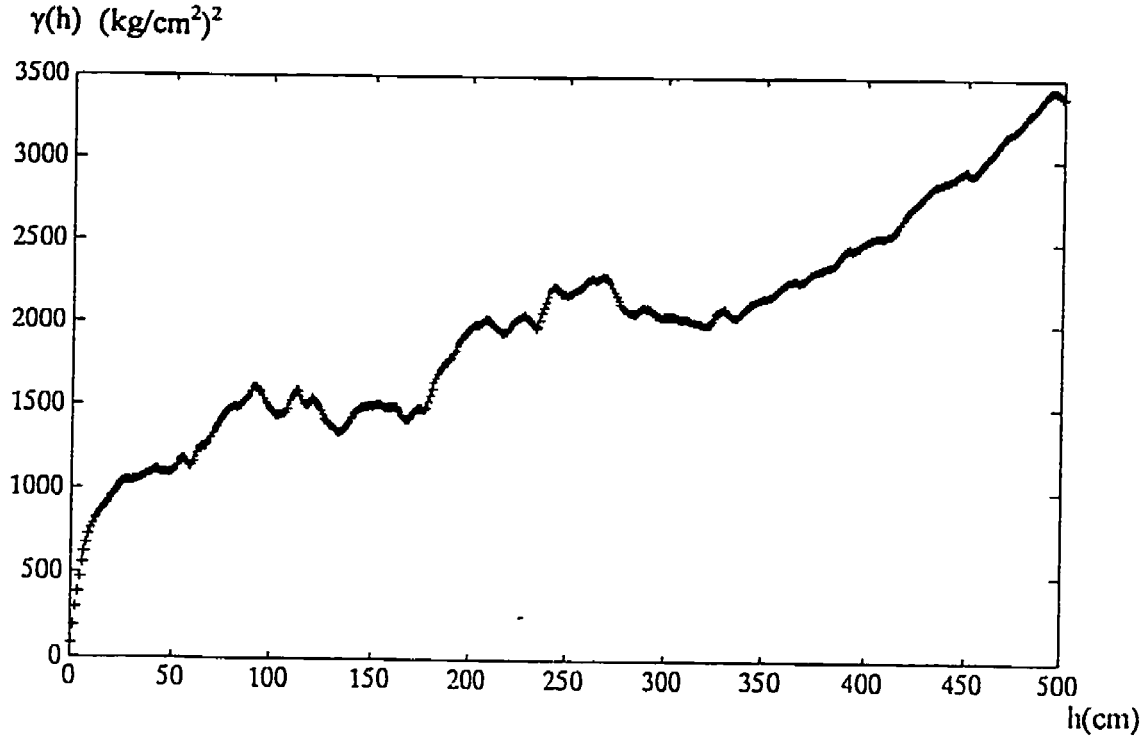


Figure 5.54: Demi-variogramme G7-13 e.

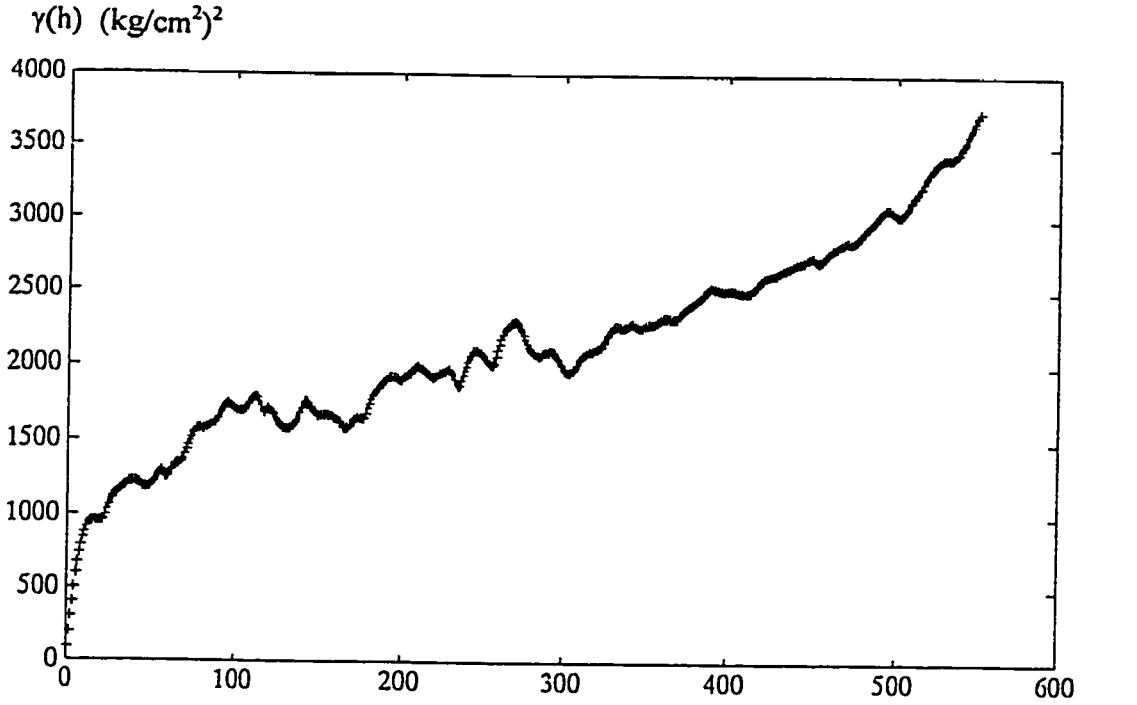


Figure 5.55: Demi-variogramme G7-13 f.

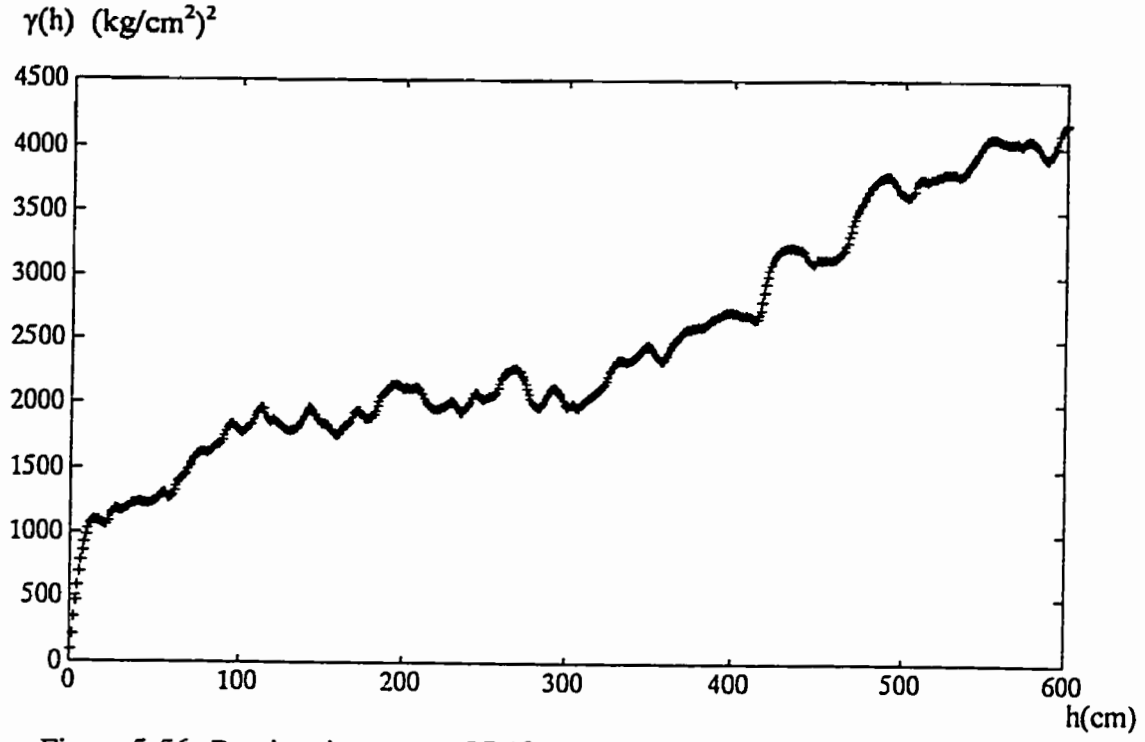


Figure 5.56: Demi-variogramme G7-13 g.

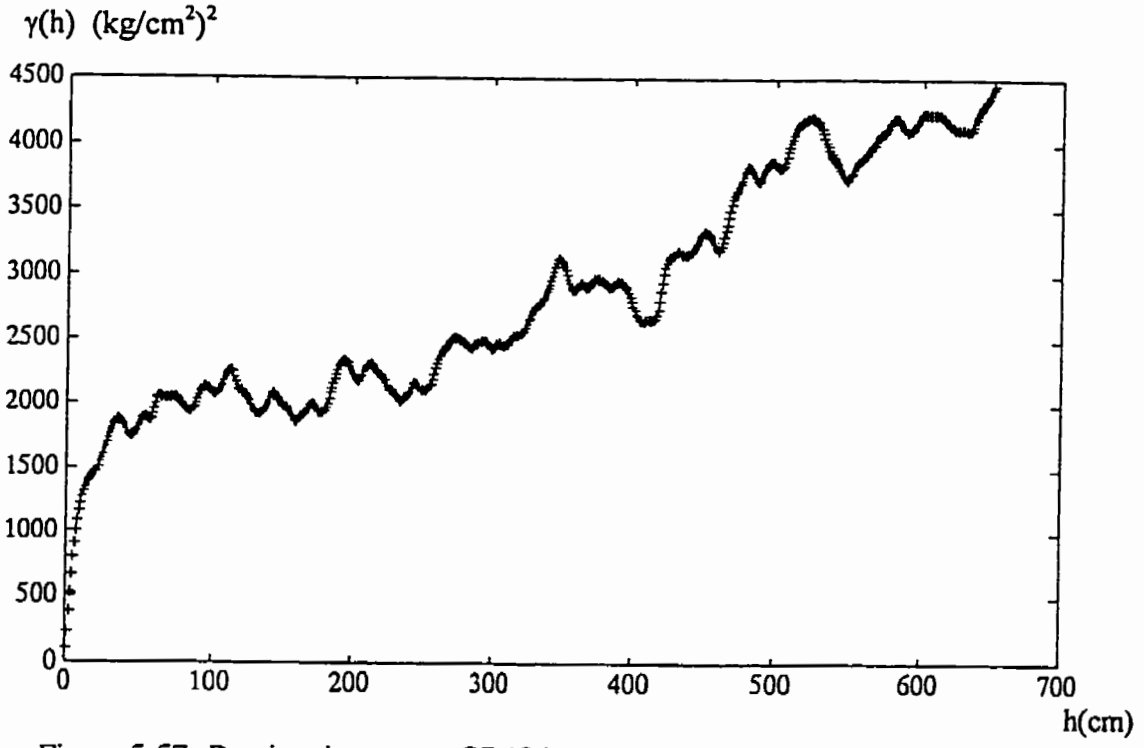


Figure 5.57: Demi-variogramme G7-13 h.

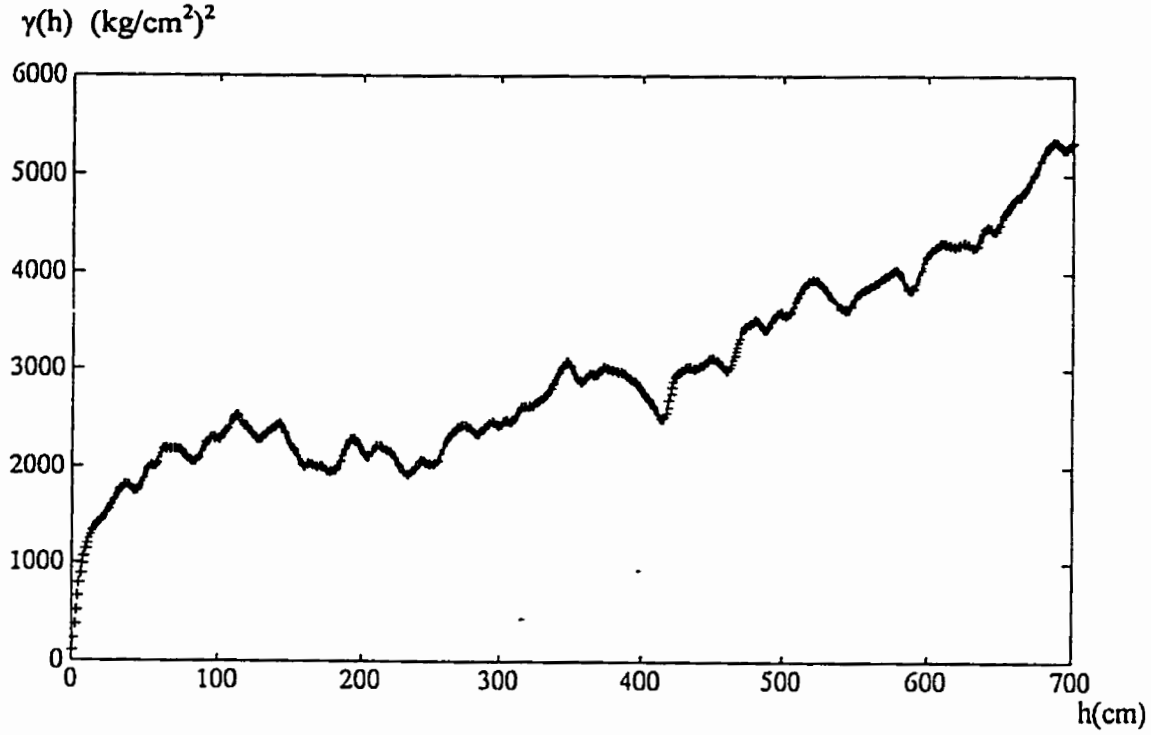


Figure 5.58: Demi-variogramme G7-13 i.

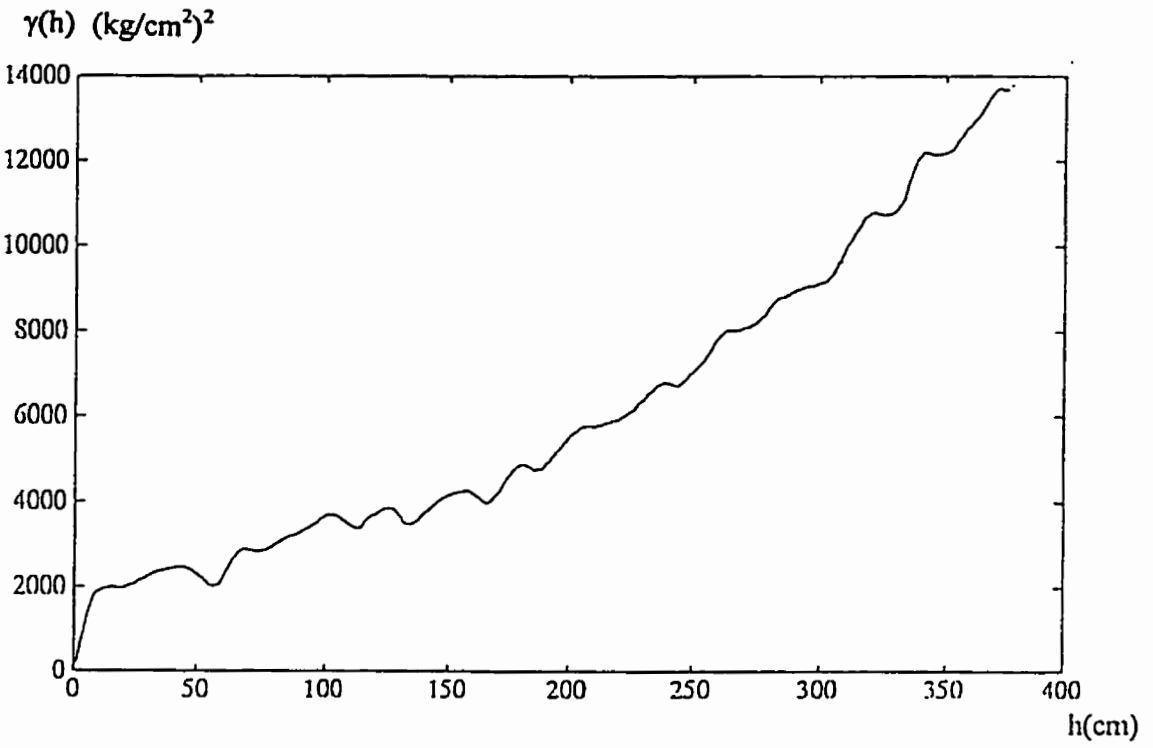


Figure 5.59: Demi-variogramme G5 B

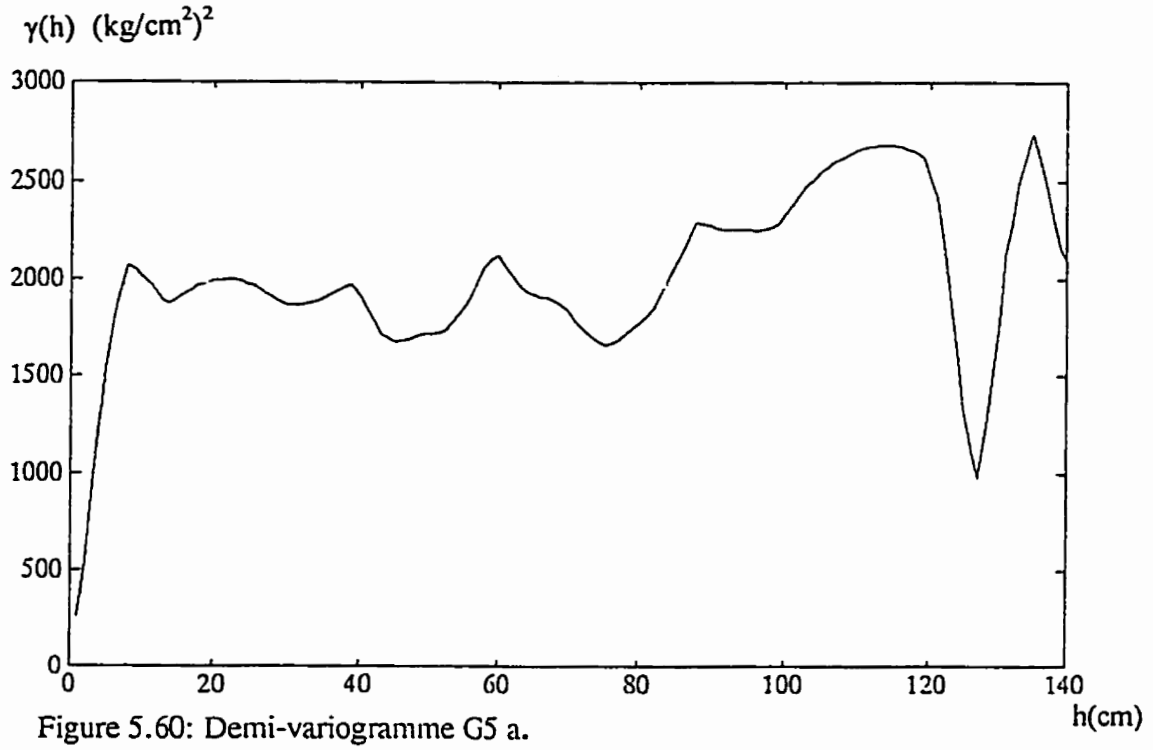


Figure 5.60: Demi-variogramme G5 a.

