

Record Number:

Author, Monographic: Guertin, K. V.//Villeneuve, J. P.//Deschênes, S.//Dubé, C.

Author Role:

Title, Monographic: Modélisation de la structure temporelle et spatiale d'images infrarouges.
Tome 2 - Méthodes géostatistiques appliquées à la synthèse et à la reproduction d'images DAEDALUS

Translated Title:

Reprint Status:

Edition:

Author, Subsidiary:

Author Role:

Place of Publication: Québec

Publisher Name: INRS-Eau

Date of Publication: 1987

Original Publication Date:

Volume Identification:

Extent of Work: 220

Packaging Method: pages

Series Editor:

Series Editor Role:

Series Title: INRS-Eau, Rapport de recherche

Series Volume ID: 222

Location/URL:

ISBN: 2-89146-220-3

Notes: Rapport annuel 1987-1988

Abstract: Rapport rédigé pour Approvisionnement et Services Canada, et le Centre de recherche pour la défense de Valcartier
10.00\$

Call Number: R000222

Keywords: rapport/ ok/ dl

RAPPORT FINAL

MÉTHODES GÉOSTATISTIQUES APPLIQUÉES
À LA SYNTHÈSE ET À LA REPRODUCTION
D'IMAGES DAEDALUS

RAPPORT SCIENTIFIQUE 222

par

Kateri GUERTIN
Jean-Pierre VILLENEUVE
Sylvain DESCHÈNES
Clément DUBÉ

INRS-Eau, Université du Québec, Case postale 7500,
2700, rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7

Dossier MAS: 16SD.97701-4-23571
INRS : SB-43040147

RAPPORT FINAL

MODÉLISATION DE LA STRUCTURE
TEMPORELLE ET SPATIALE
D'IMAGES INFRAROUGES

par

Jean-Pierre VILLENEUVE
Jean-Pierre FORTIN
Kateri GUERTIN
Jocelyn OUELLET
Clément DUBÉ
Claude BLANCHETTE
Sylvain DESCHÈNES
Sylvain HOULE
Jean LACROIX

TOME II

MÉTHODES GÉOSTATISTIQUES APPLIQUÉES
À LA SYNTHÈSE ET À LA REPRODUCTION
D'IMAGES DAEDALUS

INRS-Eau, Université du Québec, case postale 7500
2700, rue Einstein, Sainte-Foy (Québec) G1V 4C7

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION
2. INFORMATION DISPONIBLE
3. TRAITEMENT D'IMAGES À COUVERT UNIQUE
 - 3.1 Synthèse de l'information
 - 3.1.1 Le semi-variogramme
 - 3.1.2 L'échantillonnage
 - 3.2 Reproduction de l'image
 - 3.3 Évaluation de l'image reproduite
 - 3.4 Exemple d'application
 - 3.4.1 Synthèse et échantillonnage de l'image-forêt
 - 3.4.2 Reproduction de l'image-forêt par krigeage
 - 3.4.3 Évaluation de l'image-forêt krigée
 - 3.5 Commentaires sur le traitement appliqué en présence d'une image à couvert unique
4. TRAITEMENTS D'IMAGES À COUVERTS MULTIPLES
 - 4.1 Traitement/couvert avec semi-variogrammes/couvert/image
 - 4.1.1 Classification par couvert des pixels de l'image
 - 4.1.2 Synthèse de l'information
 - 4.1.3 Reproduction de l'image
 - 4.1.4 Évaluation de l'image reproduite
 - 4.2 Traitement/couvert avec semi-variogrammes/couvert/vol
 - 4.3 Exemple d'application
 - 4.3.1 Traitement unique de l'image trimodale
 - 4.3.2 Traitement par couvert de l'image trimodale avec semi-variogrammes/couvert/image

- 4.3.3 Traitement par couvert de l'image trimodale avec semi-variogrammes/couvert/vol
- 4.3.4 Évaluation des trois traitements appliqués à l'image trimodale

4.4 Commentaires sur les traitements appliqués en présence d'une image à couverts multiples

5. CONCLUSION

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXE-A - INTRODUCTION AU KRIGEAGE ORDINAIRE

- A.1 Variable régionalisée et fonction aléatoire
- A.2 Le semi-variogramme
- A.3 La variance d'estimation
- A.4 Le krigeage ordinaire

ANNEXE-B - EXEMPLES D'APPLICATION POUR IMAGES À COUVERT UNIQUE

- B.1 Exemple 1: Image-culture (C35)
- B.2 Exemple 2: Image urbaine (U35)

ANNEXE-C - EXEMPLES D'APPLICATION POUR IMAGES À COUVERTS MULTIPLES

- C.1 Exemple 1: Image à couverts forestier, agricole et urbain (R35)
- C.2 Exemple 2: Image à couverts agricole et urbain (X35)

ANNEXE-D - EFFET DU BRUIT DU CAPTEUR DANS L'ANALYSE D'IMAGES DAEDALUS

- D.1 Effet du bruit du capteur dans le calcul des semi-variogrammes directionnels d'images urbaines
- D.2 Effet du bruit du capteur dans le calcul des semi-variogrammes directionnels d'images-eau.
- D.3 Commentaires

LISTE DES FIGURES

- Figure 1. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et à pas constant de 4 pixels (b) avec modèle ajusté sur une distance de 16 pixels.
- Figure 2. Echantillonnage des 320 valeurs extrêmes locales de l'image-forêt F35.
- Figure 3. Distribution normale de la valeur d'irradiance VV avec moyenne VK et variance VE et délimitation des zones d'erreurs relatives sévères (ERS) positives, nulles et négatives.
- Figure 4. Organigramme de la procédure de traitement d'images à couvert unique.
- Figure 5. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour l'image-forêt F35.
- Figure 6. Histogramme des 4096 valeurs vraies de l'image-forêt F35.
- Figure 7. Histogramme des 320 valeurs échantillonnées de l'image-forêt F35.
- Figure 8. Isolignes (1,3,5 μF) des écarts-types d'estimation de l'image-forêt F35.
- Figure 9. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image-forêt F35.

- Figure 10. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image-forêt F35.
- Figure 11. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-forêt F35 basées sur 320 échantillons.
- Figure 12. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image-forêt F35.
- Figure 13. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-forêt F35 basées sur 320 échantillons.
- Figure 14. Reproduction-couleurs des valeurs vraies de l'image-forêt F35.
- Figure 15. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image-forêt F35 basées sur 320 échantillons.
- Figure 16. Histogramme des 4096 rapports d'erreurs (RER) de l'image-forêt F35 basés sur 320 échantillons.
- Figure 17. Scattérogramme 1 de l'image F35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) à partir de 320 échantillons - coefficient de corrélation de .937.
- Figure 18. Echantillonnage de 256 valeurs régulièrement réparties dans l'image-forêt F35.

- Figure 19. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-forêt F35 basées sur 256 échantillons.
- Figure 20. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-forêt F35 basées sur 256 échantillons.
- Figure 21. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image-forêt F35 basées sur 256 échantillons.
- Figure 22. Scattérogramme 2 de l'image F35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) basées sur 256 échantillons - coefficient de corrélation de .922.
- Figure 23. Organigramme de la procédure de traitement par couvert d'images multimodales avec semi-variogrammes/couvert/image.
- Figure 24. Histogramme des 4096 valeurs vraies de l'image trimodale Q35.
- Figure 25. Organigramme de la procédure de traitement par couvert d'images multimodales avec semi-variogrammes/couvert/vol.
- Figure 26. Histogramme des 320 valeurs échantillonnées de l'image trimodale Q35.
- Figure 27. Semi-variogrammes directionnels à pas variable et modèle isotrope de l'image trimodale Q35 - traitement 1.

- Figure 28. Matrice indicatrice issue de la classification des pixels de l'image Q35 en couverts forestier (0), agricole (1) et urbain (2).
- Figure 29. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert forestier de l'image Q35 - traitement 2.
- Figure 30. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert agricole de l'image Q35 - traitement 2.
- Figure 31. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert urbain de l'image Q35 - traitement 2.
- Figure 32. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-forêt F35 utilisés pour le traitement 3 de l'image Q35.
- Figure 33. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-culture C35 utilisés pour le traitement 3 de l'image Q35.
- Figure 34. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image urbaine U35 utilisés pour le traitement 3 de l'image Q35.
- Figure 35. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image Q35 - traitement 1.

- Figure 36. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image Q35 - traitement 2.
- Figure 37. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image Q35 - traitement 3.
- Figure 38. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image trimodale Q35.
- Figure 39. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image trimodale de Q35.
- Figure 40. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 1.
- Figure 41. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 1.
- Figure 42. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 2.
- Figure 43. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 2.
- Figure 44. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 3.

- Figure 45. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 3.
- Figure 46. Reproduction-couleurs des valeurs vraies de l'image trimodale Q35.
- Figure 47. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image trimodale Q35 - traitement 1.
- Figure 48. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image trimodale Q35 - traitement 2.
- Figure 49. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image trimodale Q35 - traitement 3.
- Figure 50. Scattérogramme 1 de l'image Q35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) issues du traitement 1 - coefficient de corrélation de .949.
- Figure 51. Scattérogramme 2 de l'image Q35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) issues du traitement 2 - coefficient de corrélation de .958.
- Figure 52. Scattérogramme 3 de l'image Q35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) issues du traitement 3 - coefficient de corrélation de .958.

Figure 53. Isolignes (1,3,5,7 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image Q35 - traitement 1.

Figure 54. Isolignes (1,3,5,7 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image Q35 - traitement 2.

Figure 55. Isolignes (1,3,5,7,9,11,13,15 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image Q35 - traitement 3.

Figure 56. Reproduction-couleurs des erreurs (VV-VK) de l'image Q35 - traitement 1.

Figure 57. Reproduction-couleurs des erreurs (VV-VK) de l'image Q35 - traitement 2.

Figure 58. Reproduction-couleurs des erreurs (VV-VK) de l'image Q35 - traitement 3.

Figure A1. Double nature d'une variable régionalisée $r(x)$.

Figure A2. Semi-variogramme expérimental et modèle d'ajustement.

Figure A3. Anisotropie zonale.

Figure B1. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour l'image-culture C35.

Figure B2. Histogramme des 4096 valeurs vraies de l'image-culture C35.

Figure B3. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image-culture C35.

Figure B4. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image-culture C35.

Figure B5. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-culture C35.

Figure B6. Scattérogramme de l'image C35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image C35 - coefficient de corrélation de .912.

Figure B7. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour l'image urbaine U35.

Figure B8. Histogramme des 4096 valeurs vraies de l'image urbaine U35.

Figure B9. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image urbaine U35.

- Figure B10. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image urbaine U35.
- Figure B11. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image urbaine U35.
- Figure B12. Scattérogramme de l'image U35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image U35 - coefficient de corrélation de .742.
- Figure C1. Histogramme des 4096 valeurs vraies de l'image R35.
- Figure C2. Matrice indicatrice issue de la classification des pixels de l'image R35 en couverts forestier (0), agricole (1) et urbain (2).
- Figure C3. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image R35 - traitement 1.
- Figure C4. Semi-variogrammes directionnels à pas variable et modèle isotrope pour le couvert forestier de l'image R35 - traitement 2.
- Figure C5. Semi-variogrammes directionnels à pas variable et modèle isotrope pour le couvert agricole de l'image R35 - traitement 2.
- Figure C6. Semi-variogrammes directionnels à pas variable et modèle isotrope pour le couvert urbain de l'image R35 - traitement 2.

Figure C7. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-forêt F35 utilisés pour le traitement 3 de l'image R35.

Figure C8. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-culture C35 utilisés pour le traitement 3 de l'image R35.

Figure C9. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image urbaine U35 utilisés pour le traitement 3 de l'image R35.

Figure C10. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image R35 - traitement 1.

Figure C11. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image R35 - traitement 2.

Figure C12. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image R35 - traitement 3.

Figure C13. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image R35.

Figure C14. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image R35.

Figure C15. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 1.

Figure C16. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 1.

Figure C17. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 2.

Figure C18. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 2.

Figure C19. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 3.

Figure C20. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 3.

Figure C21. Scattérogramme 1 de l'image R35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image R35 issues du traitement 1 - coefficient de corrélation de .753.

Figure C22. Scattérogramme 2 de l'image R35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image R35 issues du traitement 2 - coefficient de corrélation de .911.

Figure C23. Scattérogramme 3 de l'image R35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image R35 issues du traitement 3 - coefficient de corrélation de .907.

- Figure C24. Isolignes (3,8,13 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image R35 - traitement 1.
- Figure C25. Isolignes (3,8 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image R35 - traitement 2.
- Figure C26. Isolignes (3,8,13 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image R35 - traitement 3.
- Figure C27. Histogramme des 4096 valeurs vraies de l'image X35.
- Figure C28. Matrice indicatrice issue de la classification des pixels de l'image X35 en couverts urbain (0) et agricole (1).
- Figure C29. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image X35 - traitement 1.
- Figure C30. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert agricole de l'image X35 - traitement 2.
- Figure C31. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert urbain de l'image X35 - traitement 2.
- Figure C32. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-culture C35 utilisés pour le traitement 3 de l'image X35.

- Figure C33. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image urbaine U35 utilisés pour le traitement 3 de l'image X35.
- Figure C34. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image X35 - traitement 1.
- Figure C35. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image X35 - traitement 2.
- Figure C36. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image X35 - traitement 3.
- Figure C37. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image X35.
- Figure C38. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image X35.
- Figure C39. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 1.
- Figure C40. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 1.
- Figure C41. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 2.

- Figure C42. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 2.
- Figure C43. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 3.
- Figure C44. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 3.
- Figure C45. Scattérogramme 1 de l'image X35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image X35 issues du traitement 1 - coefficient de corrélation de .883.
- Figure C46. Scattérogramme 2 de l'image X35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image X35 issues du traitement 2 - coefficient de corrélation de .920.
- Figure C47. Scattérogramme 3 de l'image X35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image X35 issues du traitement 3 - coefficient de corrélation de .918.
- Figure C48. Isolignes (2,5,8,11 μF) des écarts-types d'estimation de l'image X35 - traitement 1.
- Figure C49. Isolignes (2,5,8 μF) des écarts-types d'estimation de l'image X35 - traitement 2.
- Figure C50. Isolignes (2,5,8,11,14 μF) des écarts-types d'estimation de l'image X35 - traitement 3.

Figure D1. Semi-variogrammes directionnels à pas constants de 1 (a) et 4 (b) pixels pour l'image urbaine UR34 - vol est-ouest.

Figure D2. Semi-variogrammes directionnels à pas constants de 1 (a) et 4 (b) pixels pour l'image urbaine UR35 - vol nord-sud.

Figure D3. Semi-variogrammes directionnels à pas variable pour l'image-eau E34 - vol est-ouest.

Figure D4. Semi-variogrammes directionnels à pas variable pour l'image-eau E35 - vol nord-sud.

Figure D5. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image-eau E34 (vol est-ouest) avec alignement des isolignes dans la direction nord-sud.

Figure D6. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image-eau E35 (vol nord-sud) avec alignement des isolignes dans la direction est-ouest.

Figure D7. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image eau-urbaine B34 (vol est-ouest) avec le seul alignement des isolignes du milieu aquatique dans la direction nord-sud.

Figure D8. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-eau E35 (vol nord-sud) à partir de 320 échantillons et d'un modèle ajusté au semi-variogramme nord-sud de la figure D4.

LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1. Identification des images traitées.
- Tableau 2. Statistiques des 4096 valeurs de l'image-forêt F35 et des ensembles de 320 et 256 valeurs échantillonnées.
- Tableau 3. Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image-forêt F35 et des 4096 valeurs krigées à partir de 320 et 256 valeurs échantillonnées.
- Tableau 4. Erreurs associées aux krigeages de l'image-forêt F35 basés sur 320 et 256 valeurs échantillonnées.
- Tableau 5. Statistiques des 4096 valeurs de l'image trimodale Q35 et des 320 valeurs échantillonnées.
- Tableau 6. Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image trimodale Q35 et des 4096 valeurs krigées selon trois traitements.
- Tableau 7. Erreurs associées aux krigeages de l'image trimodale Q35 réalisés selon trois traitements.
- Tableau 8. Moyennes des variances d'estimation prédites par krigeage et variances des erreurs (VV-VK) issues des trois traitements appliqués à l'image trimodale Q35.

Tableau B1. Statistiques des 4096 valeurs de l'image-culture C35 et des 320 valeurs échantillonnées.

Tableau B2. Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image-culture C35 et des 4096 valeurs krigées à partir des 320 valeurs échantillonnées.

Tableau B3. Erreurs associées au krigeage de l'image-culture C35 basé sur 320 valeurs échantillonnées.

Tableau B4. Statistiques des 4096 valeurs de l'image urbaine U35 et des 320 valeurs échantillonnées.

Tableau B5. Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image urbaine U35 et des 4096 valeurs krigées à partir des 320 valeurs échantillonnées.

Tableau B6. Erreurs associées au krigeage de l'image urbaine U35 basé sur 320 valeurs échantillonnées.

Tableau C1. Statistiques des 4096 valeurs de l'image R35 et des 320 valeurs échantillonnées.

Tableau C2. Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image R35 et des 4096 valeurs krigées selon trois traitements.

Tableau C3. Erreurs associées aux krigeages de l'image R35 réalisés selon trois traitements.

Tableau C4. Statistiques des 4096 valeurs de l'image bimodale X35 et des 320 valeurs échantillonnées.

Tableau C5. Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image bimodale X35 et des 4096 valeurs krigées selon trois traitements.

Tableau C6. Erreurs associées aux krigeages de l'image bimodale X35 réalisés selon trois traitements.

Tableau D1. Moyenne et écart-type des images UR34 et UR35 représentant une scène urbaine de 128x128 pixels et prises lors de vols croisés.

Tableau D2. Statistiques des deux images-eau E34 et E35 respectivement prises lors de vols est-ouest et nord-sud.

METHODES GEOSTATISTIQUES APPLIQUEES A LA SYNTHESE ET A LA
REPRODUCTION D'IMAGES DAEDALUS

1. INTRODUCTION

Le but de la présente étude consiste à établir une procédure qui permette de synthétiser l'information contenue dans une image Daedalus pour ensuite reproduire cette image le plus fidèlement possible. On désire donc établir la signature de l'image qui allouera ensuite sa reproduction à l'aide d'un minimum d'information.

Pour ce faire, on a recours à des techniques géostatistiques qui permettent premièrement de caractériser la structure de variabilité spatiale de l'image au moyen de semi-variogrammes, et deuxièmement de reproduire cette image. La technique d'estimation linéaire utilisée à cette fin, le krigeage ordinaire, est optimale dans le sens qu'elle minimise la variance de l'erreur d'estimation (appelée plus couramment variance d'estimation).

Dans ce rapport, on définit tout d'abord le type d'images utilisées ainsi que les conditions dans lesquelles l'étude a été réalisée. On établit ensuite une procédure de synthèse et de reproduction pour des images à couvert unique (unimodales) et on l'illustre à l'aide d'un exemple. Enfin, on adapte cette procédure pour des images à couverts multiples (multimodales) et on donne un exemple d'application basé sur une image trimodale. Les résultats des exemples traités sont évalués en termes d'erreurs et en comparant visuellement l'image reproduite (estimée) avec l'image originale (vraie).

Afin d'alléger le texte principal, on présente à l'annexe A une brève introduction aux concepts de base de la géostatistique linéaire, tel que le semi-variogramme, la variance d'estimation, le krigeage ordinaire, etc. On incite donc le lecteur non familier avec la géostatistique à parcourir cette annexe avant d'entreprendre la lecture de ce rapport. Des exemples additionnels de synthèse et de reproduction d'images à couvert unique et à couverts multiples sont donnés aux annexes B et C. Enfin, on retrouve à l'annexe D les résultats d'une brève étude sur l'effet que peut avoir le bruit du capteur dans l'analyse d'images Daedalus.

2. INFORMATION DISPONIBLE

Au cours de cette étude, on a considéré des images infrarouges aéroportées de type Daedalus prises à une altitude moyenne de 9100 mètres et fournies par le Centre de Recherche pour la Défense de Val-Cartier (CRDV). Les images traitées contiennent 64x64 pixels (soit 4096 pixels) et couvrent une superficie de 15.9 km² (résolution de 62.4 mètres/pixel); toutes ont été prises au cours d'un même vol nord-sud, durant le jour, au mois d'octobre. La bande spectrale de 3.5 à 5.0 microns étant peu fiable, on n'a utilisé que l'information de la bande spectrale de 8.0 à 12.0 microns. La valeur d'irradiance de chaque pixel d'une image est exprimée en micro-Flicks (μF):

$$\mu F = C1 \times R + C2$$

où C1 et C2 sont les constantes de calibration telles que définies dans Corriveau (1983), et R est la valeur de radiance (ton de gris) variant entre 0 et 255.

La liste des images traitées au cours de cette étude apparaît au tableau 1. On y retrouve le numéro de la bande magnétique, la direction du vol, les dimensions et les coordonnées des images ainsi que leurs constantes de calibration C1 et C2.

3. TRAITEMENT D'IMAGES A COUVERT UNIQUE

Dans le cas d'une image à couvert unique, les valeurs d'irradiance des pixels sont en général homogènes sur l'ensemble de l'image et leur histogramme est le plus souvent unimodal. On peut alors considérer ces valeurs d'irradiance comme étant les réalisations d'une seule fonction aléatoire stationnaire intrinsèque (annexe A, sections A.1 et A.2): la moyenne des valeurs est constante à l'intérieur de l'image et la fonction du semi-variogramme de ces valeurs existe et ne dépend que du vecteur distance entre deux pixels de l'image et non pas de leur emplacement dans l'image. Une telle hypothèse de stationnarité intrinsèque étant acceptable pour les valeurs d'une image, on peut donc accéder à la fonction du semi-variogramme et utiliser la technique du krigage ordinaire dans le but de reproduire ces valeurs à partir d'une information limitée.

3.1 Synthèse de l'information

Dans un premier temps, on désire établir un minimum d'information qui puisse synthétiser l'image le mieux possible.

3.1.1 Le semi-variogramme

On peut à l'aide de la fonction du semi-variogramme caractériser la structure de variabilité spatiale des valeurs d'irradiance des pixels à l'intérieur de l'image. En principe, on doit calculer des semi-variogrammes directionnels à partir d'un ensemble de valeurs échantillonnées régulièrement à travers l'image. Pour cette étude, on utilise les valeurs d'irradiance des 4096 pixels de l'image et on calcule 4 semi-variogrammes selon des directions de 0 (est-ouest), 45, 90 (nord-sud) et 135 degrés. Tout d'abord, ces semi-variogrammes sont calculés selon un pas (unité de distance) variable: on considère un pas de 1 pixel pour des distances inférieures à 8 pixels et un pas de 4 pixels pour des distances au-delà de 8 pixels. On obtient ainsi des semi-variogrammes exhaustifs, bien définis sur de courtes distances, que l'on illustre sur une distance maximale de 16 pixels (figure 1a) à cause d'une limitation du logiciel de traçage de semi-variogrammes utilisé. Puis, afin de pouvoir juger du comportement des semi-variogrammes pour des distances au-delà de 16 pixels, on recalcule les mêmes semi-variogrammes directionnels avec un pas constant de 4 pixels (figure 1b). Tenant compte des deux ensembles de courbes expérimentales (qui coïncident sur leurs distances communes de 4 à 16 pixels), on leur ajuste un modèle positif défini (annexe A, section A.2) omnidirectionnel (isotrope) ou directionnel (anisotrope). Dans le cas où les semi-variogrammes directionnels coïncident sur une distance d'au moins 8 pixels, un modèle omnidirectionnel est acceptable; il est toutefois préférable, pour une image de 64x64 pixels, d'ajuster le modèle sur une distance d'environ 16 pixels (figure 1a). Le modèle peut être ajusté à la main ou automatiquement (par la méthode des moindres carrés (Marquardt, 1963)) aux semi-variogrammes expérimentaux sur une distance maximale de 32 pixels, qui correspond à la moitié de l'image.

3.1.2 L'échantillonnage

En plus de la fonction du semi-variogramme qui fournit la signature de l'image, on a besoin d'échantillonner l'image afin de pouvoir la reproduire par krigeage. L'ensemble des pixels échantillonnés doit demeurer restreint tout en étant représentatif à la fois de l'image dans sa totalité - les pixels doivent être uniformément sélectionnés à l'intérieur de l'image - et de ses valeurs extrêmes. On réalise un tel échantillonnage en sélectionnant les valeurs extrêmes locales: dans le cas d'une image de 64x64 pixels, on divise la surface en 64 mini-images de 8x8 pixels à l'intérieur desquelles on choisit les valeurs extrêmes minimale et maximale, la médiane, les premier et dernier quartiles, produisant ainsi un ensemble de 320 échantillons. Un tel échantillonnage offre généralement une couverture adéquate de l'image (figure 2) tout en reproduisant localement ses valeurs extrêmes.

3.2 Reproduction de l'image

En second lieu, lorsque l'image est synthétisée au moyen de semi-variogrammes et d'un ensemble de 320 échantillons extrêmes locaux, on estime les 4096 pixels de l'image au moyen de la technique du krigeage ordinaire en 2 dimensions. Pour ce faire, on établit un rayon de recherche des échantillons qui servent à estimer chaque pixel: ce rayon de recherche dépend de la densité d'échantillonnage de l'image et peut varier selon la direction dans le cas d'une anisotropie directionnelle; il doit cependant être inférieur à la distance d'ajustement maximale du modèle de semi-variogrammes aux points expérimentaux.

Comme résultats du krigeage, on obtient un ensemble de 4096 valeurs estimées, chacune d'elles étant associée à une variance d'estimation qui quantifie le degré de précision (ou de manque de précision) de l'estimation. Il faut noter que les 320 valeurs échantillonnées sont restituées par le krigeage avec une variance d'estimation nulle, l'estimateur krigé étant un interpolateur exact.

3.3 Evaluation de l'image reproduite

En plus de comparer visuellement l'image krigée avec l'image vraie au moyen d'histogrammes, de scattérogrammes, de vues en 2 et 3 dimensions et de reproductions-couleurs(*), on peut juger de la performance de la procédure établie en calculant pour chaque pixel de l'image l'erreur relative (ER) entre la valeur vraie (VV) et la valeur krigée (VK), exprimée en pourcentage:

$$ER = ((VV - VK) / VV) * 100$$

Idéalement, les valeurs de ER devraient être aussi près de 0 que possible.

(*) Dans ce rapport, les vues en 2 dimensions et les reproductions-couleurs des images sont systématiquement présentées telles qu'elles apparaissent à l'écran du Dipix, c'est-à-dire que pour les images provenant du vol nord-sud, le nord géographique pointe vers le bas de l'image. D'autre part, chaque vue en 3 dimensions est orientée particulièrement de façon à offrir la meilleure vue possible de l'image.

On calcule aussi le rapport (RER) entre l'erreur vraie (VV -VK) et l'erreur d'estimation prédite par le krigeage, c'est-à-dire la racine carrée de la variance d'estimation (VE):

$$\text{RER} = (VV - VK) / \sqrt{VE} .$$

En théorie, l'histogramme des valeurs de RER devrait être normal avec une moyenne 0 et une variance 1.

Enfin, pour chaque pixel, en supposant une distribution normale pour la valeur vraie VV avec moyenne VK et variance VE, on définit l'erreur relative sévère ERS (en %) comme suit:

$$\begin{aligned} \text{ERS} &= ([VV - (VK + 1.7 \sqrt{VE})] / VV) \text{ si } VV > (VK + 1.7 \sqrt{VE}) \\ &= ([VV - (VK - 1.7 \sqrt{VE})] / VV) \text{ si } VV < (VK - 1.7 \sqrt{VE}) \\ &= 0 \qquad \qquad \qquad \text{autrement.} \end{aligned}$$

L'erreur relative sévère est donc nulle lorsque la valeur vraie VV se situe dans l'intervalle de confiance de 90% de sa distribution normale (figure 3), positive lorsque VV est au-delà de cet intervalle et négative lorsque VV lui est inférieure. On obtient ainsi pour l'ensemble de l'image la proportion des pixels dont les valeurs de ERS sont positives, négatives et nulles, les proportions théoriques étant respectivement de 5 %, 5 % et 90 %, (en assumant la stationnarité d'ordre 2 des erreurs (VV-VK) à l'intérieur de l'image).

3.4 Exemple d'application

Afin d'illustrer la procédure de synthèse et de reproduction d'images unimodales, on a utilisé une image en milieu forestier. Les différentes étapes de la procédure établie sont rappelées dans l'organigramme présenté à la figure 4. Deux exemples supplémentaires du traitement d'images à couvert unique, en milieu agricole et urbain, sont également présentés à l'annexe B.

3.4.1 Synthèse et échantillonnage de l'image-forêt

Quatre semi-variogrammes exhaustifs ont été calculés à partir des 4096 valeurs de l'image-forêt F35, selon des directions de 0, 45, 90 et 135 degrés. Pour des distances (h) inférieures à 16 pixels, ces 4 semi-variogrammes sont très bien représentés par un modèle isotrope (omnidirectionnel) qui est la somme de deux structures sphériques (annexe A, section A.2) ajustées à la main (figure 5a):

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= \text{Sph}(15,4) + \text{Sph}(75,24), & 0 \leq h \leq 24 \text{ pxls} \\ &= 90 & h > 24 \text{ pxls} \end{aligned}$$

Ces semi-variogrammes ne manifestent pas de discontinuité à l'origine (effet de pépite nul), ce qui traduit une grande ressemblance entre les valeurs de pixels adjacents. Les semi-variogrammes calculés avec un pas constant de 4 pixels (figure 5b) et qui ne sont valables que pour des distances inférieures à 32 pixels, confirment le très bon ajustement du modèle isotrope sur une

distance de 16 pixels, au-delà de laquelle se dessine peu à peu une anisotropie.

L'histogramme des 4096 valeurs de l'image est unimodal et légèrement asymétrique (figure 6). L'histogramme des 320 valeurs extrêmes échantillonnées (figure 7) reproduit bien la moyenne et la forme de la distribution de l'image vraie (figure 6), mais l'écart-type est surestimé (tableau 2, colonnes 1 et 2), la proportion de valeurs extrêmes étant relativement trop importante (2 valeurs échantillonnées sur 5 sont des valeurs extrêmes).

3.4.2 Reproduction de l'image-forêt par krigeage

Le krigeage a été effectué à partir de ces 320 échantillons et du modèle omnidirectionnel ajusté aux semi-variogrammes expérimentaux (figures 5a et 5b), en considérant un rayon de recherche isotrope de 16 pixels. Ce rayon correspond à la distance maximale d'ajustement du modèle omnidirectionnel. Chaque pixel est donc estimé à l'aide des échantillons qui se situent à l'intérieur d'un rayon de 16 pixels quelque soit la direction. Dans le cas présent, puisqu'il y a une très bonne continuité entre les valeurs de pixels voisins - ce qui se traduit par un effet de pépite nul-, l'influence des pixels échantillonnés tout près du pixel à kriger est très importante. En termes géostatistiques, cela veut dire que le système de krigeage est tel que les pixels échantillonnés autour du pixel à estimer reçoivent les poids les plus grands (annexe A, section A.4) et forment ainsi un "écran" qui réduit l'influence des autres pixels échantillonnés plus loin à l'intérieur du rayon de recherche. Conséquemment, l'estimation de chaque pixel demeure locale et la

variabilité originale de l'image entière est davantage recréée par l'image krigée, en dépit de l'information réduite qui sert de base au krigeage.

L'aspect local de l'estimation ressort également au niveau de l'écart-type d'estimation (de krigeage). On retrouve à la figure 8, trois isolignes de contour des écarts-types d'estimation qui correspondent à 1, 3 et 5 μF . Ces isolignes, qui sont très locales (sans tendance à l'échelle de l'image), donnent une apparence tachetée à la figure, reflétant ainsi l'uniformité de l'échantillonnage à l'intérieur de l'image. En fait, le centre de chaque isoligne fermée de 1 μF correspond à un pixel échantillonné pour lequel l'écart-type d'estimation est nul. Les isolignes de 3 μF qui circonscrivent de très près chaque isoligne de 1 μF , soulignent la qualité de l'estimation des pixels situés près des échantillons, cette qualité étant surtout due à la très bonne continuité entre les valeurs de pixels adjacents. Finalement, les zones où l'écart-type d'estimation dépasse 5 μF correspondent aux pixels moins bien estimés parce que situés plus loin des échantillons.

3.4.3 Evaluation de l'image-forêt krigée

On remarque tout d'abord, au tableau 3 (colonnes 1 et 2), que les statistiques de l'image krigée sont très voisines de celles de l'image vraie et que la variabilité des valeurs vraies est très bien reproduite. La forme de l'histogramme des 4096 valeurs krigées (figure 9) est aussi très semblable à celle de l'histogramme des valeurs vraies (figure 6). En comparant les vues en 2 dimensions des valeurs vraies et krigées (figures 10 et 11) ainsi que leur vue en 3 dimensions (figures 12 et 13), on remarque que les valeurs extrêmes sont

localement bien reproduites mais que l'ensemble de l'image krigée est toutefois lissé. Ce lissage, qui est caractéristique de la méthode du krigeage, demeure bien qu'il soit amoindri grâce à l'absence d'effet de pépite. L'aspect relativement lisse de l'image krigée apparaît aussi lorsqu'on compare les reproductions-couleurs des images vraie et krigée (figures 14 et 15, respectivement). On remarque toutefois que le krigeage a bien reproduit les principaux traits de l'image.

En termes d'erreurs, les erreurs relatives (ER) ont une moyenne très voisine de 0 et sont peu variables (tableau 4, colonne 1). La moyenne et l'écart-type des rapports d'erreurs (RER) sont assez près des valeurs théoriques de 0 et 1, et leur histogramme (figure 16) n'est que légèrement asymétrique. Quant aux erreurs sévères (ERS), les proportions d'erreurs positives et négatives forment un total de moins de 5% (avec une sous-estimation - ERS positives - légèrement plus marquée); elles indiquent dans l'ensemble une bonne représentativité des valeurs vraies par leurs valeurs krigées mais les écarts-types d'estimation (\sqrt{VE}) sont un peu surestimés. En effet, la moyenne des 4096 variances d'estimation (VE) prédites par le krigeage est égale à $20.5 \mu F^2$, ce qui dépasse légèrement la variance des 4096 erreurs (VV-VK) qui est de $14.7 \mu F^2$.

Enfin, le scattérogramme des 4096 valeurs vraies (en ordonnée, figure 17) et krigées (en abscisse) montrent un très bon alignement du nuage de points le long de la droite à 45 degrés, le coefficient de corrélation étant égal à 0.937. L'amplitude de l'erreur (valeur vraie - valeur krigée) est à peu près constante quelque soit la valeur vraie, sauf pour quelques valeurs vraies élevées qui sont plus fortement sous-estimées par le krigeage. Somme toute, cette image-forêt est reproduite de façon très satisfaisante par l'image krigée.

Afin de souligner l'avantage relié à l'échantillonnage des 320 valeurs extrêmes locales d'une image, ce qui correspond en moyenne à sélectionner un pixel sur 12.8, on a aussi krigé cette image-forêt en utilisant la même fonction de semi-variogrammes (figures 5a et 5b) et un ensemble de 256 valeurs régulièrement échantillonnées (soit 1 pixel sur 4 par ligne d'image et 1 ligne sur 4, ce qui correspond à choisir un pixel sur 16; figure 18). Les valeurs apparaissant en dernière colonne des tableaux 2, 3 et 4 décrivent les résultats de ce krigeage. On remarque tout d'abord que cet échantillonnage ne contient pas les valeurs minimales et maximales de l'image, que la moyenne est légèrement biaisée, et que l'écart-type est sousestimé (tableau 2). On observe également un lissage plus prononcé de l'ensemble des 4096 valeurs krigées avec ces 256 échantillons qu'avec les 320 valeurs extrêmes locales (tableau 3). On constate cet aspect plus lissé en examinant les figures 19, 20 et 21 qui présentent respectivement les vues en 2 et 3 dimensions et la reproduction-couleurs de l'image krigée à partir de 256 valeurs (*). Dans les trois cas, les nuances extrêmes de l'image vraie (figures 10, 12 et 14) ont disparu. En termes d'erreurs relatives, la performance du krigeage basé sur 256 valeurs est légèrement moins satisfaisante que celle du krigeage basé sur 320 valeurs extrêmes (tableau 4).

On remarque aussi que le nuage de points du scattérogramme des valeurs vraies et krigées (figure 22) n'est plus aussi bien aligné le long de la droite à 45 degrés: on retrouve plus de points sous la droite pour des valeurs vraies

(*) La reproduction-couleurs de la figure 21 est présentée avec les reproductions-couleurs des figures 14 et 15 afin de faciliter leur comparaison.

très faibles et au-dessus de la droite pour des valeurs vraies très fortes. Ce résultat montre que le lissage des valeurs krigées est plus prononcé que dans le cas du krigeage basé sur 320 échantillons extrêmes locaux (figure 17). D'autre part, le coefficient de corrélation demeure très élevé (.922) et la variance des erreurs (VV-VK), qui est de $18.4 \mu F^2$, est bien prédite par la moyenne des variances d'estimation issues du krigeage qui est égale à $20.4 \mu F^2$.

Enfin, il faut noter que l'on peut sélectionner 16 différents ensembles de 256 valeurs à l'intérieur d'une image et que les résultats du krigeage dépendent de chaque échantillonnage. Par exemple, dans le cas présent, les valeurs krigées sont davantage lissées parce que l'ensemble des 256 valeurs sélectionnées ne contient pas les valeurs minimale et maximale de l'image (tableau 2); un autre échantillonnage de 256 pixels régulièrement répartis pourrait contenir ces valeurs, bien que ce ne soit pas certain. D'autre part, l'ensemble de 320 valeurs extrêmes locales est unique pour chaque image.

3.5 Commentaires sur le traitement appliqué en présence d'une image à couvert unique

Tout d'abord, en ce qui concerne la synthèse de l'information contenue dans l'image, le calcul de 4 semi-variogrammes directionnels exhaustifs répond bien à ce besoin. L'utilisation des 4096 pixels permet de bien définir la structure de variabilité pour des distances allant de 1 à 32 pixels. Il est en particulier très important de pouvoir bien établir les semi-variogrammes pour des distances de moins de 8 pixels, cette portion étant la plus utilisée lors du krigeage qui dépend principalement des échantillons situés près du pixel à

estimer. Il s'ensuit que le modèle ajusté aux semi-variogrammes expérimentaux doit être précis sur de courtes distances (inférieures ou égales au rayon de recherche des échantillons). Cela est d'autant plus pertinent que l'effet de pépète des semi-variogrammes calculés pour toutes les images à couvert unique traitées jusqu'ici est nul (voir annexe B).

Il faut mentionner que l'on peut également définir les semi-variogrammes directionnels à partir des valeurs d'un sous-ensemble de pixels régulièrement localisés à l'intérieur de l'image. De tels semi-variogrammes calculés à partir de 256 pixels (soit un pixel sur 16) se comparent en général très bien avec les semi-variogrammes exhaustifs. Toutefois, ils ne permettent pas d'établir de façon certaine la structure de variabilité directionnelle pour des distances inférieures à 4 pixels; la structure à l'origine doit donc être extrapolée, ce qui rend moins fiables les modèles de ces semi-variogrammes.

Dans un autre ordre d'idées, on pourrait également déterminer des semi-variogrammes/couvert/vol qui serviraient à la synthèse et à la reproduction de toutes les images d'un même couvert prises dans des conditions identiques, lors du même vol. De tels semi-variogrammes typiques de chaque couvert accéléreraient considérablement la procédure, étant donné le temps important requis pour le calcul de semi-variogrammes exhaustifs. Pour plus de précision, les semi-variogrammes typiques d'un couvert pourraient être corrigés en fonction de la moyenne et de la variance propres à chaque image traitée (en supposant que la forme générale des semi-variogrammes soit stable pour les images d'un même couvert prises lors d'un même vol).

On doit aussi souligner l'importance de l'échantillonnage systématique des

valeurs extrêmes locales de l'image. Cela compense considérablement l'effet de lissage qui caractérise la méthode du krigeage et assure la reproduction des valeurs d'irradiance extrêmes, ce qui est essentiel si on envisage d'utiliser l'image krigée pour des fins de détection d'anomalies.

Enfin, tel que mentionné à la section 3.4.3 et à l'annexe B (où des images à couvert unique sont traitées), les résultats d'application du traitement proposé sont très satisfaisants et confirment la justesse des semi-variogrammes et de la méthode du krigeage face au besoin de synthèse et de reproduction d'images. On remarque entre autres l'absence systématique d'effet de pépite et l'isotropie (sur de courtes distances du moins) des semi-variogrammes. Bien qu'on ne puisse pas encore généraliser ces observations, elles n'en traduisent pas moins une réalité qui s'avère très pratique dans le domaine de la reproduction d'images.

4. TRAITEMENTS D'IMAGES A COUVERTS MULTIPLES

Dans le cas d'une image à couverts multiples, l'histogramme des valeurs d'irradiance des pixels montre généralement autant de modes qu'il y a de couverts distincts présents dans l'image(*). On ne peut donc, en théorie, considérer l'ensemble des valeurs d'irradiance comme étant les réalisations d'une seule fonction aléatoire stationnaire intrinsèque. On doit plutôt considérer les valeurs d'irradiance à l'intérieur de chaque couvert comme étant les réalisations d'une fonction aléatoire stationnaire intrinsèque et entreprendre la synthèse et le krigeage de l'image, couvert par couvert.

(*) On ne doit toutefois pas juger du nombre de couverts présents dans une image uniquement d'après le nombre de modes que compte son histogramme. Une image à couvert multiple peut même avoir un histogramme unimodal (voir annexe C, section C.1).

En pratique, on a expérimenté trois procédures de traitement d'images à couverts multiples. Tout d'abord, on a utilisé un traitement unique "aveugle" qui consiste à traiter l'image comme si elle était à couvert unique, utilisant pour ce faire la procédure décrite à la section 3. Cette approche, bien que théoriquement non rigoureuse, est surtout utilisée dans le but de comparer ses résultats avec ceux des deux autres procédures qui traitent séparément chaque couvert de l'image et qui sont décrites ci-dessous.

4.1 Traitement/couvert avec semi-variogrammes/couvert/image

L'agencement des diverses étapes de ce traitement par couvert est illustré par l'organigramme de la figure 23.

4.1.1 Classification par couvert des pixels de l'image

On considère une image de 4096 pixels (64x64) formée de N couverts distincts. En se basant sur l'histogramme multimodal des valeurs de l'image, on établit N-1 valeurs-seuils qui séparent les N différents milieux (figure 24). Dans le cas où l'histogramme de l'image ne montre pas N modes distincts, on peut établir les valeurs-seuils à partir d'autres images prises dans les mêmes conditions de vol.

On procède ensuite à la classification en attribuant aux pixels de chaque couvert une valeur indicatrice caractéristique du couvert (0,1,2,...,N-1), créant ainsi une matrice indicatrice de dimensions 64x64. Par exemple, selon l'histogramme trimodal de la figure 24, les valeurs d'irradiance plus petites ou égales à la valeur-seuil S1 ont une valeur indicatrice de 0; les valeurs d'irradiance plus grandes que S1 et plus petites ou égales à S2 ont une valeur

indicatrice de 1; et les valeurs restantes ($>S_2$) ont une valeur indicatrice de 2. Afin d'adoucir les frontières entre les pixels des différents couverts et de minimiser l'occurrence au sein d'un couvert de pixels isolés appartenant à un autre couvert, on passe une fenêtre de 5x5 pixels sur l'ensemble de l'image. On ne réassigne toutefois que les pixels dont la valeur est voisine d'une valeur-seuil et qui peuvent donc appartenir à un couvert ou à l'autre. Ces pixels sont alors réassignés au couvert auquel appartient la moyenne des 24 pixels de la fenêtre qui les entoure.

Il faut souligner ici que cette méthode de classification des pixels par couvert est très simple et qu'elle n'est pas la seule disponible(*). On a parfois dû réassigner à la main certains pixels isolés au sein d'un autre couvert afin de pouvoir les kriger à partir des échantillons disponibles. Dans un premier temps, cette méthode satisfait toutefois les besoins de la présente étude par sa simplicité, sans pour autant compromettre la validité des résultats. D'autre part, il est clair qu'une technique de classification plus performante (au niveau de l'élimination de pixels isolés) ne pourrait qu'améliorer la procédure de reproduction de l'image.

(*) Dans le cas d'images bimodales ($N=2$), une méthode de classification reposant sur une hypothèse de normalité des valeurs de chaque couvert a aussi été utilisée au cours de cette étude (Bow, 1984).

4.1.2 Synthèse de l'information

Tout comme pour une image à couvert unique (section 3.1), on fait la synthèse de l'information contenue dans l'image à l'aide de semi-variogrammes directionnels et d'un échantillonnage des valeurs extrêmes locales.

- Semi-variogrammes/couvert/image

Pour chaque couvert de l'image, on calcule quatre semi-variogrammes exhaustifs directionnels (à 0, 45, 90 et 135 degrés), à pas variable et à pas constant, à partir des pixels qui sont assignés au couvert selon la matrice indicatrice établie lors de l'étape de classification. Par exemple, seuls les pixels associés à une valeur indicatrice de 0 sont utilisés dans le calcul des semi-variogrammes du couvert de type 0.

Un modèle isotrope ou anisotrope est ensuite ajusté aux quatre semi-variogrammes calculés pour chaque couvert sur une distance maximale de 32 pixels.

- Échantillonnage

On échantillonne les 320 valeurs extrêmes locales de l'image à couverts multiples tout comme on le fait pour une image à couvert unique (section 3.1.2). Cet ensemble de pixels est donc représentatif de l'image entière sans tenir compte des différents couverts.

4.1.3 Reproduction de l'image

On procède ensuite à l'estimation des 4096 pixels de l'image au moyen de la technique de krigeage ordinaire en 2 dimensions. Plus exactement, on réalise autant de krigeages qu'il y a de couverts distincts dans l'image: à partir de la matrice indicatrice, de l'ensemble des 320 pixels échantillonnés et des modèles ajustés aux semi-variogrammes des N différents couverts, on krige successivement les pixels qui appartiennent à chacun des couverts, obtenant ainsi, après fusion des valeurs estimées, une image krigée à N couverts. Bien entendu, chaque pixel d'un couvert donné n'est estimé qu'à partir des échantillons et du modèle de semi-variogrammes de ce même couvert. Le rayon de recherche des échantillons qui servent au krigeage de chaque pixel, est également établi pour chaque couvert, en fonction de la distance d'ajustement du modèle des semi-variogrammes du couvert.

Tout comme dans le cas d'une image à couvert unique, on obtient un ensemble de 4096 valeurs krigées, chacune d'elles étant associée à une variance d'estimation typique du couvert auquel elle appartient, sauf pour les 320 valeurs échantillonnées qui sont restituées par le krigeage avec une variance d'estimation nulle.

4.1.4 Evaluation de l'image reproduite

On fait l'évaluation de la procédure établie dans le cas d'une image à N couverts exactement comme pour une image à couvert unique (section 3.3). On compare visuellement l'image krigée avec l'image vraie à l'aide de vues en 2 et

3 dimensions, de reproductions-couleurs et de scattérogrammes. On calcule également pour chaque pixel l'erreur relative (ER), le rapport entre l'erreur vraie et l'erreur prédite par krigeage (RER), et les proportions d'erreurs relatives sévères (ERS) positives, négatives et nulles.

4.2 Traitement/couvert avec semi-variogrammes/couvert/vol

Ce second traitement par couvert est en tous points pareil au précédent sauf en ce qui a trait aux semi-variogrammes (figure 25). Alors que dans la procédure décrite plus haut, on calcule les semi-variogrammes pour N couverts différents à partir des pixels de l'image elle-même, on utilise maintenant des semi-variogrammes calculés à partir de N images à couvert unique prises dans les mêmes conditions de vol. Par exemple, la partie forêt d'une image à plusieurs couverts est estimée à l'aide des semi-variogrammes (ou plus exactement du modèle qui leur est ajusté) d'une image-forêt à couvert unique prise dans les mêmes conditions, lors du même vol.

Cette procédure accélère le traitement de l'image en éliminant le temps de calcul des semi-variogrammes pour chaque couvert à partir de l'image elle-même. De plus, elle offre des semi-variogrammes exhaustifs pour des couverts peu étendus à l'intérieur de l'image et à partir desquels les semi-variogrammes ne seraient pas bien définis.

D'autre part, les semi-variogrammes provenant d'images à couvert unique représentent moins bien les pixels de chaque couvert de l'image multiple. La différence peut être marquée surtout au niveau des paliers des semi-variogrammes.

4.3 Exemple d'application

Afin d'illustrer les trois procédures de synthèse et de reproduction utilisées dans le cas d'images à couverts multiples, on présente un exemple traitant d'une image à trois couverts: forestier, agricole et urbain. Des exemples supplémentaires sont également donnés à l'annexe C.

Sur l'histogramme des 4096 valeurs de l'image Q35 étudiée (figure 24), les modes forestier, agricole et urbain apparaissent distinctement. On a donc établi les deux valeurs-seuils d'après cet histogramme: la première (S1) à 681 μF et la seconde (S2) à 703 μF . L'histogramme des 320 valeurs extrêmes locales échantillonnées (figure 26) reproduit bien la moyenne et les trois modes de l'histogramme des valeurs vraies, mais surestime son écart-type (tableau 5), la proportion de valeurs extrêmes étant relativement trop importante (2 valeurs échantillonnées sur 5 sont des minima et maxima locaux).

4.3.1 Traitement unique de l'image trimodale

On a calculé quatre semi-variogrammes exhaustifs à pas variable à partir des 4096 pixels de l'image selon les directions de 0, 45, 90 et 135 degrés (figure 27) sans tenir compte des différents couverts qui composent cette image. Pour des distances (h) allant jusqu'à 8 pixels, ces 4 semi-variogrammes sont très bien représentés par un modèle isotrope de type exponentiel:

$$\gamma(h) = 115 (1 - e^{-h/8})$$

L'absence d'effet de pépite traduit une grande ressemblance entre les valeurs de pixels adjacents et assure une estimation locale de même qu'une bonne restitution de la variabilité originale de l'image (section 3.4.2).

Le krigeage a été réalisé à partir des 320 valeurs échantillonnées et de ce modèle ajusté aux semi-variogrammes expérimentaux, en considérant un rayon de recherche isotrope de 8 pixels.

4.3.2 Traitement par couvert de l'image trimodale avec semi-variogrammes/couvert/image

Tel que décrit à la section 4.1.1, les pixels de l'image trimodale ont été classifiés en 3 couverts, générant ainsi une matrice indicatrice où les 0 correspondent au milieu forestier, les 1 au milieu agricole et les 2 au milieu urbain (figure 28).

En se basant sur cette matrice indicatrice, on a calculé pour chaque couvert 4 semi-variogrammes directionnels (à 0, 45, 90 et 135 degrés) à partir de tous les pixels appartenant à un même couvert. On a ensuite ajusté aux semi-variogrammes des milieux forestier, agricole et urbain les modèles isotropes suivants (figures 29a,b, 30a,b et 31a,b):

$$\begin{aligned} \gamma(h)_f &= \text{Sph}(2,2) + \text{Sph}(3.5,6) + \text{Sph}(5.5,40) \quad 0 \leq h \leq 40 \text{ pxls} \\ &= 11 \quad \quad \quad h > 40 \text{ pxls} \end{aligned}$$

$$\gamma(h)_c = 13 (1 - e^{-h/1.7})$$

$$\begin{aligned} \gamma(h)_u &= \text{Sph}(52, 2.85) \quad 0 \leq h \leq 2.85 \text{ pxls} \\ &= 52 \quad \quad \quad h > 2.85 \text{ pxls} \end{aligned}$$

Les rayons de recherche isotropes utilisés pour le krigeage des pixels des 3 couverts sont, respectivement, de 16, 14 et 8 pixels.

4.3.3 Traitement par couvert de l'image trimodale avec semi-variogrammes/couvert/vol

Pour ce deuxième traitement par couvert de l'image trimodale, on a besoin de semi-variogrammes expérimentaux provenant de 3 images à couvert unique prises en milieu forestier, agricole et urbain. On a donc utilisé les semi-variogrammes des 3 images à couvert unique déjà traitées dans cette étude: l'image-forêt F35 étudiée à la section 3.4, et les images C35 et U35 respectivement en milieu agricole et urbain, décrites à l'annexe B, sections B1 et B2. Les modèles isotropes ajustés aux semi-variogrammes de ces images (figures 32a,b, 33a,b et 34a,b) sont les suivants:

$$\begin{aligned} \gamma(h)_F &= \text{Sph}(15, 4) + \text{Sph}(75, 24) \quad 0 \leq h \leq 24 \text{ pxls} \\ &= 90 \quad \quad \quad h > 24 \text{ pxls} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma(h)_C &= \text{Sph}(15, 4) + \text{Sph}(15, 10) + \text{Sph}(16, 24) \quad 0 \leq h \leq 24 \text{ pxls} \\ &= 46 \quad \quad \quad h > 24 \text{ pxls} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma(h)U &= \text{Sph}(80,3) + \text{Sph}(65,6) + \text{Sph}(85,15) & 0 \leq h \leq 15 \text{ pxls} \\ &= 230 & h > 15 \text{ pxls} \end{aligned}$$

Les rayons de recherche isotropes choisis pour kriger les pixels des 3 couverts sont respectivement de 16, 14 et 16 pixels. Dans le cas de l'image en milieu agricole, on remarque qu'un rayon de 14 pixels dépasse la distance d'ajustement du modèle isotrope aux semi-variogrammes expérimentaux qui est plutôt de 8 pixels (figure 33a). En effet, les semi-variogrammes indiquent une anisotropie pour des distances supérieures à 8 pixels. Strictement parlant, un modèle anisotrope aurait dû être ajusté à ces semi-variogrammes afin de pouvoir utiliser un rayon de recherche de 14 pixels. Toutefois, comme il n'y avait que très peu de pixels (environ 10) qu'on ne pouvait kriger avec un rayon de 8 pixels, on a simplement conservé le modèle isotrope original et allongé le rayon de recherche de façon à pouvoir estimer tous les pixels du milieu agricole à partir des échantillons appartenant à ce même milieu. Quant aux pixels suffisamment entourés d'échantillons pour être krigés avec un rayon de 8 pixels, leur valeur estimée et leur variance d'estimation associée ne sont pas affectées de façon significative par l'allongement du rayon: dû à l'absence d'effet de pépite, les échantillons situés le plus près des pixels à estimer (à moins de 8 pixels) reçoivent la majeure partie du poids et créent ainsi un écran face aux échantillons plus éloignés (entre 8 et 14 pixels) qui n'ont conséquemment que très peu de poids dans le calcul des valeurs krigées et de leur variance d'estimation.

4.3.4 Evaluation des trois traitements appliqués à l'image trimodale

De façon générale, lorsqu'on compare les résultats de krigeage avec les valeurs vraies, on constate que la performance des trois traitements appliqués à l'image trimodale est très satisfaisante.

Tout d'abord, les statistiques des résultats obtenus selon les 3 traitements (tableau 6) sont très voisines de celles des valeurs vraies. On y remarque toutefois que l'écart-type des valeurs krigées selon le traitement unique (traitement 1) est légèrement inférieur à celui des valeurs vraies, tandis que les écarts-types des traitements par couvert avec semi-variogrammes/couvert/image (traitement 2) et avec semi-variogrammes/couvert/vol (traitement 3) sont un peu plus larges que celui des valeurs vraies. Ces différences sont également apparentes au niveau des histogrammes des valeurs krigées (figures 35, 36 et 37 pour les traitements 1, 2 et 3). La variabilité des valeurs résultant du traitement 1 est réduite à cause du lissage qu'entraîne le krigeage unique. D'autre part, pour les traitements 2 et 3, bien que les valeurs krigées soient lissées à l'intérieur de chaque couvert, l'effet de ce lissage sur la variabilité de l'image entière est masqué par la démarcation amplifiée entre les valeurs des 3 couverts: les trois modes des histogrammes des figures 36 et 37 sont mieux démarqués que ceux de l'histogramme des valeurs vraies (figure 24), mais chaque mode est aussi plus homogène (variance plus faible).

On formule les mêmes observations lorsqu'on compare les vues en 2 et 3 dimensions des valeurs vraies (figures 38 et 39) avec celles des valeurs krigées selon les traitement 1 (figures 40 et 41), 2 (figures 42 et 43) et 3

(figures 44 et 45). De même, les reproductions-couleurs de l'image vraie (figure 46) et des 3 images krigées (figures 47, 48 et 49) illustrent d'une part l'adoucissement des contrastes entre les couverts et l'arrondissement des formes par le traitement 1, et d'autre part, la démarcation plus précise des milieux par les traitements 2 et 3, le contraste à l'intérieur de chaque couvert étant toutefois réduit.

Enfin, les scattérogrammes des valeurs vraies et krigées selon les trois traitements viennent confirmer ces observations. Pour le traitement 1 (figure 50), on ne distingue pas les couverts si ce n'est par le plus grand nombre de pixels appartenant aux couverts forestier et agricole et par les différences plus marquées entre les valeurs vraies et krigées du milieu urbain ($>703 \mu F$): la variabilité des valeurs urbaines étant plus grande, il n'est pas étonnant d'observer des erreurs plus larges. Sur les scattérogrammes très semblables des traitements 2 et 3 (figures 51 et 52), les trois couverts apparaissent distinctement au niveau des valeurs krigées. Là encore, les différences entre les valeurs vraies et krigées du milieu urbain sont légèrement plus marquées. En fait, on remarque que, si on exclut les pixels dont les valeurs sont voisines des valeurs-seuils, les valeurs krigées selon les trois traitements sont très semblables (voir aussi les figures 40, 42 et 44) et leurs coefficients de corrélation avec les valeurs vraies sont presque égaux, et cela, bien que les semi-variogrammes utilisés dans chaque cas soient différents. Cela est dû à l'unique ensemble d'échantillons qui est à l'origine des trois traitements de même qu'à l'absence d'effet de pépite et à l'isotropie de tous les semi-variogrammes considérés: il en résulte une estimation "locale" (fortement influencée

par les valeurs échantillonnées tout autour du pixel à kriguer), semblable pour les trois traitements, sauf près des limites entre les couverts où les valeurs krigées selon le traitement 1 sont davantage lissées.

D'autre part, l'effet des différents semi-variogrammes utilisés lors des 3 traitements apparaît au niveau de l'écart-type d'estimation (voir annexe A, section A.3, où l'on décrit la relation entre le semi-variogramme et la variance d'estimation). Pour le traitement 1, l'écart-type d'estimation est uniforme sur l'ensemble de l'image (figure 53) et reflète ainsi l'unique modèle de semi-variogrammes utilisé pour kriguer toute l'image. Le centre des isolignes fermées de $1 \mu F$ représente les pixels échantillonnés pour lesquels l'écart-type d'estimation est nul. Logiquement, l'écart-type augmente (la précision diminue) lorsqu'on s'éloigne des endroits échantillonnés.

Pour le traitement 2 (figure 54), les couverts apparaissent distinctement, avec des patrons d'isolignes différents. Cette démarcation s'explique par les différents semi-variogrammes utilisés pour chaque couvert. Tous les modèles de semi-variogrammes étant sans effet de pépite, l'ampleur de cette démarcation dépend surtout de la différence observée entre les valeurs des modèles sur des distances inférieures aux rayons de recherche utilisés. Par exemple, pour un rayon de recherche de 16 pixels, le modèle des semi-variogrammes en milieu forestier ne dépasse pas la valeur de $8 \mu F^2$ (figure 29a), tandis que le modèle des semi-variogrammes du couvert agricole atteint $13 \mu F^2$ sur une distance de moins de 2 pixels (figure 30a), induisant ainsi une légère démarcation entre les écarts-types d'estimation des milieux forestier et agricole. De façon plus frappante encore, les écarts-types d'estimation pour les pixels du couvert urbain sont encore mieux identifiés grâce à un modèle de semi-variogrammes qui rejoint son palier de $52 \mu F^2$ sur une distance de moins de 3 pixels. (figure 31a).

Dans le cas du traitement 3 (figure 55), le milieu urbain est particulièrement bien délimité par des écarts-types d'estimation nettement plus élevés (jusqu'à 15 μF); ceux-ci s'expliquent par le palier très élevé (230 μF^2) atteint sur une distance de 15 pixels par le modèle des semi-variogrammes (figure 34a). En comparaison, les couverts forestier et agricole sont confondus, l'isoligne maximale dans les deux milieux étant de 5 μF . On observe en effet que les semi-variogrammes de ces deux milieux sont semblables sur des distances de moins de 16 pixels: par exemple, pour une distance de 8 pixels, les valeurs des modèles des semi-variogrammes des couverts forestier et agricole sont respectivement de 51 et 37 μF^2 .

En termes d'erreurs, les résultats des trois traitements sont très intéressants. Les erreurs relatives (ER) des valeurs krigées selon les trois traitements sont sans biais et peu variables (tableau 7). Plus particulièrement, les trois reproductions-couleurs des erreurs (VV-VK) sont très semblables (figures 56, 57 et 58), les valeurs les plus fortes, qu'elles soient positives ou négatives, se situant surtout dans le milieu urbain. Ce résultat supporte bien l'observation faite auparavant concernant les ressemblances locales des valeurs krigées selon les 3 traitements (figures 50, 51 et 52) basés sur le même ensemble d'échantillons. Quant aux rapports d'erreurs (RER) et aux proportions d'erreurs sévères (ERS) positives, négatives et nulles, elles varient davantage d'un traitement à l'autre. Comme le calcul de ces deux types d'erreurs tient compte de l'écart-type d'estimation (section 3.3), ces différences s'expliquent par l'utilisation de différents semi-variogrammes pour chaque traitement.

Enfin, on peut juger de la justesse respective des semi-variogrammes utilisés pour chaque traitement en comparant la variance des erreurs (VV-VK) et la moyenne des variances d'estimations prédites par le krigeage (tableau 8). On remarque, que, bien que les variances des erreurs soient voisines pour les trois traitements, les moyennes des variances d'estimation varient davantage selon le traitement, et cela à cause de leur étroite relation avec les différents semi-variogrammes utilisés. Il ressort donc que la variance de l'erreur (VV-VK) est mieux prédite par la moyenne des variances d'estimation du traitement 2, ce qui confirme la pertinence des semi-variogrammes/couvert/image.

4.4 Commentaires sur les traitements appliqués en présence d'une image à couverts multiples

Des trois traitements expérimentés au cours de cette étude, le traitement unique est manifestement le plus simple. Bien qu'il ne tienne pas compte des différentes populations statistiques de l'image, on remarque que, dans l'exemple présenté, les valeurs krigées "aveuglement" se comparent très bien à celles obtenues à l'aide des 2 traitements par couvert. Une telle similarité des valeurs krigées selon les 3 traitements s'explique par l'unique ensemble d'échantillons utilisés ainsi que par la forte continuité spatiale et l'isotropie qui caractérisent les phénomènes étudiés (absence d'effet de pépite et isotropie des semi-variogrammes) et qui ont été établies dans les 3 cas. Des différences plus marquées apparaissent néanmoins dans les zones frontières entre les couverts: selon le traitement unique, tous les échantillons environnant le pixel à estimer sont retenus tandis que pour les 2 traitements par couvert, seuls les échantillons appartenant au couvert du pixel à estimer sont

utilisés. Encore là, le traitement unique manque de rigueur en krigeant un pixel à l'aide d'échantillons appartenant à différents couverts, c'est-à-dire à différentes populations statistiques.

Dans le cas des 2 traitements par couvert, la procédure utilisée pour classifier les pixels par couvert peut certainement être améliorée. Un des aspects critiques de la méthode de classification consiste à minimiser l'occurrence au sein d'un couvert de pixels isolés appartenant à un autre couvert. D'autre part, il serait intéressant de vérifier l'effet que peut avoir la matrice indicatrice issue de la classification sur la forme des semi-variogrammes; une matrice dont les valeurs diffèrent légèrement près des frontières entre les couverts générerait-elle des semi-variogrammes très différents sur de courtes distances?

Des deux traitements par couvert utilisés, le premier (avec semi-variogrammes/couvert/image) est clairement plus précis en termes de semi-variogrammes et de variance d'estimation tandis que le deuxième (avec semi-variogrammes/couvert/vol) est plus pratique, puisqu'il ne requiert pas le calcul des semi-variogrammes de chaque couvert pour chaque image traitée. Tel que mentionné plus haut, l'absence systématique d'effet de pépité chez tous les semi-variogrammes assure cependant des valeurs estimées semblables selon ces deux traitements qui sont basés sur un même échantillonnage.

Tout comme dans le cas du traitement d'images à couvert unique (section 3.5), un compromis face à ces 2 traitements par couvert consisterait à corriger les semi-variogrammes/couvert/vol en fonction de la moyenne et de la variance propres à chacun des couverts de l'image traitée.

On aurait alors pas besoin de calculer les semi-variogrammes/couvert pour chaque image à couverts multiples prise lors du même vol.

D'autre part, en ce qui a trait à l'échantillonnage de l'image, on pourrait, afin d'assurer une représentativité équitable de tous les couverts qui la composent, sélectionner à l'intérieur de chaque couvert un nombre d'échantillons extrêmes locaux proportionnel à la superficie occupée par le couvert. On reproduirait ainsi les valeurs extrêmes locales à l'intérieur de chaque couvert, ce qui irait de pair avec le principe de semi-variogrammes et de krigeage par couvert. Dans le même ordre d'idées, les statistiques des erreurs pourraient aussi être calculées pour chaque couvert.

Enfin, on doit souligner que tous les résultats des applications réalisées jusqu'à maintenant (section 4.3 et annexe C) sur des images à couverts multiples sont très satisfaisants et que, comme pour les images à couvert unique, tous les semi-variogrammes calculés et utilisés sont isotropes (sur des distances d'au moins 8 pixels) et ne montrent pas d'effet de pépite.

5. CONCLUSION

On a établi au cours de cette étude une procédure de synthèse et de reproduction d'images Daedalus à l'aide des techniques géostatistiques du semi-variogramme et du krigeage ordinaire. Cette procédure consiste, dans un premier temps, à faire la synthèse de l'information contenue dans l'image traitée au moyen de 320 valeurs extrêmes locales échantillonnées, de 4 semi-variogrammes directionnels (calculés à 0, 45, 90 et 135 degrés) et, dans le cas d'images à multiples couverts, d'une matrice indicatrice des différents couverts. En second lieu, à partir de cette information, on reproduit l'image

par la méthode du krigeage ordinaire en 2 dimensions. Cette technique d'estimation, qui produit un estimateur linéaire sans biais associé une variance d'estimation minimale, offre donc un moyen de reproduction très adéquat basé sur une information limitée.

De façon générale, les résultats d'applications de la procédure établie au cours de cette étude sont très satisfaisants: les images krigées, qu'elles soient unimodales ou non, reproduisent très fidèlement les images originales. Bien entendu, vu le nombre limité d'images traitées jusqu'à présent, il demeurerait essentiel de vérifier la performance de la procédure en considérant plusieurs autres images prises dans diverses conditions de vol. Toutefois, avant d'entreprendre une telle vérification, il semble opportun de faire quelques observations et suggestions concernant les différentes étapes de cette procédure qui demeure sujette à améliorations.

Tout d'abord, en ce qui touche le traitement d'images unimodales, le calcul des semi-variogrammes directionnels exhaustifs permet de bien définir la structure de variabilité pour des distances allant de 1 à 32 pixels (dans le cas d'images de 64x64 pixels). Il est particulièrement important de bien établir les semi-variogrammes pour des distances de moins de 8 pixels, cette portion étant la plus utilisée lors du krigeage. En effet, vu l'absence systématique d'effet de pépite pour toutes les images traitées au cours de la présente étude, les valeurs échantillonnées près du pixel à estimer sont les plus influentes dans le processus de krigeage. Dans ce cas, une distance minimale d'ajustement des modèles des semi-variogrammes de 8 pixels est acceptable; il est toutefois préférable, étant donné la dimension des images traitées et la

densité d'échantillonnage, d'ajuster les modèles sur une distance de 16 pixels.

On doit aussi mentionné que les semi-variogrammes calculés à partir d'un sous-ensemble de pixels régulièrement localisés à l'intérieur de l'image se comparent en général très bien avec les semi-variogrammes exhaustifs. D'une part, l'usage de tels semi-variogrammes réduirait considérablement le temps de calcul; d'autre part, ils ne permettraient pas d'établir de façon aussi précise la très importante structure de variabilité sur de courtes distances.

Dans le but de réduire le temps de calcul des semi-variogrammes, on pourrait également déterminer des semi-variogrammes/couvert/vol qui serviraient au traitement de toutes les images d'un même couvert prises dans des conditions identiques, lors d'un même vol. On a constaté (lors du traitement d'images multimodales) que les valeurs krigées basées sur de tels semi-variogrammes/couvert/vol sont comparables aux valeurs obtenues avec les semi-variogrammes calculés directement à partir de l'image. On attribue principalement ce résultat à l'isotropie et à l'absence d'effet de pépite systématiquement observées chez tous les semi-variogrammes utilisés, de même qu'à l'ensemble commun de valeurs échantillonnées. D'autre part, on a remarqué que les variances d'estimation associées aux valeurs krigées dépendent davantage des valeurs des paliers des semi-variogrammes utilisés. On pourrait peut-être remédier à ce problème en ajustant les semi-variogrammes/couvert/vol en fonction de la moyenne et de la variance de chaque image traitée (en supposant que la forme des semi-variogrammes est constante pour chaque couvert, pour chaque vol). Il serait donc avantageux d'investiger cette possibilité.