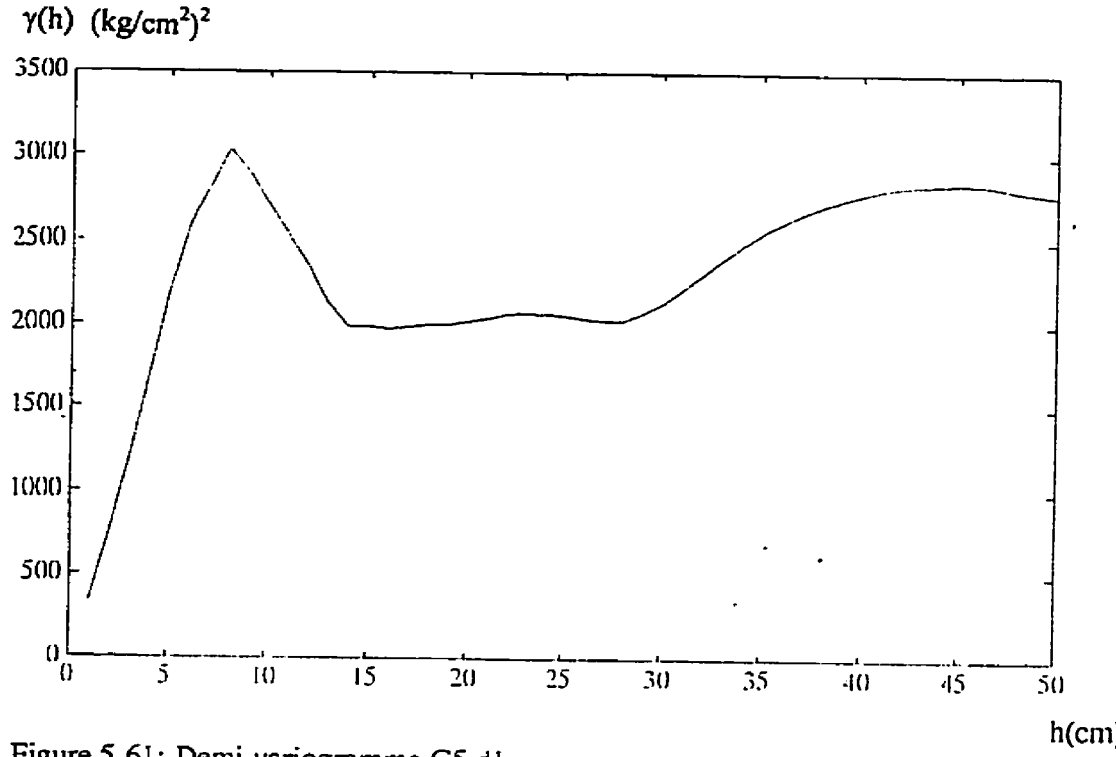


Figure 5.61: Demi-variogramme G5 d1.

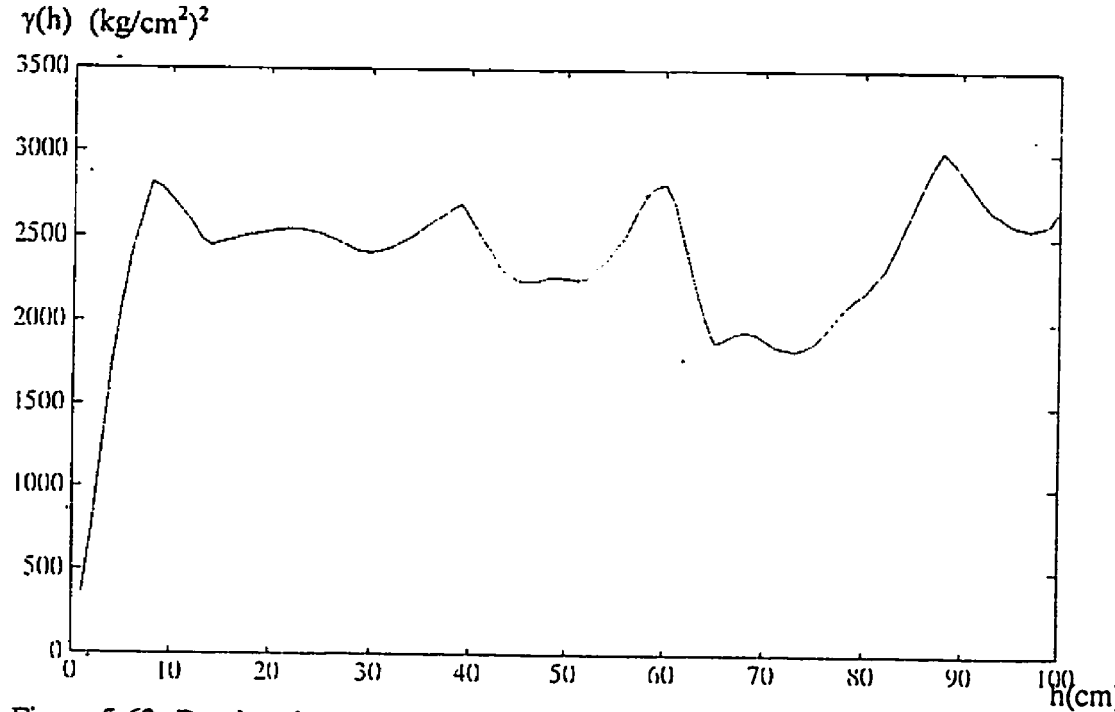


Figure 5.62: Demi-variogramme G5 d2.

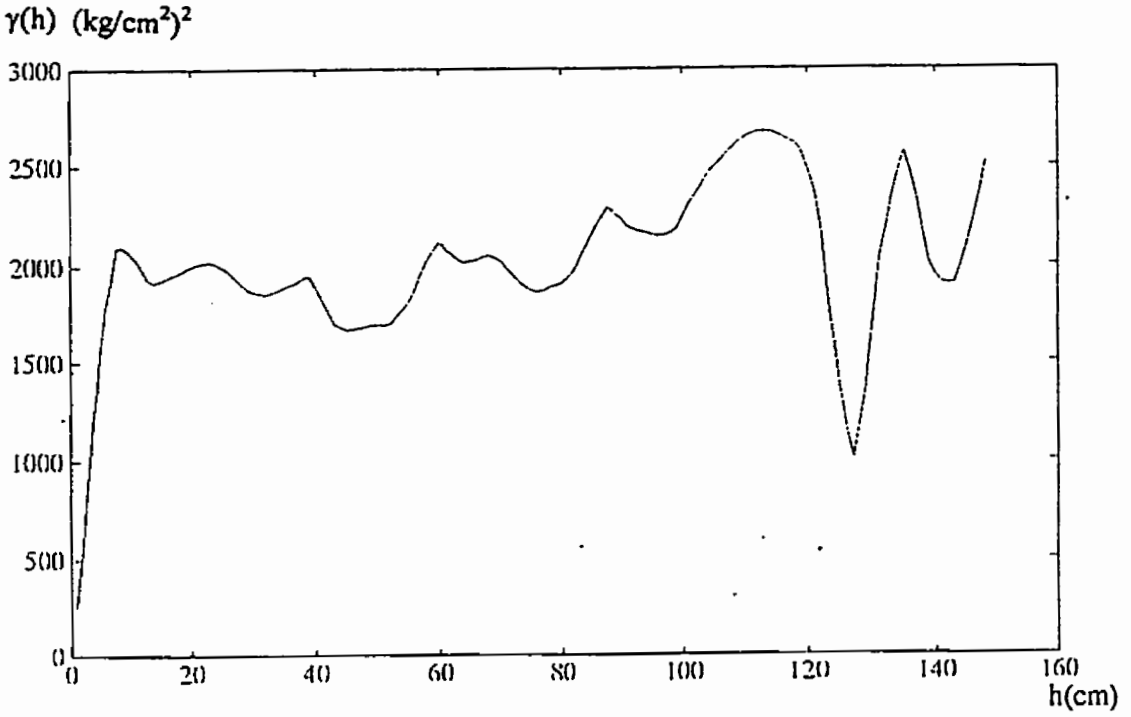


Figure 5.63: Demi-variogramme G5 d3.

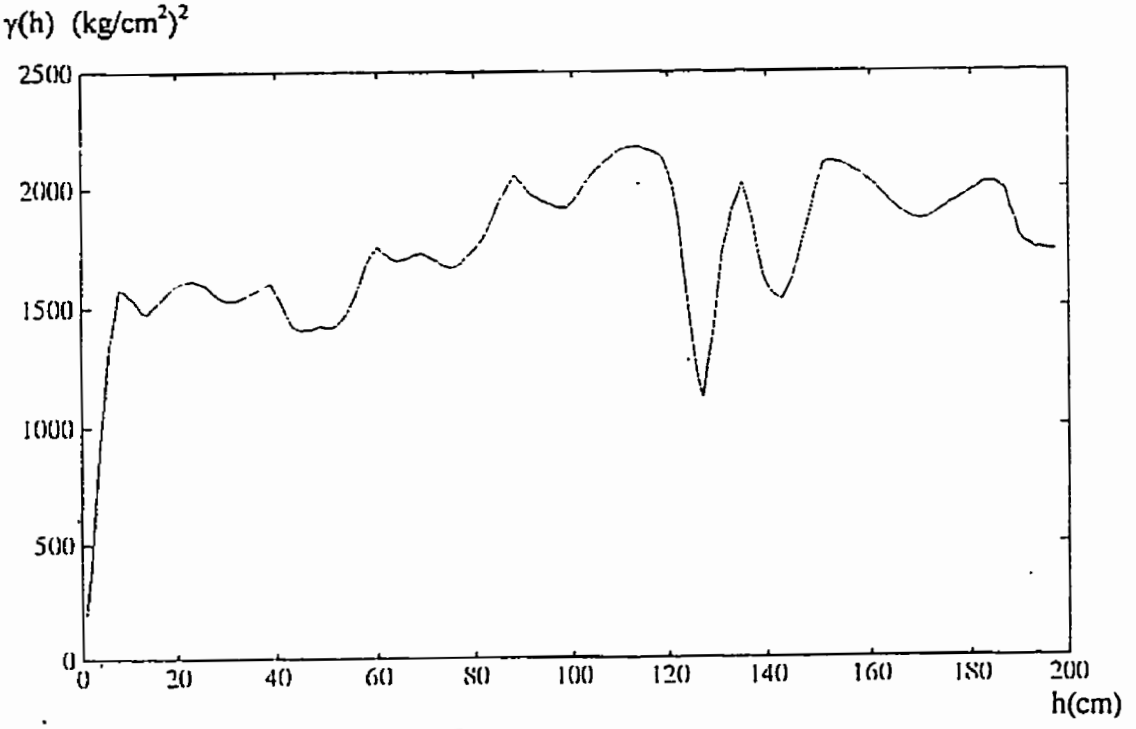


Figure 5.64: Demi-variogramme G5 d4.

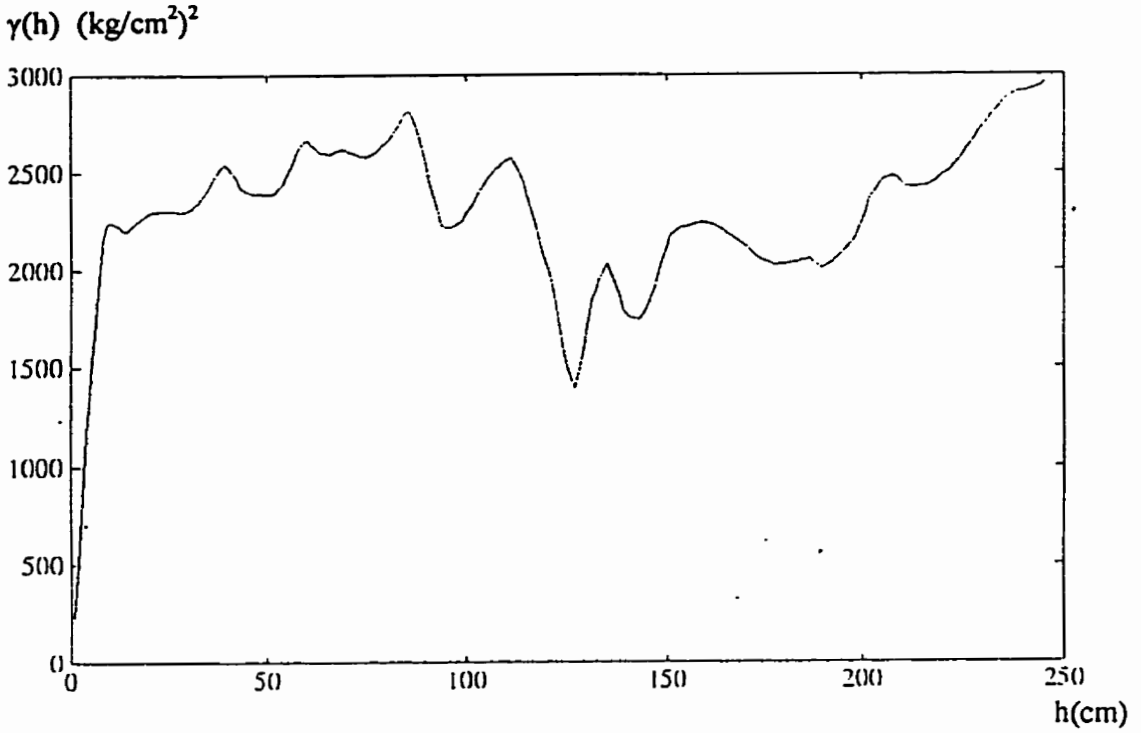


Figure 5.65: Demi-variogramme G5 d5

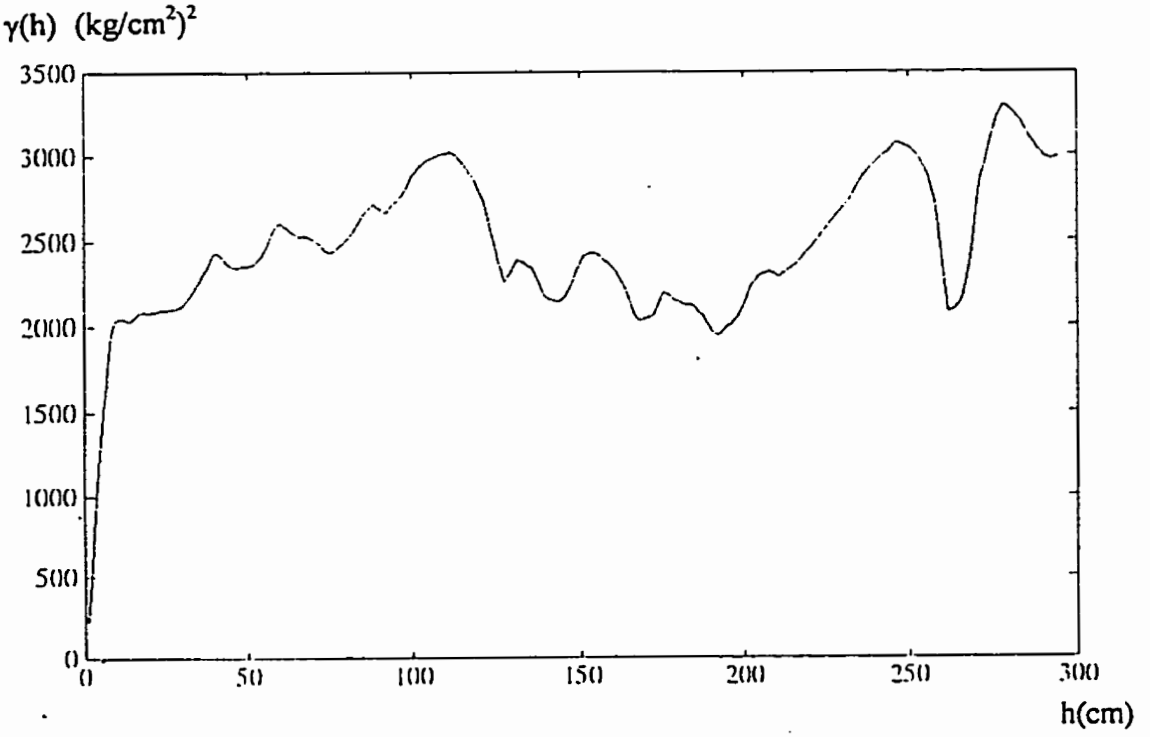


Figure 5.66: Demi-variogramme G5 d6

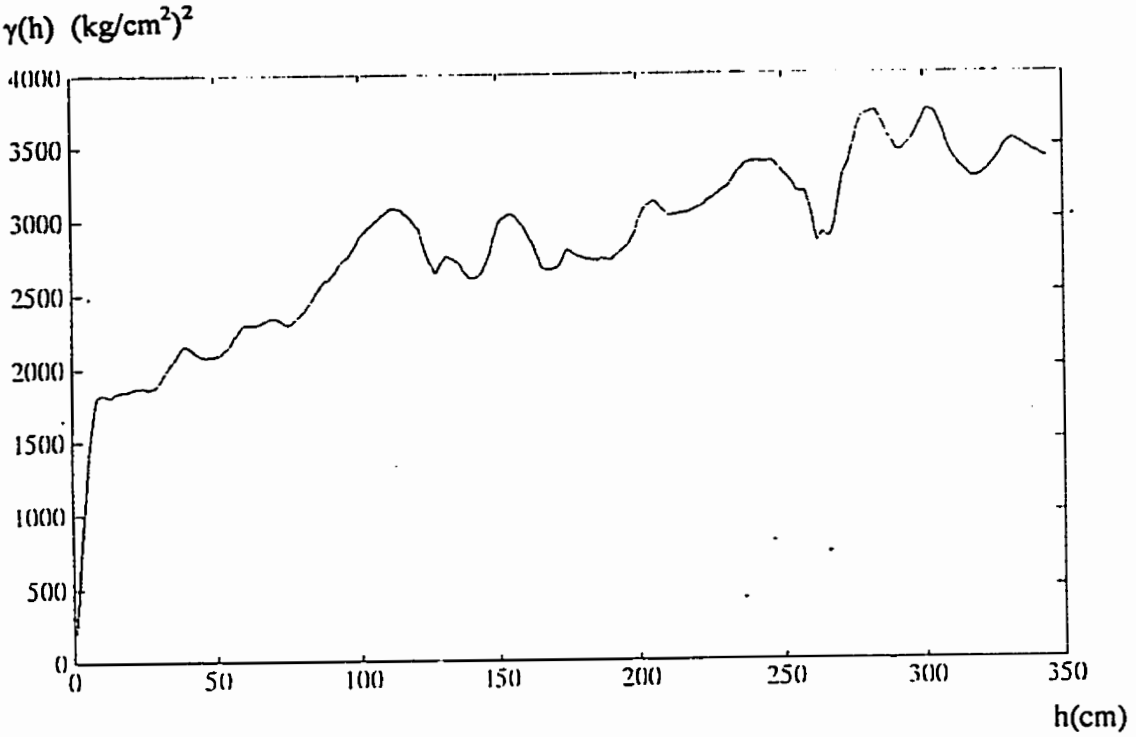


Figure 5.67: Demi-variogramme G5 d7.