On doit aussi souligné l'importance de l'échantillonnage systématique des valeurs extrêmes locales de l'image tant pour la reproduction de ses valeurs extrêmes que pour la réduction de l'effet de lissage qui caractérise le krigage. .

Deuxièmement, en ce qui concerne les images à couverts multiples, il convient d'ajouter les observations suivantes sur les trois traitements appliqués au cours de l'étude.

Le traitement unique (traitement 1) est plus simple d'application mais ne tient pas compte de la nature particulière de la population statistique de chaque couvert. Il n'assure pas systématiquement des résultats aussi satisfaisants que les deux autres traitements, surtout dans le cas où les différents couverts ne sont pas clairement définis mais sont plutôt enchevêtrés (tel que pour l'image R35, annexe C, section C.2). En effet, les différences entre les valeurs estimées du traitement unique et des deux autres traitements se situent surtout dans les zones frontières entre les couverts.

Pour les deux traitements par couvert (traitements 2 et 3), la méthode utilisée pour classifier les pixels entre les différents couverts, bien qu'efficace, pourrait être améliorée de façon à minimiser l'occurrence de pixels isolés au sein d'un couvert auquel ils n'appartiennent pas. De plus, il serait indiqué de vérifier l'effet que pourrait avoir la matrice indicatrice issue de la classification sur les valeurs des semi-variogrammes de chaque couvert. Par exemple, deux matrices indicatrices issues de deux méthodes de classification et dont les valeurs diffèreraient près des frontières entre les couverts, généreraient-elles des semi-variogrammes très différents sur de courtes distan-

fes? Si tel était le cas, ces semi-variogrammes entraîneraient à leur tour des divergences au niveau des variances d'estimation et peut-être même des valeurs krigées et rendraient ainsi le choix de la méthode de classification plus conséquent..

En ce qui regarde l'échantillonnage de l'image multimodale, on pourrait assurer une représentativité équitable de chaque couvert en sélectionnant un nombre d'échantillons extrêmes locaux proportionnel à la superficie occupée par chaque couvert de l'image. On produirait ainsi un échantillonnage des valeurs extrêmes locales par couvert, ce qui irait de pair avec le principe de semi-variogrammes et de krigeage par couvert. De la même façon, les statistiques des erreurs pourraient être calculées pour chaque couvert, permettant ainsi de juger de la performance de la procédure appliquée à chaque milieu.

Des deux traitements par couvert utilisés, le premier (avec semi-variogrammes/couvert/image) est clairement plus adéquat en termes de semi-variogrammes et de variances d'estimation. D'autre part, le second traitement (avec semi-variogrammes/couvert/vol) est plus pratique puisqu'il ne requiert pas le calcul des semi-variogrammes de chaque couvert pour chaque image, et puisqu'il assure des semi-variogrammes bien définis pour des couverts peu étendus à l'intérieur de l'image. Tel que mentionné plus haut, ce traitement a produit des valeurs krigées très semblables à celles obtenues selon le traitement 2. Il n'est cependant pas aussi performant en ce qui concerne l'établissement des variances d'estimation, d'où la solution proposée d'ajuster les semi-variogrammes/couvert/vol en fonction de la moyenne et de la variance de chaque couvert de l'image.

Finalement, il serait très intéressant d'envisager la reproduction des images traitées au cours de cette étude à l'aide d'une méthode de simulation conditionnelle et non plus du krigeage ordinaire. L'avantage principal de la simulation conditionnelle (conditionnelle à un ensemble de valeurs échantillonnées) est qu'elle permet de bien recréer la variabilité originale des valeurs des pixels de l'image: l'ensemble des valeurs simulées, incluant les valeurs échantillonnées, n'est pas lissé comme c'est le cas pour l'ensemble des valeurs krigées. D'un autre côté, il faut souligner que les valeurs simulées à chaque pixel ne sont plus des valeurs estimées associées à des variances d'estimation minimales qui quantifient le degré de précision de l'estimation.

C'est donc en fonction des objectifs visés et de l'utilisation future des images reproduites qu'il faudrait choisir entre le krigeage et la simulation conditionnelle. À ce propos, une étude comparative de ces deux techniques permettrait d'établir plus clairement leurs caractéristiques ainsi que leurs avantages et désavantages respectifs.

6. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BOW, S.T. (1984).

Pattern Recognition. Electrical Engineering and Electrics.

CLARK, I. (1979).

Practical geostatistics. Applied Sciences Pub. Ltd., London, 129 p.

CORRIVEAU, R. (1983)

Standard Statistical Analysis of Five IR Backgrounds Gathered in Northern Canadian Territory. Annex to a DREV Specification - 1332/83/5.

DAVID, M. (1977).

Geostatistical Ore Reserve Estimation. Elsevier Scientific Publishing Company, New York, 364 p.

JOURNEL, A.G. et Ch.J. HUIJBREGTS (1978).

Mining Geostatistic. Academic Press, New York, 600 p.

MARQUARDT, D.W. (1963).

An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters.
Journal of the Society of Industrial and Applied Mathematics 2,
pp 431-441.

ANNEXE A - INTRODUCTION AU KRIGEAGE ORDINAIRE

De façon générale, le terme "géostatistique" désigne l'étude statistique de phénomènes naturels tels qu'un corps minéralisé, un réservoir pétrolifère, le phénomène des précipitations acides, l'irradiance des pixels d'une image aéroportée. En particulier, on connaît la géostatistique pour ses techniques d'estimation linéaire par krigeage. Dans cette annexe, on introduit les concepts de base qui servent à l'élaboration de la technique du krigeage ordinaire, en se limitant toutefois aux seuls développements nécessaires à l'établissement de la procédure décrite dans le texte principal. On y illustre ces concepts à l'aide d'exemples basés sur les valeurs d'irradiance d'une image aéroportée. Afin de conserver un caractère général au texte qui suit, la notation utilisée est la plus simple possible et aucune démonstration n'est fournie. Pour plus de détails concernant le krigeage ordinaire et la géostatistique en général, le lecteur peut se référer aux trois ouvrages suivants: Clark, 1979, David, 1977 et Journel et Huijbregts, 1978. Le premier ouvrage introduit les principaux concepts à l'aide d'exemples pratiques; le deuxième fournit une analyse plus complète de ces concepts tandis que le dernier permet une compréhension plus approfondie de la géostatistique.

A.1 Variable régionalisée et fonction aléatoire

Un phénomène naturel peut être caractérisé par la distribution spatiale d'un certain nombre de quantités mesurables appelées variables régionalisées. Par exemple, la distribution de la valeur d'irradiance $r(x)$ pour tout pixel x à l'intérieur d'une image aéroportée, est une variable régionalisée définie dans l'espace horizontal que couvre l'image. Une telle variable régionalisée est

caractérisée par une double nature: un aspect local erratique qui fait penser à une variable aléatoire et un aspect général plus structuré qui requiert une certaine représentation fonctionnelle (figure A1). Pour obtenir une formulation appropriée à cette double nature de la variable régionalisée, on a recours au concept de fonction aléatoire.

Une fonction aléatoire $R(x)$ peut être décrite comme un ensemble de variables aléatoires $R(x_i)$ définies à chaque pixel x_i de l'image (I): $R(x) = \{R(x_i), \text{ pour tout } x_i \in I\}$, les variables aléatoires $R(x_i)$ étant corrélées entre elles. A chaque pixel x_i , la variable aléatoire $R(x_i)$ a une distribution probabiliste de sorte que la valeur d'irradiance $r(x_i)$ observée en ce pixel est interprétée comme une réalisation particulière de la variable aléatoire $R(x_i)$. De façon similaire, l'ensemble des valeurs $\{r(x_i), \text{ pour tout } x_i \in I\}$ c'est-à-dire la variable régionalisée $r(x)$, est interprétée comme une réalisation particulière de la fonction aléatoire $R(x)$.

Dans le but de bien faire la distinction entre les observations et le modèle probabiliste, la variable régionalisée ou les réalisations des variables aléatoires sont écrites en lettres minuscules, tandis que la fonction ou les variables aléatoires elles-mêmes sont écrites en lettres majuscules.

L'interprétation probabiliste d'une variable régionalisée $r(x)$ en tant que réalisation particulière d'une fonction aléatoire $R(x)$ est pratique seulement si on peut inférer la loi de probabilité qui définit cette fonction aléatoire dans son ensemble. Il est clair, toutefois, qu'à partir d'une seule réalisation $r(x)$, on ne peut pas rigoureusement déduire la loi de probabilité de la fonction aléatoire $R(x)$. Afin de sortir de cette impasse, on a recours à

différentes hypothèses de stationnarité qui établissent divers degrés d'homogénéité spatiale selon les besoins de la situation.

A.2 Le semi-variogramme

Le semi-variogramme est une fonction qui quantifie le degré de corrélation entre deux variables aléatoires $R(x_i)$ et $R(x_i+h)$ séparées par un vecteur distance h pour tout pixel $x_i \in I$. C'est, en d'autres mots, une signature qui caractérise la structure de variabilité spatiale de la fonction aléatoire $R(x)$. Le taux de variabilité (manque de corrélation) entre deux variables aléatoires $R(x_i)$ et $R(x_i+h)$ dépend de la nature du phénomène étudié. De façon générale, le semi-variogramme augmente avec la distance h qui sépare les deux variables. Il peut aussi varier selon la direction du vecteur.

En termes probabilistes, on définit le semi-variogramme comme étant la moitié de la variance de l'incrément $[R(x_i) - R(x_i+h)]$:

$$\begin{aligned}\gamma(x_i, h) &= 1/2 * \text{Var} \{R(x_i) - R(x_i+h)\} \\ &= 1/2 * [E \{(R(x_i) - R(x_i + h))^2\} - (E \{R(x_i) - R(x_i + h)\})^2], x_i \in I\end{aligned}$$

C'est une fonction à la fois du pixel x_i et du vecteur distance h , et son estimation requiert plusieurs réalisations de la paire de variables $[R(x_i), R(x_i+h)]$. En pratique, au maximum une seule réalisation $[r(x_i), r(x_i+h)]$ est disponible, soit le couple de valeurs aux pixels x_i et x_i+h . Afin d'assurer l'accessibilité du semi-variogramme, on assume alors une hypothèse de station-

narité intrinsèque(*) pour la fonction aléatoire $R(x)$. Cela signifie que

- l'espérance mathématique de $R(x_i)$ est constante pour tout pixel x_i :

$$E \{R(x_i) - R(x_i+h)\} = 0 \text{ pour toute distance } h;$$

- le semi-variogramme existe et dépend uniquement du vecteur h (en module et direction) et non plus de la localisation de x_i :

$$\gamma(h) = 1/2 * E\{(R(x_i) - R(x_i+h))^2\} \text{ pour tout } x_i \in I.$$

On peut ensuite calculer le semi-variogramme expérimental $\gamma(h)^*$ à partir des valeurs de l'ensemble des pixels de l'image:

$$\gamma(h)^* = \frac{1}{2NP(h)} \sum_{i=1}^{NP(h)} (r(x_i) - r(x_i+h))^2$$

où $NP(h)$ est le nombre de paires de valeurs $[r(x_i), r(x_i+h)]$ séparées par un vecteur h .

On calcule ainsi le semi-variogramme $\gamma(h)^*$ pour des vecteurs h variant en module et en direction. Très souvent, $\gamma(h)^*$ apparaît comme une ligne brisée qui atteint un palier (C) après une distance (a) appelée portée (figure A2). La portée est la distance au-delà de laquelle les valeurs de deux pixels ne sont plus corrélées; elle quantifie le concept intuitif de la zone d'influence de la fonction aléatoire $R(x)$. La valeur du palier correspond à la variance

(*) Une hypothèse de stationnarité intrinsèque pour $R(x)$ correspond à une hypothèse de stationnarité d'ordre 2 limitée à l'incrément $[R(x) - R(x+h)]$.

des valeurs utilisées pour calculer le semi-variogramme. On doit noter toutefois que, pour certaines variables régionalisées, le palier peut ne pas exister. À l'origine, il se peut qu'on observe une discontinuité appelée effet de pépite (C_0), bien que par définition, $\gamma(0) = 0$. Cette discontinuité, s'il en est une, représente le palier d'une micro-structure de variabilité qui ne peut être clairement représentée à partir des valeurs d'irradiance de l'image qui servent à calculer le semi-variogramme. Les erreurs de mesures des valeurs (s'il y a lieu) sont aussi reflétées dans l'effet de pépite.

En pratique, un semi-variogramme expérimental ne doit être considéré que pour des distances inférieures à $L/2$, L étant la dimension de l'image pour laquelle $\gamma(h)^*$ a été calculé. De plus, un minimum de 30 à 50 paires d'échantillons ($NP(h)$) est recommandé pour le calcul de $\gamma(h)^*$ (Journel et Huijbregts, 1978, p.194).

Selon que les semi-variogrammes calculés pour différentes directions coïncident ou non, le phénomène est dit "isotrope" ou "anisotrope". Par exemple, on est en présence d'une anisotropie zonale (figure A3) lorsqu'on observe des taux de variabilité extrêmes pour deux directions à angle droit (NS et EO), alors que pour les deux directions intermédiaires (NE-SO et NO-SE) les taux de variabilité coïncident et sont intermédiaires (David, 1977, p.134). Il faut souligner qu'une anisotropie décelée dans les semi-variogrammes directionnels doit toujours correspondre à une réalité physique du phénomène.

Il se peut aussi que la variabilité quantifiée par $\gamma(h)$ soit due à diverses causes qui se manifestent à des échelles différentes. Par exemple, la variabilité d'une image peut être générée à 3 niveaux différents: au niveau

d'un pixel (pour des distances $h \approx 0$), l'effet de pépite C_0 (s'il en est un) reflète les micro-variabilités du phénomène (incluant les erreurs de mesures); puis, $\gamma_1(h)$, dont la portée est d'environ 5 pixels, représente la variabilité particulière à des éléments de l'image (collines, champs, etc.) dont le rayon d'influence ne dépasse pas 5 pixels; enfin, $\gamma_2(h)$, avec une portée de plus de 30 pixels, caractérise l'ensemble des éléments à l'intérieur de l'image. Ces diverses sources de variabilité, quantifiées par autant de structures gigognes (Journel et Huijbregts, 1978, p.149), interviennent simultanément pour toutes les distances h , de sorte que:

$$\gamma(h) = C_0 + \gamma_1(h) + \gamma_2(h).$$

Enfin, on ajuste un modèle au semi-variogramme expérimental (figure A2) à l'aide de fonctions mathématiques "définies positives", de façon à ne pas engendrer de variances d'estimation négatives lors du krigeage (Journel et Huijbregts, 1978, p.35). De tels modèles définis positifs couramment utilisés en géostatistique sont les modèles sphériques, exponentiels et linéaires (Journel et Huijbregts, 1978, pp. 161-195):

- modèle sphérique avec palier (C) et portée (a):

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C [1.5 (h/a) - 0.5 (h/a)^3] = \text{Sph}(C,a) & 0 \leq h \leq a \\ &= C & h > a \end{aligned}$$

- modèle exponentiel avec palier (C) et portée ($\approx 3a$):

$$\gamma(h) = C [1 - e^{(-h/a)}]$$

- modèle linéaire sans palier ni portée:

$$\gamma(h) = wh \quad \text{où } w \text{ est la pente à l'origine}$$

A.3 La variance d'estimation

Sous l'hypothèse de stationnarité intrinsèque, le variogramme $2\gamma(h) = E\{[R(x) - R(x+h)]^2\}$ peut être vu comme une variance d'estimation, c'est-à-dire comme la variance de l'erreur commise lorsque la valeur d'irradiance au pixel x est estimée par la valeur au pixel $x+h$.

Supposons que la valeur d'irradiance inconnue $R(x_0)$ du pixel x_0 est estimée par $R(x_0)^*$, c'est-à-dire par une combinaison linéaire de N variables $R(x_a)$ échantillonnées aux pixels x_a situés près de x_0 :

$$R(x_0)^* = \sum_{a=1}^N \lambda_a R(x_a)$$

où les λ_a sont les poids attribués à chaque échantillon.

À partir de la variance d'estimation élémentaire $2\gamma(h)$, on peut déduire la variance d'estimation de $R(x_0)$ par $R(x_0)^*$:

$$\sigma_e^2 = E\{[R(x_0) - R(x_0)^*]^2\}$$

$$\begin{aligned}
 &= 2 \sum_{a=1}^N \lambda_a \gamma(h_{oa}) - \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \lambda_a \lambda_b \gamma(h_{ab}) - \gamma(h_{oo}) \\
 &= 2 \sum_{a=1}^N \lambda_a \gamma(h_{oa}) - \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \lambda_a \lambda_b \gamma(h_{ab})
 \end{aligned}$$

où $\gamma(h_{ab})$ est la valeur du semi-variogramme pour la distance h_{ab} entre les pixels échantillonnés x_a et x_b ; $\gamma(h_{oa})$ est la valeur du semi-variogramme pour la distance h_{oa} entre les pixels x_o et x_a ; et $\gamma(h_{oo})$, qui correspond à $\gamma(0)$, est nul.

La formulation de la variance d'estimation σ_e^2 montre que, dans le cas de l'estimation d'un pixel x_o basée sur un ensemble de N pixels échantillonnés, la qualité de l'estimation dépend des 3 critères suivants:

- 1) les distances relatives entre le pixel à estimer x_o et l'information utilisée (l'ensemble des N échantillons aux pixels x_a), exprimées par les termes $\gamma(h_{oa})$, $a = 1, N$;
- 2) la quantité et l'arrangement spatial de l'information exprimés par les termes $\gamma(h_{ab})$, $a, b = 1, N$;
- 3) le degré de continuité du phénomène étudié quantifié par le semi-variogramme $\gamma(h)$.

D'autre part, on doit noter que la variance d'estimation σ_e^2 ne dépend pas des valeurs expérimentales ($r(x_a)$, $a = 1, N$) que prennent les variables échantillonnées et qu'elle peut aussi être calculée pour tout estimateur linéaire non krigé. On peut donc obtenir la variance d'estimation d'un estimateur linéaire

dès que l'on connaît l'emplacement des variables échantillonnées, avant même d'en connaître les valeurs expérimentales.

A.5 Le krigeage ordinaire

La technique du krigeage ordinaire est utilisée sous une hypothèse de stationnarité intrinsèque pour $R(x)$ de sorte que:

$$E\{R(x)\} = m \quad \text{pour tout } x \in I,$$

$$\gamma(x,h) = \gamma(h) \quad \text{pour tout } x \in I.$$

On suppose donc que la valeur moyenne de $R(x)$ à l'intérieur de l'image est constante quoiqu'inconnue. Le krigeage ordinaire (KO) est une régression linéaire qui produit un estimateur linéaire sans biais (il ne cause pas d'erreur systématique) avec une variance d'estimation minimale. Par exemple, supposons que l'on désire estimer la valeur d'irradiance inconnue $R(x_0)$ du pixel x_0 à partir d'un ensemble de N échantillons $R(x_a)$, $a = 1, N$. L'estimateur $R(x_0)^*$ obtenu par KO est une combinaison linéaire des N données:

$$R(x_0)^* = \sum_{a=1}^N \lambda_a R(x_a)$$

Les N poids λ_a sont déterminés par le système de krigeage de façon à ce que:

$$- \sum_{a=1}^N \lambda_a = 1; \text{ cette condition assure le non-biais de } R(x_0)^*, \text{ c'est-à-dire que}$$

$$E\{R(x_0) - R(x_0)^*\} = 0;$$

- la variance d'estimation, appelée dans ce cas variance de krigeage et écrite

$$\sigma_k^2 = E\{[R(x_0) - R(x_0)^*]^2\}, \text{ est minimale.}$$

Pour réaliser le krigeage, on exprime σ_k^2 en fonction du semi-variogramme,

$$\sigma_k^2 = 2 \sum_{a=1}^N \lambda_a \gamma(h_{oa}) - \sum_{a=1}^N \sum_{b=1}^N \lambda_a \lambda_b \gamma(h_{ab}),$$

et on utilise la technique de Lagrange pour minimiser σ_k^2 sous la contrainte

$$\sum_{a=1}^N \lambda_a = 1. \quad \text{On résout alors un système de } N+1 \text{ équations linéaires avec } N+1$$

inconnus qui sont les N poids λ_a et le paramètre de Lagrange μ (Journel et Huijbregts, 1978, pp. 304-312); ce système de krigeage est le suivant:

$$\sum_{b=1}^N \lambda_b \gamma(h_{ab}) + \mu = \gamma(h_{oa}) \quad a = 1, N$$

$$\sum_{b=1}^N \lambda_b = 1.$$

La variance de krigeage peut alors s'écrire comme suit:

$$\sigma_k^2 = \sum_{a=1}^N \lambda_a \gamma(h_{oa}) + \mu.$$

En pratique, pour estimer la valeur $R(x_0)$ d'un pixel x_0 , on ne retient que les échantillons $R(x_a)$ qui sont situés à l'intérieur d'un rayon de recherche établi en fonction de la densité d'information et de la distance d'ajustement du modèle des semi-variogrammes.

ANNEXE B - EXEMPLES D'APPLICATION POUR IMAGES A COUVERT UNIQUE

B.1 Exemple 1: Image-culture (C35)

Les statistiques des 4096 valeurs de l'image-culture C35 apparaissent au tableau B1 avec celles des 320 échantillons extrêmes locaux. On y remarque une surestimation de l'écart-type des 320 échantillons tandis que leur moyenne coïncide avec celle des 4096 valeurs. D'autre part, pour des distances (h) allant jusqu'à 8 pixels, on a ajusté un modèle isotrope unique aux 4 semi-variogrammes directionnels exhaustifs calculés à 0, 45, 90 et 135 degrés (figures B1a et B1b). Ce modèle est composé de la somme de 3 structures sphériques et ne compte pas d'effet de pépite:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= \text{Sph}(15,4) + \text{Sph}(15,10) + \text{Sph}(16,24) & 0 \leq h \leq 24 \text{ pxls} \\ &= 46 & h > 24 \text{ pxls} \end{aligned}$$

Les statistiques des résultats du krigeage réalisé avec un rayon de recherche de 8 pixels sont présentées au tableau B2. On n'observe qu'un léger lissage des valeurs krigées par rapport aux valeurs vraies, et les deux histogrammes (figures B2 et B3) coïncident très bien. Les vues en 3 dimensions des valeurs vraies et krigées (figures B4 et B5, respectivement) illustrent l'aspect lissé de l'image krigée.

Le nuage de points du scattérogramme des valeurs vraies (en ordonnée, figure B6) et krigées (en abscisse) est bien aligné le long de la droite à 45 degrés (coefficient de corrélation de 0.912) sauf pour les quelques valeurs

très basses ($<600\mu\text{F}$) qui sont sensiblement surestimées par le krigeage. On constate, par exemple, que la valeur minimale de 582.9 est attribuée, en réalité, à 3 pixels adjacents (figure B4). L'unique pixel échantillonné parmi ceux-ci a été restitué par le krigeage (figure B5) tandis que les valeurs aux 2 autres pixels ont été considérablement lissées (augmentées, dans ce cas) par l'intermédiaire des échantillons environnants dont les valeurs sont beaucoup plus élevées. Il faut souligner, toutefois, que ces valeurs extrêmes très faibles et très locales n'appartiennent pas au milieu agricole et qu'elles représentent vraisemblablement des bâtiments.

Les erreurs, dont les principales statistiques apparaissent au tableau B3, sont peu importantes sauf pour les valeurs minimales de ER et RER qui sont anormalement larges, encore une fois à cause de ces quelques valeurs très faibles qui n'appartiennent pas au milieu agricole.

B.2 Exemple 2: Image urbaine (U35)

On présente au tableau B4 les statistiques des 4096 valeurs de l'image urbaine U35, de même que celles des 320 valeurs extrêmes locales échantillonnées. La moyenne des 4096 valeurs est bien reproduite par les 320 échantillons, mais son écart-type est surestimé. Quant aux quatre semi-variogrammes directionnels exhaustifs calculés à 0, 45, 90 et 135 degrés (figures B7a et B7b), ils sont très bien ajustés sur une distance de 16 pixels par un modèle isotrope. Ce modèle, qui n'a pas d'effet de pépite, est fait de la somme de 3 structures sphériques ajustées à la main:

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= \text{Sph}(80,3) + \text{Sph}(65,6) + \text{Sph}(85,15) & 0 \leq h \leq 15 \text{ pxls} \\ &= 230 & h > 15 \text{ pxls} \end{aligned}$$

Le krigeage a été effectué avec un rayon de recherche de 16 pixels. Les statistiques des résultats sont données au tableau B5. On y remarque un écart-type des valeurs krigées sensiblement inférieur à celui des valeurs vraies, ce qui quantifie leur aspect lissé. Cette variabilité réduite des valeurs krigées est également apparente lorsqu'on compare les histogrammes des valeurs vraies (figure B8) et krigées (figure B9), de même que leurs vues en 3 dimensions (figures B10 et B11, respectivement). Enfin, le scattérogramme de la figure B12 confirme ces observations. On retrouve un nuage de points assez dispersé (coefficient de corrélation de 0.742), sans biais global, mais dont les valeurs faibles sont surestimées et les valeurs fortes sousestimées. En termes d'erreurs, la reproduction de l'image est satisfaisante (tableau B6). Les erreurs relatives (ER) sont comprises entre -7% et 7% et n'indiquent pas non plus de biais global.

Somme toute, bien que très valable, la reproduction de cette image urbaine n'est pas aussi satisfaisante que celles des images en milieu forestier et agricole déjà traitées. La plus grande variabilité des valeurs d'irradiance sur de courtes distances, traduite par des semi-variogrammes avec un palier de $230 \mu\text{F}^2$ et une portée de 15 pixels, est responsable des erreurs d'estimation plus marquées en milieu urbain.

ANNEXE C - EXEMPLES D'APPLICATION POUR IMAGES A COUVERTS MULTIPLES

C.1 Exemple 1: Image à couverts forestier, agricole et urbain (R35)

Les statistiques des 4096 valeurs de l'image à trois couverts R35 sont données au tableau C1, de même que celles des 320 valeurs extrêmes locales échantillonnées. Typiquement, les moyennes coïncident tandis que l'écart-type des 4096 valeurs est surestimé par celui des 320 échantillons.

L'histogramme des 4096 valeurs de l'image étant unimodal (figure C1), on a utilisé pour la classification des pixels les mêmes valeurs-seuils que pour l'image trimodale (forêt - culture - urbain) Q35 traitée à la section 4.3: les valeurs-seuils S1 et S2 sont respectivement égales à 681 et 703 μF . On constate, à l'aide de la matrice indicatrice (figure C2) résultante, que les 3 couverts ne sont pas très bien définis à l'intérieur de l'image mais qu'ils sont plutôt enchevêtrés localement les uns avec les autres.

Pour le traitement unique (traitement 1), on a calculé 4 semi-variogrammes directionnels (à 0, 45, 90 et 135 degrés) à partir des 4096 pixels de l'image, sans tenir compte des différents couverts. On a ajusté à ces semi-variogrammes expérimentaux un modèle isotrope de type exponentiel, sans effet de pépite et valable pour des distances (h) allant jusqu'à 20 pixels (figures C3a et C3b):

$$\gamma(h) = 220 (1 - e^{-h/2.5})$$

On a ensuite krigé les 4096 pixels de l'image à partir des 320 échantillons et avec un rayon de recherche de 20 pixels.

Pour le traitement par couvert avec semi-variogrammes/couvert/image (traitement 2), on a calculé 4 semi-variogrammes directionnels exhaustifs à pas variable pour chacun des 3 couverts. Encore une fois, des modèles isotropes sans effet de pépite leur ont été ajustés (automatiquement dans ce cas-ci); ces modèles pour les couverts forestier, agricole et urbain (figures C4, C5 et C6) sont les suivants:

$$\gamma(h)_f = 42.41 \left(1 - e^{-h/1.37} \right)$$

$$\gamma(h)_c = 37.8 \left(1 - e^{-h/1.56} \right)$$

$$\gamma(h)_u = 103.9 \left(1 - e^{-h/1.41} \right)$$

Le krigeage des trois couverts a ensuite été fait à partir des valeurs échantillonnées appartenant à chaque milieu et avec des rayons de recherche longs de 16 pixels.

Enfin, pour le traitement par couvert avec semi-variogrammes/couvert/vol (traitement 3), on a eu recours aux trois modèles ajustés aux semi-variogrammes forestiers, agricoles et urbains (figures C7a,b, C8a,b et C9a,b) des trois images à couvert unique traitées à la section 3.4 et à l'annexe B:

$$\begin{aligned} \gamma(h)_F &= \text{Sph}(15,4) + \text{Sph}(75,24) & 0 \leq h \leq 24 \text{ pxls} \\ &= 90 & h > 24 \text{ pxls} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma(h)_C &= \text{Sph}(15,4) + \text{Sph}(15,10) + \text{Sph}(16,24) & 0 \leq h \leq 24 \text{ pxls} \\ &= 46 & h > 24 \text{ pxls} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \gamma(h)_u &= \text{Sph}(80,3) + \text{Sph}(65,6) + \text{Sph}(85,15) & 0 \leq h \leq 15 \text{ pxls} \\ &= 230 & h > 15 \text{ pxls} \end{aligned}$$

Chacun de ces modèles a été associé à un rayon de recherche de 16 pixels et le krigeage des trois couverts a été réalisé à partir des valeurs échantillonnées à l'intérieur de chaque couvert.

Les statistiques des valeurs krigées selon les 3 traitements sont très voisines de celles des valeurs vraies (tableau C2). La moyenne est toujours bien reproduite tandis que l'écart-type est légèrement sousestimé par le traitement unique et surestimé par les deux traitements par couvert. Ces différences apparaissent également au niveau des histogrammes des valeurs vraies et krigées: pour le traitement 1 (figure C10), l'histogramme est encore unimodal comme pour les valeurs vraies (figure C1) mais plus resserré à cause du lissage qu'entraîne le krigeage unique; pour les traitements 2 et 3 (figures C11 et C12), les 3 modes apparaissent distinctement indiquant ainsi que l'effet du lissage à l'intérieur de chaque couvert est masqué par la démarcation amplifiée, générée entre les couverts par le processus de classification et maintenue par le krigeage par couvert.

De la même façon, si on compare les vues en 2 et 3 dimensions des valeurs vraies (figures C13 et C14) et krigées (figures C15 et C16, C17 et C18, C19 et C20 pour les traitements 1, 2 et 3), on observe que les délimitations entre les pixels des 3 couverts sont adoucies par le traitement 1 et amplifiées par les traitements 2 et 3. Plus particulièrement, si on observe les trois vues en 2 dimensions des valeurs krigées (figures C15, C17 et C19), on constate que les contours issus du traitement 1 diffèrent sensiblement de ceux des traitements 2

et 3 qui eux sont très semblables. On doit rappeler, à ce propos, que les trois couverts n'ont pas de domaines bien définis à l'intérieur de l'image vraie (figure C13) et qu'ils sont plutôt entremêlés (figure C2). Conséquemment, la procédure de classification génère de nombreuses délimitations entre les couverts de sorte que les valeurs krigées issues des traitements 2 et 3 ne sont que rarement estimées à partir des mêmes échantillons que les valeurs issues du traitement 1 (contrairement à l'image trimodale Q35 traitée à la section 4.3.4). Ce résultat se traduit au niveau des erreurs relatives (ER) dont les statistiques pour le traitement 1 diffèrent sensiblement de celles des traitements 2 et 3 (tableau C3).

Les scattérogrammes des valeurs vraies et krigées selon les trois traitements (figures C21, C22 et C23) confirment ces observations. Tout d'abord, le nuage de points issus du traitement 1 (figure C21) est davantage dispersé (coefficient de corrélation de 0.753) par rapport à la droite à 45 degrés que le sont les nuages des traitements 2 et 3 (figures C22 et C23) dont les coefficients de corrélation sont respectivement de 0.911 et 0.907. Pour les 2 traitements par couvert, on observe la démarcation très claire entre les valeurs des 3 couverts ($S_1 = 681 \mu\text{F}$ et $S_2 = 703 \mu\text{F}$). D'autre part, la variabilité des valeurs krigées à l'intérieur de chaque couvert est légèrement moindre pour le traitement 2, indiquant ainsi une estimation plus homogène de chaque couvert.

Les trois traitements se distinguent également au niveau des écarts-types d'estimation. Tout comme pour l'image trimodale Q35, les isolignes de contours des écarts-types reliés au traitement unique (figure C24) sont uniformes à l'intérieur de l'image tandis que ceux des traitements 2 et 3 (figures C25 et

C26) sont contrôlées par les lignes de démarcation entre les couverts. Ces isolignes traduisent ainsi les différents semi-variogrammes utilisés pour chaque traitement. Les rapports d'erreurs (RER) et les proportions d'erreurs sévères (ERS) qui dépendent de l'écart-type d'estimation varient aussi d'un traitement à l'autre (tableau C3).

En résumé, il ressort pour cette image R35 que 1) les résultats des deux traitements par couvert sont plus satisfaisants que ceux du traitement unique et 2) les écarts-types d'estimation issus du traitement 2 sont plus fiables, puisqu'ils dépendent des semi-variogrammes/couvert de l'image elle-même.

C.2 Exemple 2: Image à couverts agricole et urbain (X35)

Les statistiques des 4096 valeurs de l'image à deux couverts X35 apparaissent au tableau C4 avec celles des 320 valeurs extrêmes échantillonnées. Encore une fois, la moyenne des valeurs vraies est bien reproduite par les 320 échantillons tandis que leur écart-type est surestimé.

L'histogramme des 4096 valeurs de l'image étant unimodal (figure C27), on a établi la valeur-seuil entre les couverts agricole et urbain en se basant sur la valeur utilisée pour le traitement des images trimodales Q35 et R35. On a donc choisi une valeur-seuil de 701 μF , ce qui donne un rapport de surface de 2 pour 1 pour les milieux agricole et urbain. La matrice indicatrice résultant de la classification basée sur cette valeur-seuil apparaît à la figure C28. On remarque que les deux couverts s'y distinguent clairement.

Pour le traitement unique (traitement 1), on a calculé 4 semi-variogrammes exhaustifs directionnels (à 0, 45, 90 et 135 degrés) à partir des 4096 pixels de l'image, sans tenir compte des différents couverts. On a ajusté à ces semi-variogrammes expérimentaux un modèle isotrope sans effet de pépite, valable pour une distance maximale (h) de 20 pixels. Ce modèle est composé de 3 structures sphériques (figures C29a et C29b):

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= \text{Sph}(35,3) + \text{Sph}(40,12) + \text{Sph}(45,24) & 0 \leq h \leq 24 \text{ pxls} \\ &= 120 & h > 24 \text{ pxls.} \end{aligned}$$

On a ensuite krigé les 4096 pixels de l'image à partir des 320 valeurs échantillonnées et avec un rayon de recherche de 20 pixels.