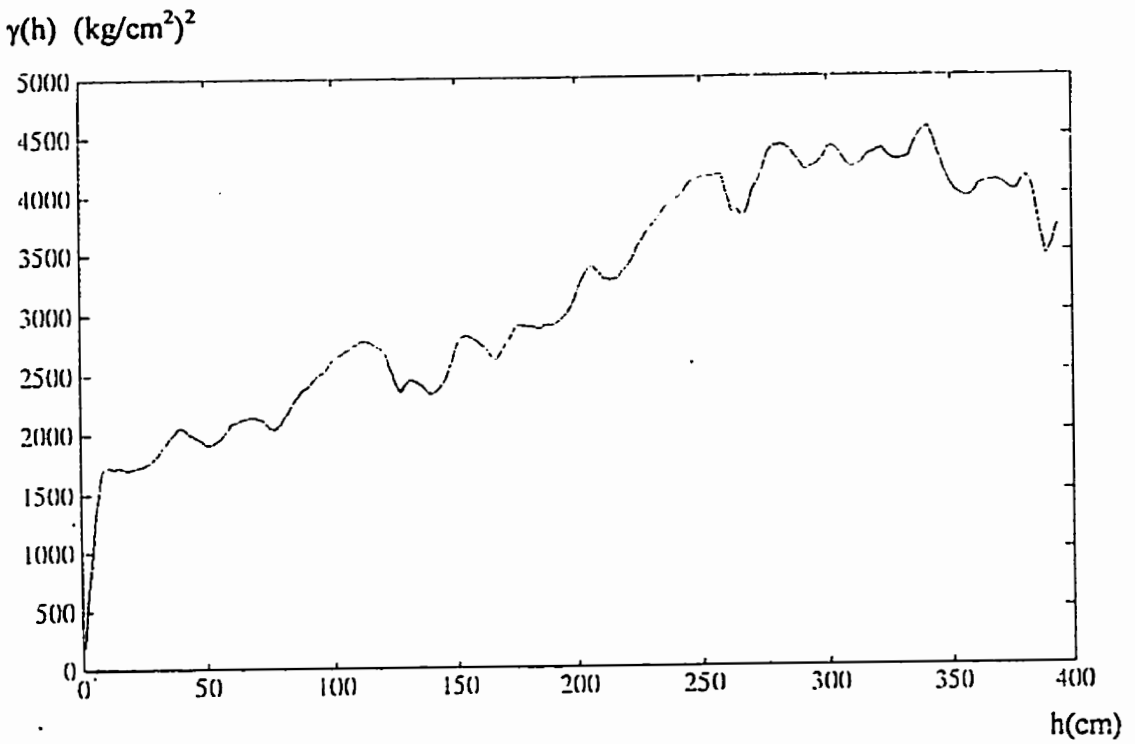


Figure 5.68: Demi-variogramme G5 d8.

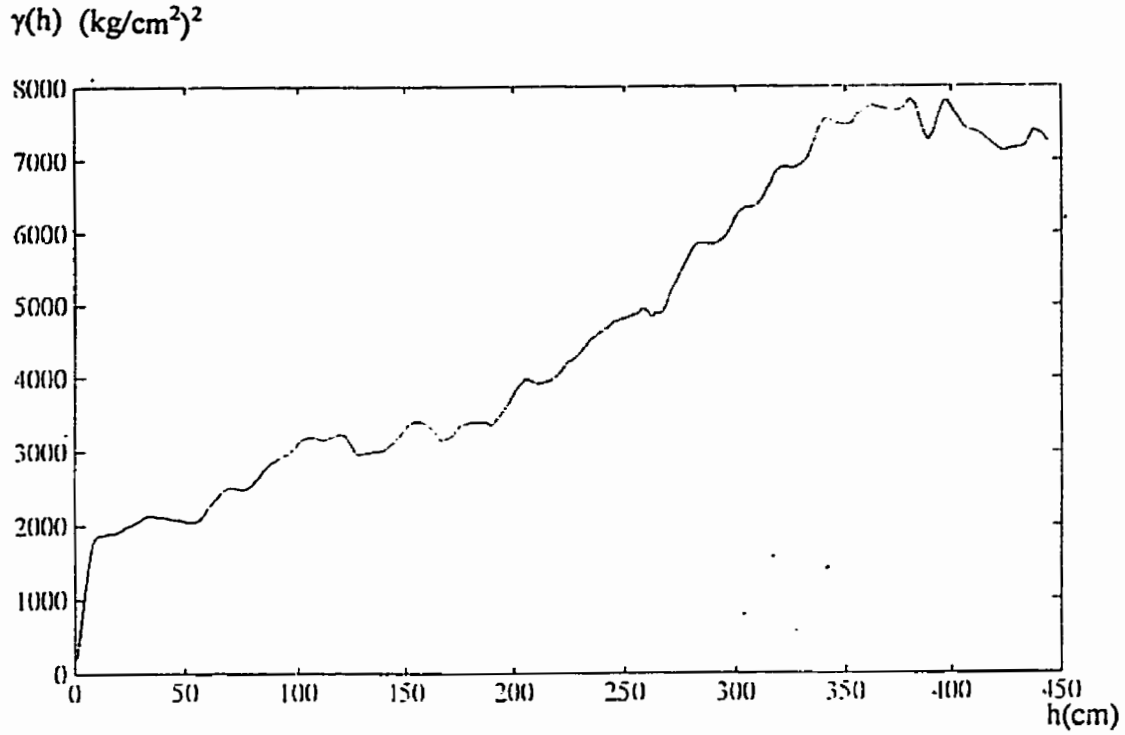


Figure 5.69: Demi-variogramme G5 d9.

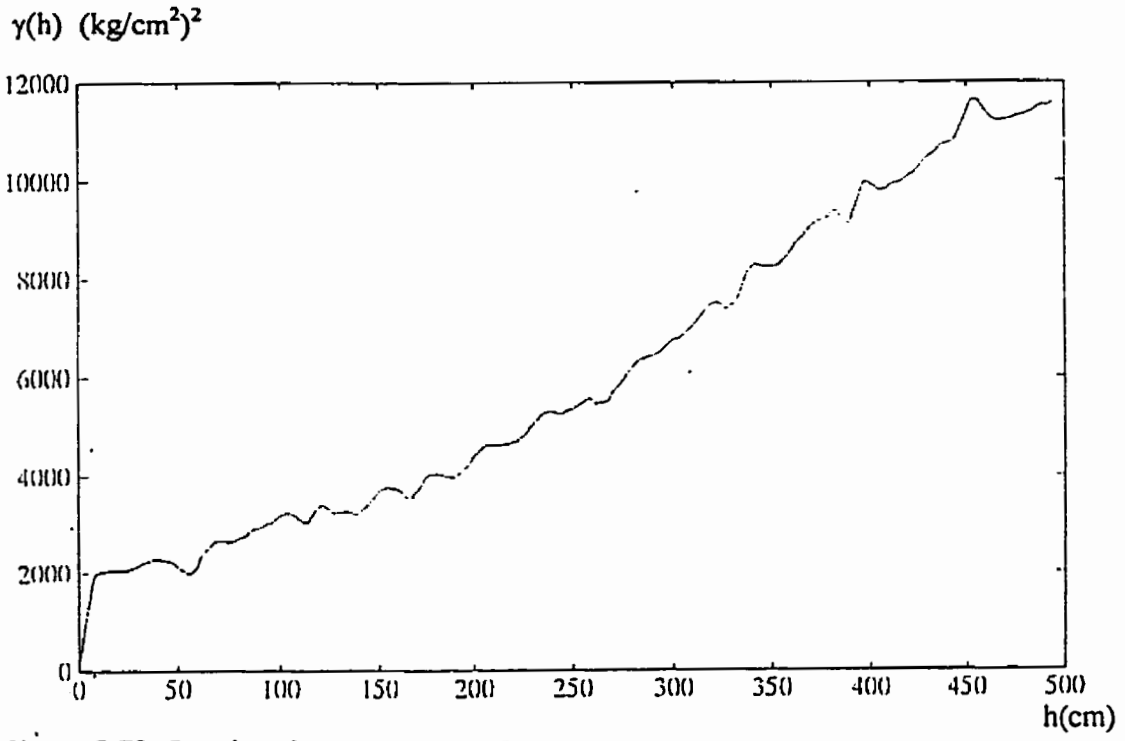


Figure 5.70: Demi-variogramme G5 d10.

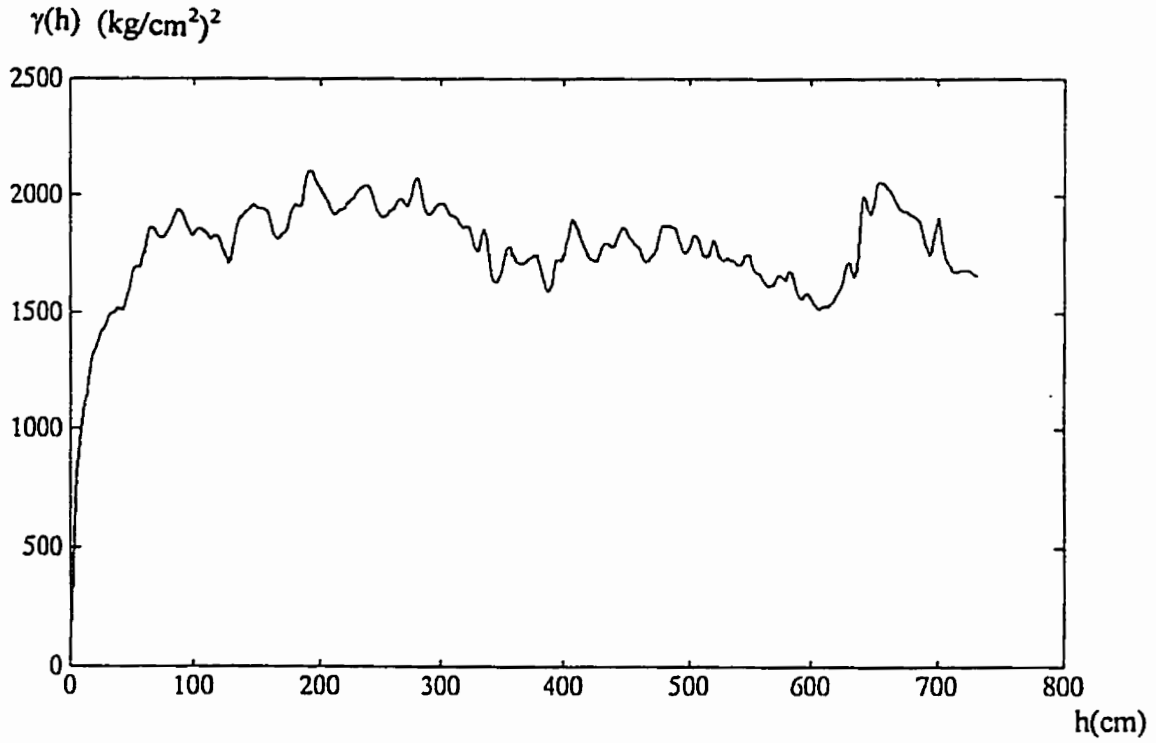


Figure 5.71: Demi-variogramme G5 c

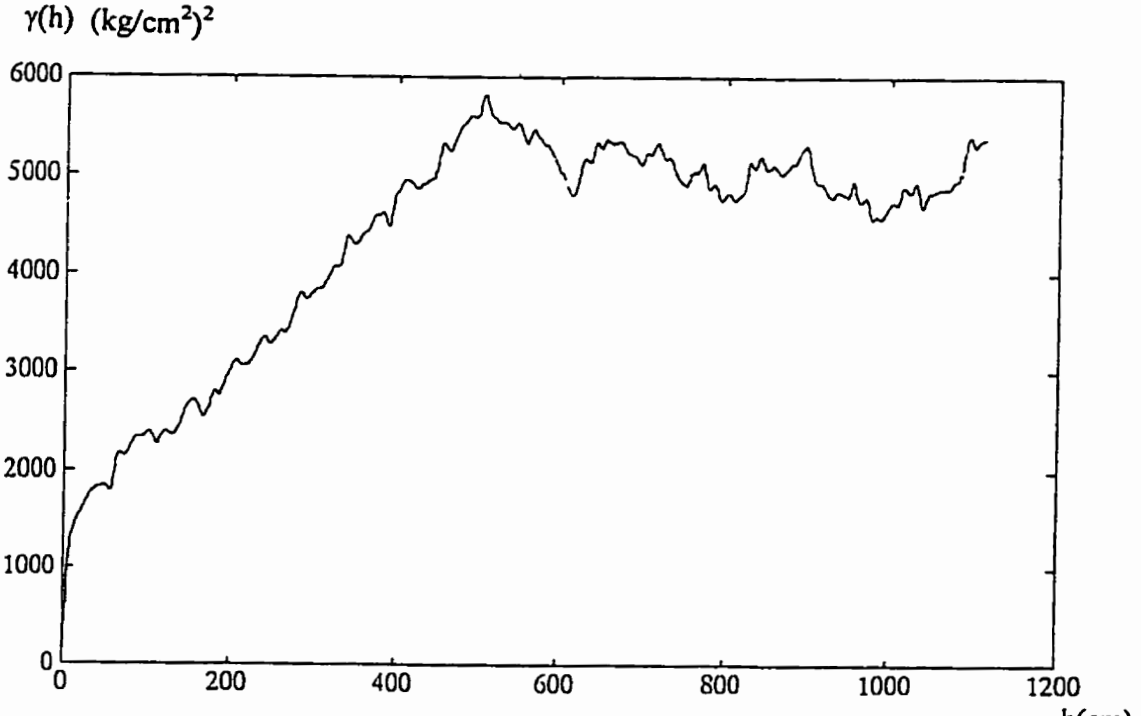


Figure 5.72: Demi-variogramme G5 e.

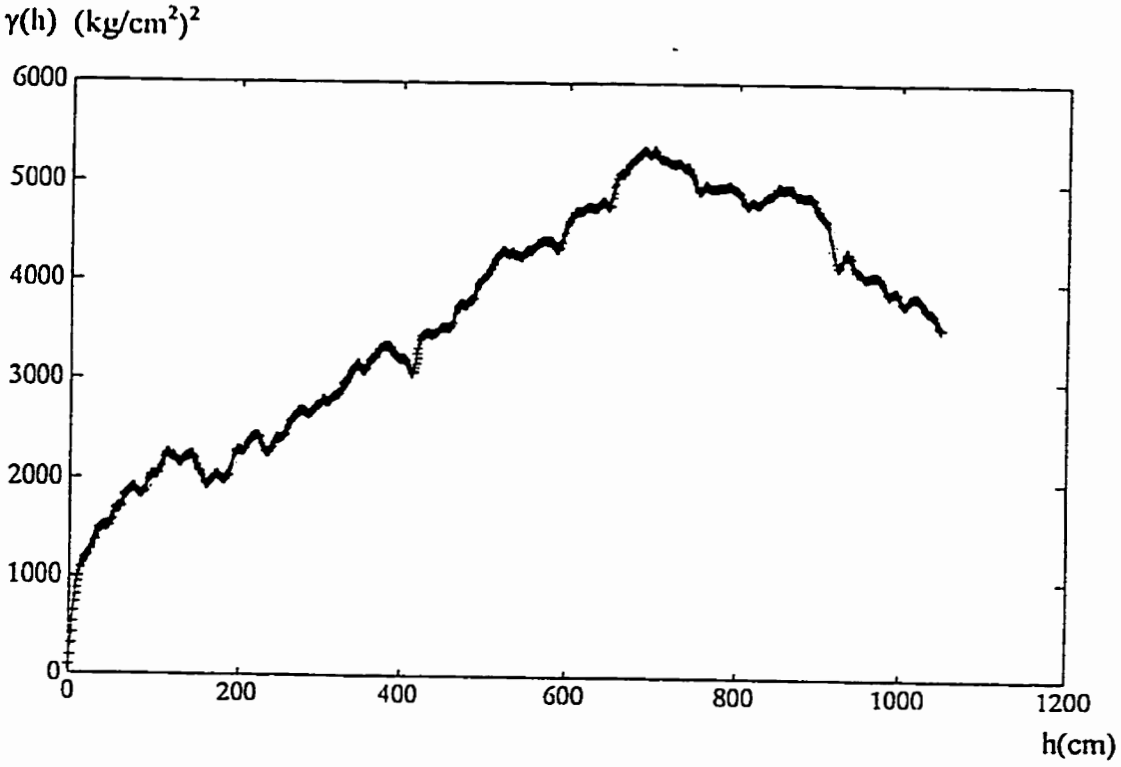


Figure 5.73: Demi-variogramme G7-13-7.

CHAPITRE VI
DISCUSSION

6.1 Les données

Le système ENPASOL a été mis au point au départ pour des foreuses rotary puis utilisé avec des foreuses à carottier. Les données traitées dans le présent mémoire ont été produites par une foreuse à carottier NQ (carotte de 45 mm de diamètre). La mécanique d'attaque de la roche par le trépan n'est pas la même dans le cas du forage rotary et du forage avec carottier. L'équation utilisée pour calculer les résistances au forage est typique de celles utilisés avec le forage rotary. Il se pourrait donc que les résistances au forage déduites avec une foreuse à carottier soient biaisées.

Par ailleurs, il est reconnu, lorsque le forage s'effectue dans une roche avec un contenu argileux élevé, il y a diminution de l'efficacité du découpage par bourrage des orifices d'évacuation des débris. Ce bourrage affecte la vitesse d'avancement et par conséquent la résistance au forage, masquant éventuellement des hétérogénéités de petite échelle. Il se pourrait que ce phénomène joue un certain rôle lors du forage dans le shale.

La concordance des valeurs apparaissant dans les différentes colonnes du journal de forage ENPASOL n'a pas été systématiquement vérifiée. Les profils de résistance au forage ont été numérisés tel quel. Les tiges utilisées lors des forages impliqués dans ce mémoire avaient 3 mètres de longueur et, en général, les courses sont faites sur 0,60 m. Elles n'ont été dans certains cas que de 0,10 m. Les données affichées dans le journal de forage ENPASOL (voir figure 2.1) comme longeur de tiges sont en fait des longeurs de courses.

En examinant le journal de forage ENPASOL, on se rend compte que la fin et le début de chaque course entraîne souvent une diminution de la résistance au forage suivie d'une augmentation de cette dernière. Ces fluctuations sont dues au fait qu'il faut ajuster la vitesse de rotation et la poussée de la foreuse, entre autres facteurs. Mais elles peuvent néanmoins coincider avec des variations de résistance au forage.

Cet examen du journal de forage ENPASOL montre que c'est le segment G12, parmi tous les segments considérés dans le présent mémoire, qui serait le plus affecté par l'influence des débuts et des fins de courses. On y retrouve 15 cas de ce qui semble être une variation de résistance au forage coïncidant plus au moins avec les fins et les débuts de course. L'analyse détaillée de ces derniers donne:

- 3 cas de résistance qui atteint la valeur zéro sur quelques centimètres, interprétés comme étant l'effet de discontinuités géologiques;
- 5 cas d'augmentation graduelle de résistance;
- 5 cas de variation de résistance qui se situent de fait après la fin de la course;
- 2 cas de variation inexplicable.

Puisque dans le cas du segment G12 où l'influence des courses semblait a priori très importante, il a été établi qu'une faible fraction des réductions apparentes de résistance au forage serait due effectivement au processus propres aux courses, il a donc été décidé que ce facteur était encore moins important pour les autres segments et il a donc été ignoré.