Pour le traitement par couvert avec semi-variogrammes/couvert/image (traitement 2), on a calculé 4 semi-variogrammes directionnels pour chacun des couverts. Encore là, on leur a ajusté des modèles isotropes sans effet de pépite; ces modèles pour les couverts agricole et urbain (figures C30a,b et C31a,b) sont composés de 2 structures sphériques:

$$\begin{aligned} \gamma(h)_c &= \text{Sph}(5,2) + \text{Sph}(28,16) & 0 \leq h \leq 16 \text{ pxls} \\ &= 33 & h > 16 \text{ pxls;} \\ \gamma(h)_u &= \text{Sph}(20,1.5) + \text{Sph}(46,4) & 0 \leq h \leq 4 \text{ pxls} \\ &= 66 & h > 4 \text{ pxls.} \end{aligned}$$

On a ensuite krigé les 2 couverts séparément à partir des valeurs échantillonnées à l'intérieur de chacun d'eux et avec des rayons de recherche de 16 pixels.

Enfin, pour le traitement par couvert avec semi-variogrammes/couvert/vol (traitement 3), on a eu recours aux deux modèles ajustés aux semi-variogrammes agricoles et urbains (figures C32a,b et C33a,b) des 2 images à couvert unique traitées, à l'annexe B (sections B1 et B2):

$$\begin{aligned}\gamma(h)C &= \text{Sph}(15,4) + \text{Sph}(15,10) + \text{Sph}(16,24) \quad 0 \leq h \leq 24 \text{ pxls} \\ &= 46 \quad \quad \quad h > 24 \text{ pxls} \\ \gamma(h)U &= \text{Sph}(80,3) + \text{Sph}(65,6) + \text{Sph}(85,15) \quad 0 \leq h \leq 15 \text{ pxls} \\ &= 230 \quad \quad \quad h > 15 \text{ pxls}\end{aligned}$$

Dans les 2 cas, on a utilisé un rayon de recherche de 16 pixels et on a krigé les 2 couverts à partir des valeurs échantillonnées appartenant à chaque couvert.

Les moyennes des valeurs krigées selon les trois traitements reproduisent très bien celle des valeurs vraies (tableau C5); d'autre part, l'écart-type des valeurs vraies est légèrement sousestimé par le traitement unique et surestimé par les deux traitements par couverts. On observe également ces différences au niveau des histogrammes des valeurs vraies et krigées. L'histogramme des résultats du traitement 1 (figure C34) est unimodal comme celui des valeurs vraies (figure C27), quoiqu'un peu plus reserré à cause du lissage qu'entraîne le krigeage unique. Pour les 2 traitements par couvert (traitements 2 et 3), les histogrammes sont très semblables (figures C35 et C36) et comportent deux modes distincts qui indiquent que l'effet de lissage à l'intérieur de chaque couvert est masqué par la démarcation amplifiée, générée entre les couverts par le procédé de classification et maintenue par le krigeage par couvert.

De façon similaire, les vues en 2 et 3 dimensions des valeurs vraies (figures C37 et C38) et krigées (figures C39 et C40, C41 et C42, C43 et C44 pour les traitements 1, 2 et 3) illustrent l'adoucissement des limites entre les couverts par le traitement 1 et leur amplification par les traitements 2 et 3. D'un autre côté, si on s'éloigne des zones de délimitation entre les couverts, on observe une similarité au niveau des principales lignes de contours des 3 traitements. Les statistiques des erreurs relatives (ER) issues des 3 traitements sont en effet semblables (tableau C6).

Les scattérogrammes des valeurs vraies et krigées selon les 3 traitements (figures C45, C46 et C47) confirment ces observations. Dans les 3 cas, les erreurs sont sensiblement plus larges dans le milieu urbain ($>701 \mu\text{F}$), ce qui s'explique par la plus grande variabilité du phénomène d'irradiance dans ce milieu. Le nuage de points issus du traitement 1 est davantage dispersé (coefficient de corrélation de .883) par rapport à la droite à 45 degrés que le sont les nuages des traitements 2 et 3 dont les coefficients de corrélation sont respectivement de .920 et .918. Pour ces 2 traitements par couvert, on constate une démarcation très claire entre les deux couverts accompagné d'un lissage des valeurs krigées à l'intérieur de chaque couvert.

Les trois traitements se distinguent également au niveau des écarts-types d'estimation. Tout comme pour les images trimodales Q35 et R35, les isolignes de contours des écarts-types associés au traitement unique (figure C48) sont uniformes sur toute l'image alors que celles des traitements 2 et 3 (figures C49 et C50) sont contrôlées par les lignes de démarcation entre les 2 couverts. Ces isolignes reflètent ainsi les différents semi-variogrammes utilisés pour chaque traitement. Les rapports d'erreurs (RER) et les proportions d'erreurs

sévères (ERS) qui sont établis à partir de l'écart-type d'estimation varient également d'un traitement à l'autre (tableau C6).

Somme toute, les trois traitements appliqués permettent une reproduction très satisfaisante de cette image bimodale, mais seul le traitement 2 (avec semi-variogrammes/couvert/image) est représentatif en termes d'écart-types d'estimation.

ANNEXE D - EFFET DU BRUIT DU CAPTEUR DANS L'ANALYSE D'IMAGES DAEDALUS

Au cours de cette première étude, on a voulu vérifier l'effet du bruit du capteur dans l'analyse d'images Daedalus de façon à mettre en évidence certains aspects qui interviennent dans la procédure de reproduction d'une image. Bien qu'il ne faille pas tirer de conclusions générales à partir des quelques observations qui suivent, celles-ci n'en demeurent pas moins informatives.

L'effet du bruit du capteur se situe principalement au niveau du calcul des semi-variogrammes. On suspecte en effet un alignement préférentiel des valeurs d'irradiance dans la direction perpendiculaire à la ligne de vol, c'est-à-dire dans l'axe de balayage du capteur. Un tel alignement devrait entraîner une anisotropie chez les semi-variogrammes directionnels dont le taux de variabilité dans la direction perpendiculaire à la ligne de vol serait réduit par rapport au taux de variabilité dans la direction de vol.

D.1 Effet du bruit du capteur dans le calcul des semi-variogrammes directionnels d'images urbaines

On a tout d'abord vérifié l'effet du bruit du capteur dans le cas d'images en milieu urbain où l'on sait que le taux de variabilité est particulièrement élevé: le palier des semi-variogrammes de l'image U35 traitée à l'annexe B atteint $230 \mu F^2$. Bien que pour cette image on n'ait pas décelé d'anisotropie (figures B7a et B7b), on a quand même voulu vérifier l'effet du capteur, cette fois à l'aide de 2 images d'une même scène urbaine couvrant une surface de 128×128 pixels et provenant de 2 vols croisés effectués dans les mêmes conditions, à quelques minutes d'intervalles: l'image UR34 prise lors d'un vol est-ouest et l'image UR35 provenant d'un vol nord-sud (tableau 1). Tel

qu'espéré, les moyennes et écarts-types des valeurs de ces deux images coïncident (tableau D1). On observe également que les semi-variogrammes directionnels des figures D1 et D2, calculés respectivement à partir des images UR34 et UR35, coïncident et qu'ils ne montrent pas d'anisotropie, tout comme pour l'image U35.

D.2 Effet du bruit du capteur dans le calcul des semi-variogrammes directionnels d'images-eau

Pour la vérification en un milieu où le taux de variabilité est très peu élevé, on a utilisé les images-eau E34 et E35 prises lors de vols est-ouest et nord-sud respectivement (tableau 1). Les statistiques de ces deux images de 64x64 pixels apparaissent au tableau D2. Il faut souligner que ces deux images ne représentent pas la même scène comme c'est le cas pour les images urbaine UR34 et UR35 traitées à la section précédente. Les 2 semi-variogrammes directionnels à pas variable de l'image E34 (vol est-ouest, figure D3) indiquent une anisotropie très claire où la variabilité selon la direction est-ouest est plus marquée que selon la direction nord-sud. D'autre part, les 2 semi-variogrammes directionnels (à pas variable) de l'image E35 (vol nord-sud, figure D4) illustrent une anisotropie dans le sens contraire: la variabilité selon la direction nord-sud est maintenant plus prononcée que selon la direction est-ouest. Ces deux ensembles de semi-variogrammes manifestent donc une variabilité amoindrie dans la direction perpendiculaire à la ligne de vol, ce qui correspond vraisemblablement à l'effet de balayage du capteur. Les vues en 2 dimensions des images E34 et E35 (figures D5 et D6) confirment ces observations. On y constate en effet l'alignement des isolignes dans la direction perpendiculaire au vol.

D.3 Commentaires

En se basant sur les exemples présentés plus haut, il semble qu'on puisse relier l'effet apparent du bruit du capteur au peu de variabilité du milieu étudié. En effet, on ne décèle pas de variabilité préférentielle au sein du milieu urbain qui puisse être causée par le bruit du capteur. Ce milieu étant intrinsèquement variable (tableau D1), l'effet directionnel du bruit du capteur est masqué. D'autre part, dans le cas d'un milieu très peu variable comme l'eau (tableau D2), l'effet du bruit du capteur apparaît très clairement en réduisant la variabilité dans la direction perpendiculaire au vol. La figure D7, qui présente une vue en 2 dimensions d'une image à couverts urbain et aquatique (B34) prise lors d'un vol est-ouest, illustre très bien ces faits.

Il semble donc que l'on doive tenir compte de l'effet du bruit du capteur dans le traitement d'images représentant des phénomènes très peu variables. En ce qui a trait à la présente étude où l'on n'a pas analysé d'images en milieu aquatique, le problème ne se pose pas. Il ne faudrait toutefois pas être surpris de déceler un tel effet chez certaines images en milieu agricole où le taux de variabilité est quelques fois très réduit, ou encore chez des images avec un couverture de neige.

Enfin, lorsque confronté à des images qui indiquent une telle anisotropie "artificielle", il est préférable de ne retenir que le semi-variogramme calculé dans la direction du vol et de supposer une isotropie. L'image ainsi reproduite par krigeage (figure D8) est dépourvue de ces alignements systématiques d'origine artificielle.

TABLEAUX

TABLEAU 1
Identification des images traitées

NOM	TYPES COUVERTS	BANDE MAGNETIQUE	DIRECTION DU VOL	DIMENSIONS (PIXELS)	DEBUT LIGNE	DEBUT PIXEL	C1	C2
F35	Forêt	AS 1335	Nord-sud	64 x 64	2836	416	.96828	581.20
C35	Culture	AS 1335	Nord-sud	64 x 64	289	151	.96352	582.84
U35	Urbain	AS 1335	Nord-sud	64 x 64	1277	166	.90068	597.23
Q35	F-C-U	AS 1335	Nord-sud	64 x 64	1899	191	.89222	599.21
R35	F-C-U	AS 1335	Nord-sud	64 x 64	1330	252	.97035	581.06
X35	C-U	AS 1335	Nord-sud	64 x 64	1770	452	.89610	598.17
UR34	Urbain	AS 1334	Est-ouest	128 x 128	1074	18	1.51330	619.76
UR35	Urbain	AS 1335	Nord-sud	128 x 128	1256	311	.91903	593.20
E34	Eau	AS 1334	Est-ouest	64 x 64	233	40	1.52840	618.20
E35	Eau	AS 1335	Nord-sud	64 x 64	1181	166	.89171	597.65
B34	E-U	AS 1334	Est-Ouest	64 x 64	233	96	1.52840	618.20

TABLEAU 2
Statistiques des 4096 valeurs de l'image-forêt F35
et des ensembles de 320 et 256 valeurs échantillonnées

STATISTIQUES	4096 VALEURS	320 VALEURS ECHANTILLONNEES	256 VALEURS ECHANTILLONNEES
Moyenne	669.7	669.6	668.7
Ecart-type	11.4	13.0	10.9
Coefficient de variation	0.017	0.019	0.016
Minimum	641.6	641.6	646.3
Maximum	727.5	727.5	710.2

TABLEAU 3
Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image-forêt F35
et des 4096 valeurs krigées à partir de 320 et 256 valeurs échantillonnées.

STATISTIQUES	4096 VALEURS VRAIES	4096 VALEURS KRIGÉES	
		320 VALEURS ECHANTILLONNEES	256 VALEURS ECHANTILLONNEES
Moyenne	669.7	669.6	669.2
Ecart-type	11.4	11.3	10.4
Coefficient de variation	0.017	0.017	0.016
Minimum	641.6	641.6	646.3
Maximum	727.5	727.5	710.2

TABLEAU 4
Erreurs associées aux krigeages de l'image-forêt F35
basés sur 320 et 256 valeurs échantillonnées

ERREURS	4096 VALEURS KRIGÉES	
	320 ECHANTILLONS	256 ECHANTILLONS
ER (%): -----		
Moyenne	0.02	- 0.07
Ecart-type	0.57	0.63
Minimum	- 2.37	- 2.93
Maximum	3.23	3.78
RER: -----		
Moyenne	0.03	0.10
Ecart-type	0.81	0.91
Minimum	- 3.55	- 4.86
Maximum	4.54	5.62
% ERS: -----		
Positif	2.9	4.2
Négatif	1.7	2.4
Nul	95.4	93.4

TABLEAU 5
Statistiques des 4096 valeurs de l'image trimodale Q35
et des 320 valeurs échantillonnées

STATISTIQUES	4096 VALEURS	320 VALEURS ECHANTILLONNEES
Moyenne	686.1	686.2
Ecart-type	13.8	15.0
Coefficient de variation	0.020	0.022
Minimum	665.2	665.2
Maximum	744.8	744.8

TABLEAU 6
Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image trimodale Q35
et des 4096 valeurs krigées selon trois traitements

STATISTIQUES	4096 VALEURS VRAIES	4096 VALEURS KRIGÉES		
		TRAITEMENT 1	TRAITEMENT 2	TRAITEMENT 3
Moyenne	686.1	686.2	686.6	686.6
Ecart-type	13.8	13.4	14.4	14.5
Coefficient de variation	0.020	0.020	0.021	0.021
Minimum	665.2	665.2	665.2	665.2
Maximum	744.8	744.8	744.8	744.8

TABLEAU 7
Erreurs associées aux krigeages de l'image trimodale Q35
réalisés selon trois traitements

ERREURS	4096 VALEURS KRIGÉES		
	TRAITEMENT 1	TRAITEMENT 2	TRAITEMENT 3
ER (%): -----			
Moyenne	- 0.02	- 0.06	- 0.07
Ecart-type	0.63	0.61	0.62
Minimum	- 3.52	- 3.75	- 3.61
Maximum	3.60	2.47	2.85
RER: -----			
Moyenne	- 0.02	0.02	- 0.05
Ecart-type	0.82	1.71	0.71
Minimum	- 5.24	- 6.13	- 5.69
Maximum	4.54	5.23	4.35
(%) ERS: -----			
Positif	2.8	7.1	1.4
Négatif	3.6	6.6	1.9
Nul	93.6	86.3	96.7

TABLEAU 8
Moyennes des variances d'estimation prédites par krigeage
et variances des erreurs (VV-VK) issues des trois aliments
appliqués à l'image trimodale Q35

TRAITEMENT	(\overline{VE})	VAR (VV-VK)
1	26.1	19.5
2	13.5	17.7
3	38.0	18.7

TABLEAU B1
Statistiques des 4096 valeurs de l'image-culture C35
et des 320 valeurs échantillonnées

STATISTIQUES	4096 VALEURS	320 VALEURS ECHANTILLONNEES
Moyenne	686.2	686.3
Ecart-type	6.8	8.8
Coefficient de variation	0.010	0.013
Minimum	582.9	582.9
Maximum	711.4	711.4

TABLEAU B2
Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image-culture C35
des 4096 valeurs krigées à partir des 320 valeurs échantillonnées

STATISTIQUES	4096 VALEURS VRAIES	4096 VALEURS KRIGÉES (320 VALEURS ECHANTILLONNEES)
Moyenne	686.2	686.3
Ecart-type	6.8	6.3
Coefficient de variation	0.010	0.009
Minimum	582.9	582.9
Maximum	711.4	711.4

TABLEAU B3
Erreurs associées au krigeage de l'image-culture C35
basé sur 320 valeurs échantillonnées

ERREURS	4096 VALEURS KRIGÉES (320 VALEURS ÉCHANTILLONNÉES)
ER (%): -----	
Moyenne	- 0.01
Ecart-type	0.43
Minimum	- 9.29
Maximum	2.52
RER: -----	
Moyenne	- 0.02
Ecart-type	0.69
Minimum	- 13.88
Maximum	4.80
(%) ERS: -----	
Positif	1.2
Négatif	1.0
Nul	97.8

TABLEAU B4
Statistiques des 4096 valeurs de l'image urbaine U35
et des 320 valeurs

STATISTIQUES	4096 VALEURS	320 VALEURS ECHANTILLONNEES
Moyenne	706.8	707.2
Ecart-type	15.1	19.8
Coefficient de variation	0.021	9.028
Minimum	651.3	651.3
Maximum	762.1	762.1

TABLEAU B5
Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image urbaine U35
et des 4096 valeurs krigées à partir des 320 valeurs échantillonnées

STATISTIQUES	4096 VALEURS	4096 VALEURS KRIGÉES (320 VALEURS ECHANTILLONNEES)
Moyenne	706.8	707.4
Ecart-type	15.1	12.3
Coefficient de variation	0.021	0.017
Minimum	651.3	651.3
Maximum	762.1	762.1

TABLEAU B6
Erreurs associées au krigeage de l'image urbaine U35
basé sur 320 valeurs échantillonnées

ERREURS	4096 VALEURS KRIGÉES (320 VALEURS ÉCHANTILLONNÉES)
ER (%): -----	
Moyenne	- 0.11
Ecart-type	1.44
Minimum	- 6.83
Maximum	6.36
RER: ---	
Moyenne	- 0.06
Ecart-type	0.89
Minimum	- 4.30
Maximum	3.97
(%) ERS: -----	
Positif	3.1
Négatif	3.5
Nul	93.4

TABLEAU C1
Statistiques des 4096 valeurs de l'image R35
et des 320 valeurs échantillonnées

STATISTIQUES	4096 VALEURS	320 VALEURS ECHANTILLONNEES
Moyenne	697.2	697.9
Ecart-type	15.6	22.9
Coefficient de variation	0.022	0.033
Minimum	643.2	643.2
Maximum	826.9	826.9

TABLEAU C2
Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image R35
et des 4096 valeurs krigées selon trois traitements

STATISTIQUES	4096 VALEURS VRAIES	4096 VALEURS KRIGÉES		
		TRAITEMENT 1	TRAITEMENT 2	TRAITEMENT 3
Moyenne	697.2	698.1	698.6	698.6
Ecart-type	15.6	14.3	18.3	18.9
Coefficient de variation	0.022	0.020	0.026	0.027
Minimum	643.2	643.2	643.2	643.2
Maximum	826.9	826.9	826.9	826.9

TABLEAU C3
Erreurs associées aux krigeages de l'image R35
réalisés selon trois traitements

ERREURS	4096 VALEURS KRIGÉES		
	TRAITEMENT 1	TRAITEMENT 2	TRAITEMENT 3
ER (%): -----			
Moyenne	0.15	- 0.20	- 0.19
Ecart-type	1.52	1.08	1.15
Minimum	- 8.62	- 5.34	- 4.71
Maximum	6.39	3.28	4.05
RER: ---			
Moyenne	- 0.07	- 0.09	- 0.02
Ecart-type	0.89	1.01	1.16
Minimum	- 4.60	- 3.95	- 4.61
Maximum	4.46	3.29	5.95
(%) ERS: -----			
Positif	2.7	3.9	8.1
Négatif	4.2	4.9	5.5
Nul	93.1	91.2	86.4

TABLEAU C4
Statistiques des 4096 valeurs de l'image
bimodale X35 et des 320 valeurs échantillonnées

STATISTIQUES	4096 VALEURS	320 VALEURS ECHANTILLONNEES
Moyenne	697.6	697.5
Ecart-type	13.3	15.8
Coefficient de variation	0.019	0.023
Minimum	641.1	641.1
Maximum	765.0	765.0

TABLEAU C5
Statistiques des 4096 valeurs vraies de l'image bimodale X35
et des 4096 valeurs krigées selon trois traitements

STATISTIQUES	4096 VALEURS VRAIES	4096 VALEURS KRIGÉES		
		TRAITEMENT 1	TRAITEMENT 2	TRAITEMENT 3
Moyenne	697.6	698.1	697.9	697.8
Ecart-type	13.3	12.5	14.4	14.6
Coefficient de variation	0.019	0.018	0.021	0.021
Minimum	641.1	641.1	641.1	641.1
Maximum	765.0	765.0	765.0	765.0

TABLEAU C6
Erreurs associées aux krigeages de l'image
bimodale X35 réalisés selon trois traitements

ERREURS	4096 VALEURS KRIGÉES		
	TRAITEMENT 1	TRAITEMENT 2	TRAITEMENT 3
ER (%): -----			
Moyenne	- 0.08	- 0.04	- 0.03
Ecart-type	0.88	0.78	0.79
Minimum	- 4.80	- 3.43	- 3.67
Maximum	3.30	4.33	5.10
RER: ---			
Moyenne	- 0.07	0.07	- 0.08
Ecart-type	0.87	1.09	0.82
Minimum	- 5.60	- 6.46	- 5.30
Maximum	3.94	7.89	7.90
(%) ERS: -----			
Positif	3.4	6.7	3.8
Négatif	4.3	3.8	1.1
Nul	92.3	89.5	96.1

TABLEAU D1
Moyenne et écart-type des images UR34 et UR35 représentant
une scène urbaine de 128 x 128 pixels et prises lors de vols croisés

	UR34	UR35
Direction du vol	Est-ouest	Nord-sud
Moyenne	710.4	708.9
Ecart-type	15.2	15.3

TABLEAU D2
Statistiques des deux images-eau E34 et E35
respectivement prises lors de vols est-ouest et nord-sud

STATISTIQUES	E34	E35
Moyenne	655.8	663.8
Ecart-type	0.9	1.2
Coefficient de variation	0.0014	0.0018
Minimum	653.3	660.9
Maximum	659.4	685.0
Direction de vol	Est-ouest	Nord-sud

FIGURES

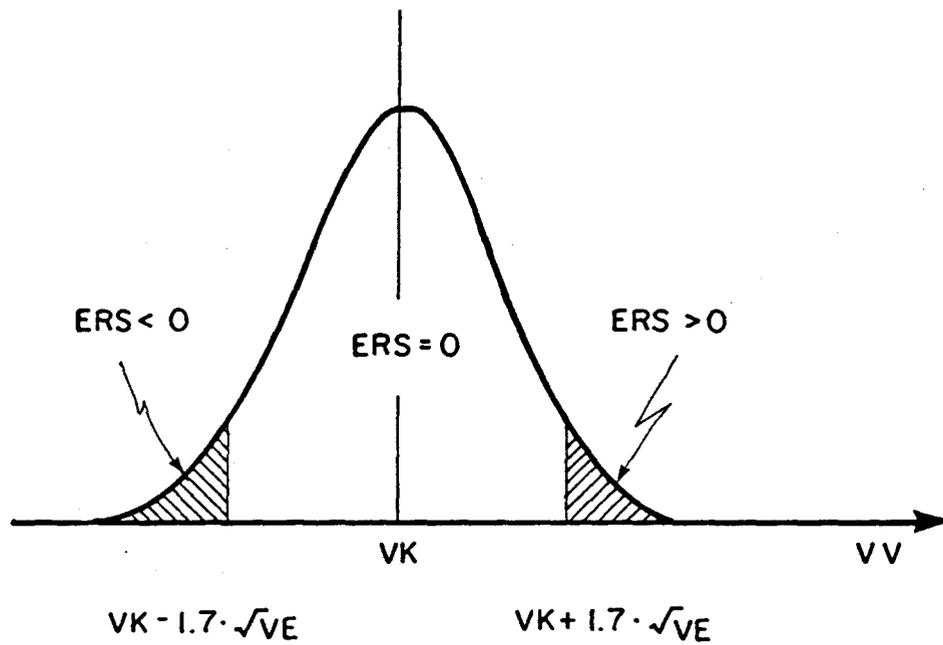


Figure 3. Distribution normale de la valeur d'irradiance VV avec moyenne VK et variance VE et délimitation des zones d'erreurs relatives sévères ERS positives, nulles et négatives.

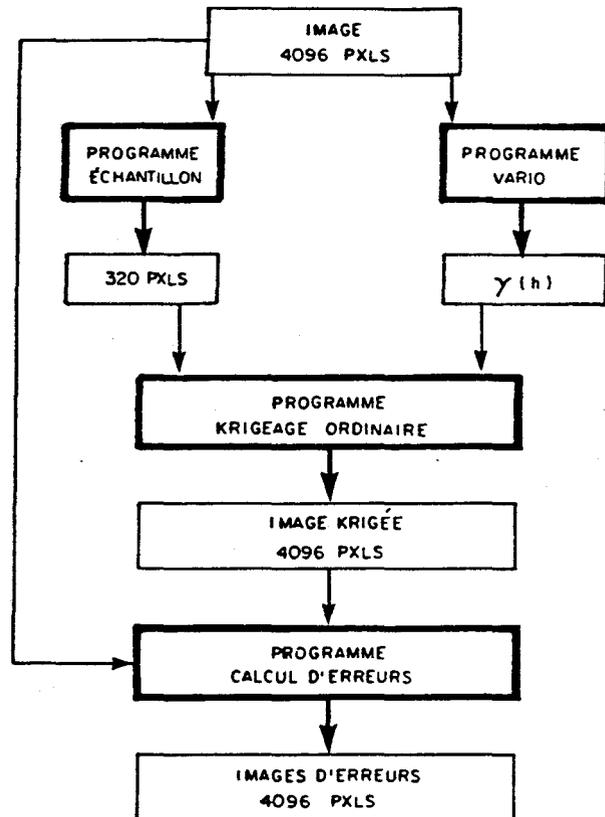


Figure 4. Organigramme de la procédure de traitement d'images à couvert unique.

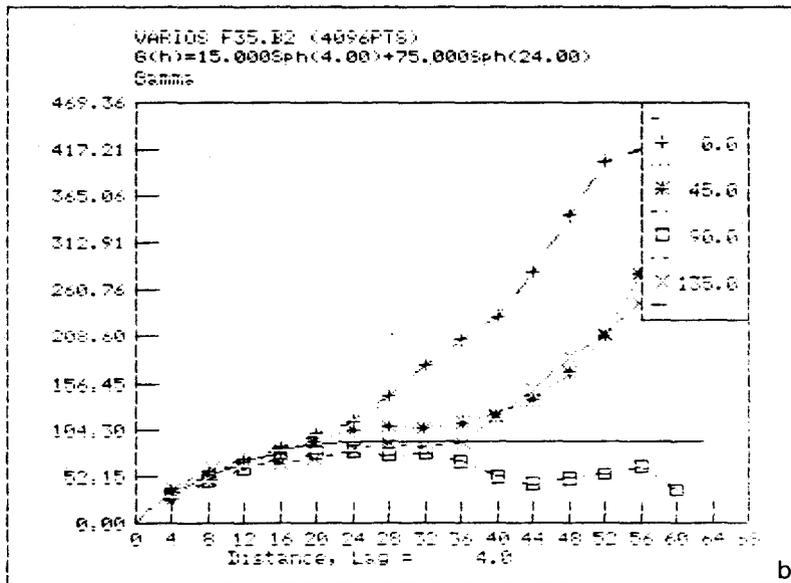
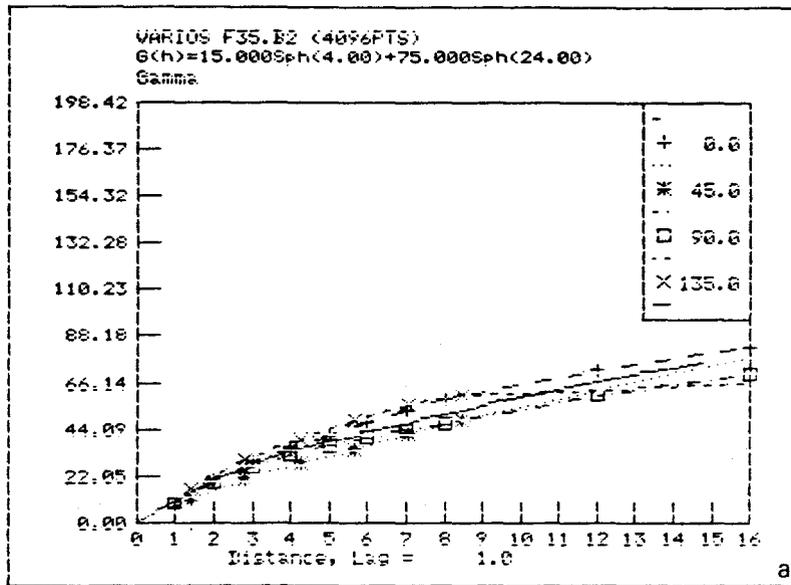


Figure 5. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour l'image-forêt F35.

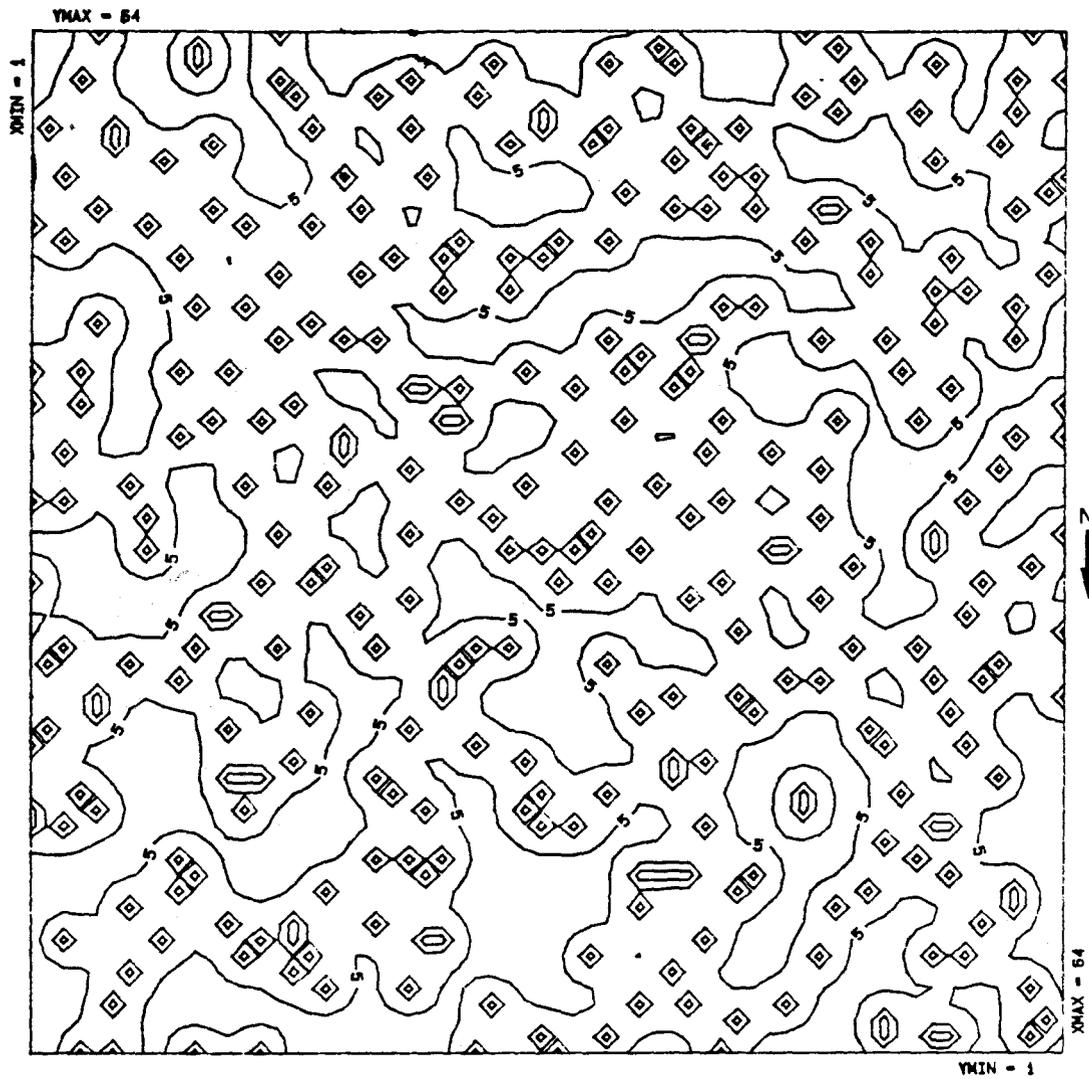


Figure 8. Isolignes (1,3,5 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image-forêt F35.

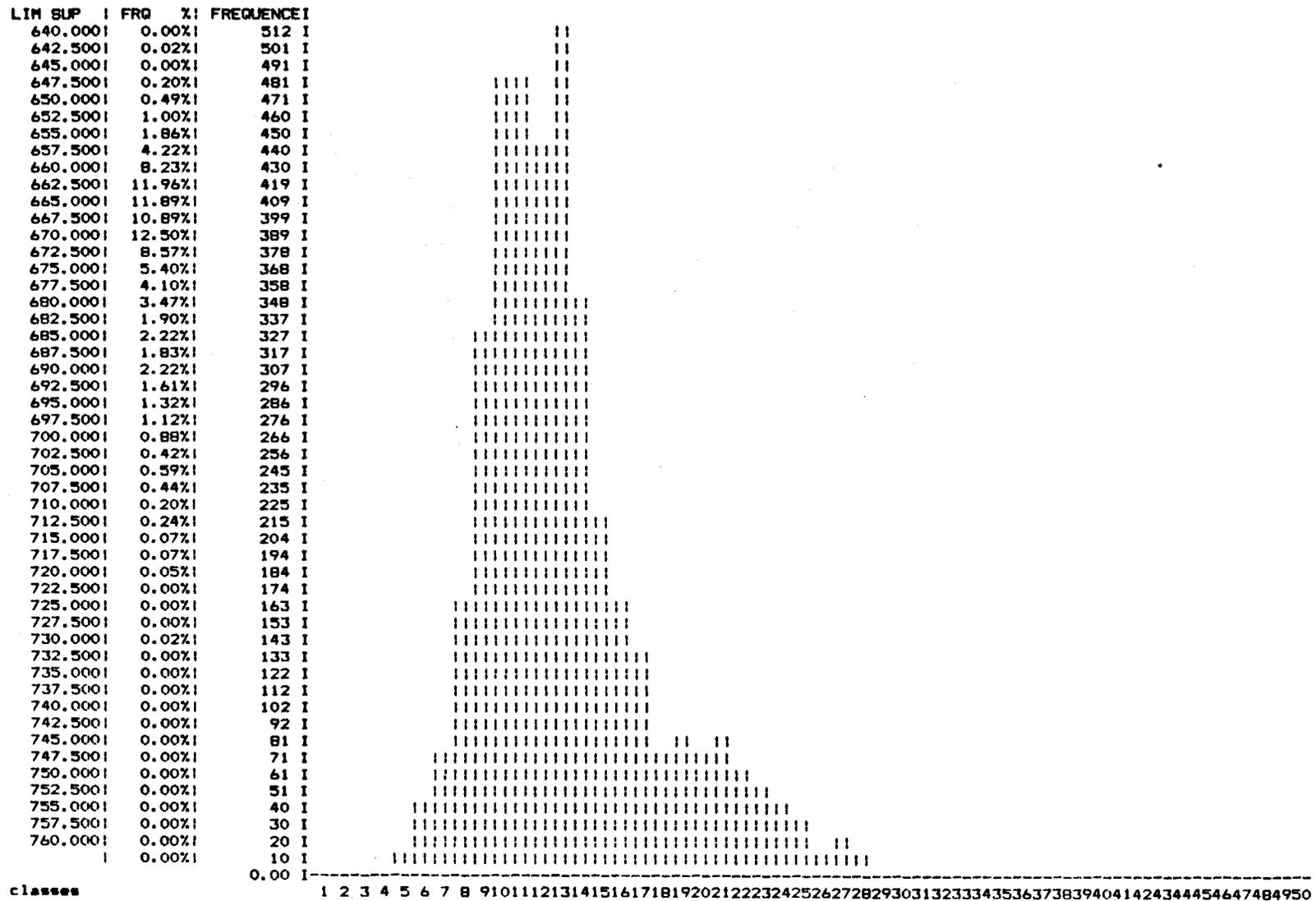


Figure 9. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image-forêt F35.