L'auteur reconnaît, puisque la vitesse de rotation et la poussée peuvent être modifiées par le foreur, indépendamment des débuts et fins de courses, que les données traités peuvent être biaisées et ne pas découler uniquement des propriétés des roches du massif foré.

6.2 Les résultats

6.2.1 Adéquation des dimensions des champs

Une des préoccupations de l'auteur de ce mémoire a été de s'assurer qu'il était possible de produire des DV représentatifs des lithologies en limitant le nombre de données sous un seuil pratique fixé après divers essais à quelques milliers. Ceci revient à limiter la longueur des segments numérisés, c'est-à-dire à fixer le champ étudié.

Afin d'établir si les segments de forage dont les données ont été traitées dans le présent mémoire étaient suffisamment longs pour mener à des DV représentatifs d'une lithologie en un endroit donné, un certain nombre de ces segments ont été soumis au processus suivant: un premier DV est calculé et tracé avec les données d'un premier mètre du segment, puis un deuxième DV est calculé avec les données précédentes augmentées des données d'un deuxième mètre du segment et ainsi de suite. En comparant ces DV, on constate qu'il vient une longueur de segment qui fait que l'addition d'un mètre supplémentaire ne modifie pas de façon significative l'allure du DV malgré les contrastes entre les données des couches d'une même lithologie.

Les figures 6.1 à 6.23 montrent 23 DV obtenus des données du segment de forage G3. Le dernier de la série, le DV de la figure 6.23 est donc le même que celui montré à la figure 5.3. Comme il fallait s'y attendre, l'examen de ces DV montre que l'introduction d'un nouveau mètre de données aux données déjà utilisées pour calculer un nouveau DV a, au départ, un effet marqué sur le nouveau DV. Ainsi, le DV G3-1 (premier mètre - figure 6.1) est totalement différent du DV G3-2 (deux premiers mètres - figure 6.2). Le premier DV montre une non-stationarité alors que le deuxième montre un effet de trou marqué. Puis, jusqu'au DV G3-10 (figure 6.10), il semble que l'évolution se fait vers une structure spatiale sans effet de trou, bien qu'on note l'existence de légères fluctuations

dans la demi-variance. À compter du DV G3-11 (figure 6.11), un effet de trou commence à se dessiner et ce dernier devient évident au DV G3-14 (figure 6.14). Par la suite, les neuf (9) DV subséquents montrent peu d'évolution au fur et à mesure que le champ est accrû. On peut donc conclure que le DV G3 est représentatif de la variabilité de la résistance au forage offerte par le shale recoupé par le forage G3. La même analyse a été faite pour les segments G1, G6 et G10, choisis au hasard, comme d'ailleurs le segment G3, et les mêmes constatations ont été faites.

6.2.2 La modélisation

6.2.2.1 Le modèle combiné sphérique-exponentiel

L'utilisation du modèle combiné sphérique-exponentiel pour décrire les demi-variogrammes a découlé du fait que ces derniers montraient un changement de pente brusque pour une certaine valeur de l'abscisse, à proximité de l'origine. En limitant la composante sphérique du modèle combiné à la portion antérieure à ce point de changement de pente brusque, il a été possible de réaliser de bons ajustements. La portée définie par la composante sphérique caractériserait les structures spatiales à petite échelle. Ce serait l'expression d'hétérogénéités intrinsèques à la roche forée.

La portée pratique de la composante exponentielle du modèle combiné serait liée aux hétérogénéités à plus grande échelle, y compris les couches à haute et à faible résistance.
Il ne faut pas perdre de vue que l'ajustement des modèles aux variogrammes expérimentales a été fait visuellement et qu'il a impliqué un nombre de tentatives limité. Conséquemment, les constatations faites à partir des paramètres variographiques ainsi obtenus doivent être considérées avec une certaine prudence.

6.2.2.2 Les effets de trou

Les effets de trou observés des demi-variogrammes découlent de la succession des caractéristiques mécaniques des cycles sédimentaires du massif rocheux. On ne peut pas les ignorer (Clark 1979).

Rappelons d'abord que les amplitudes relatives ayant mené au tableau 5.2 de même que celles présentées aux tableaux 5.3, 5.7 et 5.9 ont été calculées en suivant Journel et Huijbregts (1978) à la lettre. Dans ce contexte, il a été conclu que les effets de trou peuvent être directionnels ou non. Il peut paraître a priori surprenant de retrouver dans des formations sédimentaires un effet de trou dans toutes les directions. L'absence de trous de forage d'orientation différente à proximité l'un de l'autre empêche de faire une démonstration définitive de cet état de chose.

L'auteur de ce mémoire propose les figures 6.24a et 6.24b dans le but d'illustrer qu'il est possible d'obtenir des DV montrant un effet de trou indépendamment de la direction considérée dans un bassin sédimentaire. La figure 6.23a représente, en deux dimensions, un schéma de sédimentation simple, recoupée par deux forages hypothétiques orthogonaux, l'un faisant approximativement 30 degrés avec les couches (stratifications). Dans ce cas, les angles de couches observés sur les carottes de forages seraient approximativement constants et les DV de la résistance au forage devraient mener à des effets de trou directionnels.

Toutefois, l'expérience de terrain de l'auteur montre que la situation plus complexe représentée schématiquement à la figure 6.23b serait réaliste. Les carottes de trous de forage de même orientation que dans le cas de la figure 6.23a montreraient des variations appréciables d'angles de couches. Les DV de la résistance au forage indiqueraient un effet de trou isotrope. Les angles de couches rapportés dans la partie inférieure du tableau 3.1 montrent, pour les segments de forage numérisés, qu'une situation comme celle décrite

par la figure 6.24b est tout à fait plausible. Il ne serait alors pas surprenant d'obtenir des demi-variogrammes à effets de trou isotropes.

L'auteur reconnaît, par ailleurs, l'importance du fait suivant: si ce qui a été appelé structure à petite échelle par l'auteur existe (structure décrite à l'aide de la composante sphérique du modèle combiné sphérique-exponentiel), il faut exclure la variabilité associée à cette dernière du calcul des amplitudes relatives, du fait qu'elle se retrouve dans toutes les couches. Une telle exclusion entraînerait des valeurs d'amplitudes relatives plus grandes et réduirait le nombre de DV à effet de trou isotrope dans le tableau 5.2.

Il est évident que la poursuite de l'étude du type d'effet de trou lié aux propriétés mécaniques des roches rencontré dans les formations sédimentaires des Basses-Terres du St-Laurent s'impose. Il ne faut pas perdre de vue que les travaux dont les résultats sont rapportés dans le présent mémoire se veulent exploratoires. La décision de procéder au calcul des amplitudes relatives des effets de trou en s'appuyant sur Journel et Huijbregts (1978) vient de la préoccupation de l'auteur de rattacher la méthodologie suivie à ce stade-ci à des ouvrages classiques de la géostatistique.

La méthode d'obtention des épaisseurs moyennes de couches et de leur espacement moyen à l'intérieur d'une même lithologie utilisée dans le présent mémoire l'a aussi été par Dubart et Josien (1973) pour des DV avec effet de trou impliquant la dureté CERCHAR de roches et par Pineau et Thomas (1983) pour des DV avec effet de trou impliquant la résistance en compression simple de roches.

6.2.3 Le changement de support

Les courbes de variation de résistance au forage qui ont été numérisées dans le présent travail résultent d'un calcul qui fait intervenir des données saisies à tous les 5 mm d'avancement du trépan de la foreuse. La vitesse d'avancement introduite dans le calcul de la résistance au forage est la vitesse moyenne durant les 5 mm d'avancement (5mm/temps mesuré) alors que les valeurs des autres paramètres utilisés dans le calcul sont saisies dans l'intervalle de temps que nécessite cet avancement de 5 mm.

La numérisation s'est faite en mesurant sur ces courbes la valeur de la résistance au forage à tous les centimètres. Comme il a déjà été écrit, cette décision a été prise suite à diverses essais qui ont montré que les demi-variogrammes produits avec des lectures faites à tous les centimètres étaient identiques à ceux produits avec des lectures faites à tous les cinq millimètres. Les changements de dimensions de support ont été simulés en utilisant comme données des moyennes arithmétiques des données individuelles numérisées sur diverses distances (sans chevauchements).

Le fait que les résultats obtenus montrent que la variance des données diminue mais que la moyenne ne montre pas de différence significative au fur et à mesure que les dimensions du support augmentent confirme la validité de la façon de faire puisque les effets sont typiques de l'accroissement des dimensions du support (Isaaks et Srivastava 1989).

Dans le cas de DV originaux avec effet de trou (DV G3), les changements de dimension de support des données font évoluer les DV vers des cas d'effet de pépite pur. Toutefois, plus l'effet de trou est important au départ, plus le changement de support doit être grand pour y arriver.

D'après le Tableau 5.6 du Chapitre IV qui rapporte les paramètres variographiques des DV G1mx, le modèle combiné sphérique-exponentiel permet le meilleur ajustement dans les cas de dimensions de support inférieur à 12 cm. Quand le support est égal ou supérieur à 12 cm, le meilleur ajustement s'obtient avec seulement le modèle exponentiel. Cette observation est compatible avec le fait que la portée de la composante sphérique du modèle combiné sphérique-exponentiel ajusté au DV G1 est 12 cm.

En s'inspirant de Ouellet et al. (1987), on peut affirmer que les simulations des changements de dimension de support en faisant des moyennes arithmétiques des données sur des distances spécifiques illustreraient aussi les effets de changement d'échelle d'essais mécaniques menant à la connaissance de la déformabilité de la roche d'une lithologie. Il faudrait alors en conclure que la méthodologie d'échantillonnage ne peut pas faire abstraction de l'échelle des essais, que l'on réfère à des essais in situ ou des essais en laboratoire.

6.2.4 Le changement de l'espacement

Dans le cas de DV originaux avec effet de trou (DV G3), il a été montré que les changements de pas les font évoluer vers des cas d'effet de pépite pur. Toutefois, plus l'effet de trou est important au départ, plus l'accroissement de pas doit être grand pour y arriver.

Le fait que les changements de pas font évoluer les demi-variogrammes avec effet de trou ou sans effet de trou vers un cas d'effet de pépite pur a ausssi été montré par Clark (1979) à l'aide de données relatives à des teneurs de minerais.

Cet aspect est important pour les essais index plus au moins ponctuels utilisés en tant que moyens de diagraphie mécanique, comme par exemple le poinçonnement des parois des

trous de forage. Le nombre d'essais à effectuer est fonction de l'espacement entre les essais. Même si ces essais se font rapidement et à peu de frais, il faut en maintenir leur nombre à un minimum. L'étude de l'effet de la dimension du pas sur l'allure des demi-variogrammes et sur les renseignements qu'ils livrent peut fournir un critère de décision quant à l'espacement optimal des essais.

6.2.5 La structure géologique

La tendance montrée par les variances totales et expérimentales des segments de forage classés en fonction de leur distance de la zone de faille (voir Tableau 5.12) est vraisemblable car les contraintes tectoniques supportées par la roche auraient été plus élevées à proximité de la zone de la faille qu'ailleurs, produisant une fracturation accrue (voir la colonne RQD du Tableau 3.1) respondable d'une variabilité plus élevée.

La tendance montrée par les moyennes expérimentales semble contredire les affirmations du paragraphe précédent. En effet, pourquoi la résistance au forage moyenne du segment G7 est plus faible que celle du segment G1, étant donnée leur distance respective à la zone de faille (le segment G1 est le plus près alors que le segment G7 est le plus éloigné). Pour répondre à cette question, il est nécessaire de se référer aux processus géologiques de formation des roches. En effet, les perturbations déclenchées par la zone de faille et autres phénomènes antérieurs et postérieurs ont apporté, près de ce qui est la surface actuelle, des roches qui étaient jadis plus profondes (le rejet de la faille est supérieur à 160 m) et qui possèdent des caractéristiques qui mènent à des résistances au forage différentes. Un tel phénomène a été décrit par Gaviglio et Carrio (1993).

De plus, il est vraisemblable que les segments de forage dans le shale dont les données ENPASOL ont été numérisées ne correspondent pas à une même position stratigraphique

et que les résistances moyennes générales calculées pour chacun des segments ne soient pas comparables.

6.2.6 Les changements de lithologie

L'intérêt de pouvoir identifier des changements lithologiques avec le système ENPASOL se manifeste surtout lorsque le forage se fait à l'aide de foreuse rotary (absence de carottes de forage).

Décider de l'arrêt de tels forages quand une formation donnée est atteinte ou limiter les données acquises avec ces forages à celles propres à une zone (secteurs de design délimité entre autres, par les changements de lithologie) sont des exemples d'application.

Les simulations faites dans le but de montrer qu'il pouvait être possible de détecter des changements lithologiques en s'appuyant sur la comparaison de l'allure générale des demi-variogrammes calculés périodiquement en cours de forage ne sont pas concluantes dans tous les cas.

Le contraste existant entre les données des lithologies de part et d'autre de leur frontière commune semble être le facteur important; plus ce contraste est grand, plus il est facile de localiser rapidement l'interface le long du forage.

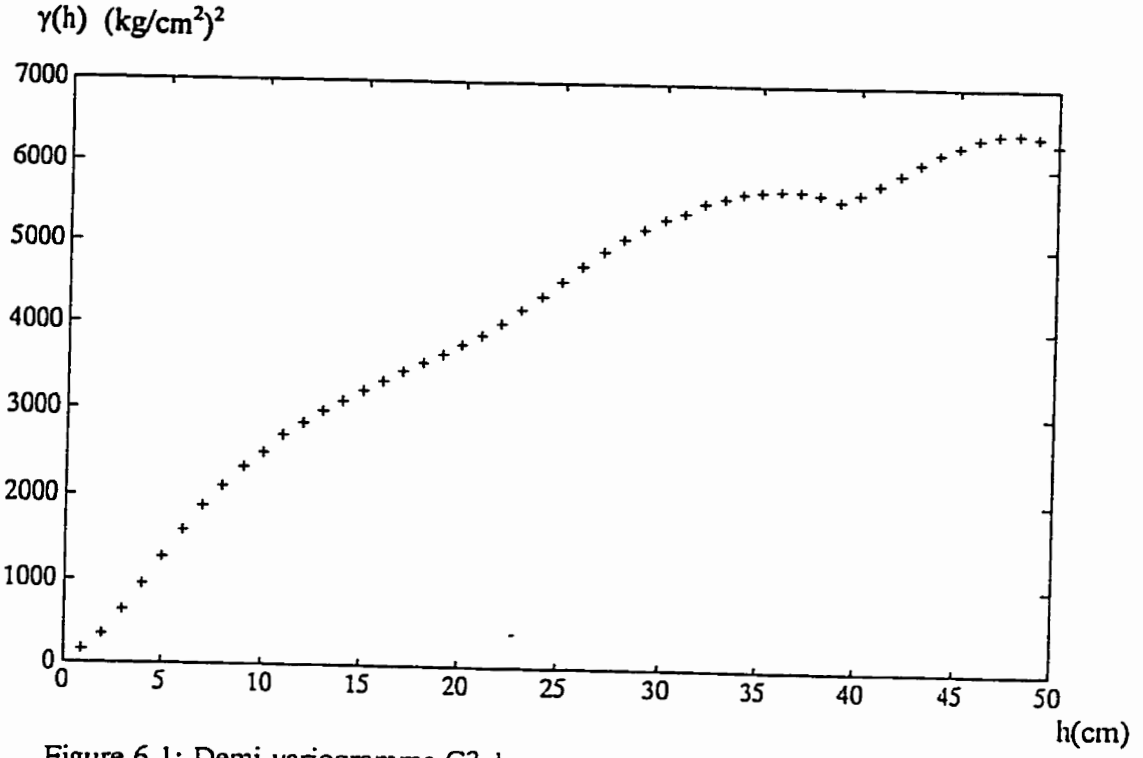


Figure 6.1: Demi-variogramme G3-1

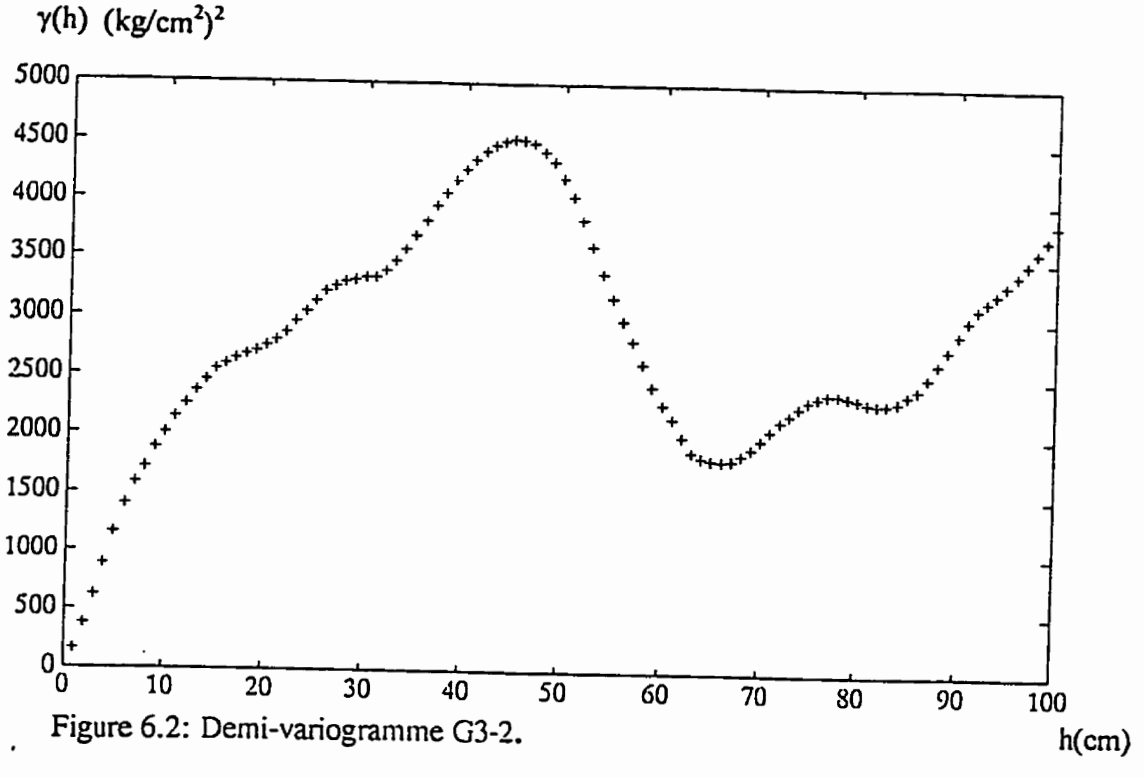


Figure 6.2: Demi-variogramme G3-2.