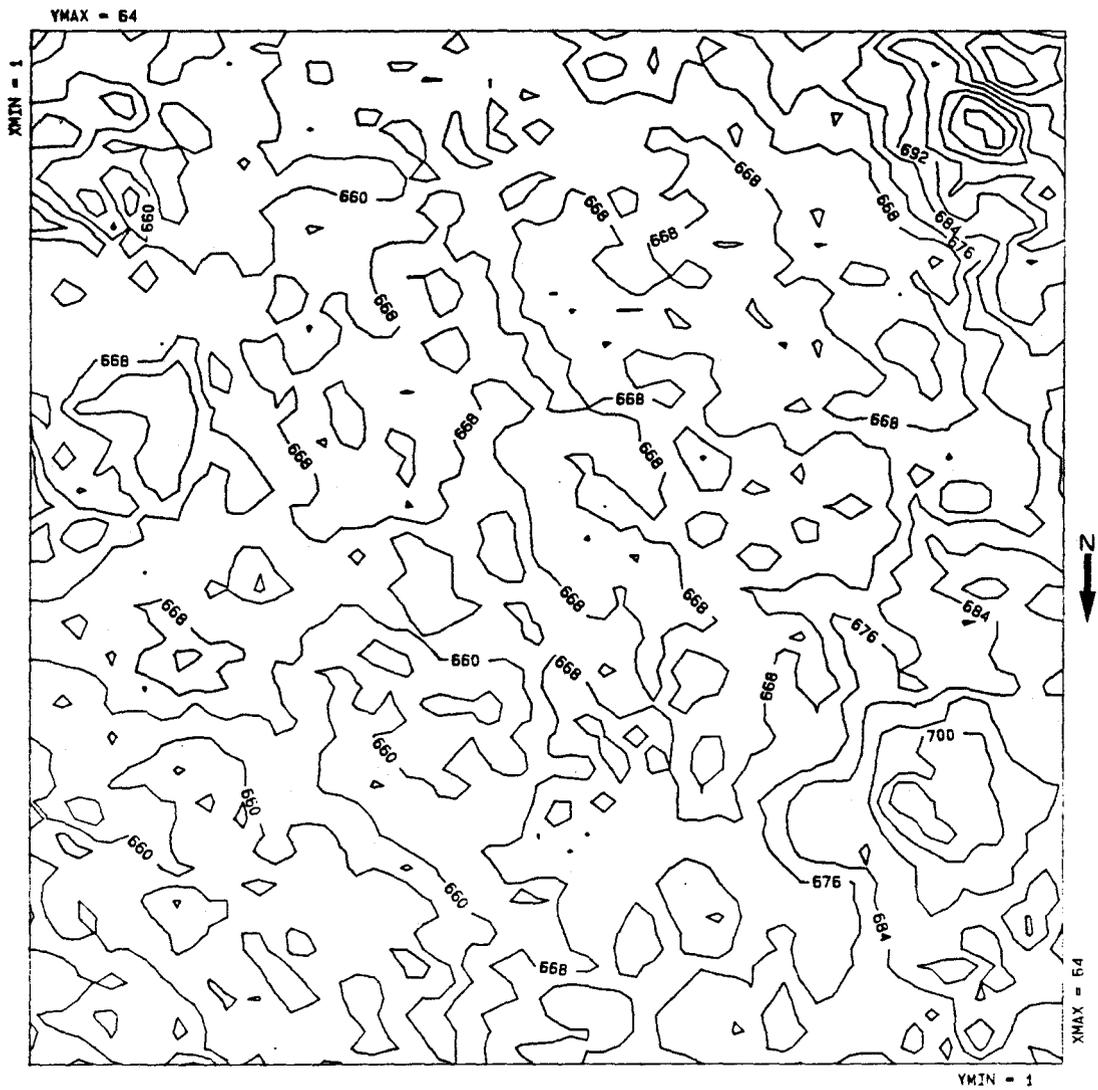


Figure 10. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image-forêt F35.

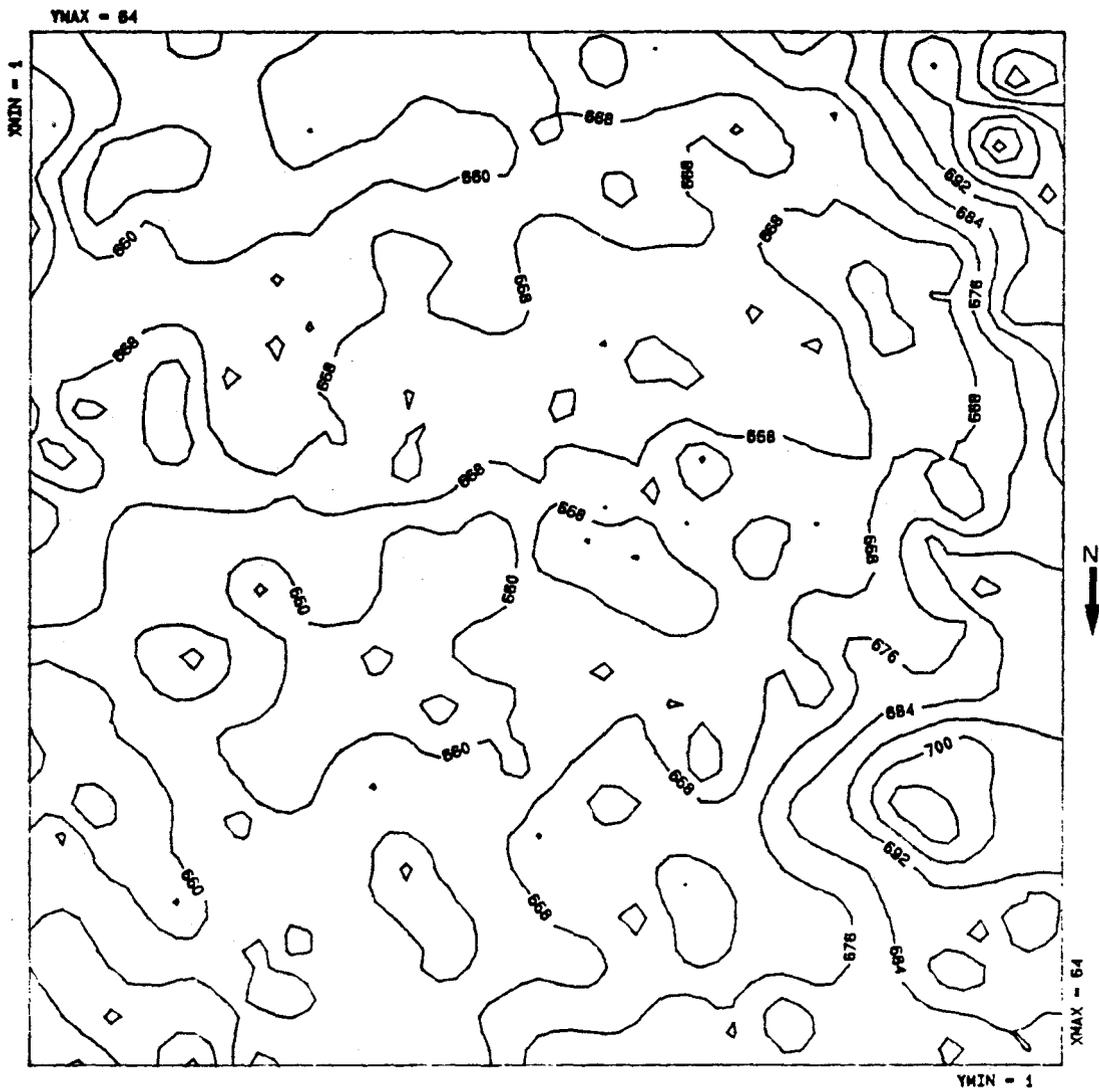


Figure 11. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-forêt F35 basées sur 320 échantillons.

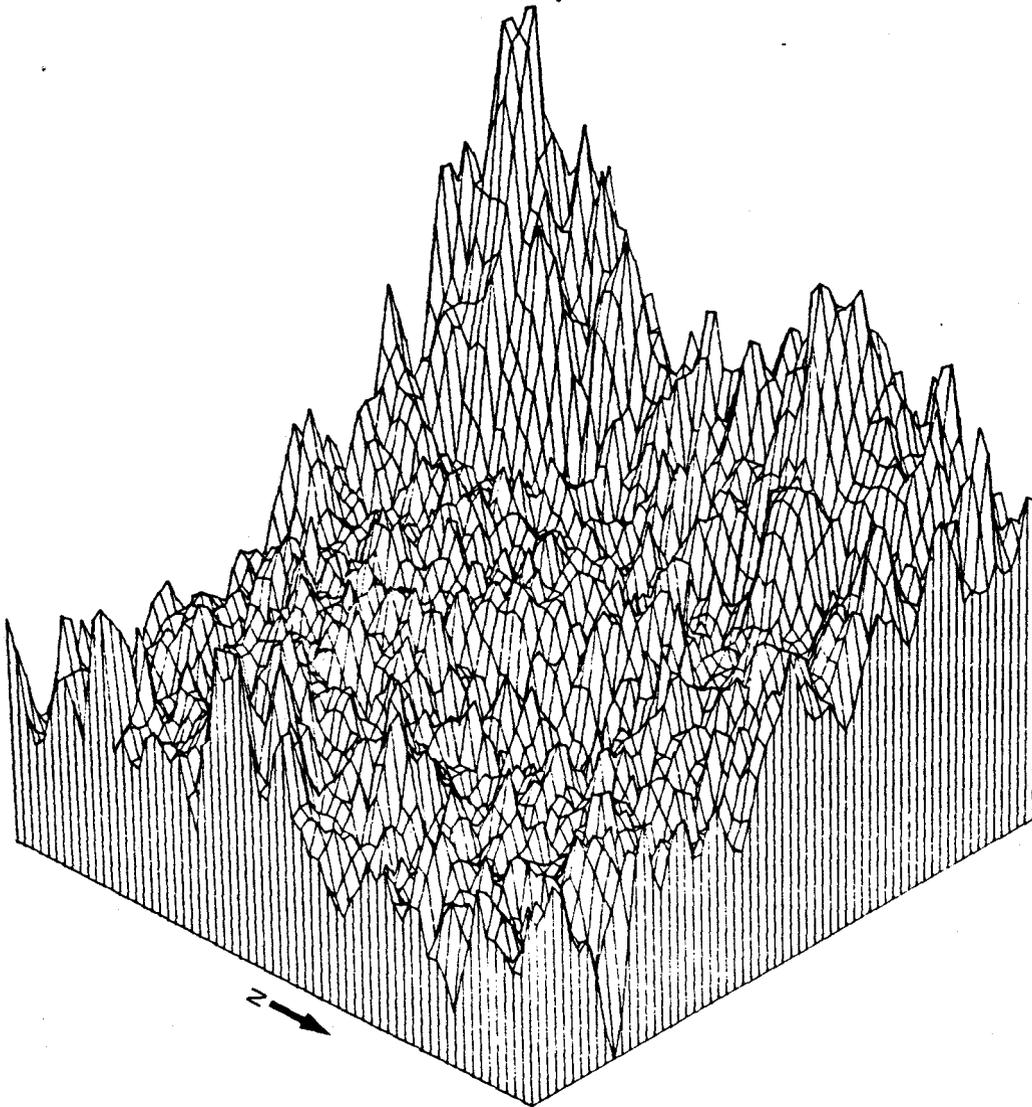


Figure 12. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image-forêt F35.

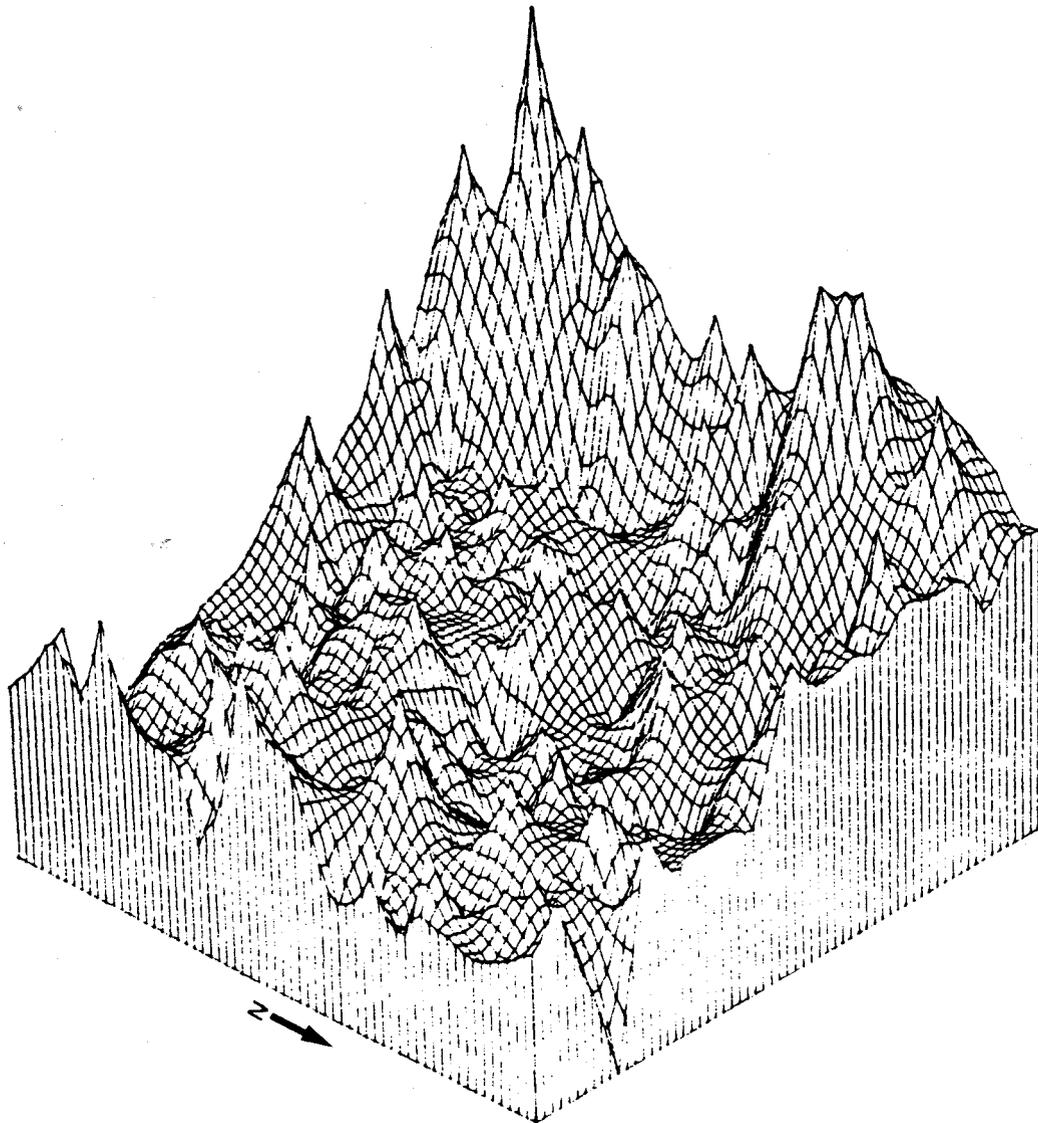


Figure 13. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-forêt F35 basées sur 320 échantillons.

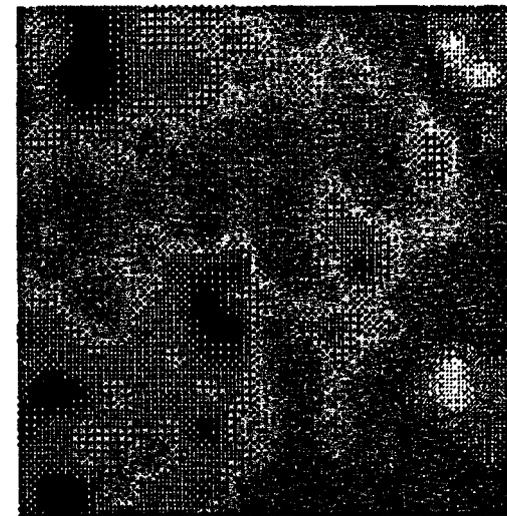
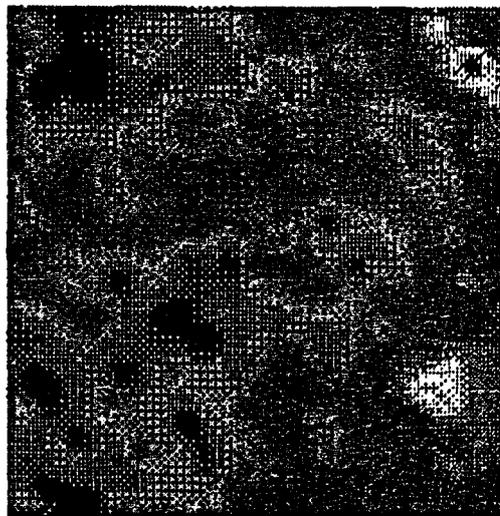
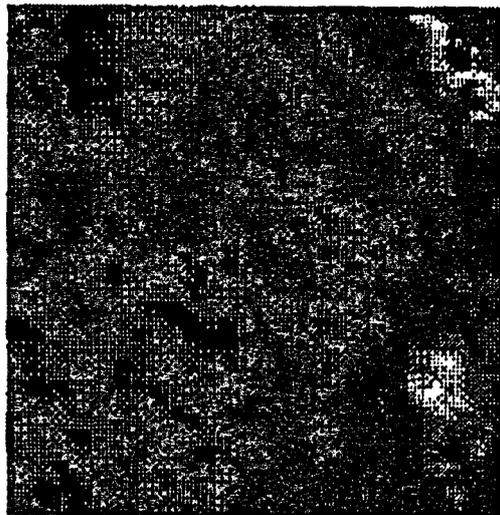


Figure 14. Reproduction-couleurs des valeurs vraies de l'image-forêt F35.

Figure 15. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image-forêt F35 basées sur 320 échantillons.

Figure 21. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image-forêt F35 basées sur 256 échantillons.

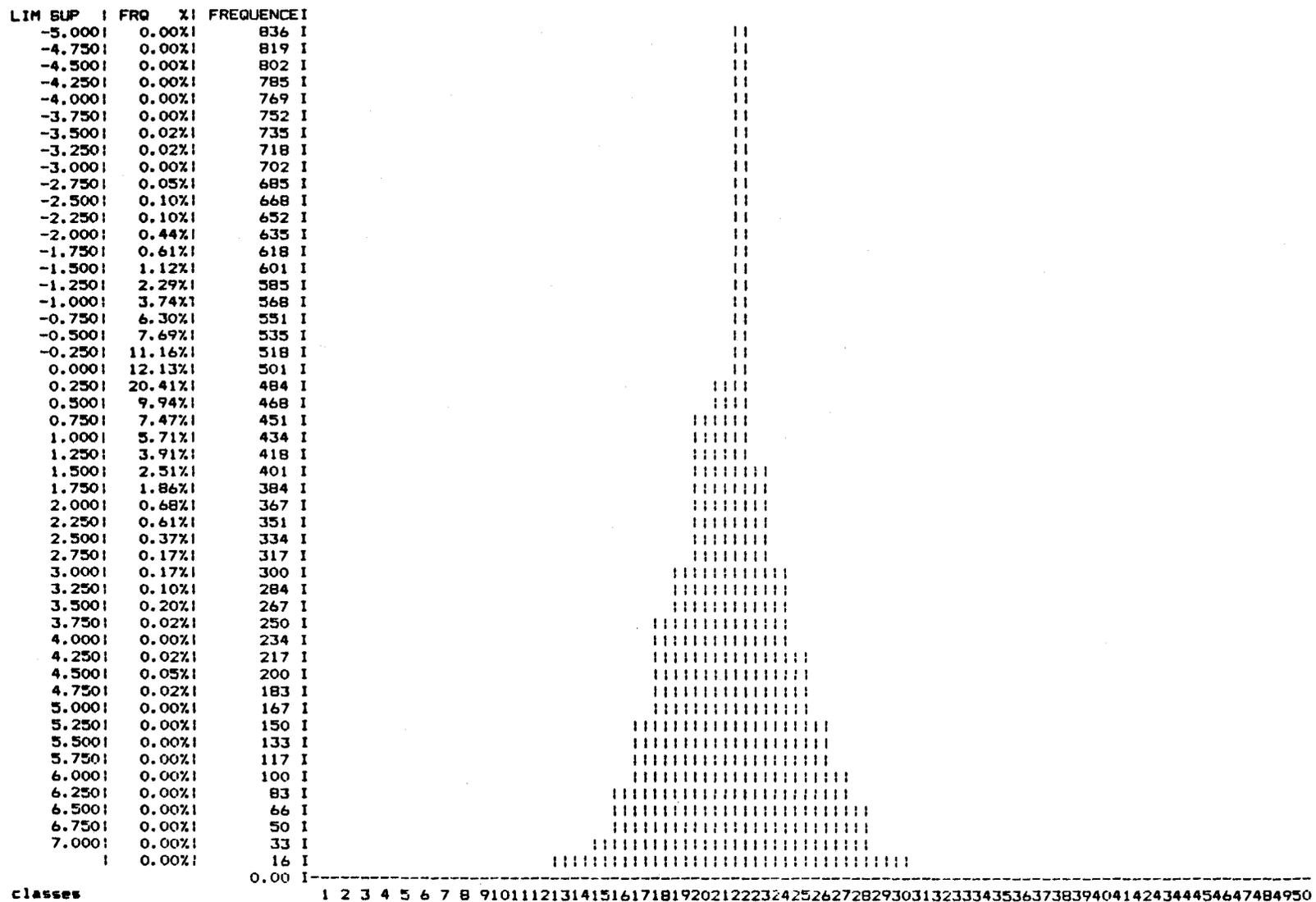


Figure 16. Histogramme des 4096 rapports d'erreurs (RER) de l'image-forêt F35 basés sur 320 échantillons.

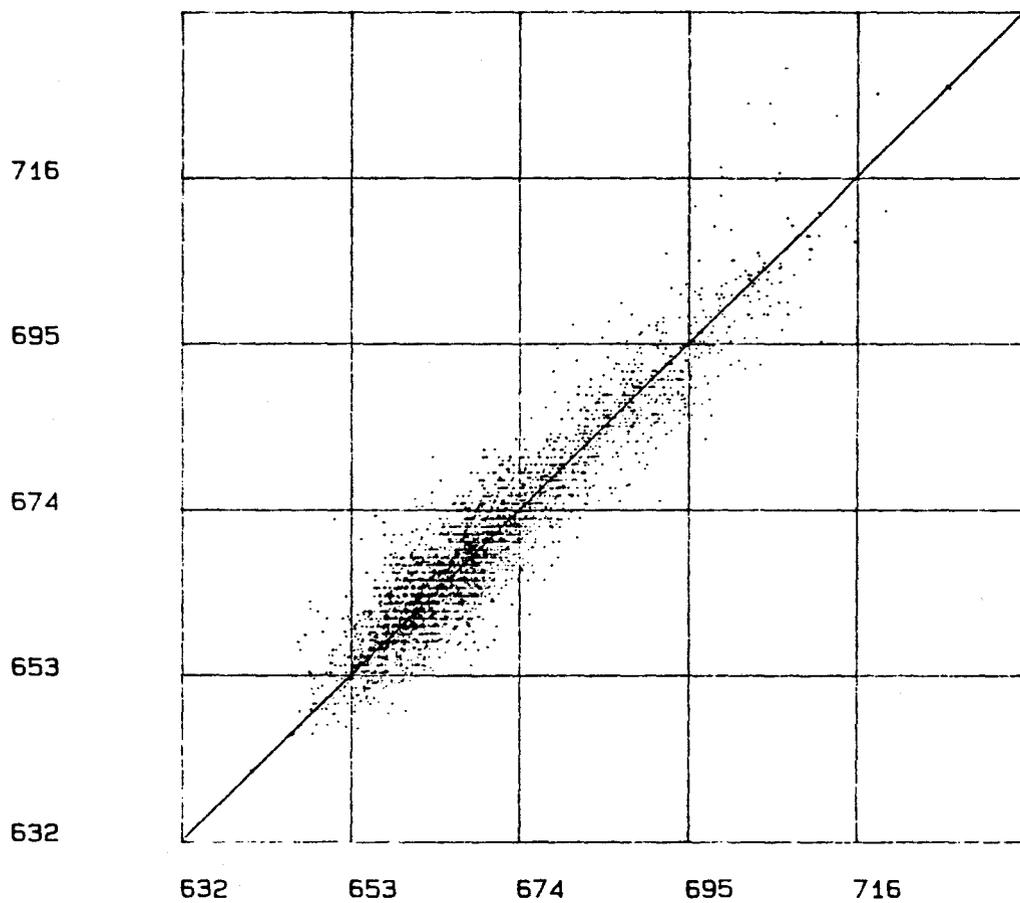


Figure 17. Scattérogramme 1 de l'image F35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) à partir de 320 échantillons - coefficient de corrélation de .937.

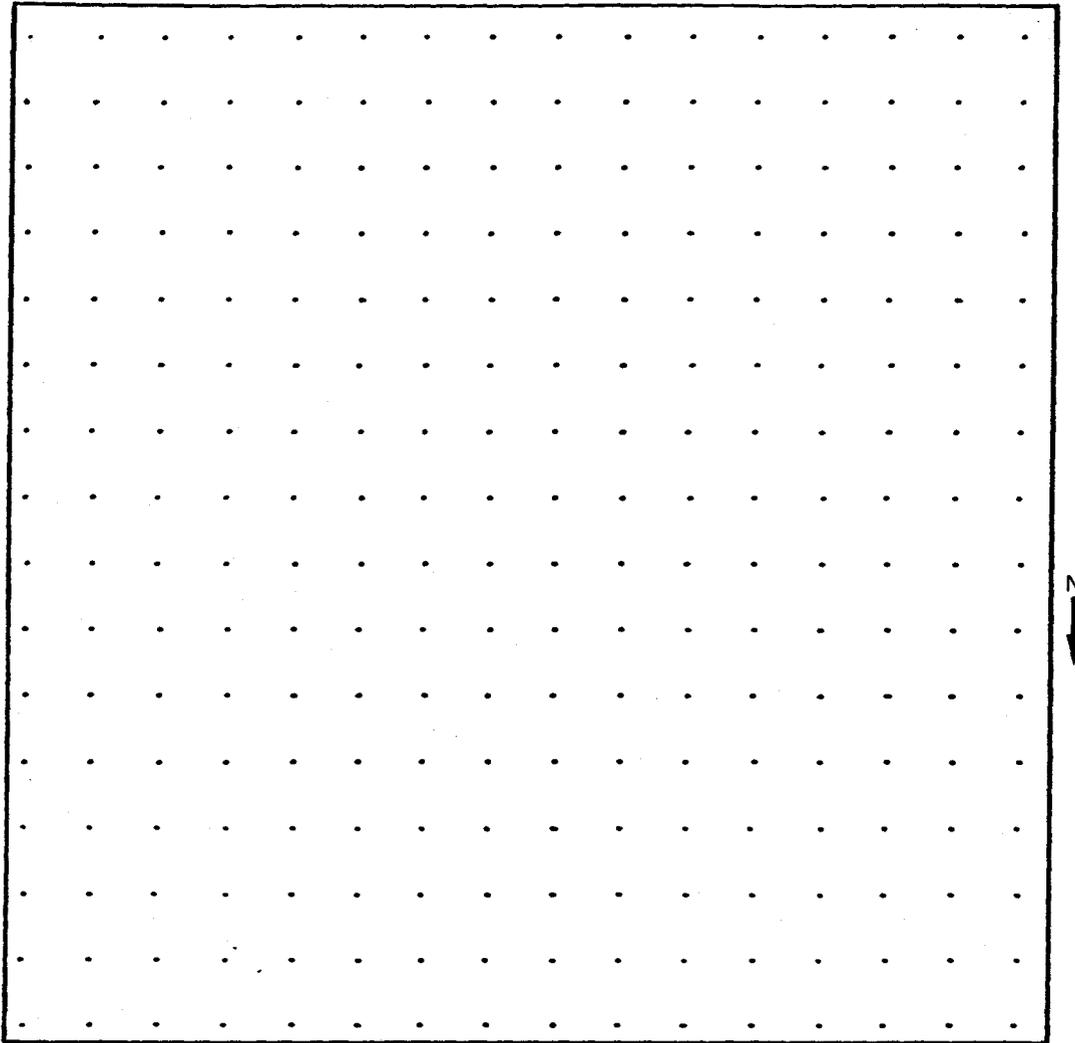


Figure 18. Echantillonnage de 256 valeurs régulièrement réparties dans l'image-forêt F35.

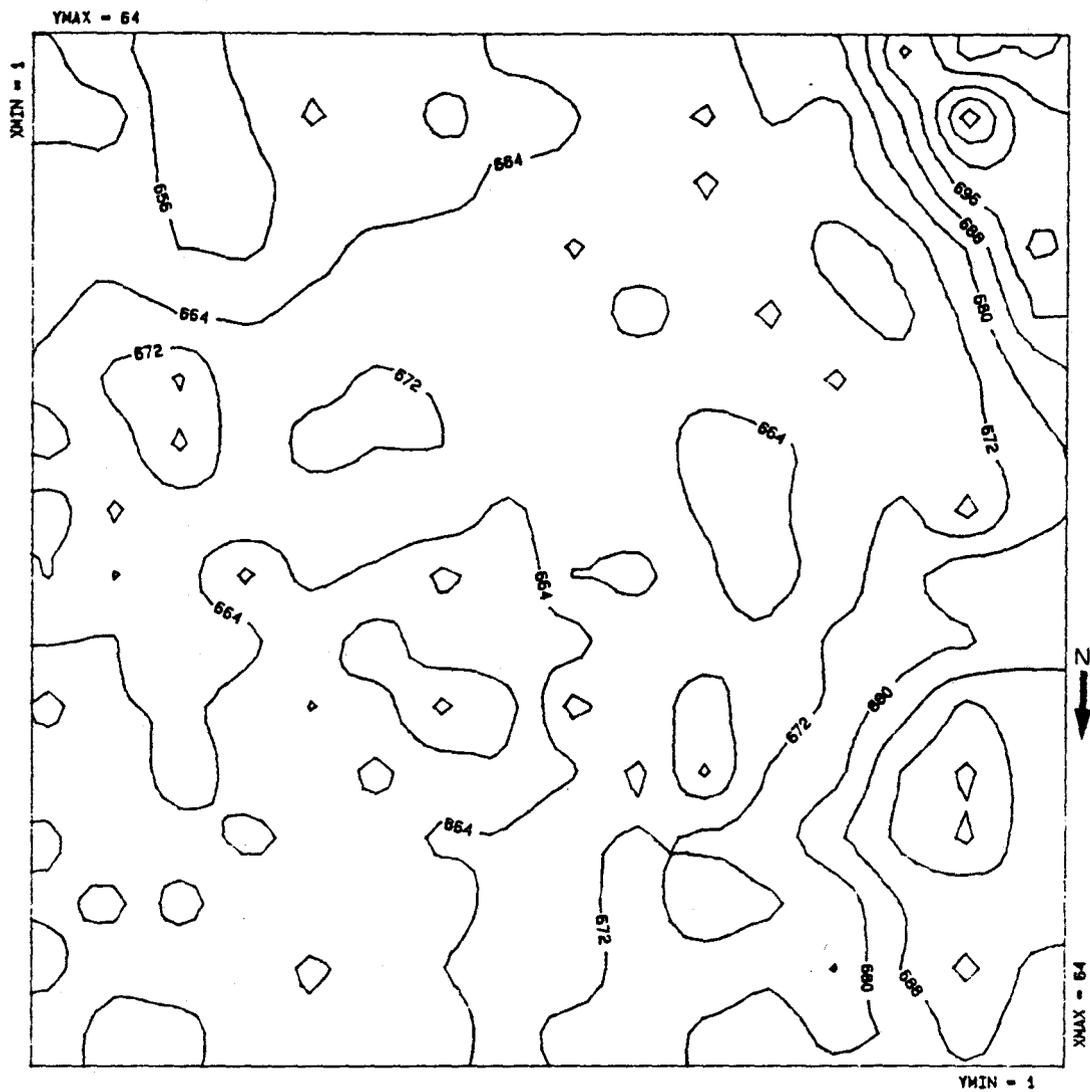


Figure 19. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-forêt F35 basées sur 256 échantillons.

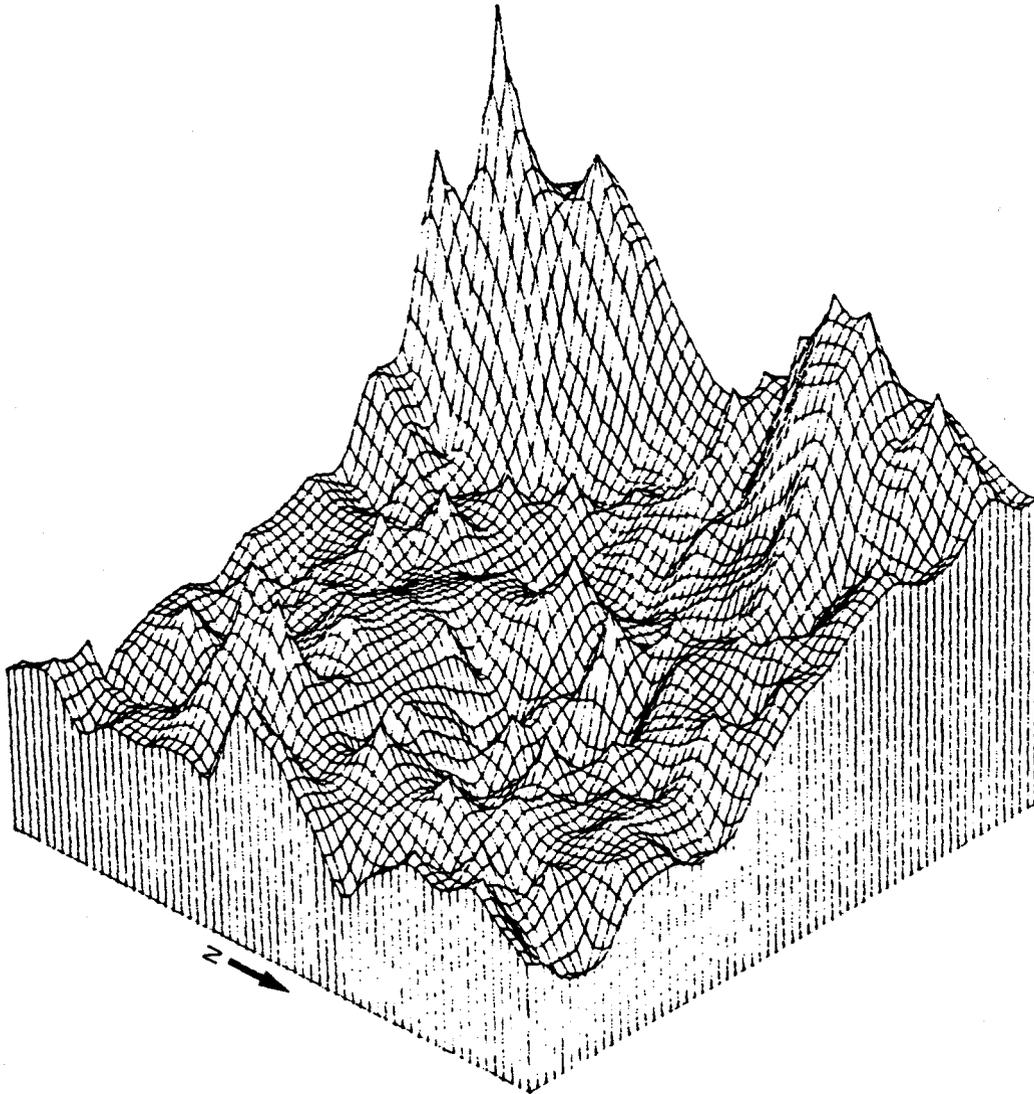


Figure 20. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-forêt F35 basées sur 256 échantillons.

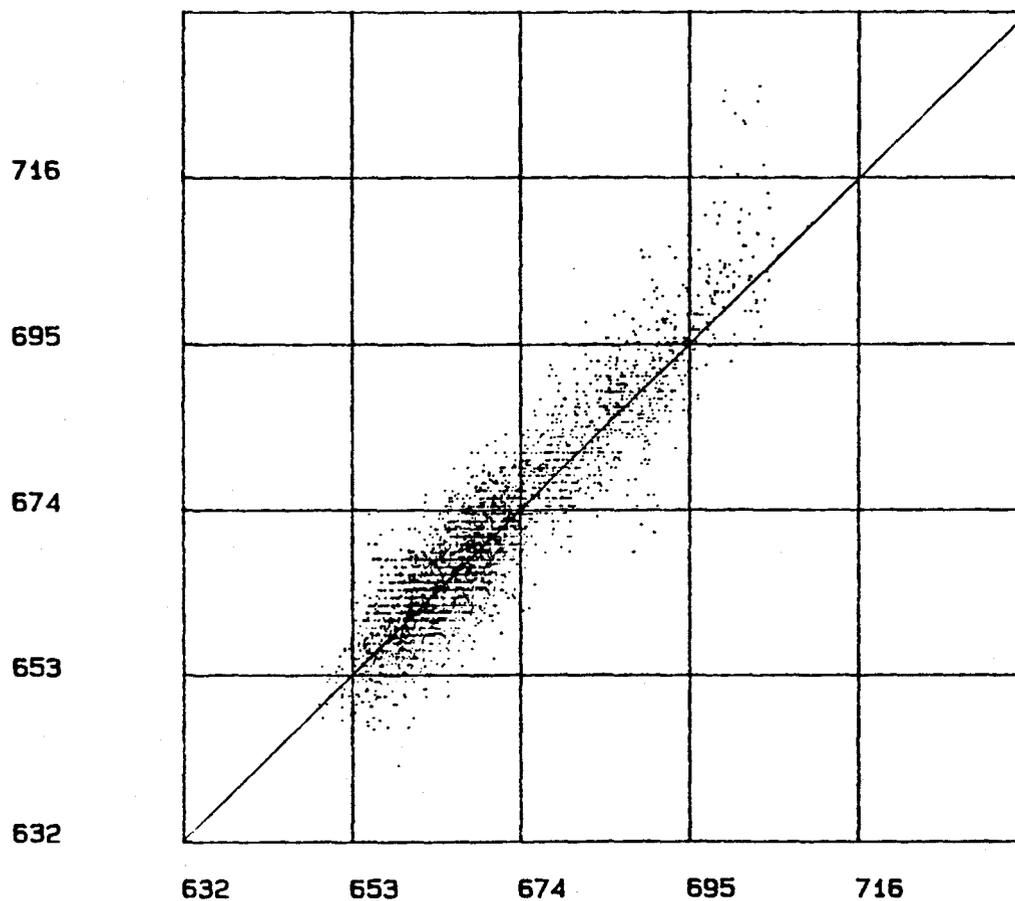


Figure 22. Scattérogramme 2 de l'image F35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) basées sur 256 échantillons - coefficient de corrélation de .922.

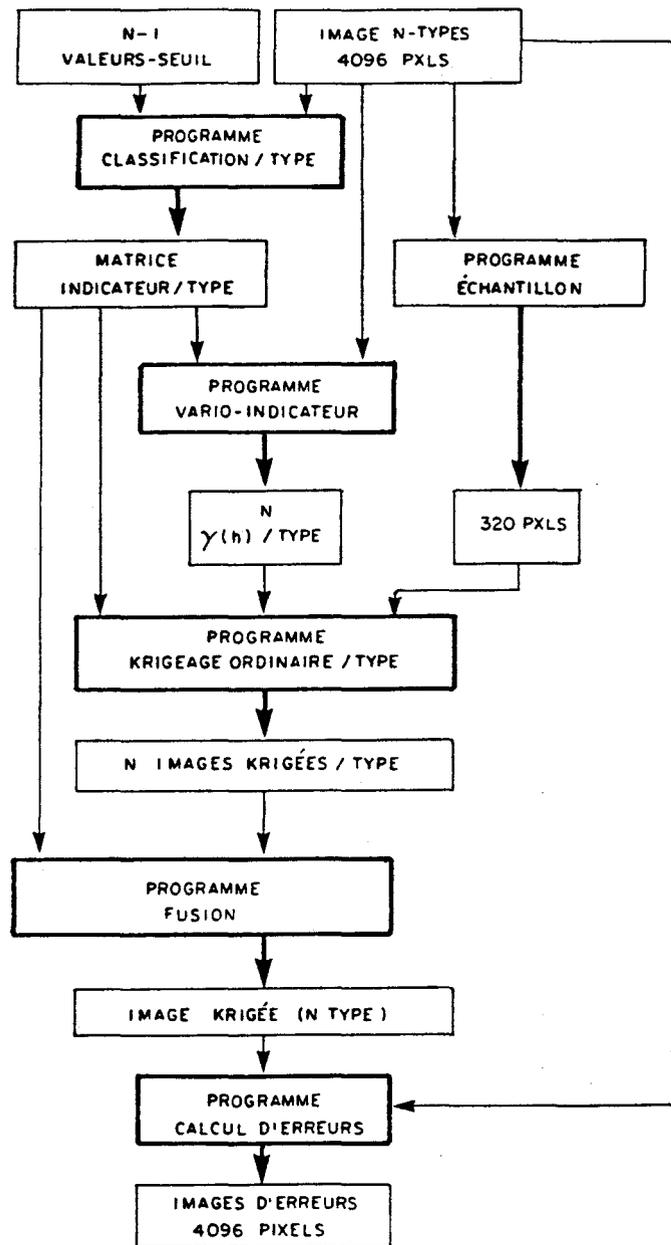


Figure 23. Organigramme de la procédure de traitement par couvert d'images multimodales avec semi-variogrammes/couvert/image.

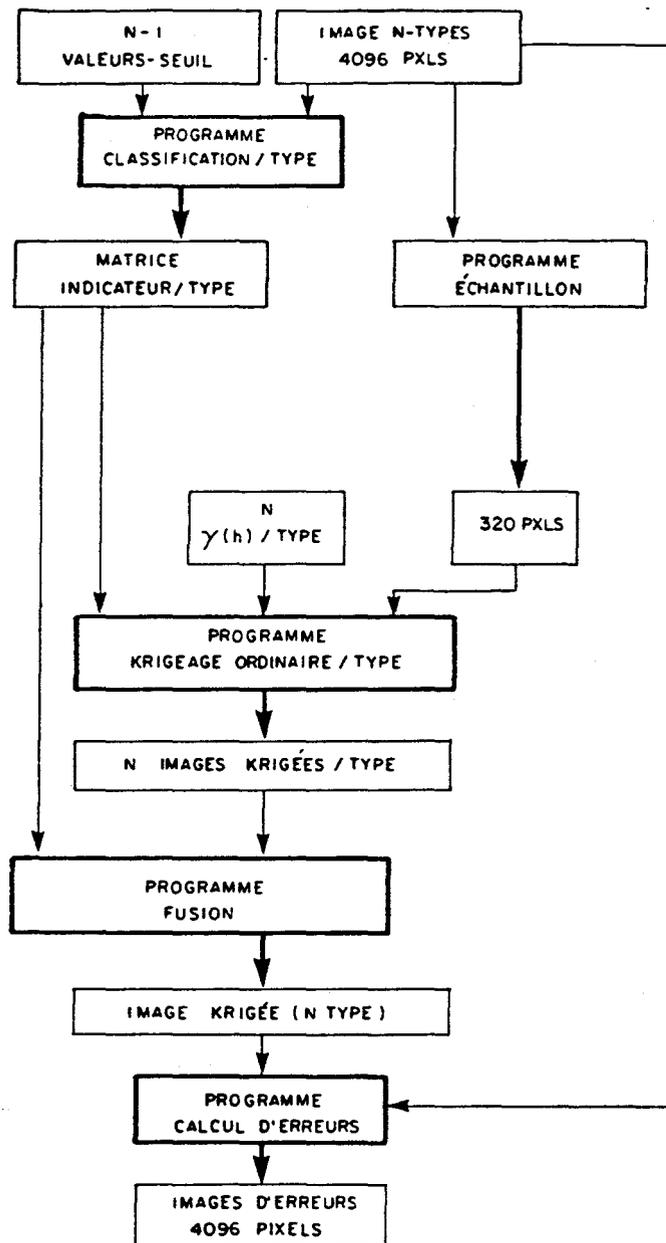


Figure 25. Organigramme de la procédure de traitement par couvert d'images multimodales avec semi-variogrammes/couvert/vol.

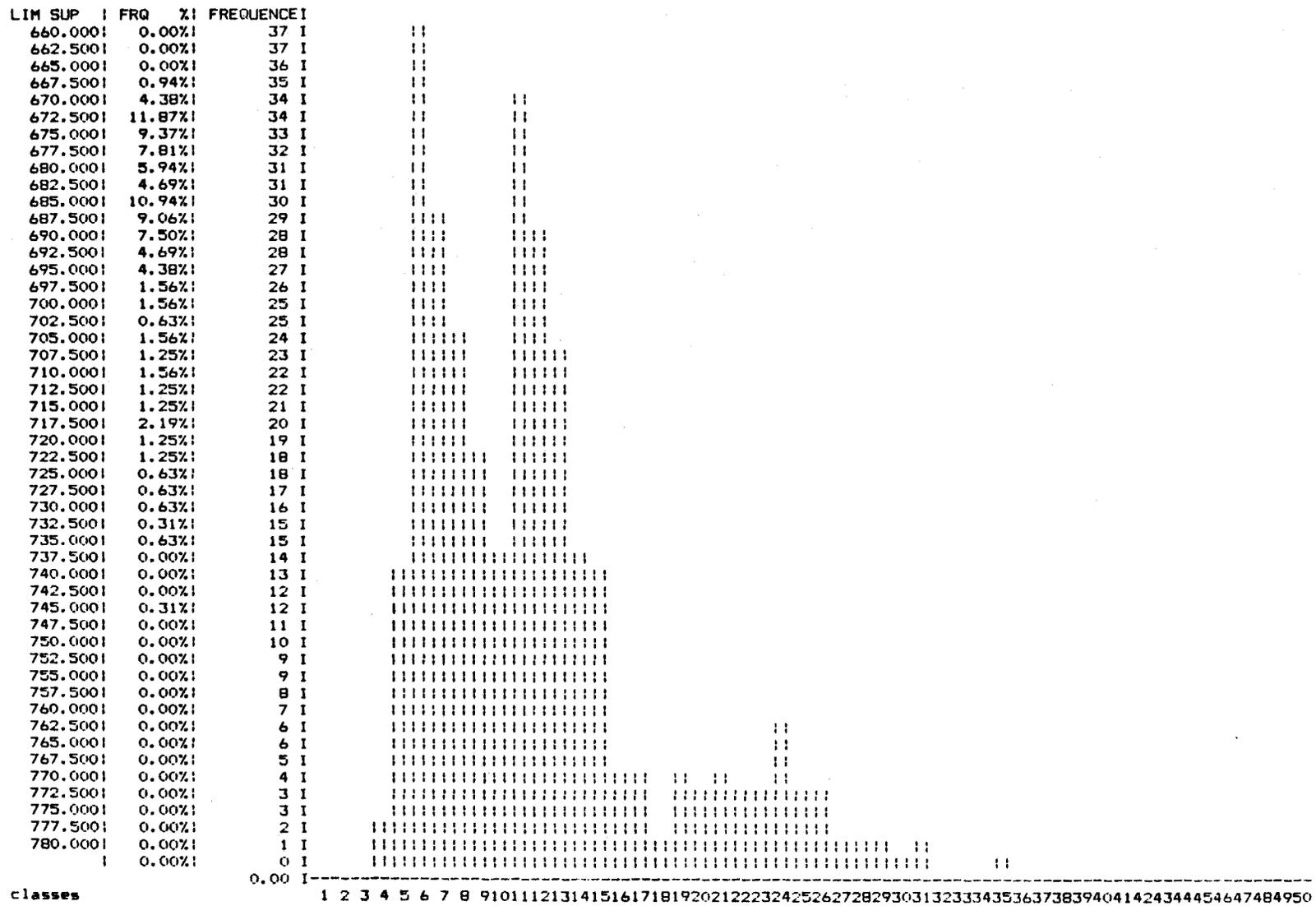


Figure 26. Histogramme des 320 valeurs échantillonnées de l'image trimodale Q35.

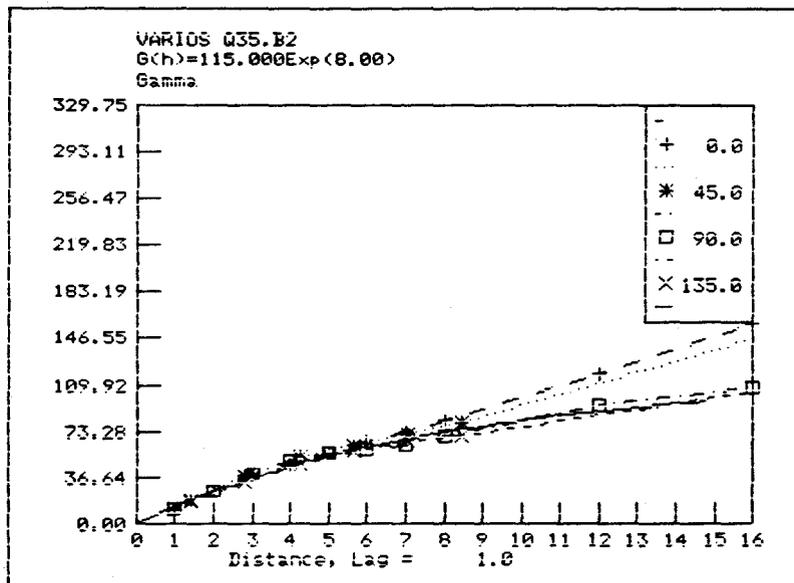


Figure 27. Semi-variogrammes directionnels à pas variable et modèle isotrope de l'image trimodale Q35 - traitement 1.

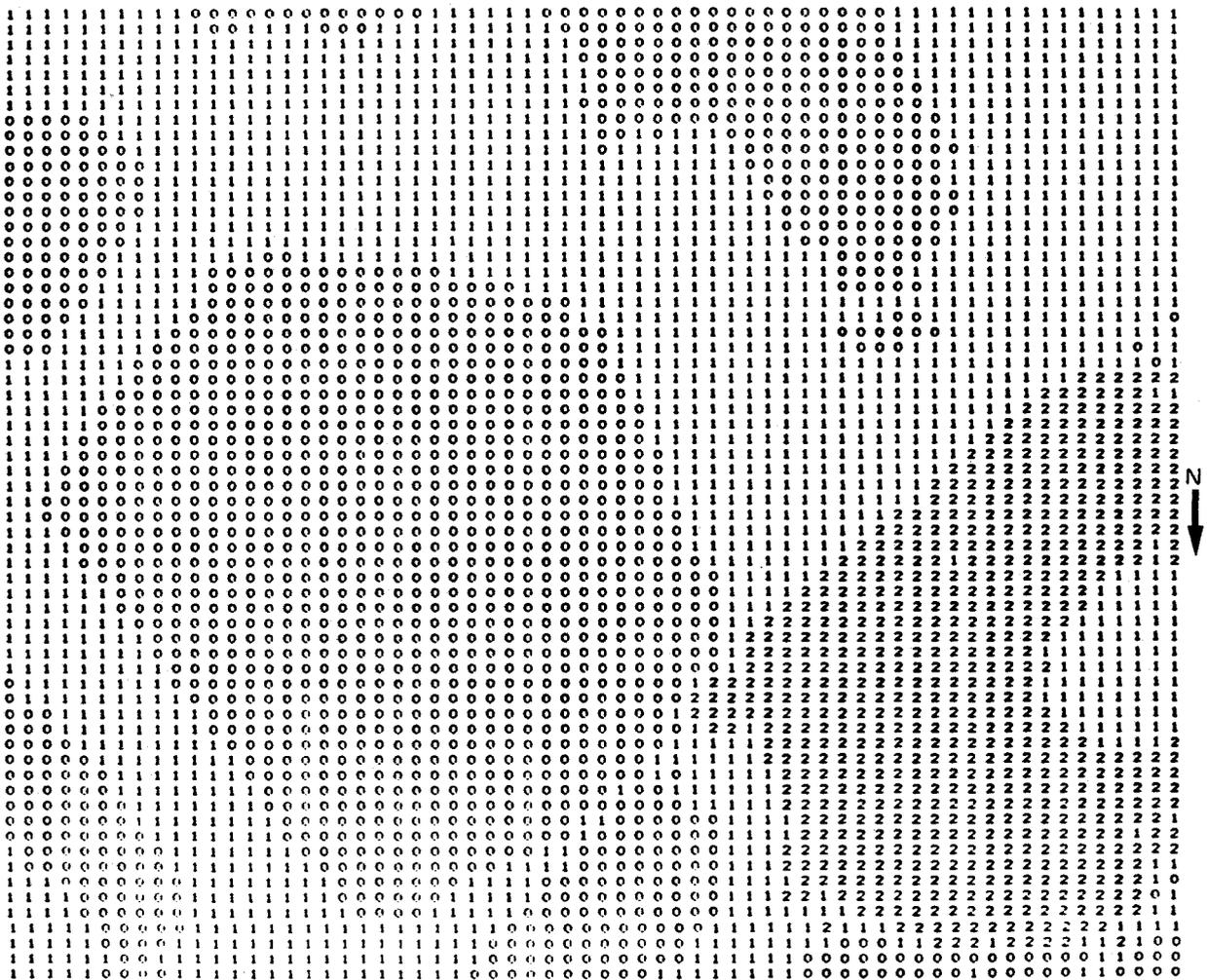


Figure 28. Matrice indicatrice issue de la classification des pixels de l'image Q35 en couverts forestier (0), agricole (1) et urbain (2).

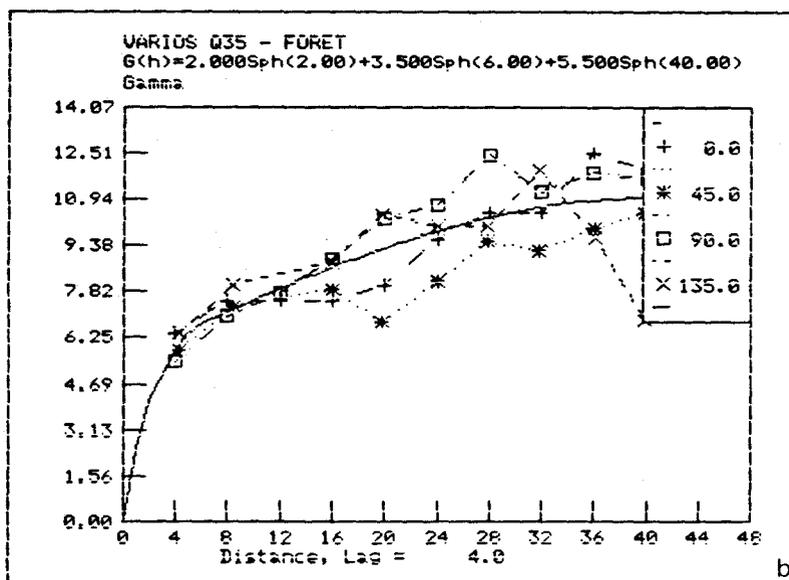
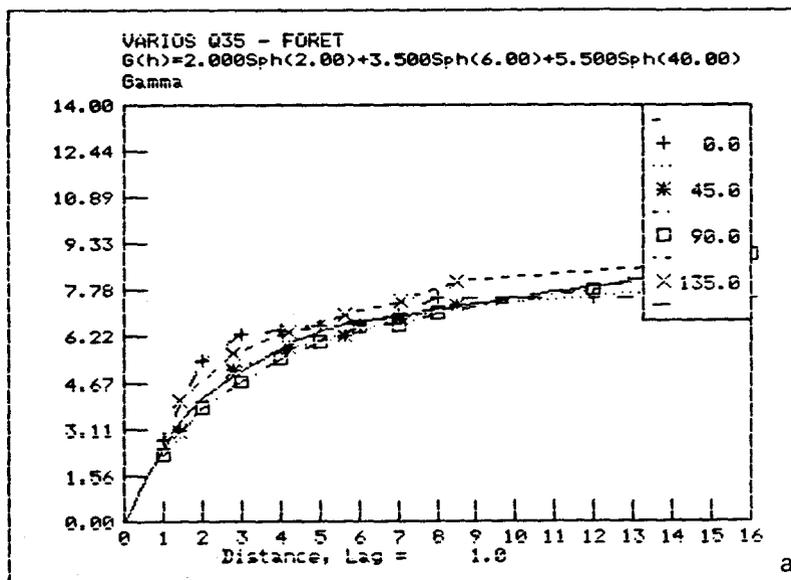


Figure 29. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert forestier de l'image Q35 - traitement 2.

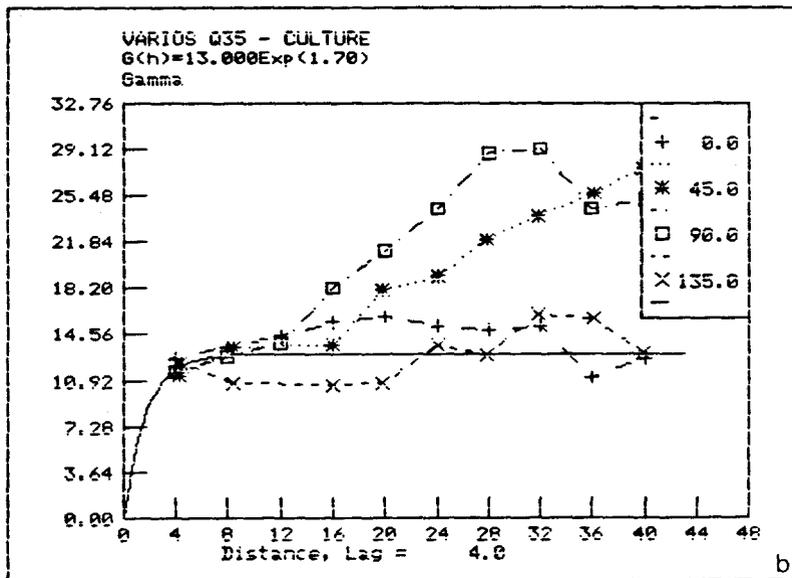
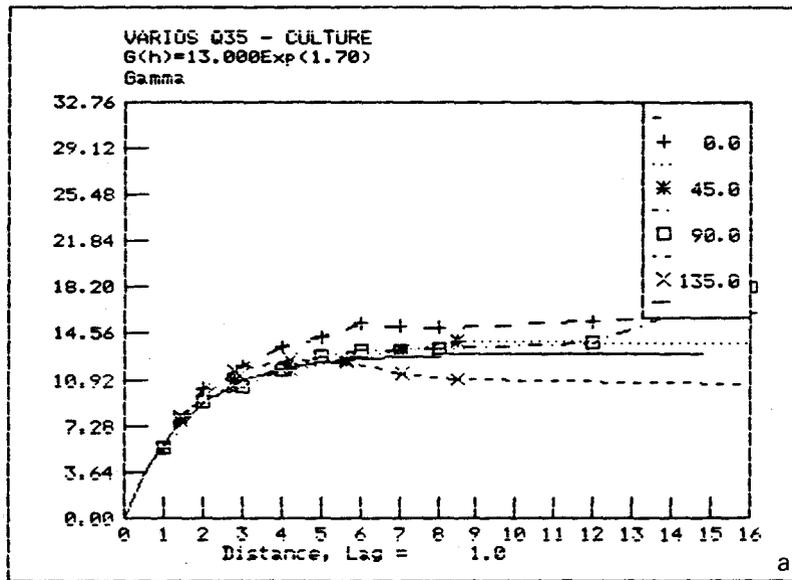


Figure 30. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert agricole de l'image Q35 - traitement 2.

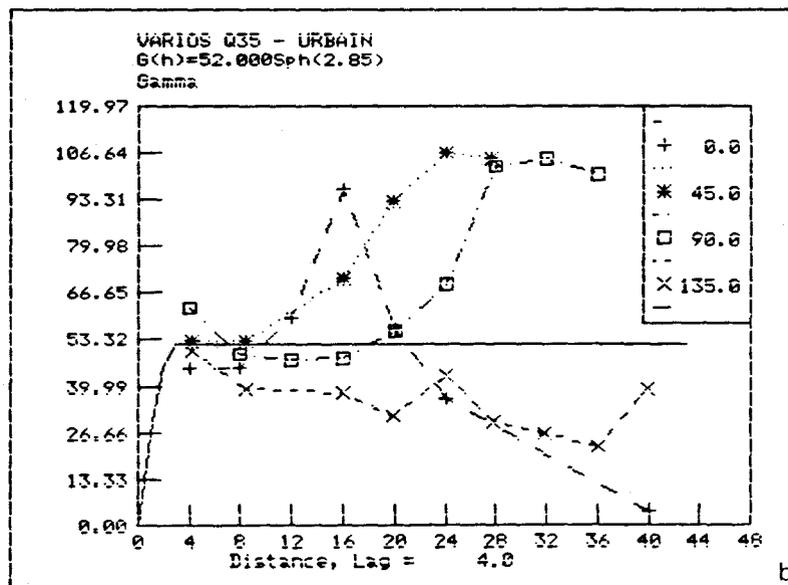
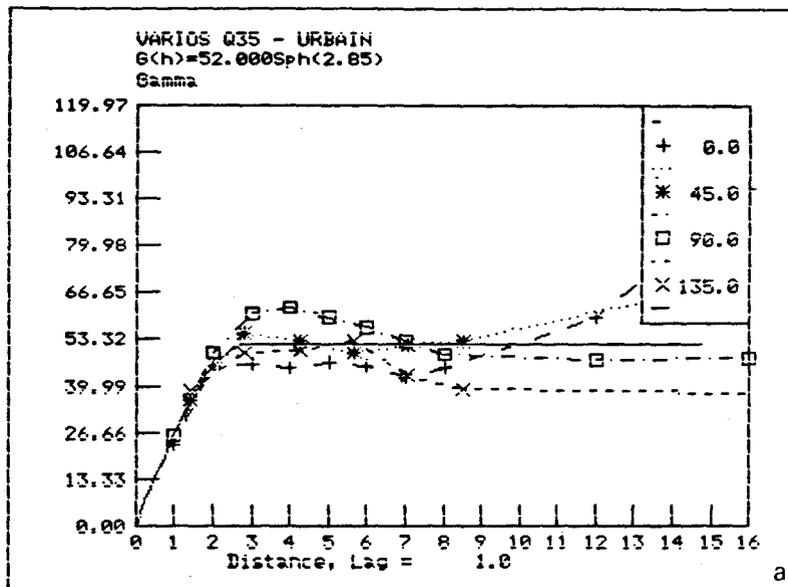


Figure 31. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert urbain de l'image Q35 - traitement 2.

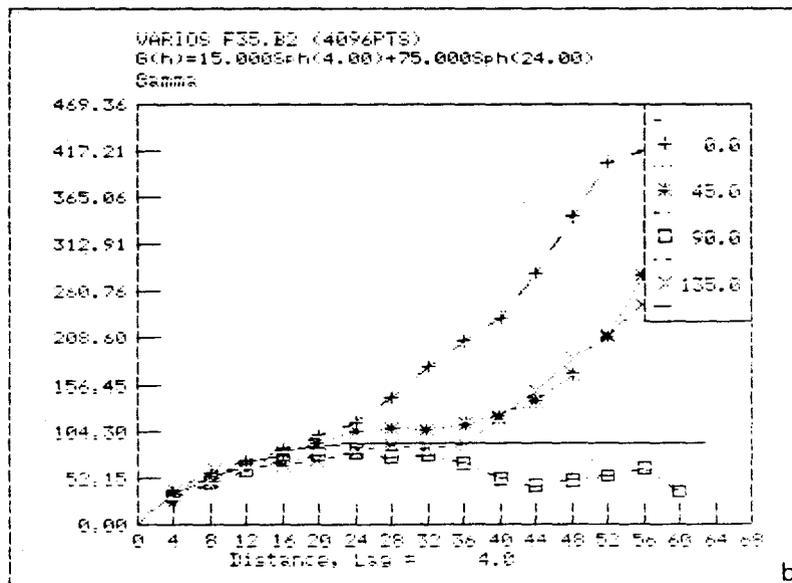
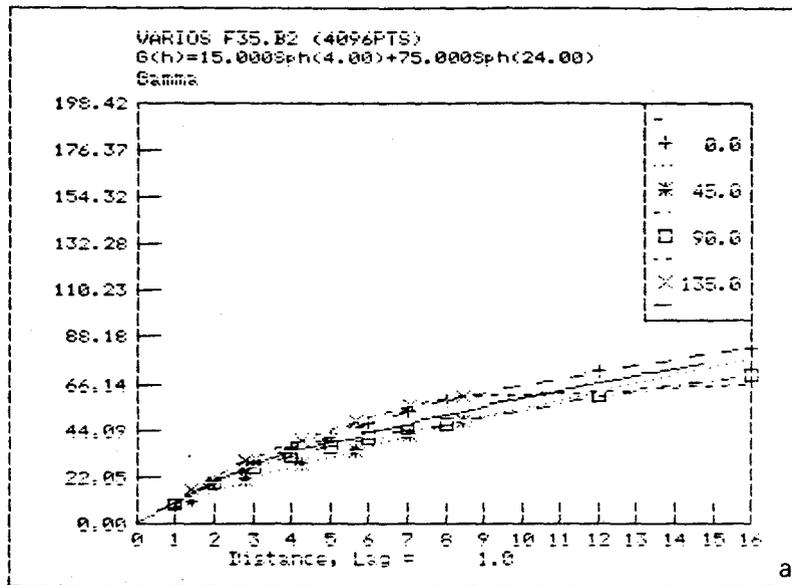


Figure 32. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-forêt F35 utilisés pour le traitement 3 de l'image Q35.

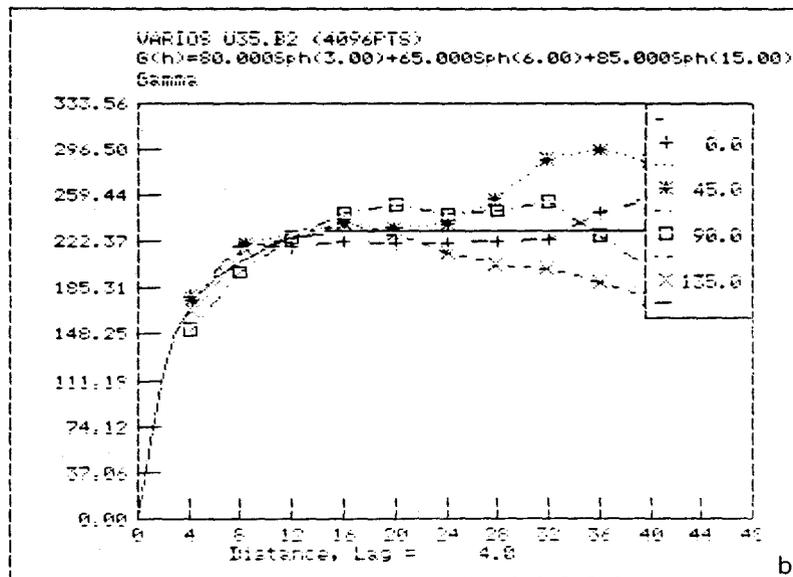
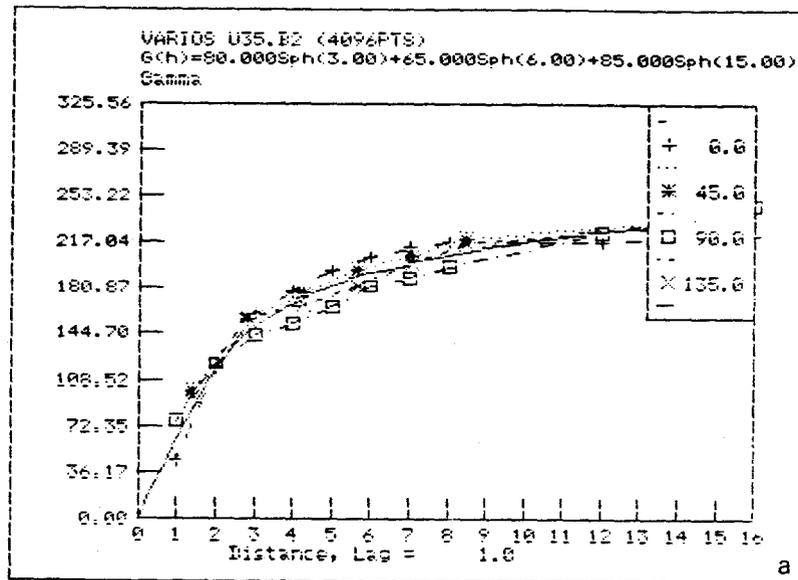


Figure 1. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et à pas constant de 4 pixels (b) avec modèle ajusté sur une distance de 16 pixels.