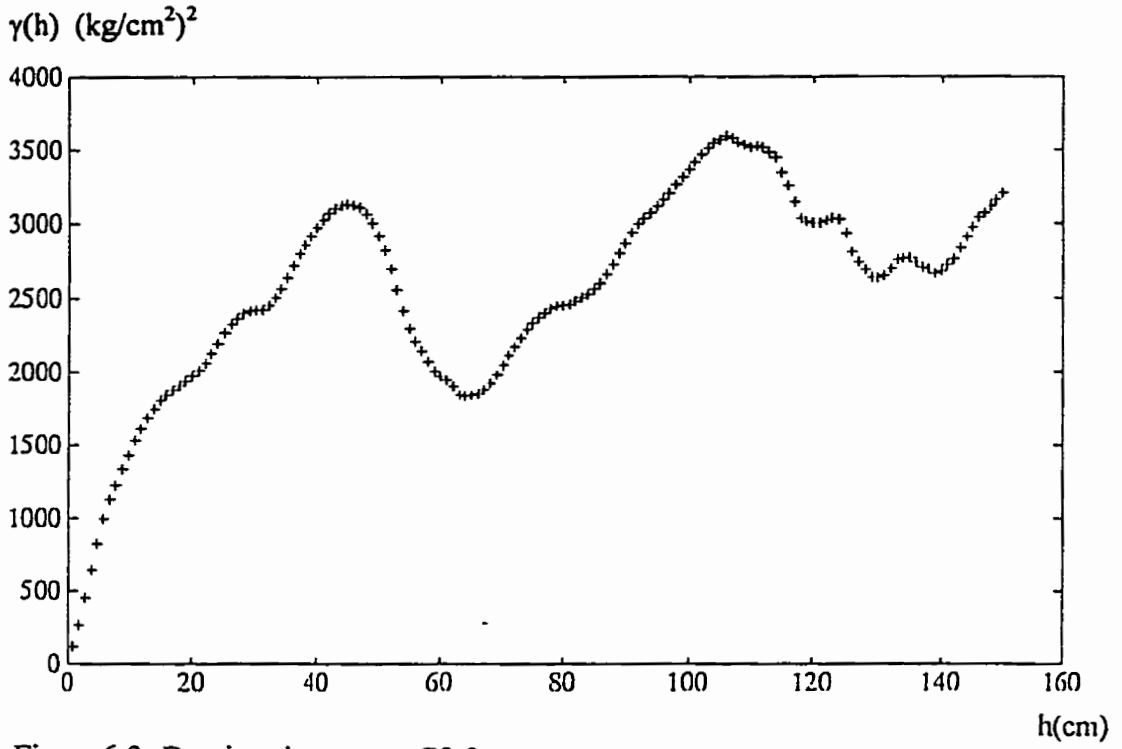


Figure 6.3: Demi-variogramme G3-3

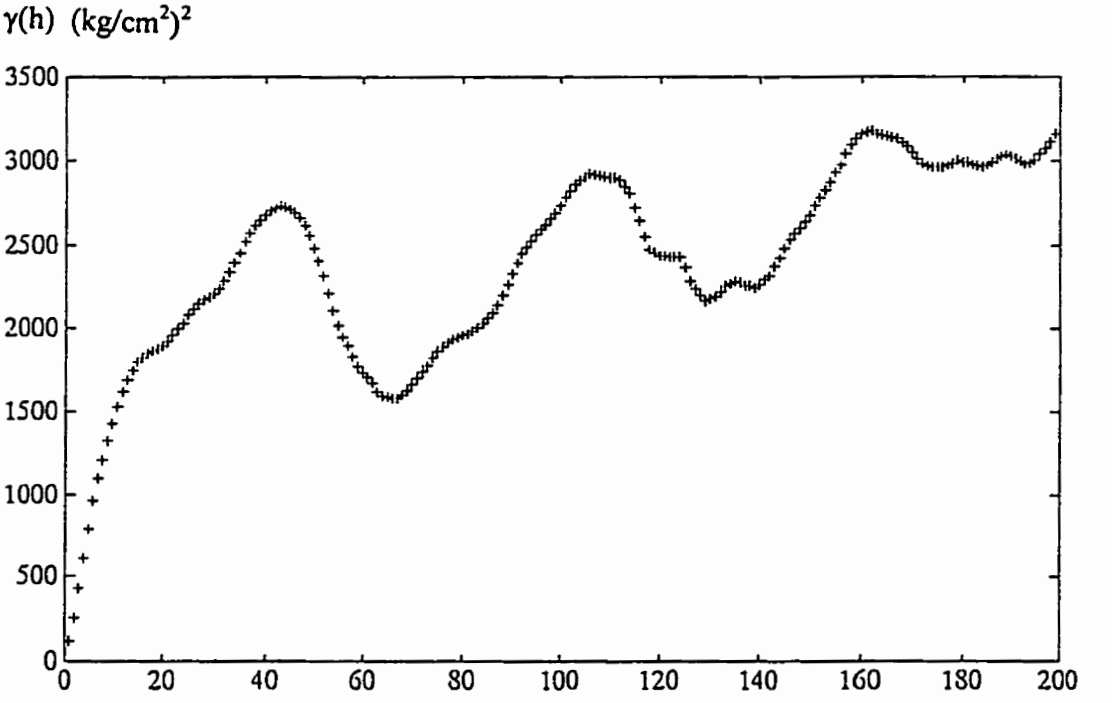


Figure 6.4: Demi-variogramme G3-4.

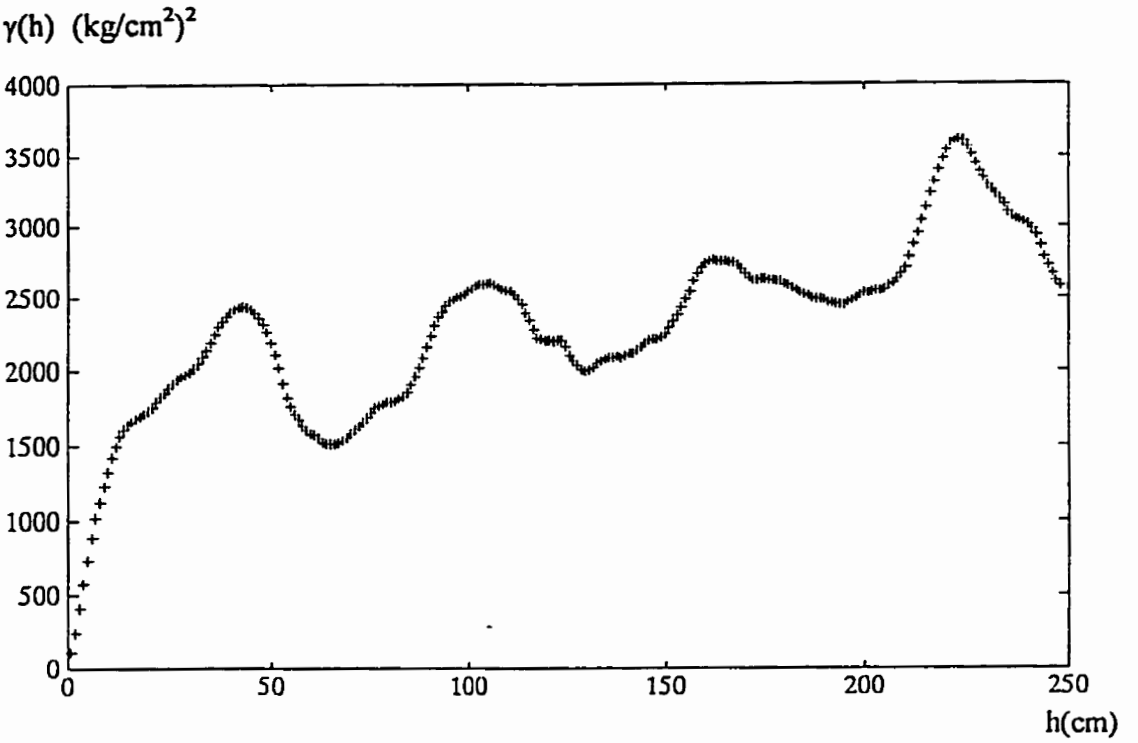


Figure 6.5: Demi-variogramme G3-5

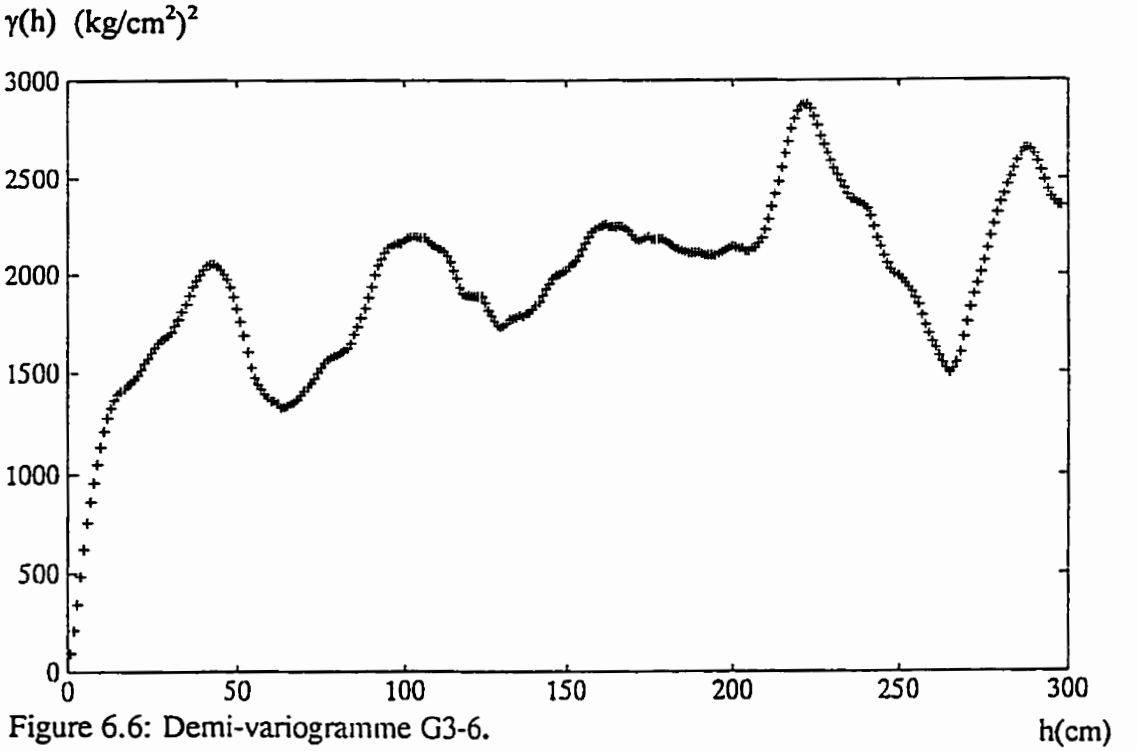


Figure 6.6: Demi-variogramme G3-6.

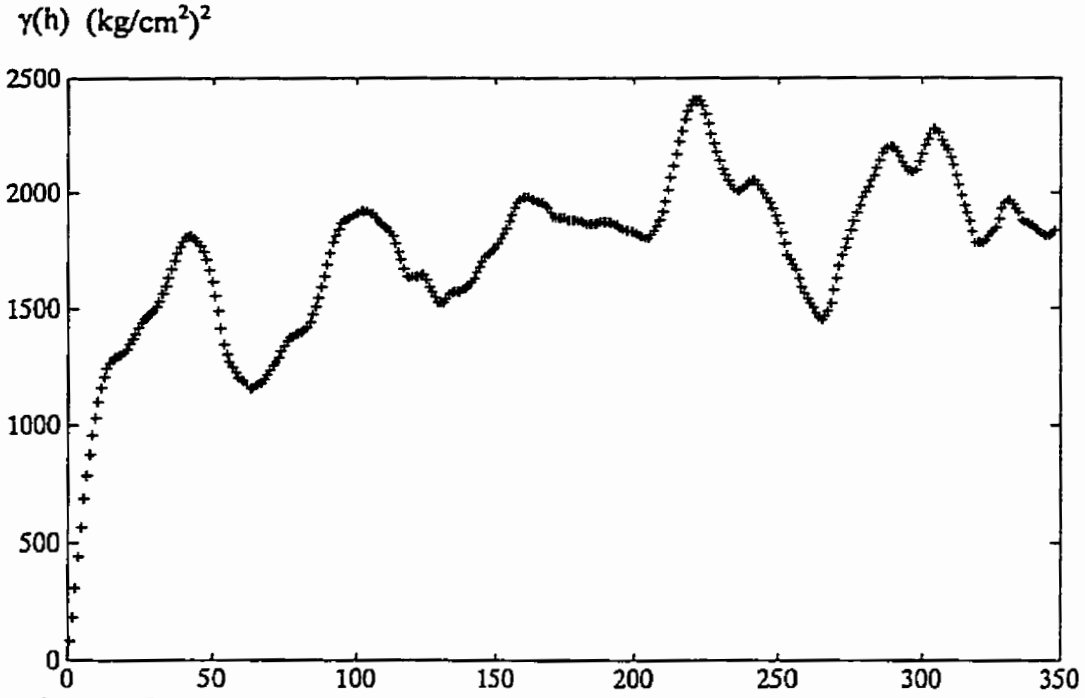


Figure 6.7: Demi-variogramme G3-7

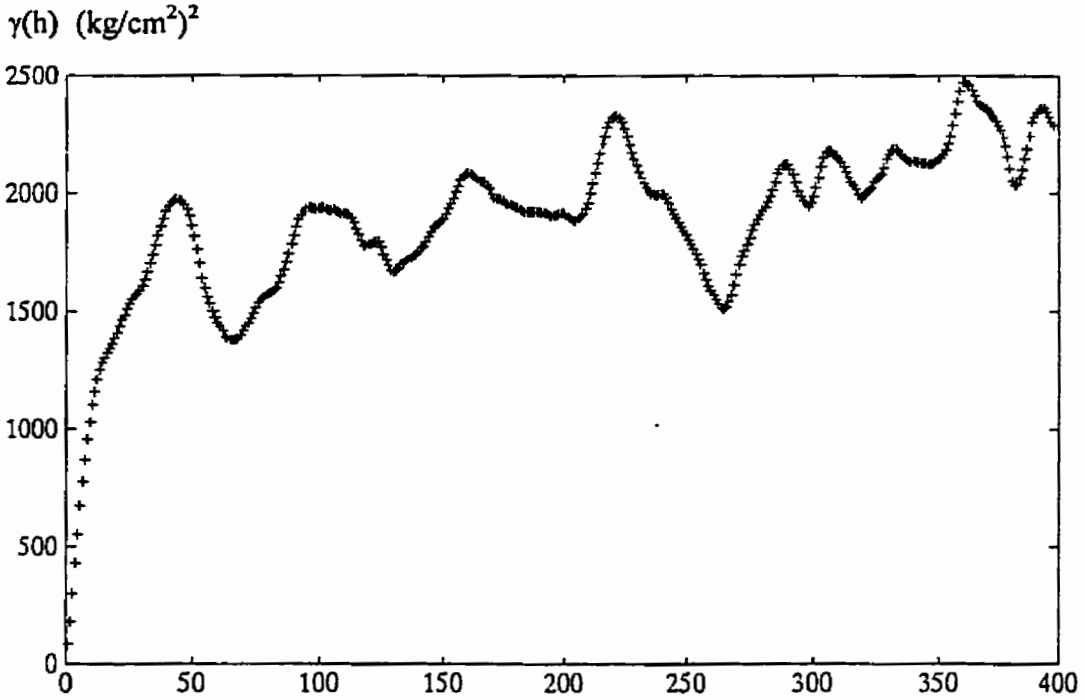


Figure 6.8: Demi-variogramme G3-8.

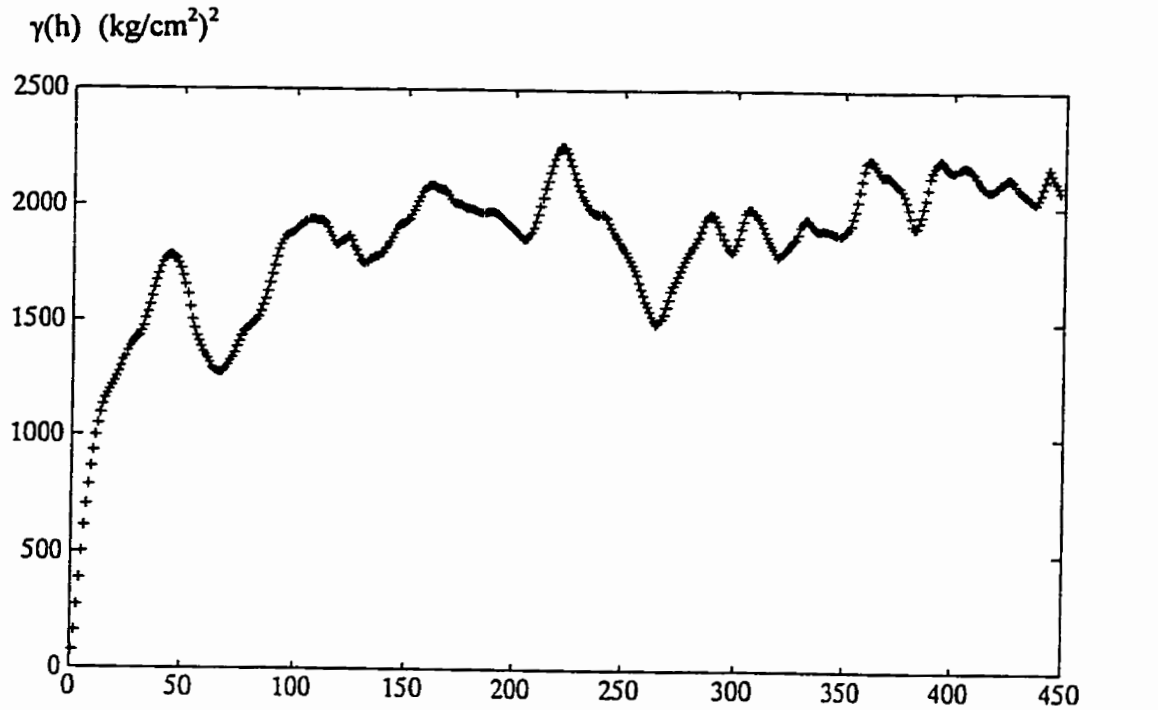


Figure 6.9: variogramme G3-9

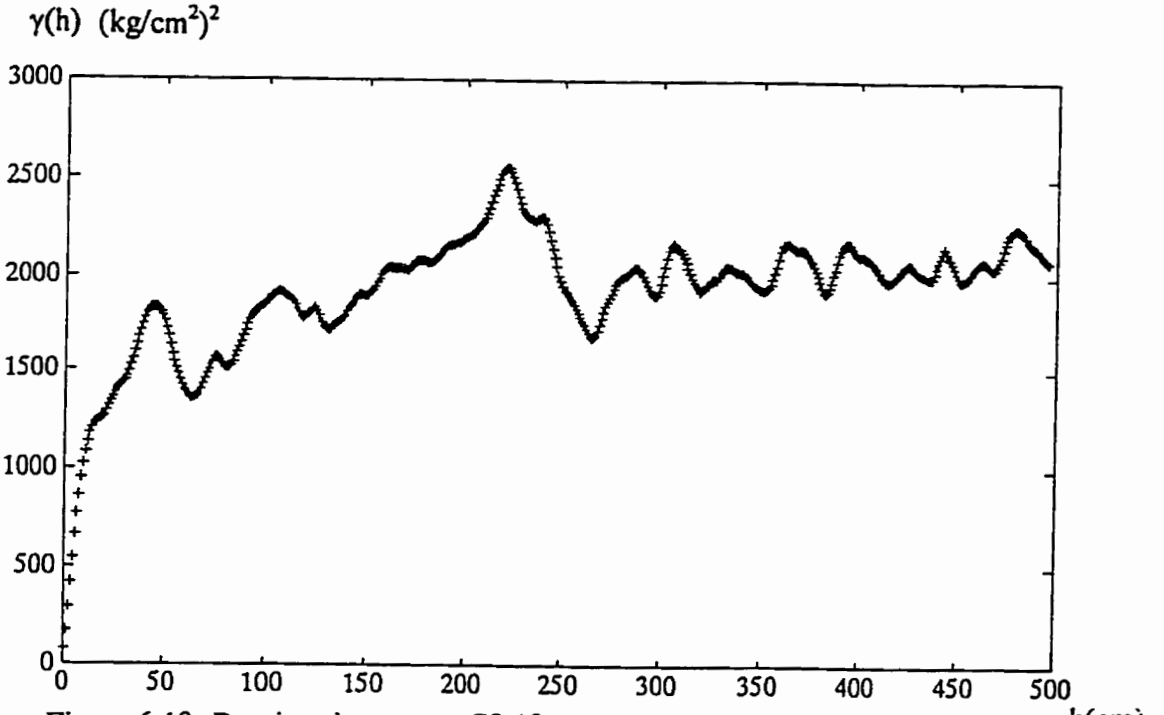


Figure 6.10: Demi-variogramme G3-10.