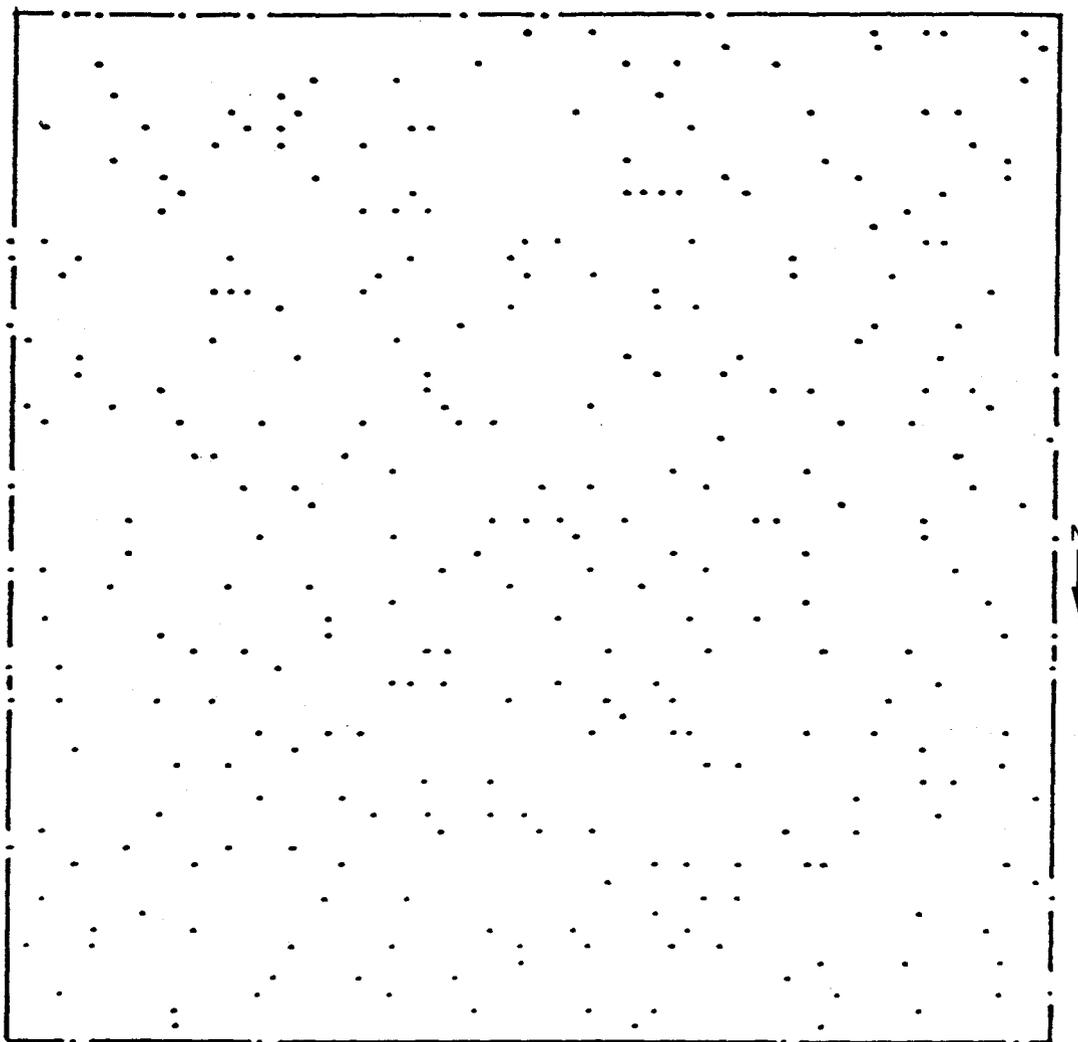


Figure 2. Echantillonnage des 320 valeurs extrêmes locales de l'image-forêt F35.

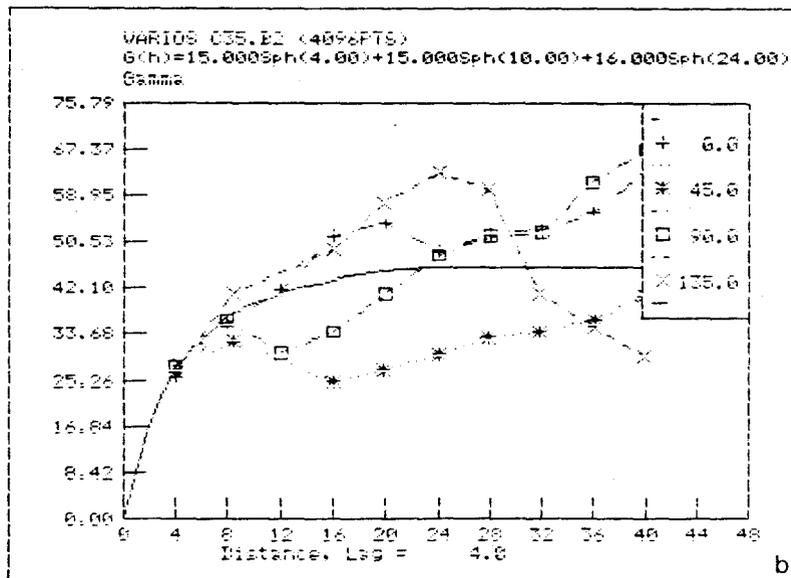
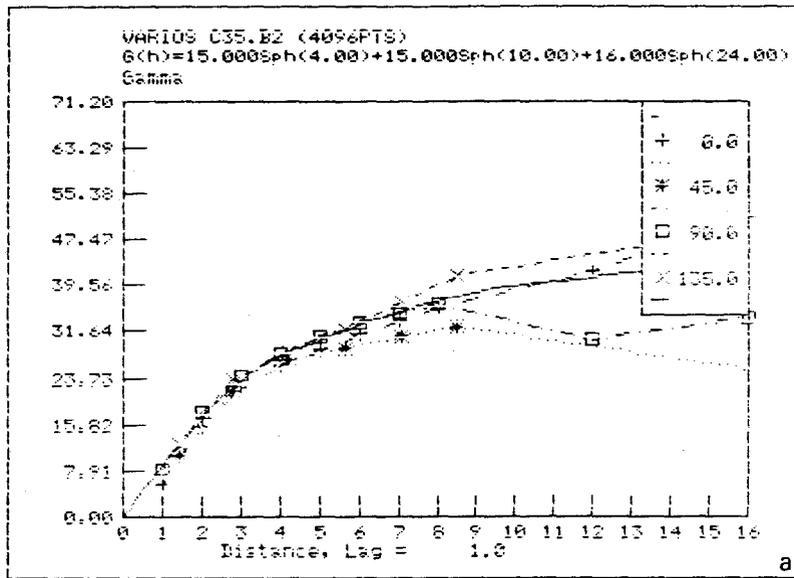


Figure 33. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-culture C35 utilisés pour le traitement 3 de l'image Q35.

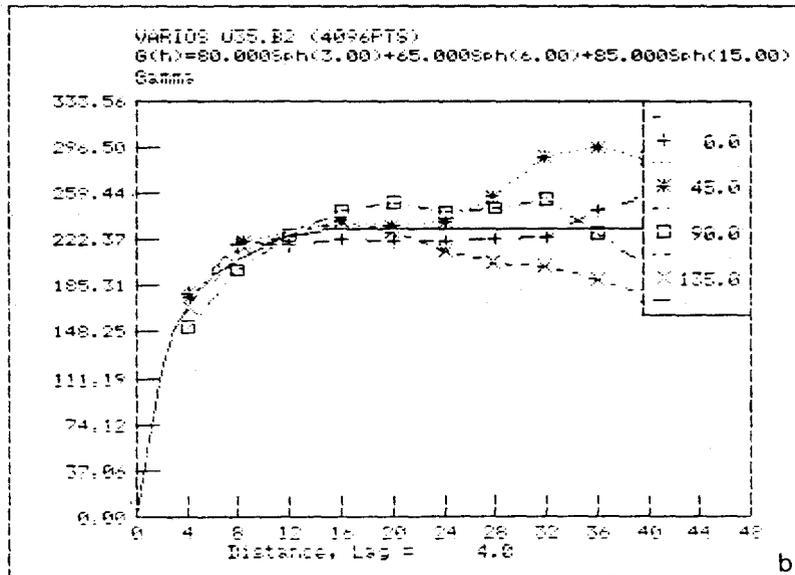
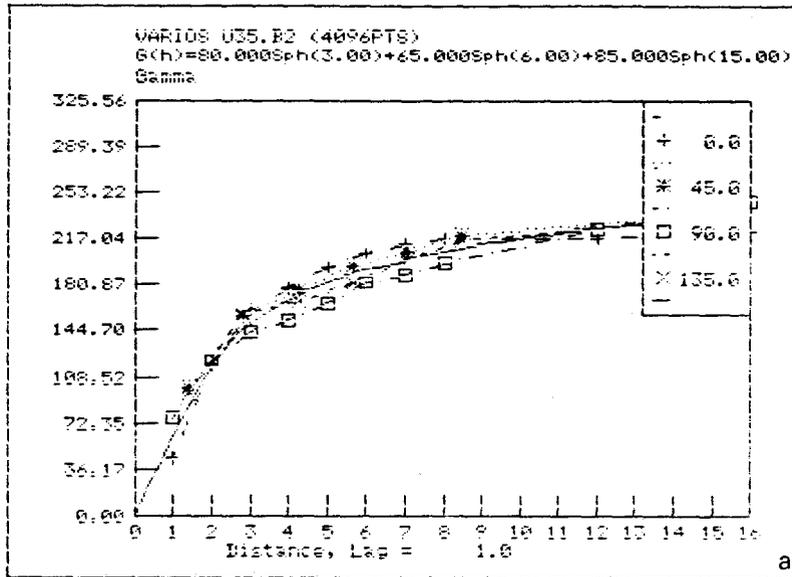


figure 34. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image urbaine U35 utilisés pour le traitement 3 de l'image Q35.

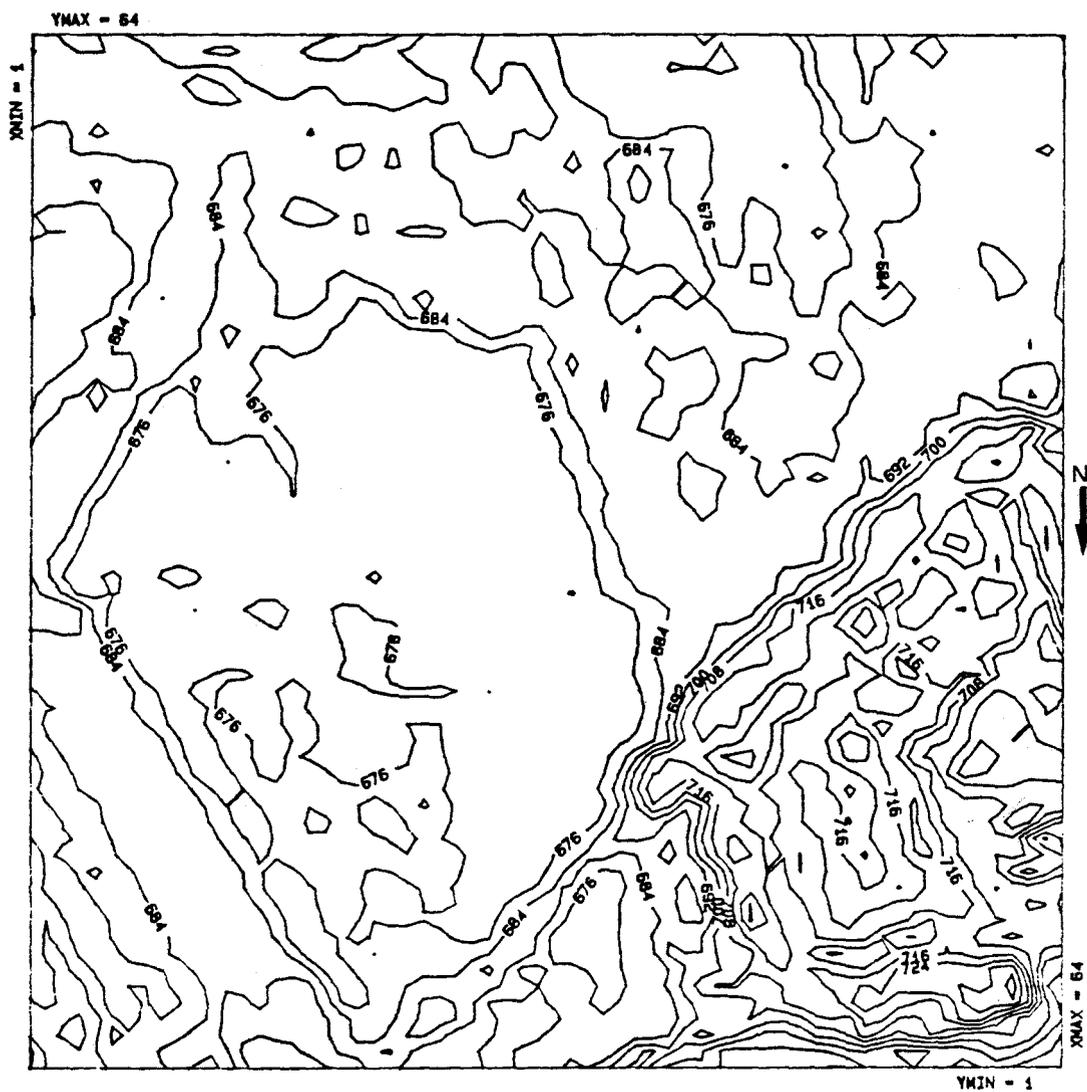


Figure 38. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image trimodale Q35.

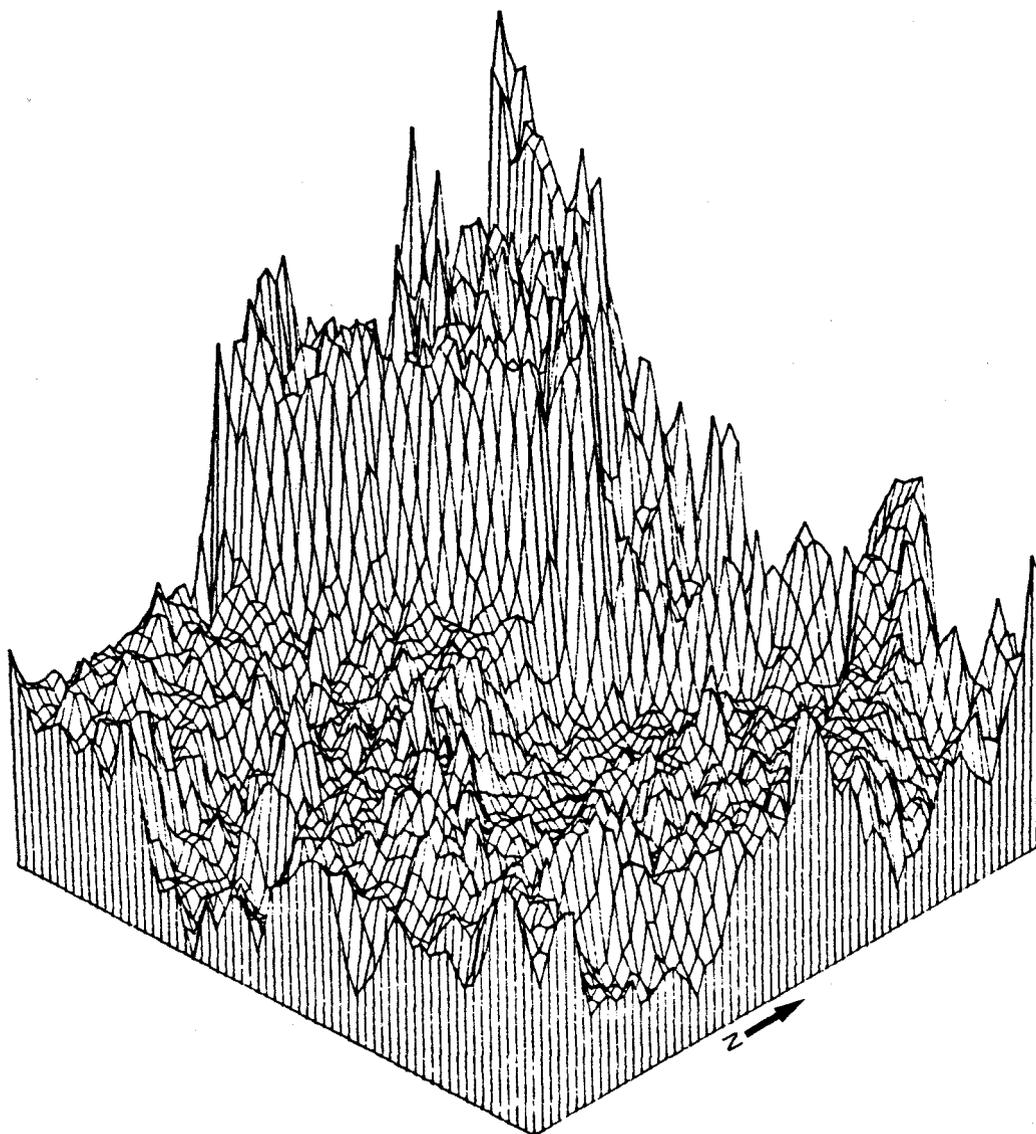


Figure 39. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image trimodale de Q35.

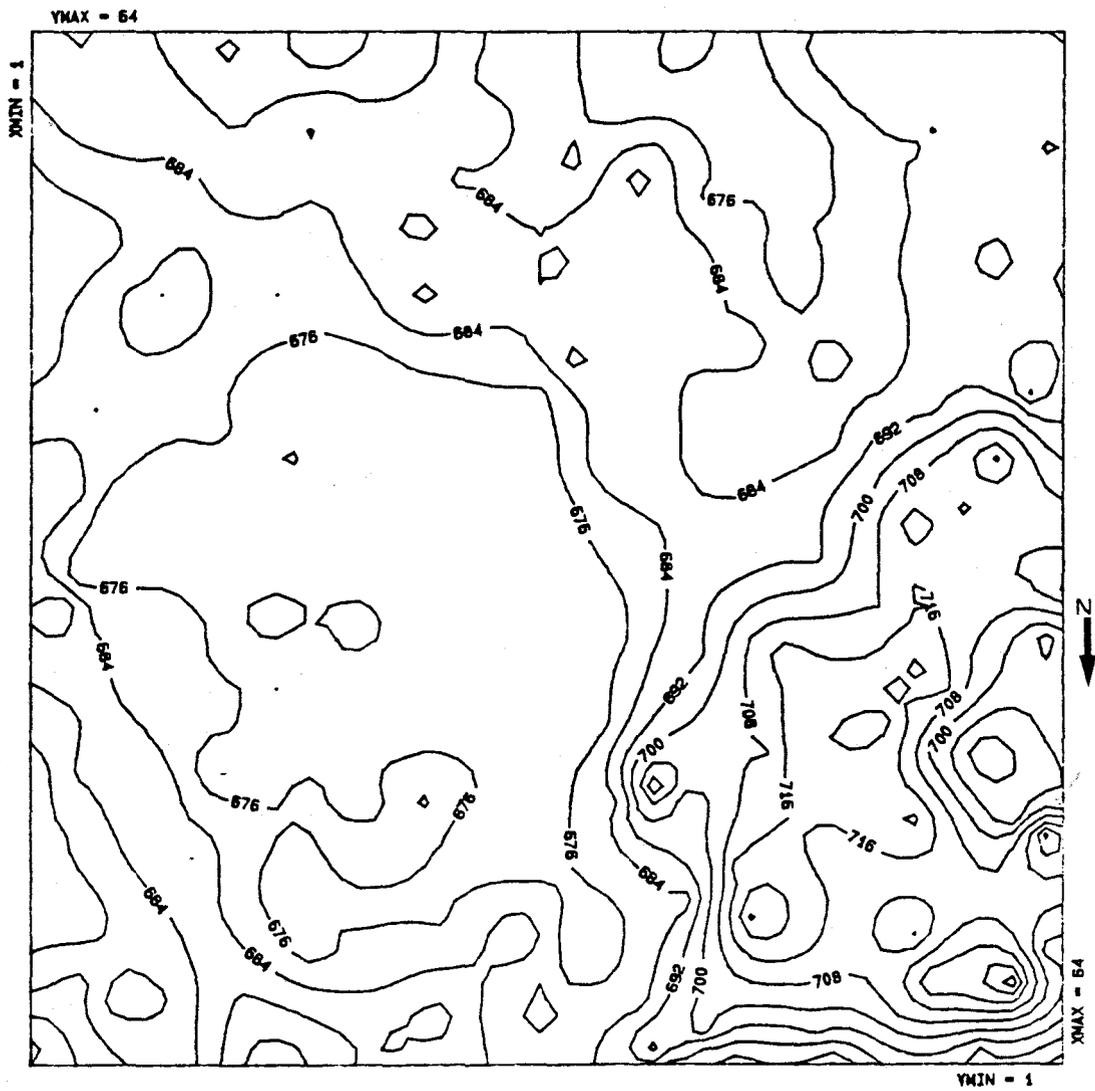


Figure 40. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 1.

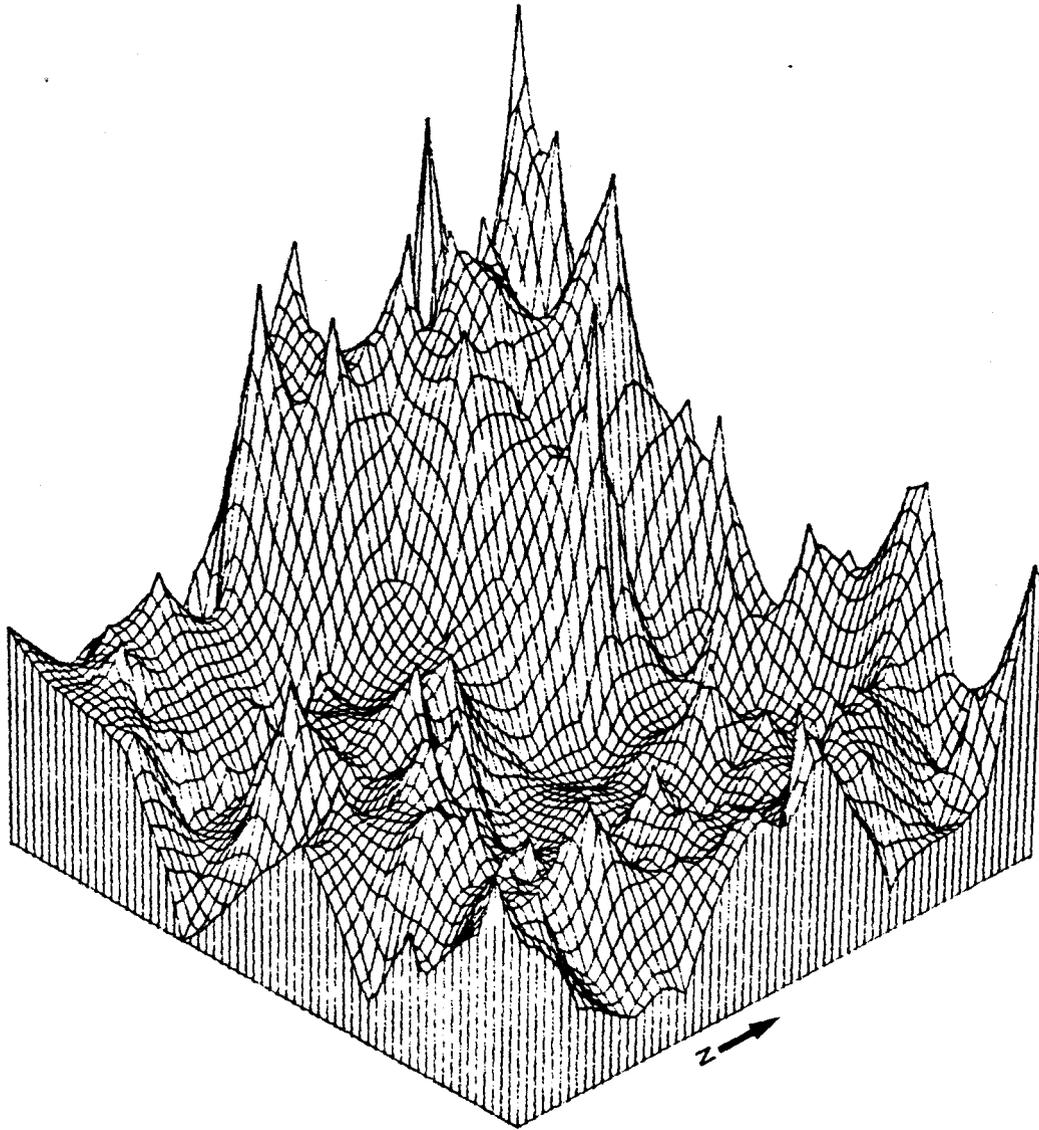


Figure 41. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 1.

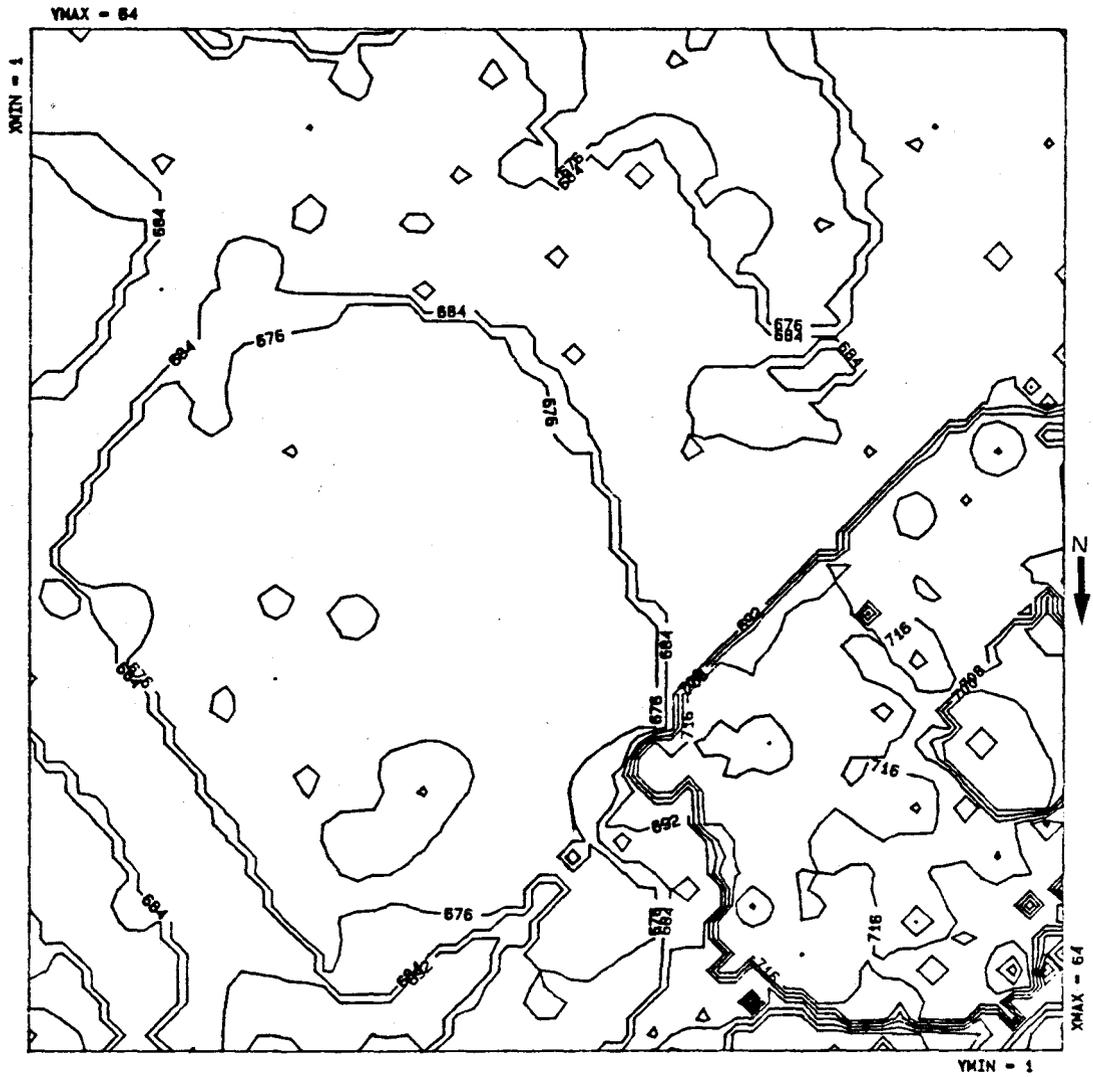


Figure 42. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 2.

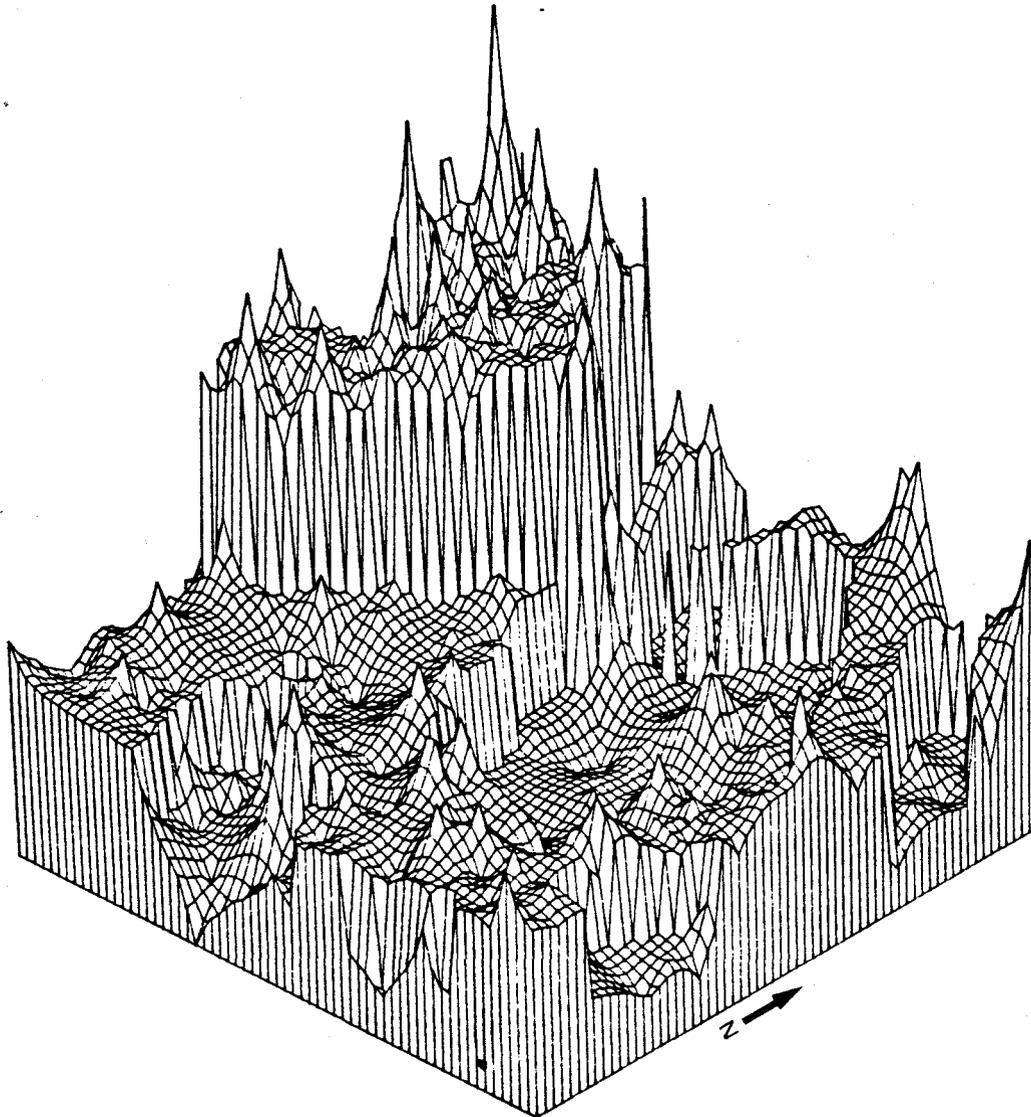


Figure 43. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 2.

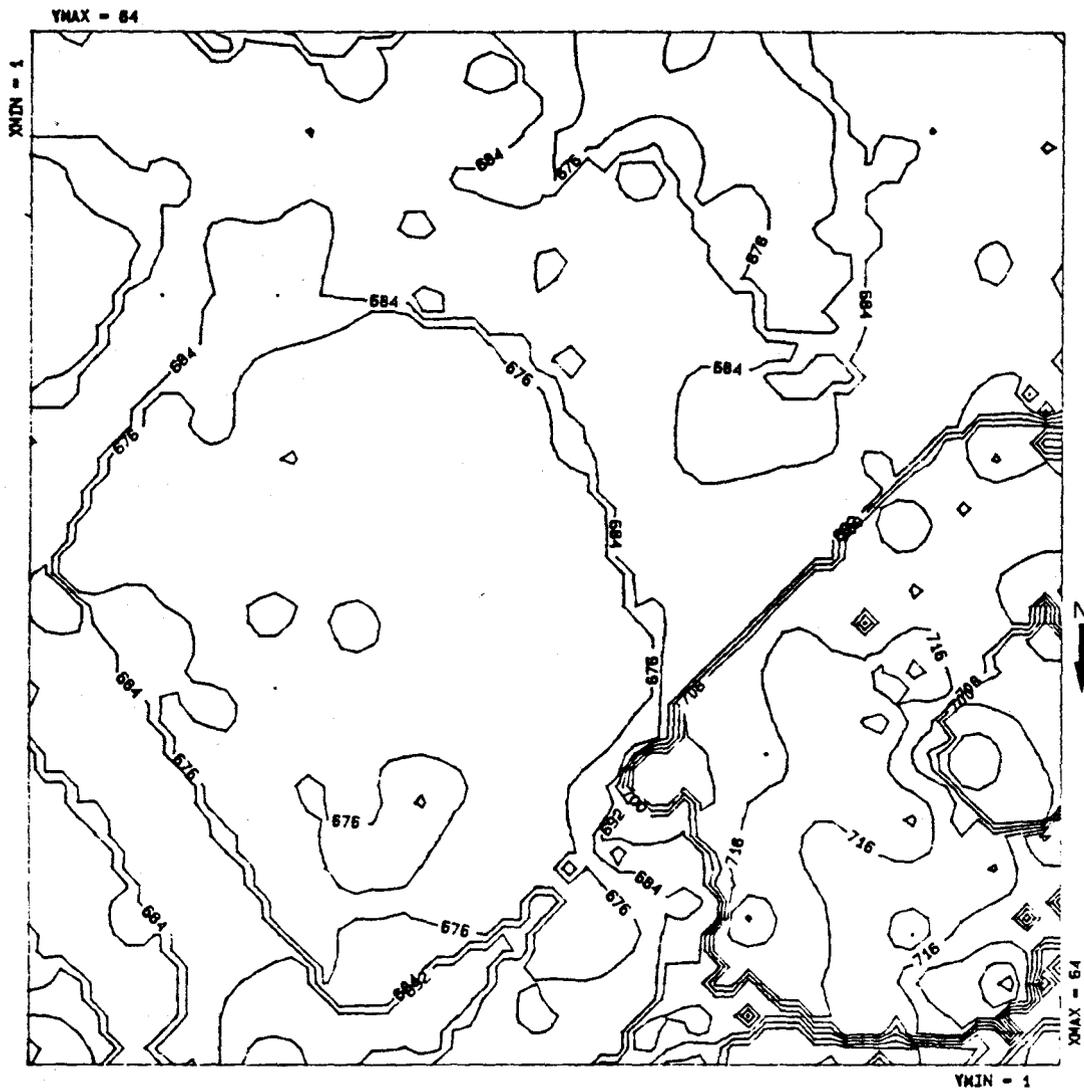


Figure 44. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 3.