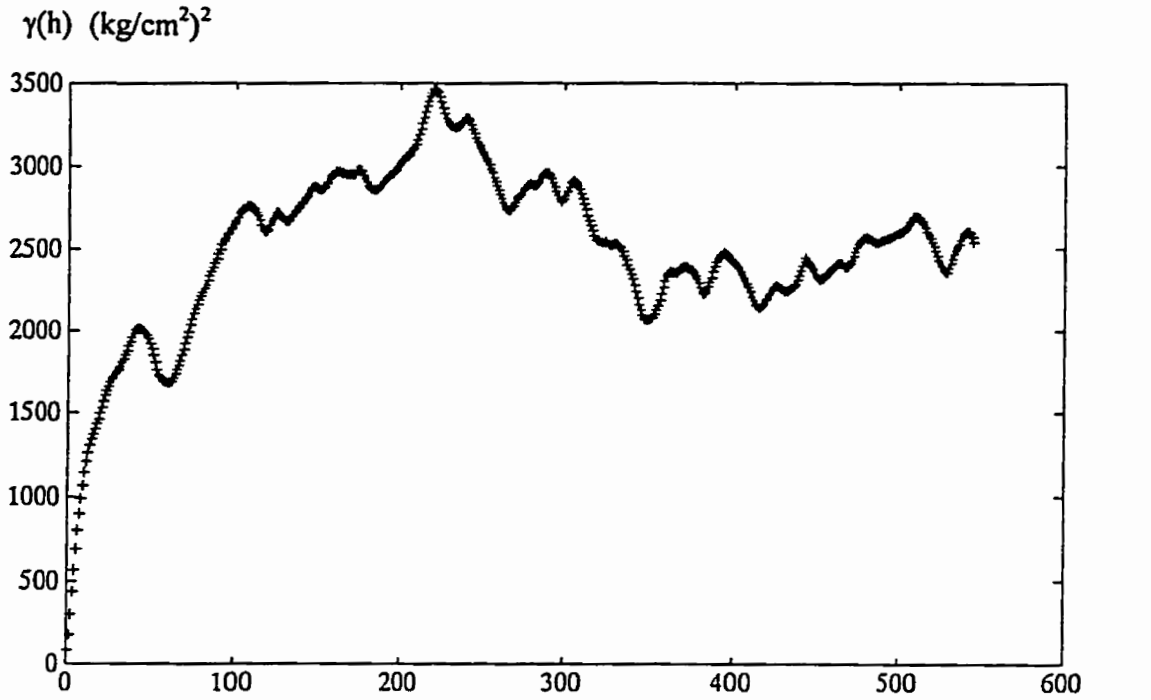


Figure 6.11: Demi-variogramme G3-11

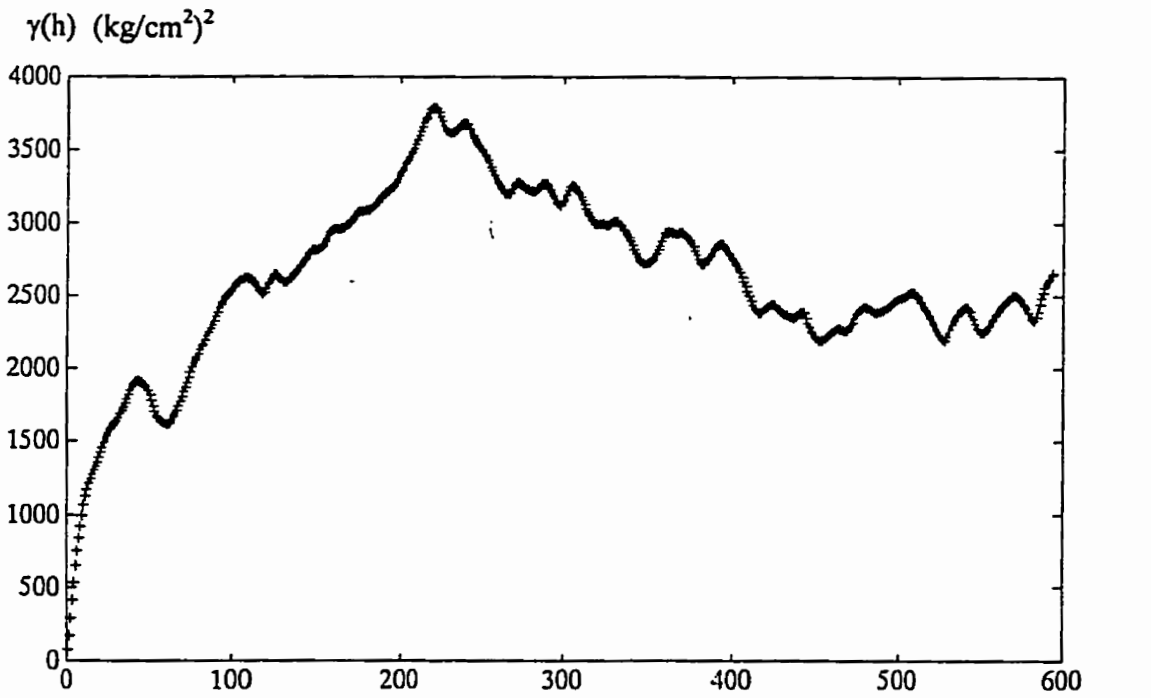


Figure 6.12: Demi-variogramme G3-12.

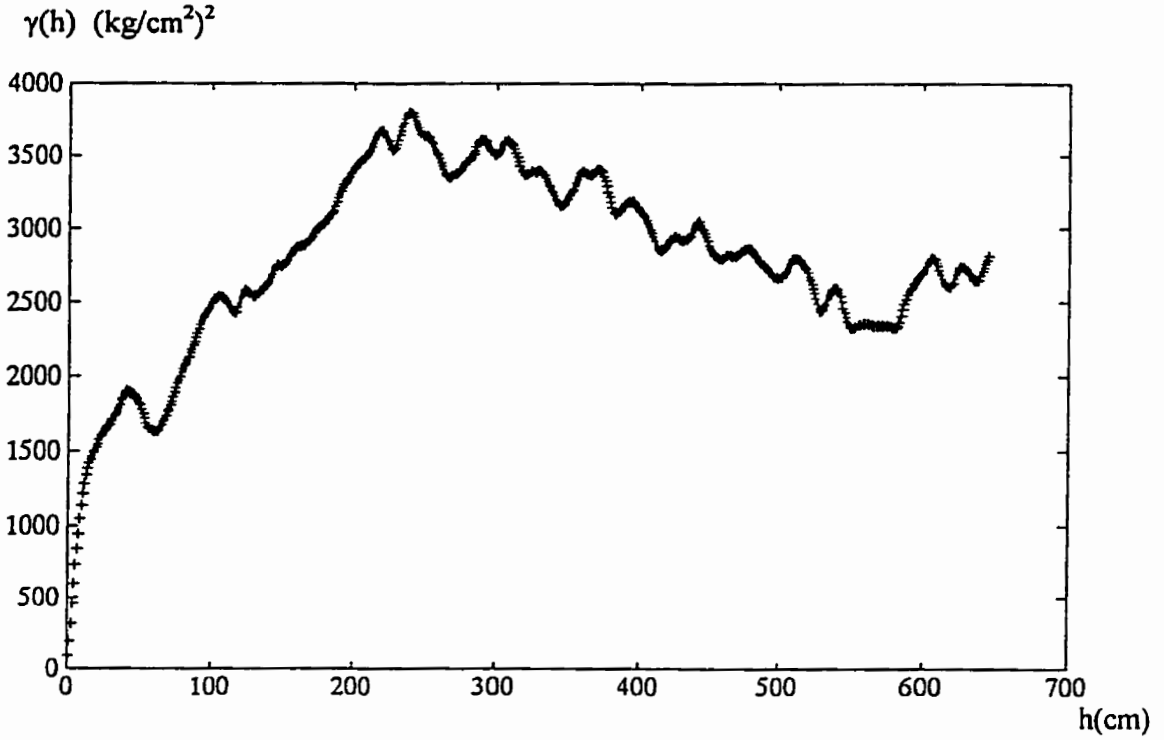


Figure 6.13: Demi-variogramme G3-13

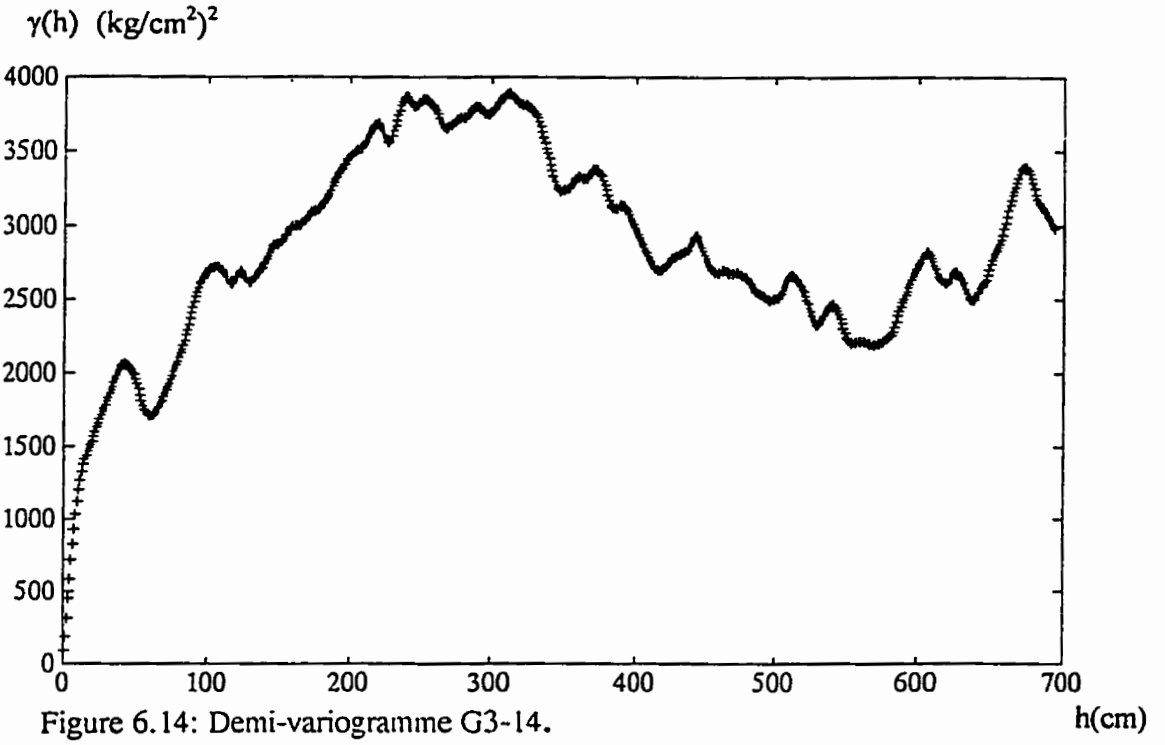


Figure 6.14: Demi-variogramme G3-14.

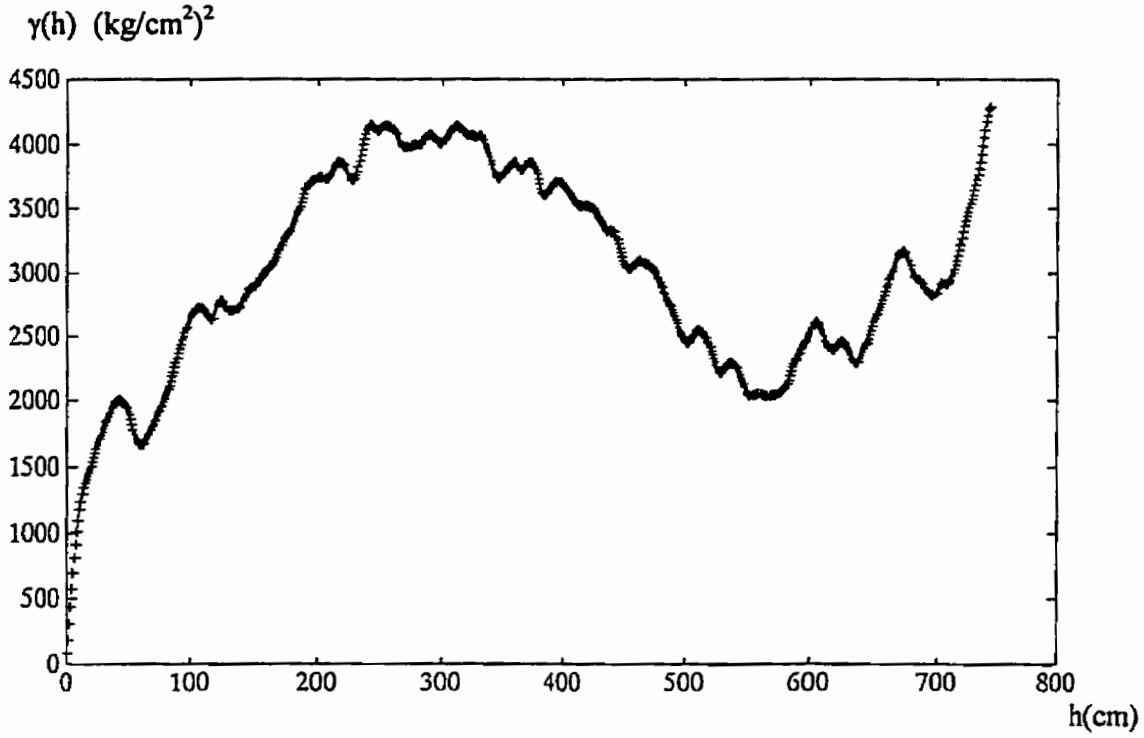


Figure 5.15: Demi-variogramme G3-15

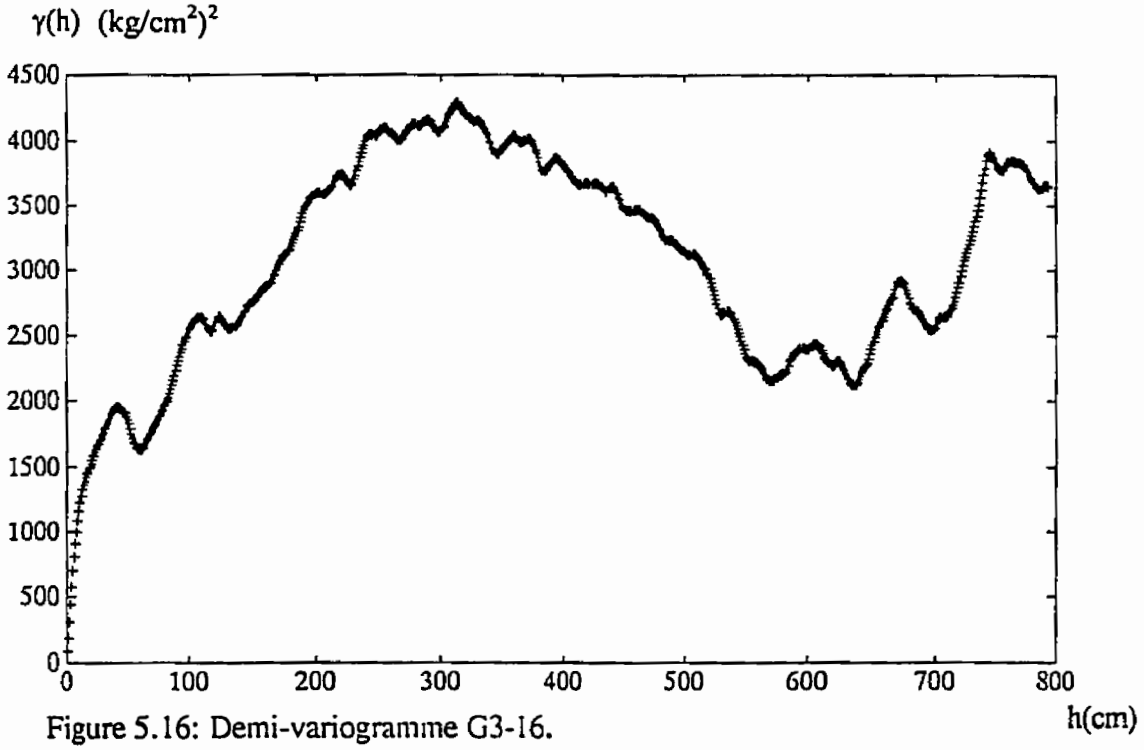


Figure 5.16: Demi-variogramme G3-16.

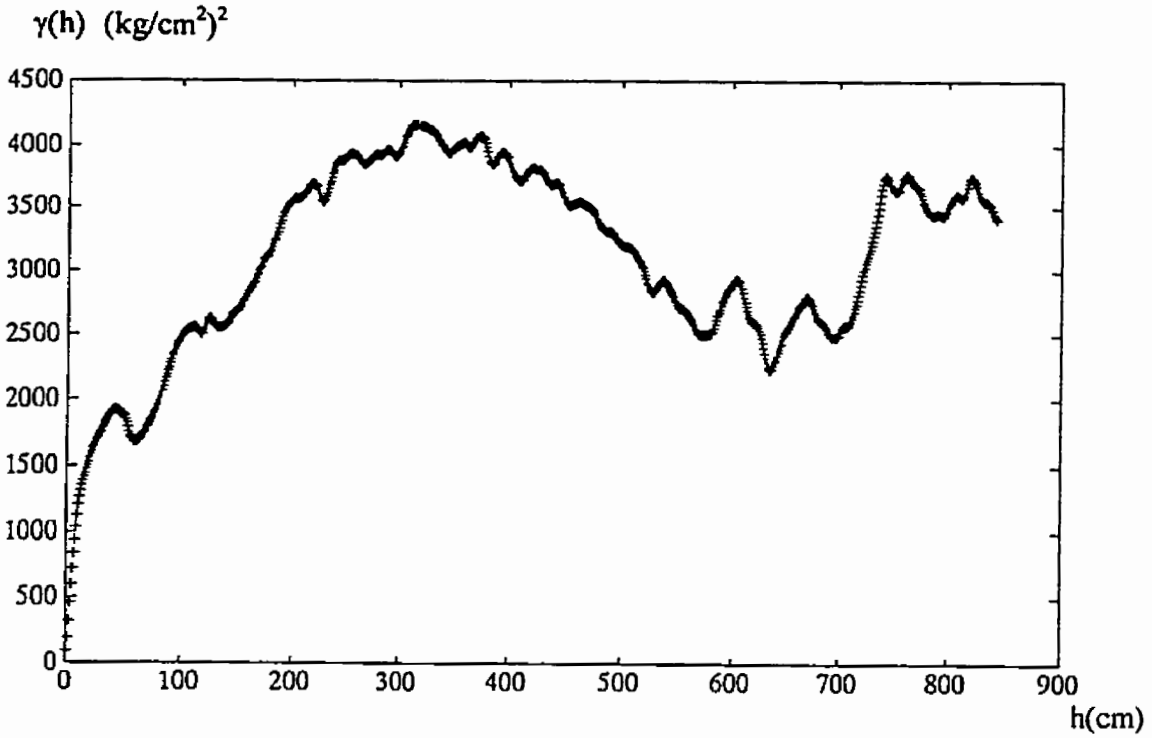


Figure 6.17: Demi-variogramme G3-17

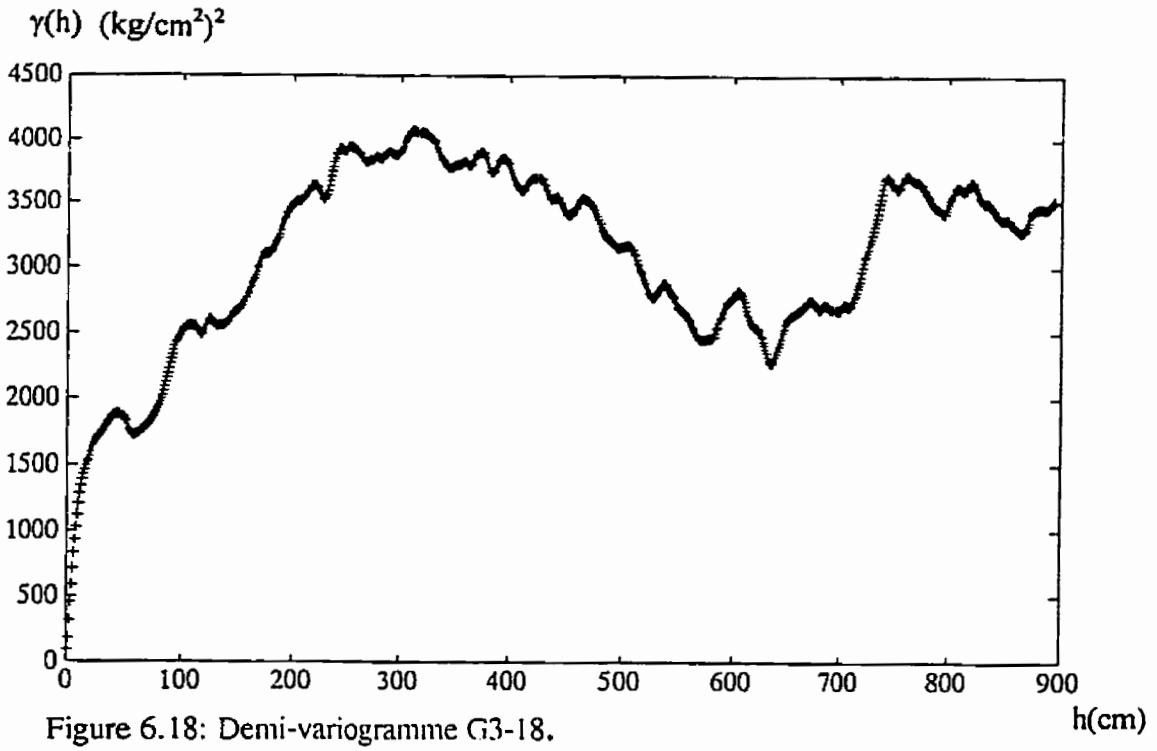


Figure 6.18: Demi-variogramme G3-18.

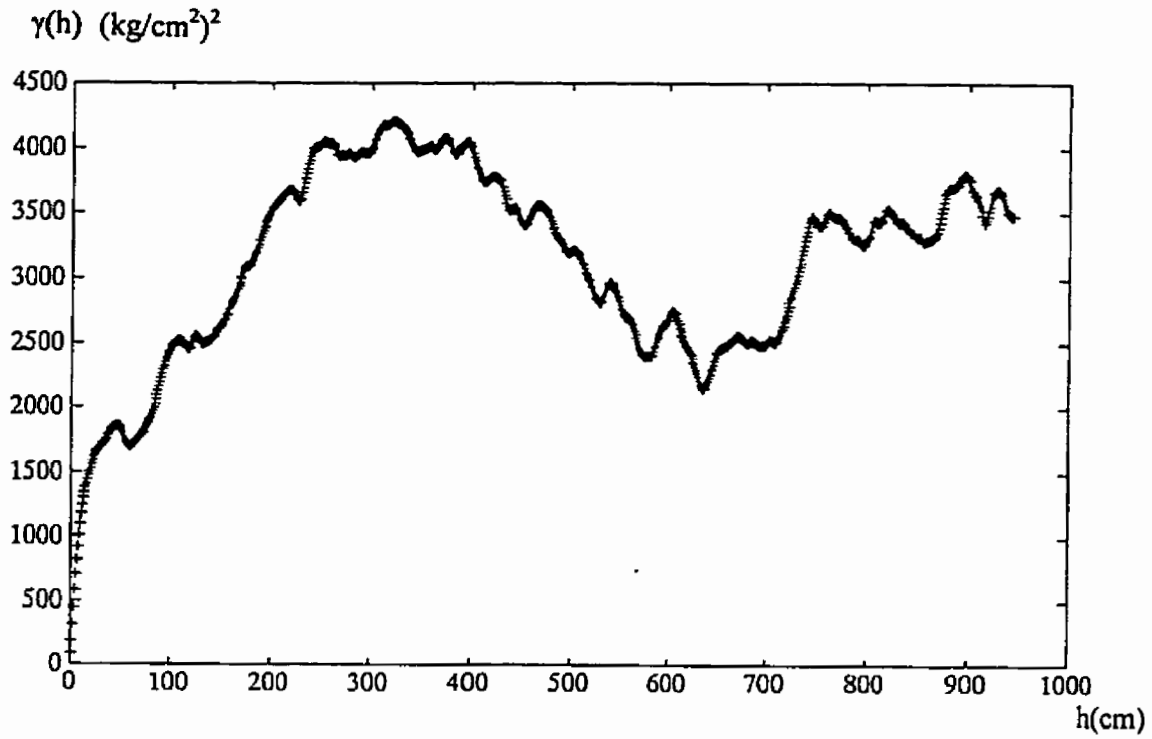


Figure 6.19: Demi-variogramme G3-19

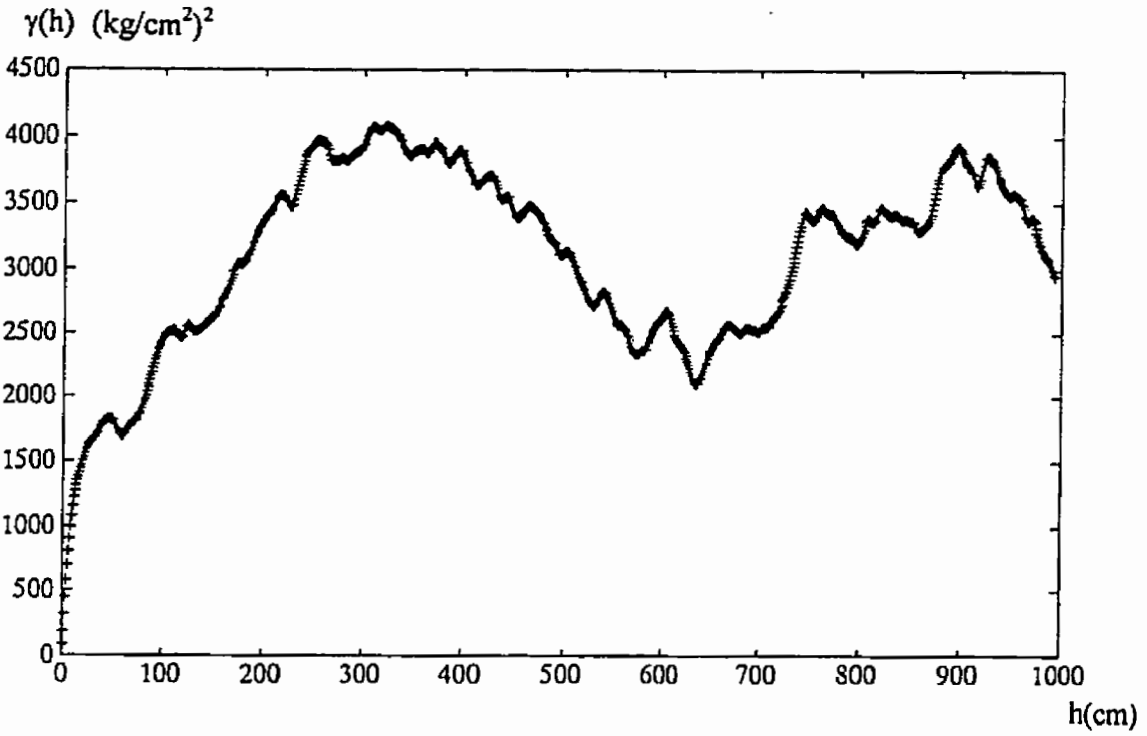


Figure 6.20: Demi-variogramme G3-20.

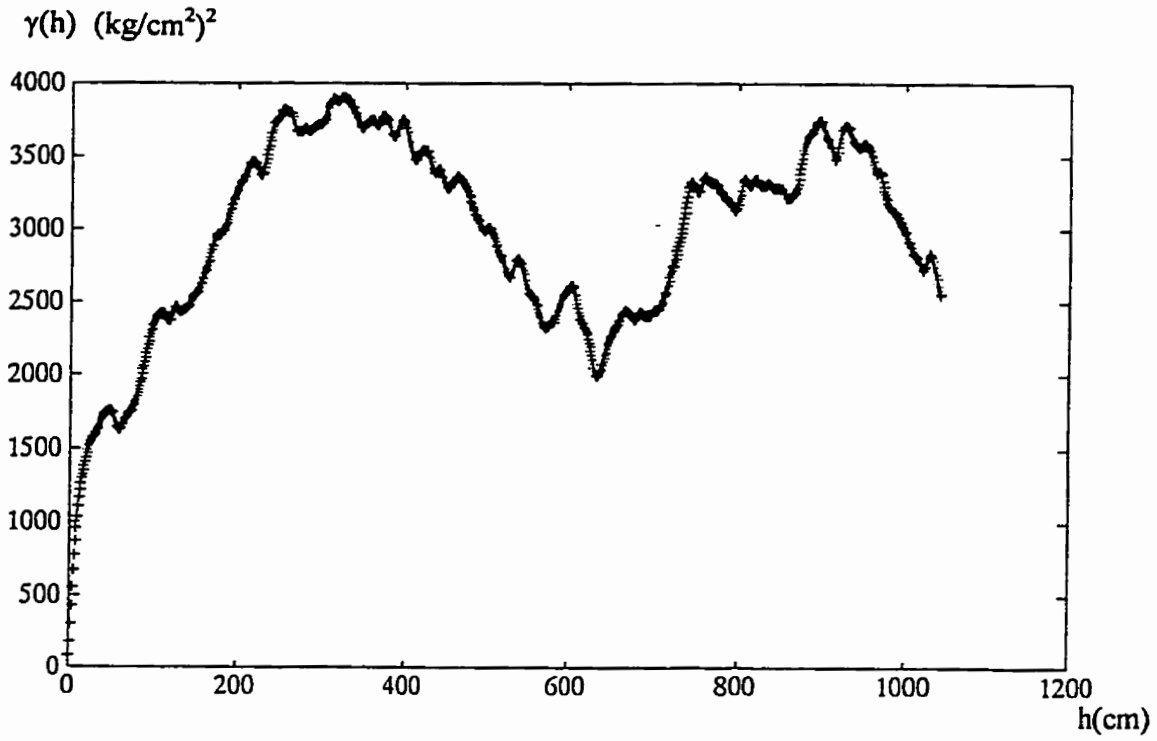


Figure 6.21: Demi-variogramme G3-21

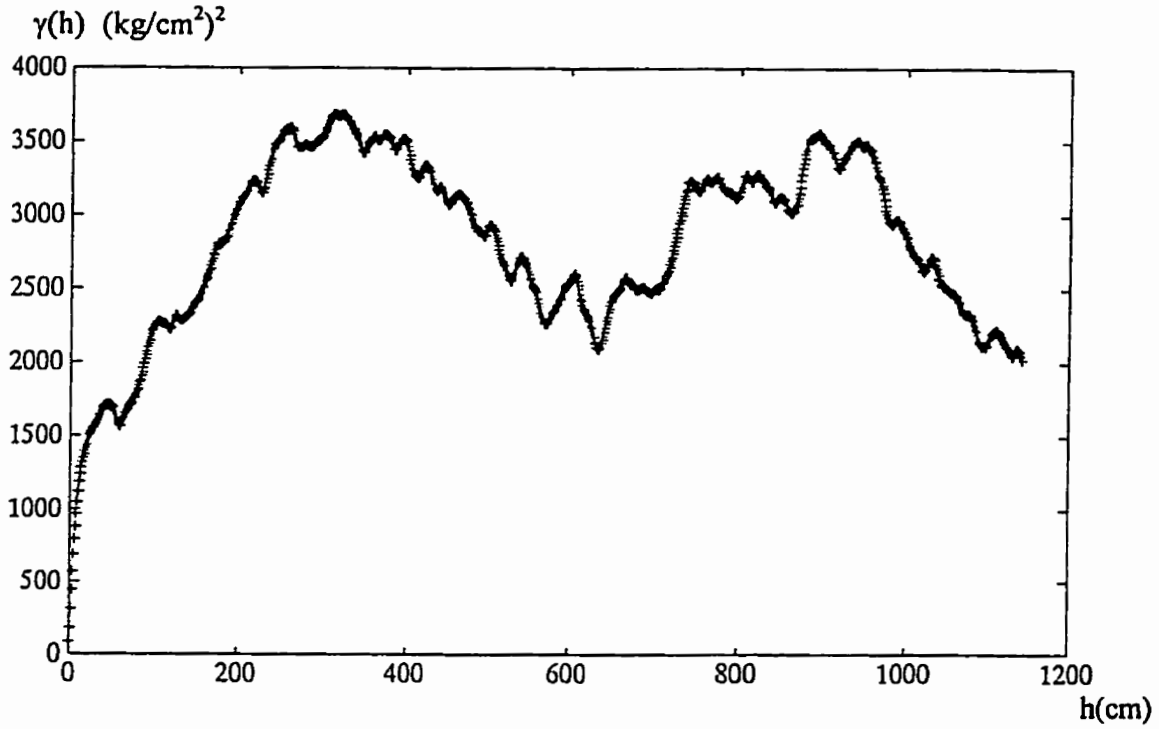


Figure 6.22: Demi-variogramme G3-22.

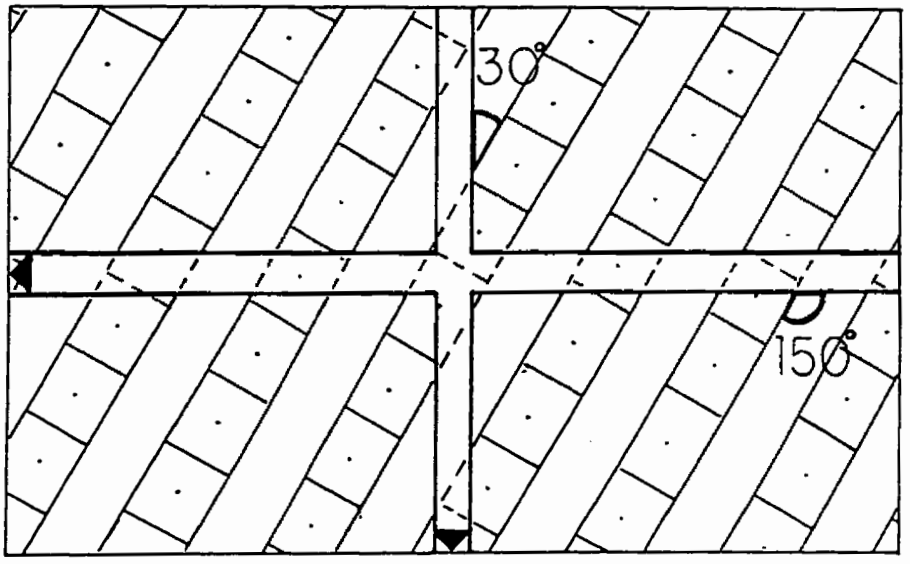


Figure 6.23 a: Schéma de sédimentation simple.

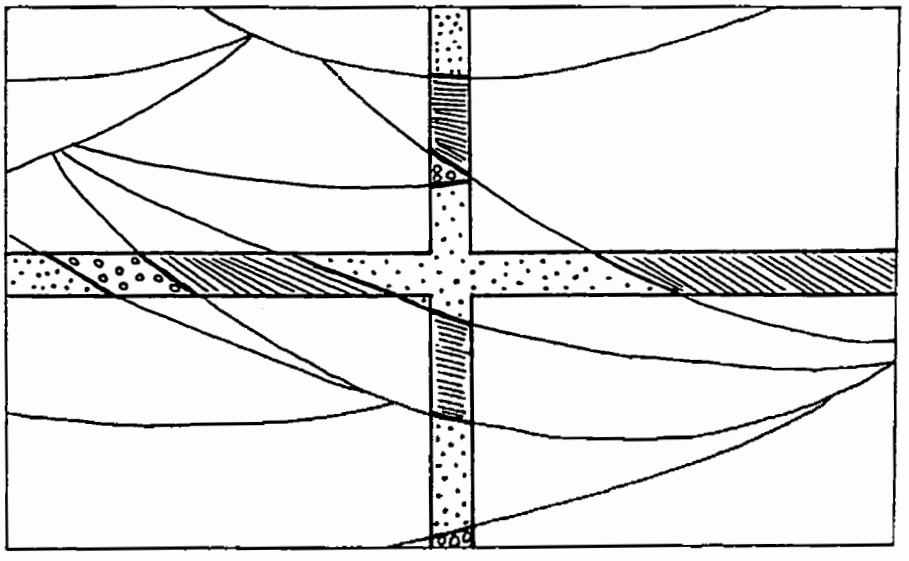


Figure 6.23 b: Schéma de sédimentation complexe.

CHAPITRE VII
CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Conclusions

Ce mémoire implique des données saisies par le système ENPASOL numérique lors d'exécution de forages avec tube carottier dans les Basses Terres du St-Laurent. Ces données sont traditionnellement traitées par examen visuel d'un profil résultant d'une combinaison quelconque de ces dernières. L'objectif du présent mémoire est d'analyser les résultats d'une combinaison des données saisies menant à la résistance au forage sous le jour des variables régionalisées et d'explorer ainsi la possibilité d'en tirer des renseignements utiles à la conception d'un programme optimal d'investigation géomécanique de sites.

7.1.1 L'allure générale des demi-variogrammes

L'étude a d'abord porté sur l'allure générale de quinze (15) segments de forage impliquant chacun une seule lithologie. Les conclusions auxquelles les DV expérimentaux des résistances au forage mesurées le long de ces quinze (15) segments ont mené sont:

- treize (13) des quinze (15) segments de forage montrent des effets de trou. Ces segments se situent soit dans le shale (G2, G3, G4, G6, G7, G8, G9, G10 et G11), soit dans le calcaire (G5, G13 et G14) ou soit dans le grès (G15);

- deux (2) des quinze (15) segments de forage ne montrent pas d'effet de trou. Le premier se situe dans le shale (G1) et le second, dans le calcaire (G12);

- si les effets de trou sont ignorés, les DV des quinze (15) segments sont adéquatement décrits à l'aide d'une combinaison modèle sphérique-modèle exponentiel sans effet de pépite. Les portées de la composante sphérique sont de l'ordre de 10 à 15 cm et représenteraient les dimensions des structures propres aux roches elles-mêmes. Les portées pratiques de la composante exponentielle sont de l'ordre de 1 à 3 m et découleraient des hétérogénéités à plus grande échelle;

- les amplitudes relatives des effets de trou des treize (13) DV qui en montrent varient de 0,075 à 0,441. Parmi ces treize (13) DV, les effets de trou de quatre (4) DV seraient directionnels (DV G3, DV G10, DV G13 et DV G14), alors que les autres seraient isotropes (DV G2, DV G4, DV G5, DV G6, DV G7, DV G8, DV G9, DV G11 et DV G15);

- les épaisseurs moyennes des couches à résistance au forage différentes varient de 1,15 à 3,80 m alors que les espacements moyens de ces couches varient de 2,10 à 6,35 m.

Donc, les formations de shale, de calcaire et de grès des Basses Terres du St-Laurent montrent des structures spatiales à petite échelle (de l'ordre de 10 cm) et à grande échelle (de l'ordre de quelques mètres). Les éprouvettes d'essais en laboratoire normalisées ont 5.4 cm de diamètre et 10.8 cm de hauteur. Les structures spatiales à petite échelle serait incluses dans de telles éprouvettes d'essais. La position des points de prélèvement des échantillons dans ces formations, échantillons à partir desquels les éprouvettes sont préparées, devrait tenir compte de la structure à grande échelle.

7.1.2 Les effets du changement des dimensions du support

L'étude a ensuite porté sur les effets du changements des dimensisons de support. Les données des segments de forage G1, G3 et G8 ont été utilisées pour les simulations. Les conclusions sont:

- dans tous les cas, les moyennes arithmétiques expérimentale des données ne montrent pas de variation significative mais leur variance expérimentale diminue avec l'accroissement de la dimension du support;

- dans le cas du G1, qui ne montre pas d'effet de trou quand la dimension du support est 1 cm, l'allure générale du DV se conserve, la portée augmente et un effet de pépite apparaît et augmente avec l'accroissement de la dimension du support (de 1 cm à 25 cm). Toutefois, il n'est pas évident que l'augmentation de la dimension du support au-delà de 25 cm entraînerait un DV à effet de pépite pur;

- le modèle combiné sphérique-exponentiel est adéquat pour décrire les DV du G1 lorsque la dimension du support est inférieure ou égale à 12 cm alors que par la suite, le modèle exponentiel seul donne le meilleur ajustement. Ceci est cohérent avec le fait que la portée du DV G1 (dimension de support de 1 cm) est 12 cm;

- dans le cas du G3, qui montre un effet de trou quand la dimension du support est 1 cm, l'allure générale du DV, les épaisseurs moyennes des couches et leur périodicité moyenne se conservent. Un effet de pépite apparaît et augmente avec l'accroissement de la dimension du support (de 1 cm à 25 cm). Il semble que l'augmentation de la dimension du support au-delà de 25 cm entraînerait éventuellement un DV à effet de pépite pur;

- dans les cas du G3 et G8, les amplitudes relatives des effets de trou que leurs DV montrent, augmentent avec l'accroissement de la dimension du support.

Découlant de ces conclusions sur les effets de changement de la dimension du support, il est évident que la méthodologie de l'échantillonnage doit tenir compte de l'échelle des essais. En effet, que ce soit un prélèvement d'échantillons pour la conduite d'essais sur des éprouvettes de dimensions autres que celles qui sont normalisées ou une localisation d'emplacements d'essais in situ de quelqu'échelle que ce soit, les résultats qui seront éventuellement obtenus de ces essais ne montreront leur véritable variabilité que si l'échelle est prise en ligne de compte.

7.1.3 Les effets du changement de l'espacement

En troisième lieu, les effets du changement du pas d'échantillonnage ont été étudiés. Les données des segments de forage G1, G3 et G8 ont été utilisées pour les simulations. Les conclusions sont:

- dans tous les cas, la moyenne arithmétique des données et leur variance ne montrent pas de variation significative avec l'accroissement de la dimension du pas;

- dans le cas du G1, qui ne montre pas d'effet de trou quand la dimension du pas est 1 cm, l'allure générale du DV se perd et évolue vers ce qui semble être un DV à un effet de pépite pur au fur et à mesure que le pas augmente (de 1 cm à 25 cm);

- le modèle combiné sphérique-exponentiel est adéquat pour décrire les DV du G1 lorsque le pas est inférieur ou égal à 3 cm alors que par la suite, le modèle sphérique seul donne le meilleur ajustement;

- dans le cas du G3, qui montre un effet de trou quand la dimension du pas est 1 cm, l'allure générale du DV, les épaisseurs moyennes des couches et leur périodicité moyenne se conservent. Un effet de pépite apparaît et oscille avec l'accroissement du pas (de 1 cm à 25 cm);

- dans les cas du G3 et G8, les amplitudes relatives des effets de trou que leurs DV montrent ne varient pratiquement pas avec l'accroissement du pas.

Les conclusions précédentes sont importantes dans le cas des essais index plus ou moins ponctuels utilisés comme moyens de réalisation d'une diagraphie mécanique. Les essais de poinçonnement des parois de trous de forage ou encore les essais de dureté sur des carottes de forage sont des exemples de tels essais. Une des utilisations faite de ces diagraphies est la détermination d'un schéma de prélèvement d'échantillons ou de localisation d'emplacements d'essais in situ. Puisque l'espacement entre les points de mesure a une grande influence sur l'allure du demi-variogramme obtenu, il faut s'assurer que ce dernier indiquera les caractéristiques nécessaires.

7.1.4 La structure géologique

Si on accepte le principe que plus la portion d'une formation géologique se situe près d'une zone de faille, plus elle aurait subit les effets des forces tectoniques, les conclusions suivantes peuvent être tirées des DV G1, DV G2, DV G3, DV G4, DV G6, DV G7, DV G8, DV G9, DV G10 et DV G11, qui impliquent tous le shale:

- la variance expérimentale diminue au fur et à mesure que la distance du forage de la zone de faille augmente, sauf pour les forages G6 et G3;

- les moyennes arithmétiques ne montrent aucune tendance particulière;

- la variance totale obtenue de la modélisation avec la combinaison modèle sphérique-modèle exponentiel diminue au fur et à mesure que la distance à la faille augmente, sauf pour les DV G9 et DV G3. Cette tendance découle surtout de la composante

sphérique du modèle combiné et serait surtout reliée à des structures spatiales à petite échelle. Le fait que la portée de la composante sphérique de la combinaison modèle sphérique-modèle exponentiel diminue aussi au fur et à mesure que la distance à la faille augmente (sauf pour le DV G3) confirme que le tectonisme aurait affecté le shale à petite échelle;

Cet ensemble de conclusions permet d'affirmer qu'une même formation peut conduire à des schémas d'échantillonnage différents selon la position de la zone considérée par rapport aux éléments majeurs de la structure géologique.

7.1.5 La détection des changements de lithologie

Finalement, les combinaisons de données faites dans le but de simuler le passage d'une lithologie à une autre, ont conduit aux conclusions qui suivent:

- il est possible de détecter le passage d'une lithologie à une autre dans certaines circonstances. Pour ce faire, il faut connaître le DV de la première lithologie et pouvoir faire des mises à jour continuelles de ce dernier au fur et à mesure que le forage se poursuit.

- lorsque le contraste entre les propriétés des deux lithologies est grand, le DV original est immédiatement modifié par les données captées dans la deuxième lithologie. Une simulation faite en partant du shale a permis de détecter le passage au calcaire avec un mètre de données.

- lorsque le contraste est moins marqué ou progressif, la détection requiert un plus grand nombre de données provenant de la deuxième lithologie, donc une plus grande distance forée dans cette dernière. Une simulation faite en partant du grès a nécessité 5 m de données dans le gneiss pour détecter le passage à la deuxième lithologie. Dans

ces conditions, il est alors possible de traverser l'épaisseur de la strate de la deuxième lithologie sans détecter un changement. Une simulation faite en partant du calcaire et traversant 3 m de grès n'a pas modifié le DV original du calcaire de façon à pouvoir reconnaître un changement de lithologie.

7.2 Recommandation

L'étude dont le présent document fait état se veut exploratoire. Il est donc évident que les travaux doivent être continués et que d'autres aspects doivent aussi être considérés.

D'autre part, les outils disponibles comportaient des limites et leur modification ne cadrait pas dans les objectifs de l'étude.

Ces prémisses font que dans l'esprit de l'auteur de ce mémoire, les points qui apparaissent les plus intéressants sont:

- définir, à partir des données saisies par le système ENPASOL numérique, une résistance au forage qui serait mieux adaptée au mécanisme du forage avec carottier et qui serait indépendante de la résistance en compression simple;

- procéder à un traitement initial des données saisies de façon à s'assurer que les effets de débuts et de fins de courses soient complètement éliminés;

- développer les outils informatiques requis pour produire des DV simultanément au forage pour appliquer la méthodologie simulée dans le présent mémoire de détection de changement de lithologie quand le système ENPASOL numérique est couplé à des foreuses sans tube carottier;

- développer les outils informatiques requis pour produire des DV simultanément au forage pour appliquer la méthodologie simulée dans le présent mémoire de détection de changement de lithologie quand le système ENPASOL numérique est couplé à des foreuses sans tube carottier;

- traiter des données provenant des trous de forage rapprochés d'orientation suffisamment différents pour statuer sur le type d'effet de trou propre aux formations des Basses Terres du St-Laurent;

- tester les conclusions tirées dans ce mémoire en procédant à des essais index en pseudo-continu dans les mêmes formations et dans la même région géographique.

RÉFÉRENCES

ADISOMA, G. S. et DAEMEN, J. J. K. (1988). Application of regionalized variables for blast vibration analysis and predictions. Proc. 29 US. Symp. Rock Mech., Minneapolis, 579-586.

BARLA, G., SCAVIA, C., ANTONELLIS, M. et GUARASCIO, M. (1987). Characterization of rock mass by geostatistical analysis at the Masua Mine. Proc.6th ISRM Cong. Montréal, 777-786.

BAECHER, G. B. (1983). Geostatistics, reliability and risk assessment in geotechnical engineering. Geostatistics for natural resources characterization, Part 2. 731-744.

BUCKLEY, J. T., KIM, Y. C., NATARAJA, M. S. et TIKTINSKY, D. H (1986). Evaluating host rock representativeness through geostatistics. Proc. 27 US. Symp. Rock Mech. Tuscalousa, 821-826.

CARTER, M. A., SCOBLE, M. J., PECK, J. et BENSOUSSAN, A. (1988). Rock mass characterization from drilling. Proc. 15 th Canadian Rock Mechanics Symposium.

CLARK, I. (1979). The semivariogram - Part 1. Engng. Min. Journal. Vol. 180, no 7; 90-94.

DAVIS, J. C. (1986). Statistics and data analysis in geology. 2 edition, John Wiley & Sons Inc. 645 p.

DUBART, J. Ch. et JOSIEN, J. P. (1973). Méthode de caractérisation des épontes rocheuses. Revue de l'Industrie Minérale - Mines. Novembre. 269-277.

GAVIGLIO, P. et CARRIO, E. (1993). Contexte géologique et variations des propriétés physiques d'un calcaire tendre. Proc. Geotechnical Engineering of Hard Soils - Soft Rocks. Symp. Vol. 1. 99-104.

GIRARD, H., MORLIER, P., PUVILLAND, O. et GARZON, M. (1986). The digital ENPASOL method. Exploitation of drilling parameters in civil engineering. Proc. 39th Canadian Geotechnical Conference, 59-68.

GLOBENSKY, J. (1987). Géologie des Basses-Terres du Saint-Laurent. Ministère de l'énergie et des ressources. Québec. 42 p.

HOERGER, S. F. et YOUNG, D. S. (1986). Non parametric approach for local probability distributions of rock joints. Proc. 27 US. Symp. Rock Mech. Tuscaloosa. 436-442.

ISAAKS, E. H. Et SRIVASTAVA, R. M. (1989). An introduction to applied geostatistics. Oxford University Press, 561p.

JOURNEL, A. G. et HUIJBREGTS, Ch. J. F. (1978). Mining Geostatistics. Academic Press, 600p.

KULATILAKE, P. H. S. W. et SOUTHWORTH, R. K. (1987). Spatial variation estimation of soil in one dimension for regularly spaced data. Proc. Prediction and Performance in Geotechnical Engineering, 429-437.

LAPOINTE, P. R. (1980). Analysis of spatial variation in rock mass properties through geostatistics. Proc. 21st U.S. Symp. On rock mechanics, 775 -786.

LAPOINTE, P. R. (1981). Improved numerical modeling of rock masses through geostatistical characterization. Proc. 22 US. Symp. Rock Mech. Cambridge. 386-391.

MARCOTTE, D. (1996). Fast variogram computation with FFT. Computers and Geosciences. (sous presse).

MATAR, J. A., MATAR de SARQUIS, M. A., GIRARDI, J. P. et TABBIA, G. H. (1986). Geostatistical investigations of rock masses: The Sierra del Medio case. Proc. 5th Int. IAEG. Cong. Buenos Aires, Argentine, 47-52.

MILLER, S. M. (1979). Geotechnical analysis for evaluating spatial dependence in fracture set characteristics. Proc. 16 APCOM. Tucson. 537-545.

NGUYEN, V. U. et BAAFI, E. Y. (1986). Site caracterization by geostatistics. Proc. Speciality geomechanics Symposium. Adelaide, Australia, 111-117.

OUELLET, J., GILL, D. E. , SOULIÉ, M. (1987). Geostatistical approach to the study of induced damage underground rock excavations. Can. Geot. J. Vol 24, No. 3. 384-391.

OUELLET, J. et GILL, D. E. (1987). Application des méthodes géostatistiques à l'investigation des massifs rocheux: une nouvelle approche. Proc. 5th Conf. on applicationss of statistics and probability in soil and structural engng. Vol 2, 686-693.

PINEAU, A. et THOMAS, A. (1983). Regionalisation des propriétés mécaniques des roches. Approche structurale geostatistique. Proc. 5th ISRM Cong., Melbourne. B23-B27.

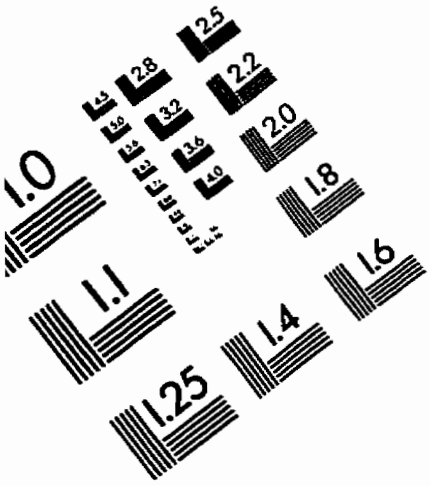
PRETORIUS, J. P. G. (1980). The estimation of the experimental and basic components of the observed variance of rock strength. Rock Mechanics, 13, 119-130.

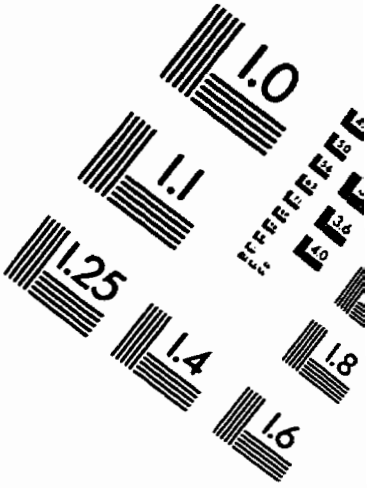
RANCOURT, A. (1996). Caractérisation de la variabilité des propriétés mécaniques des roches au moyen d'un essai index in situ. Mémoire de maîtrise. École Polytechnique, Montréal. 155p.

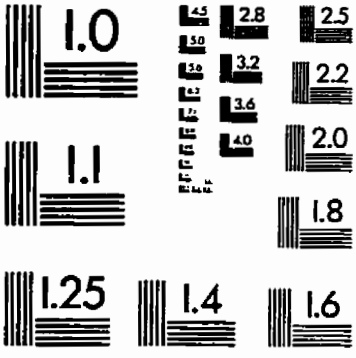
RENDU, J-P. (1982). Interactive graphics for semivariogram modelling. Society of Mining Engineers of AIME. 1-13.

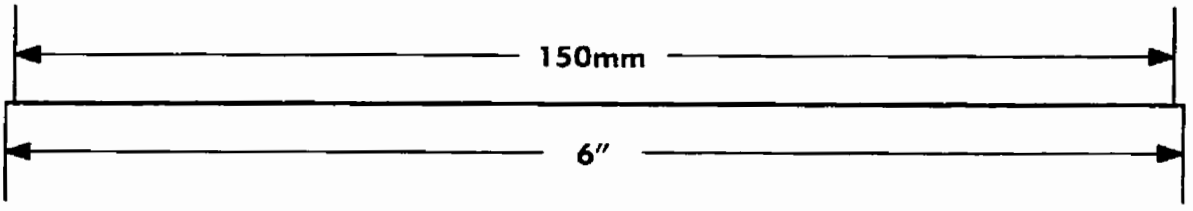
SOULIÉ, M. (1983). Geostatistical applications in geotechnics. Geostatistics for natural resources characterization. Part 2. 703-730.

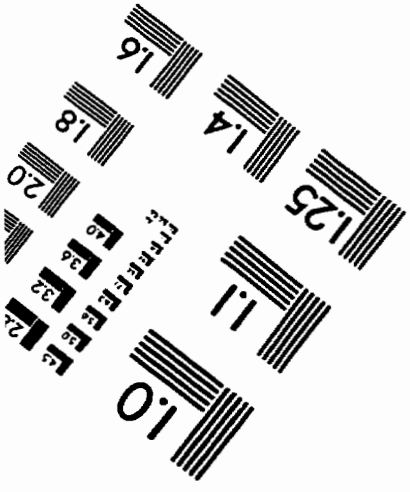
IMAGE EVALUATION TEST TARGET (QA-3)

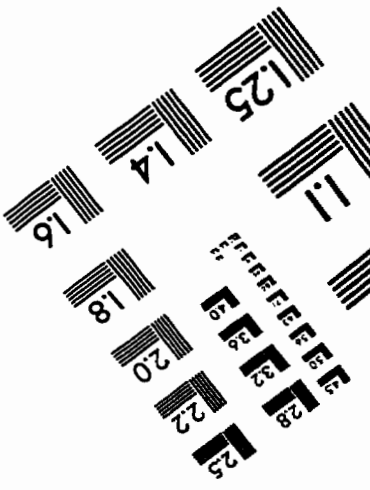












APPLIED IMAGE, Inc
1653 East Main Street
Rochester, NY 14609 USA
Phone: 716/482-0300
Fax: 716/288-5989

© 1993, Applied Image, Inc., All Rights Reserved