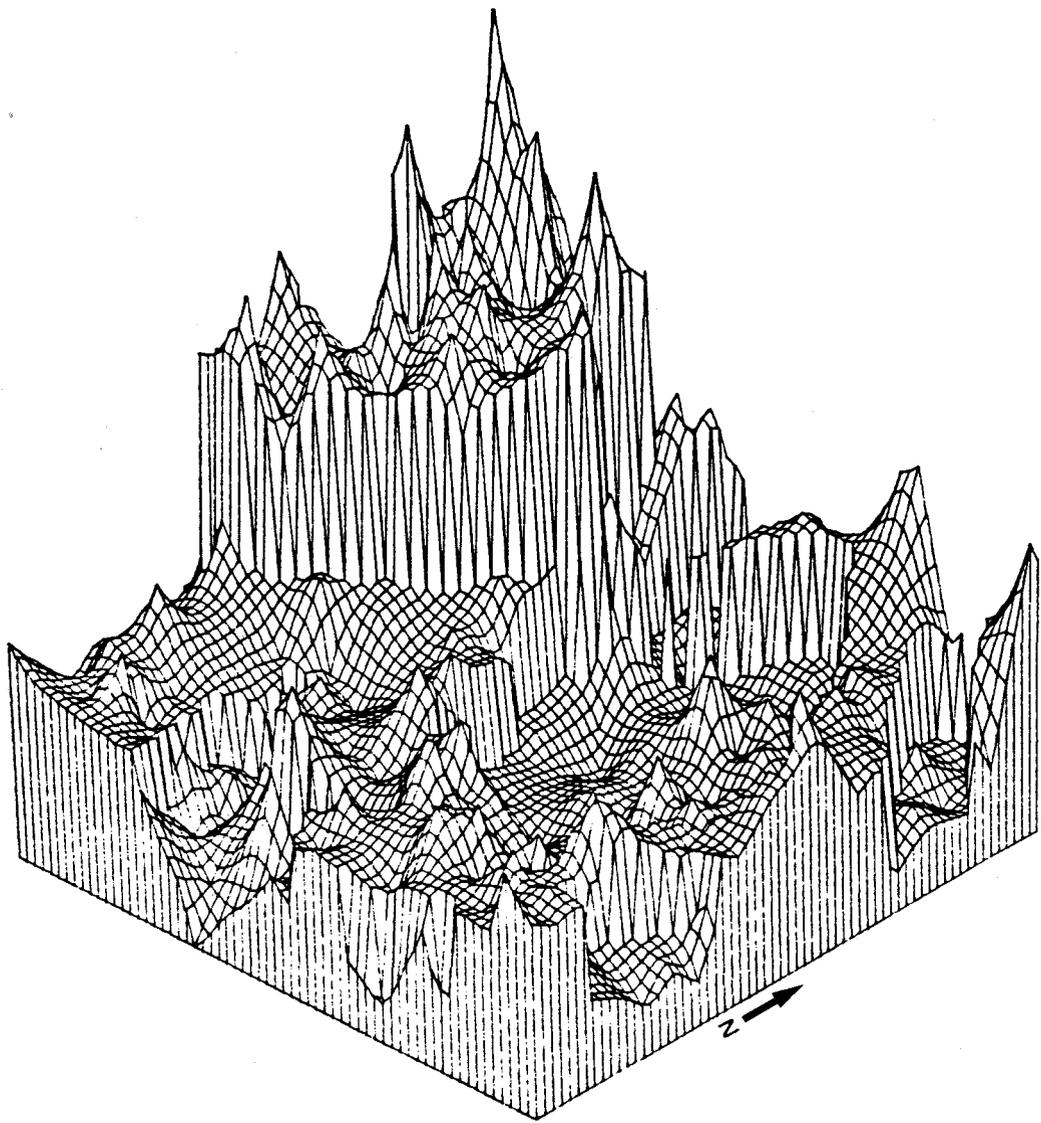


Figure 45. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image Q35 - traitement 3.



46



47



48



49

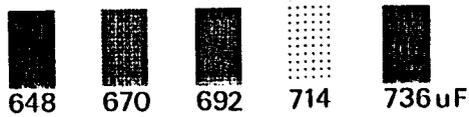


Figure 46. Reproduction-couleurs des valeurs vraies de l'image trimodale Q35.

Figure 47. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image trimodale Q35 - traitement 1.

Figure 48. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image trimodale Q35 - traitement 2.

Figure 49. Reproduction-couleurs des valeurs krigées de l'image trimodale Q35 - traitement 3.

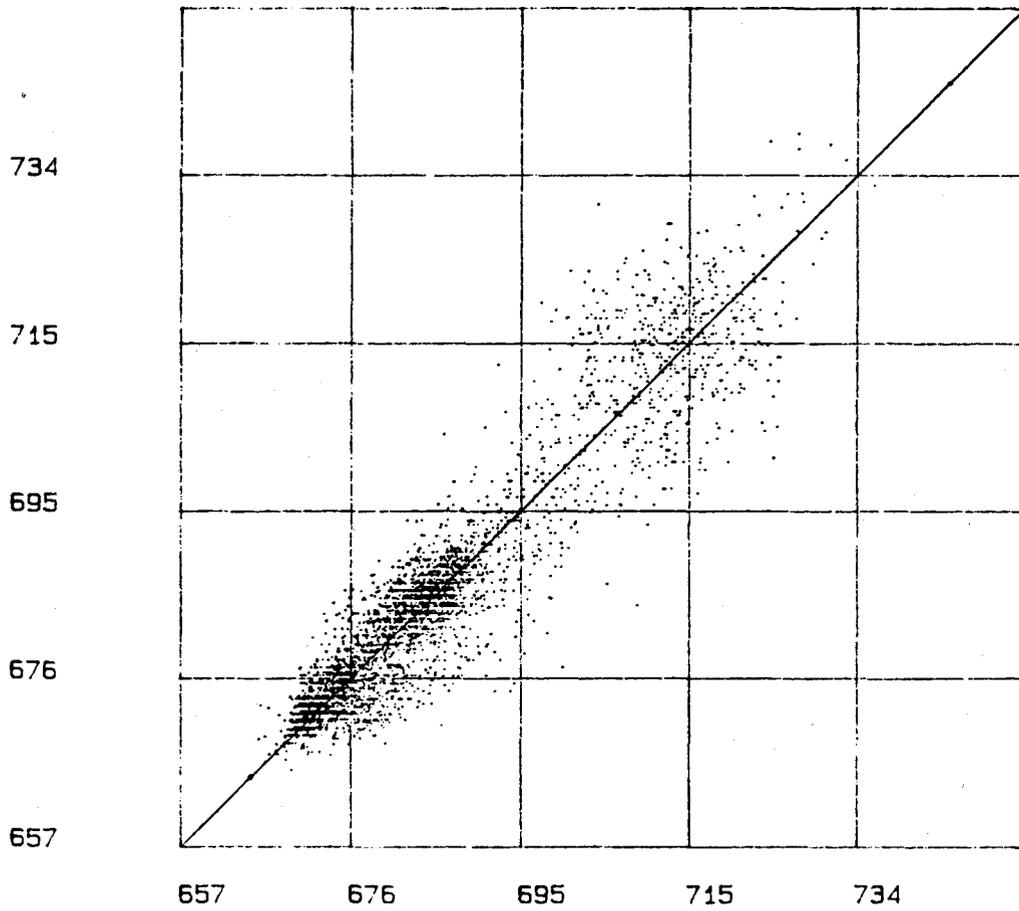


Figure 50. Scattérogramme 1 de l'image Q35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) issues du traitement 1 - coefficient de corrélation de .949.

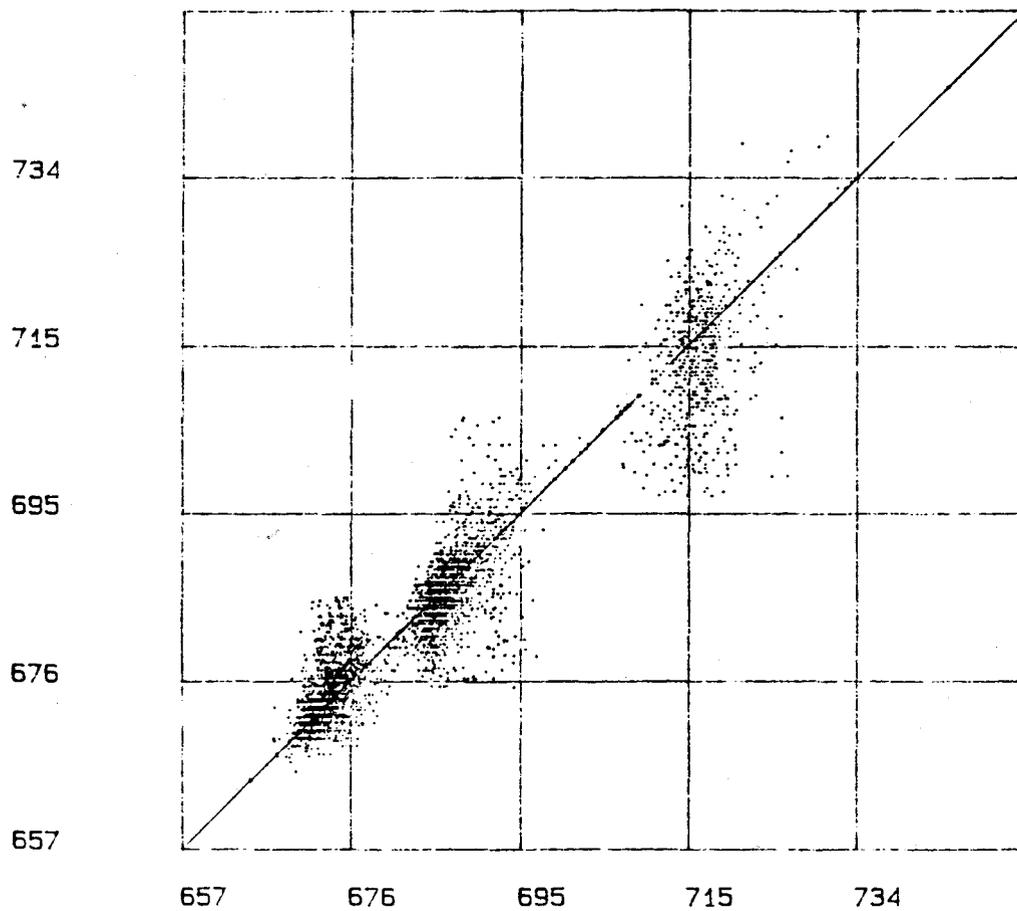


Figure 51. Scattérogramme 2 de l'image Q35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) issues du traitement 2 - coefficient de corrélation de .958.

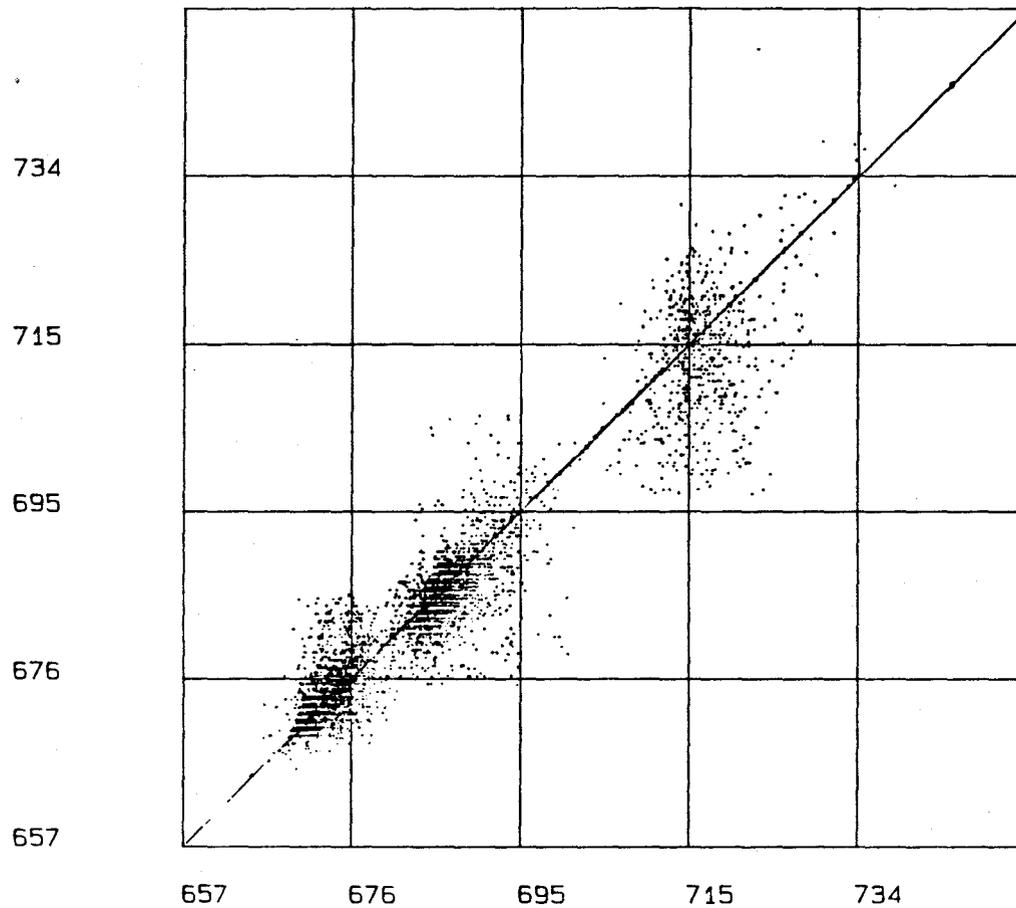


Figure 52. Scattérogramme 3 de l'image Q35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) issues du traitement 3 - coefficient de corrélation de .958.

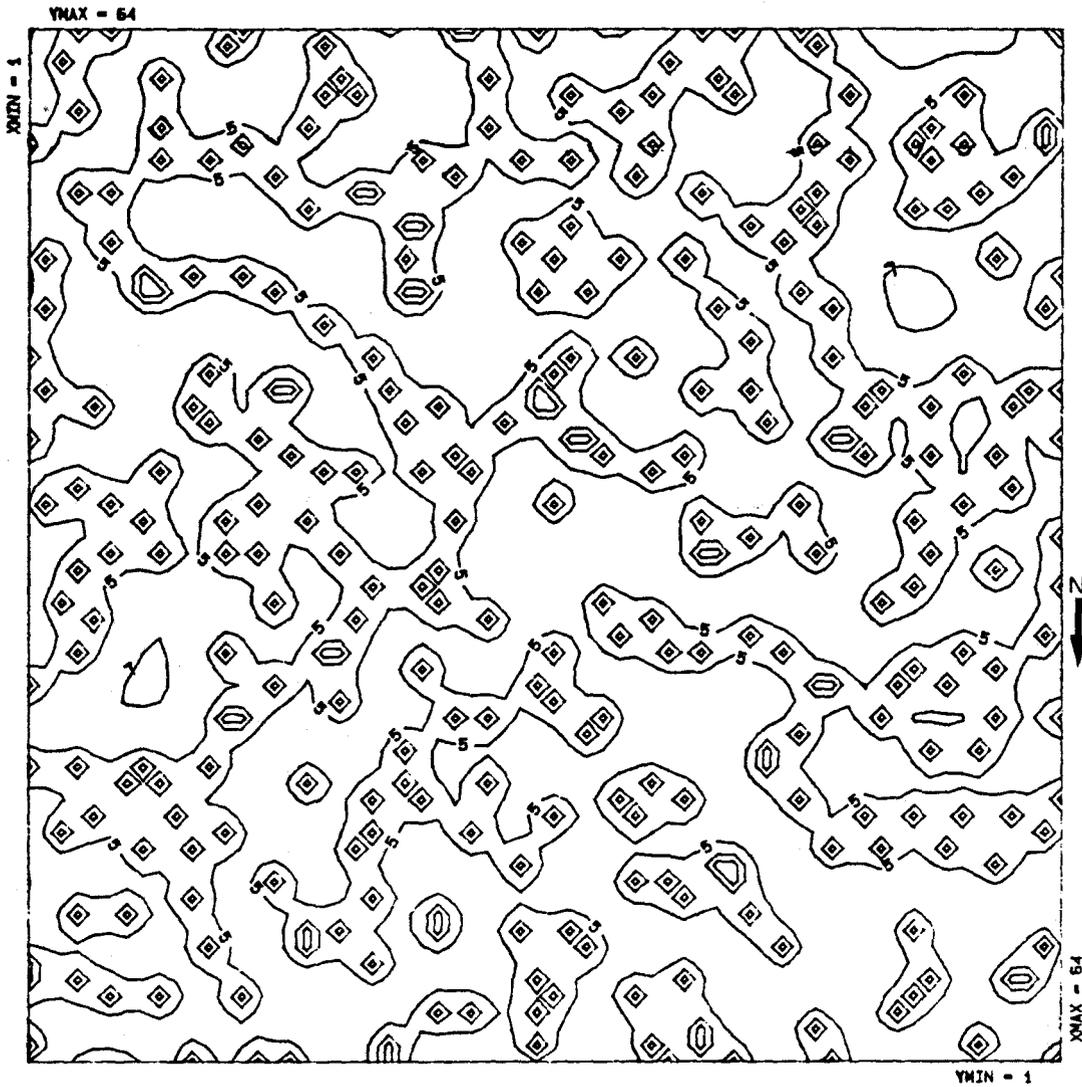


Figure 53. Isolignes (1,3,5,7 μF) des écarts-types d'estimation de l'image Q35 - traitement 1.

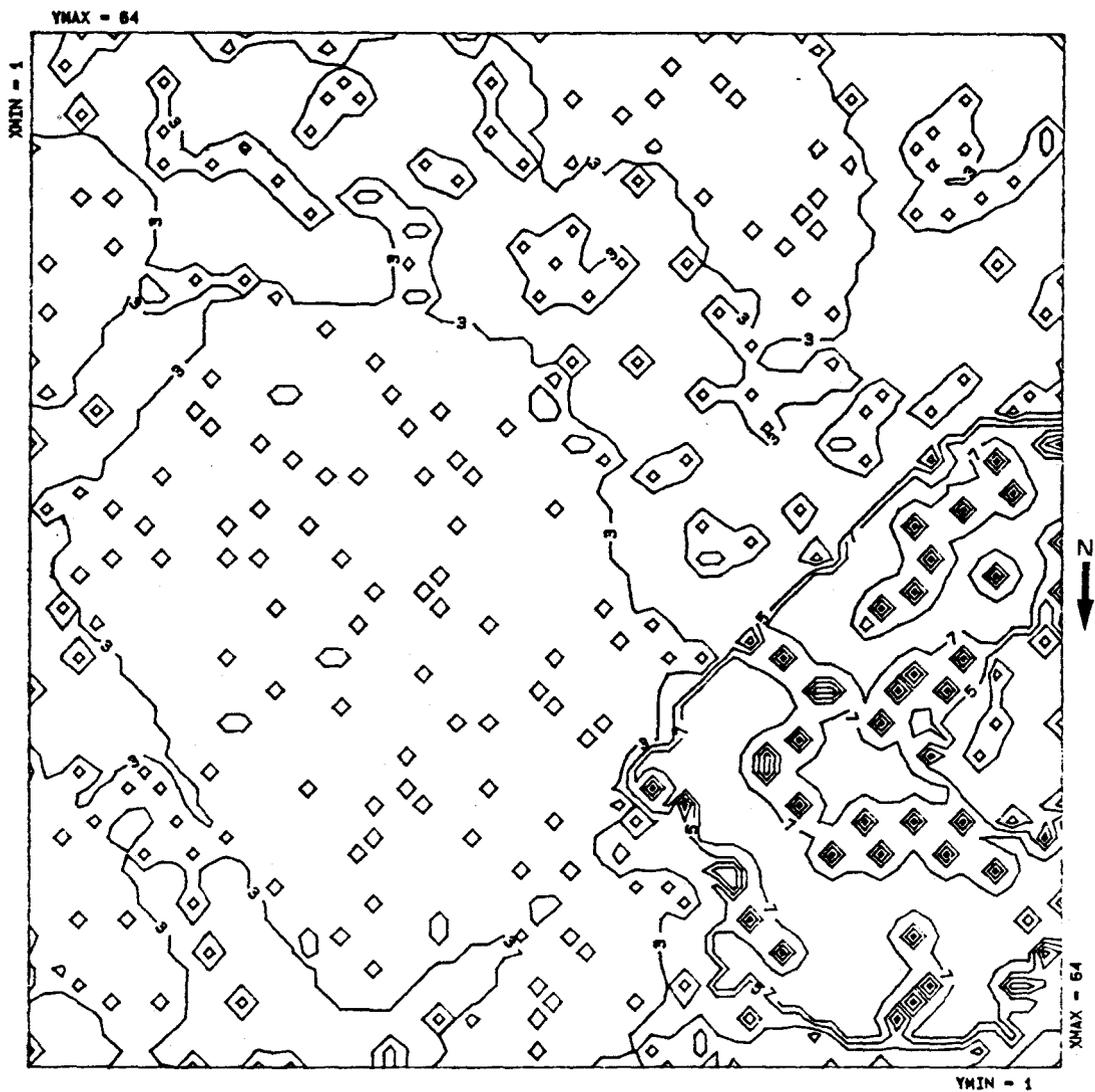


Figure 54. Isolignes (1,3,5,7 μF) des écarts-types d'estimation de l'image Q35 - traitement 2.

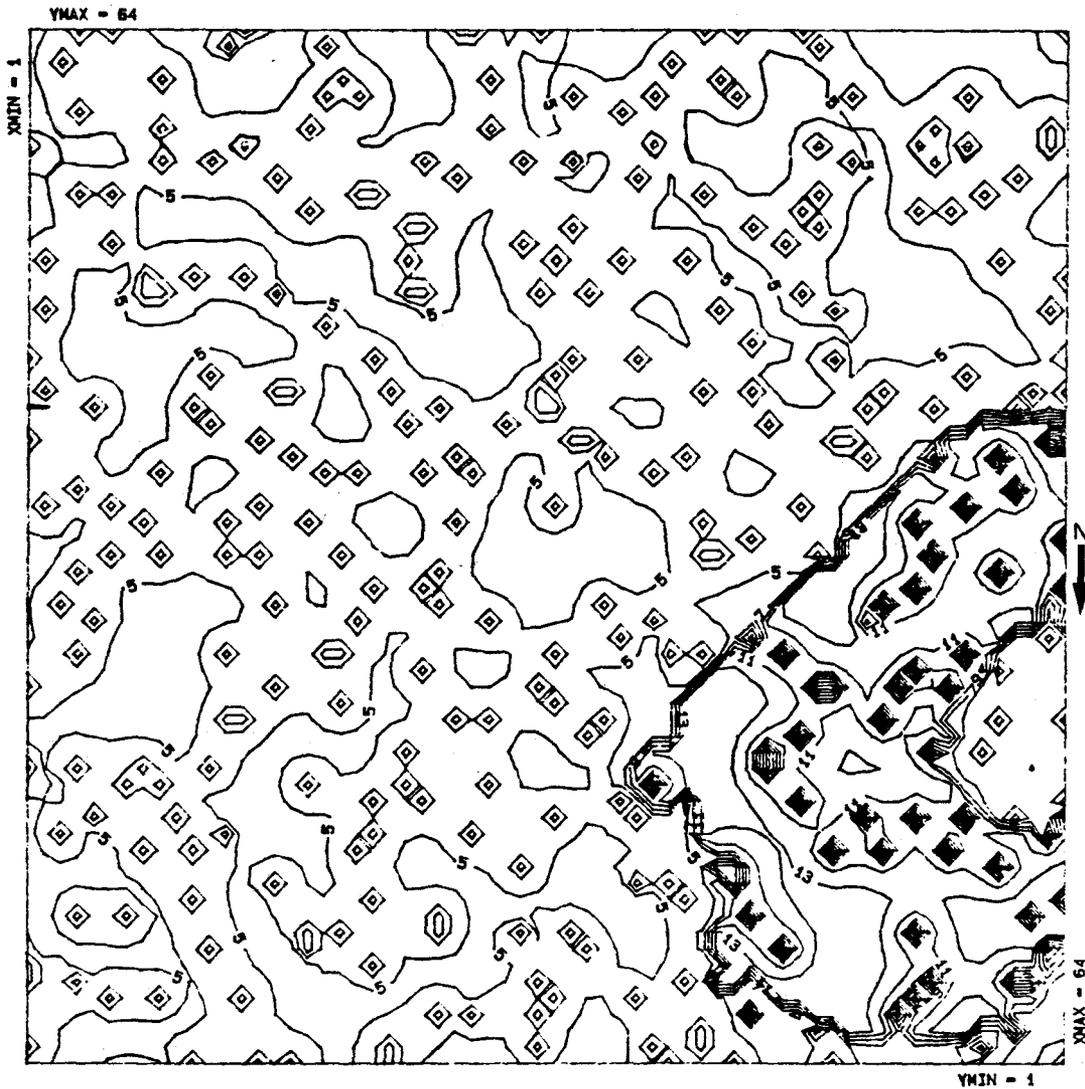


Figure 55. Isolignes (1,3,5,7,9,11,13,15 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image Q35 - traitement 3.

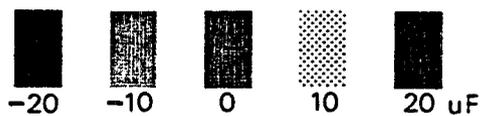
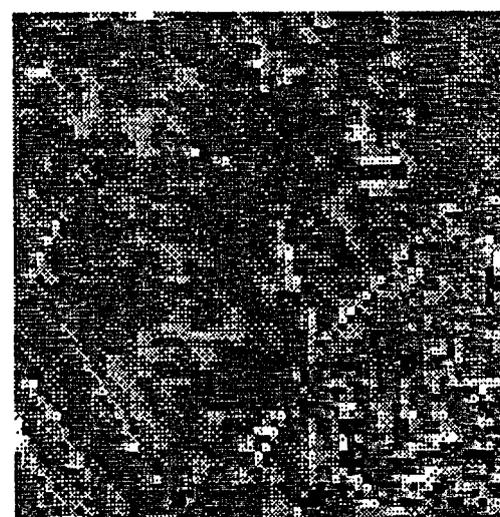
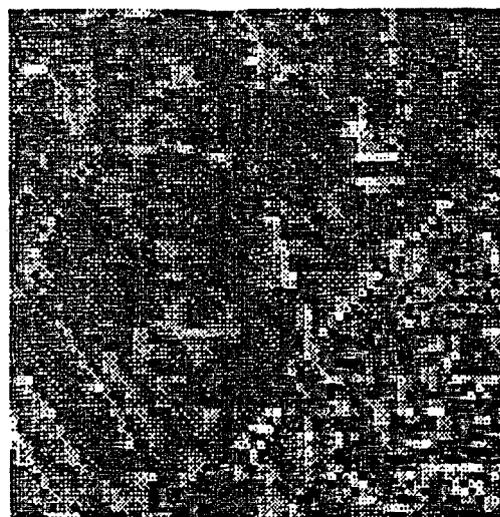


Figure 56. Reproduction-couleurs des erreurs (VV-VK) de l'image Q35 -
traitement 1.

Figure 57. Reproduction-couleurs des erreurs (VV-VK) de l'image Q35 -
traitement 2.

Figure 58. Reproduction-couleurs des erreurs (VV-VK) de l'image Q35 -
traitement 3.

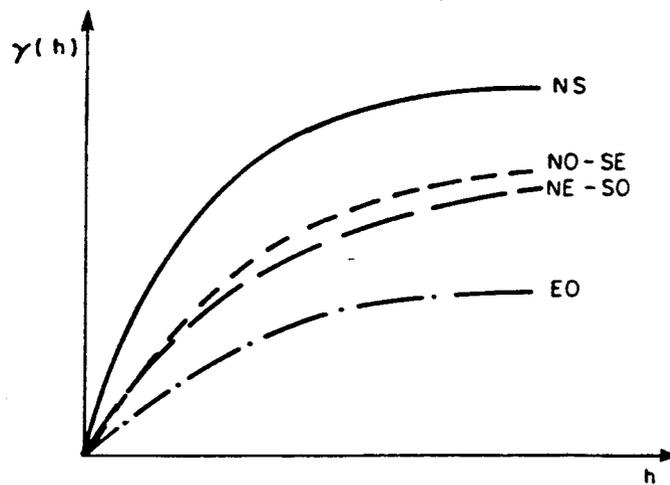
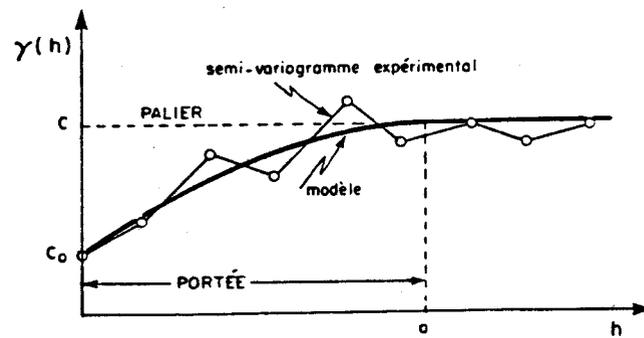
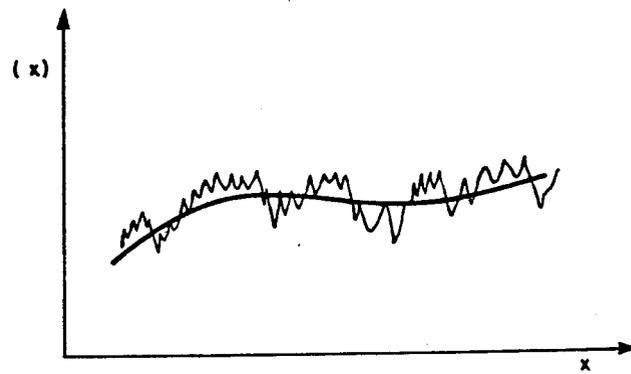


Figure A1. Double nature d'une variable régionalisée $r(x)$.

Figure A2. Semi-variogramme expérimental et modèle d'ajustement.

Figure A3. Anisotropie zonale.

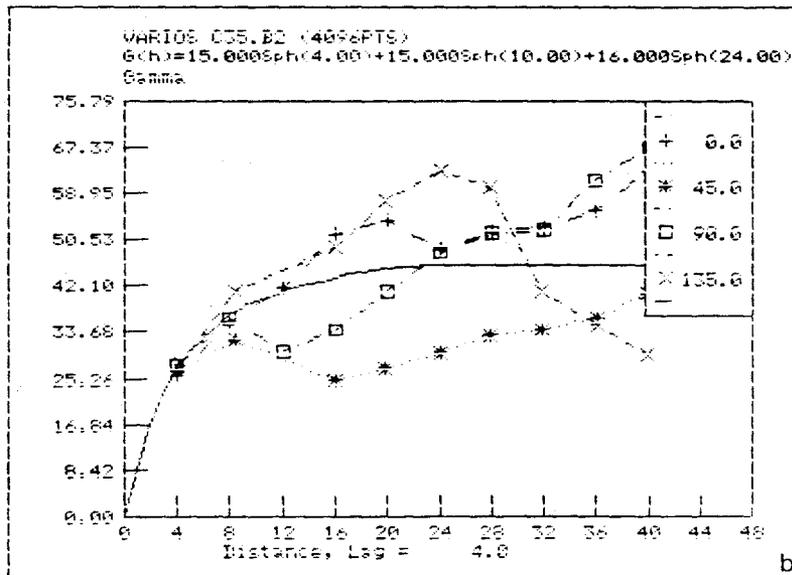
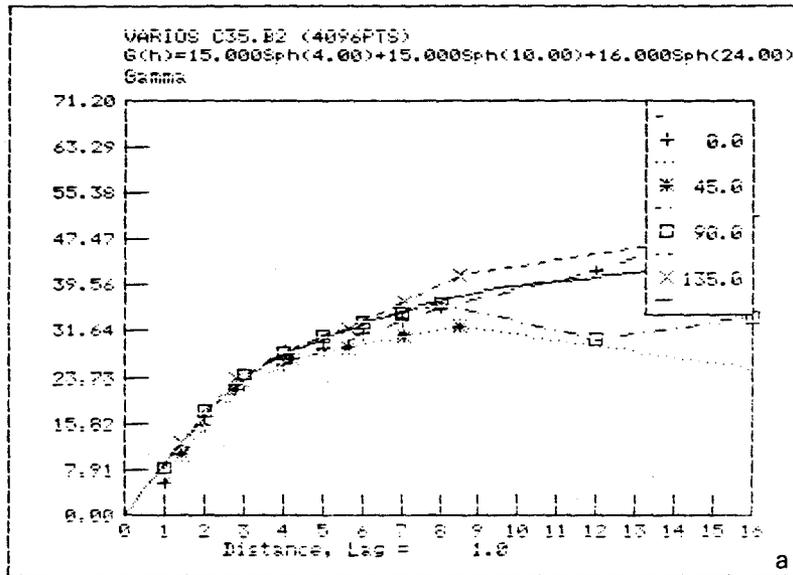


Figure B1. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour l'image-culture C35.

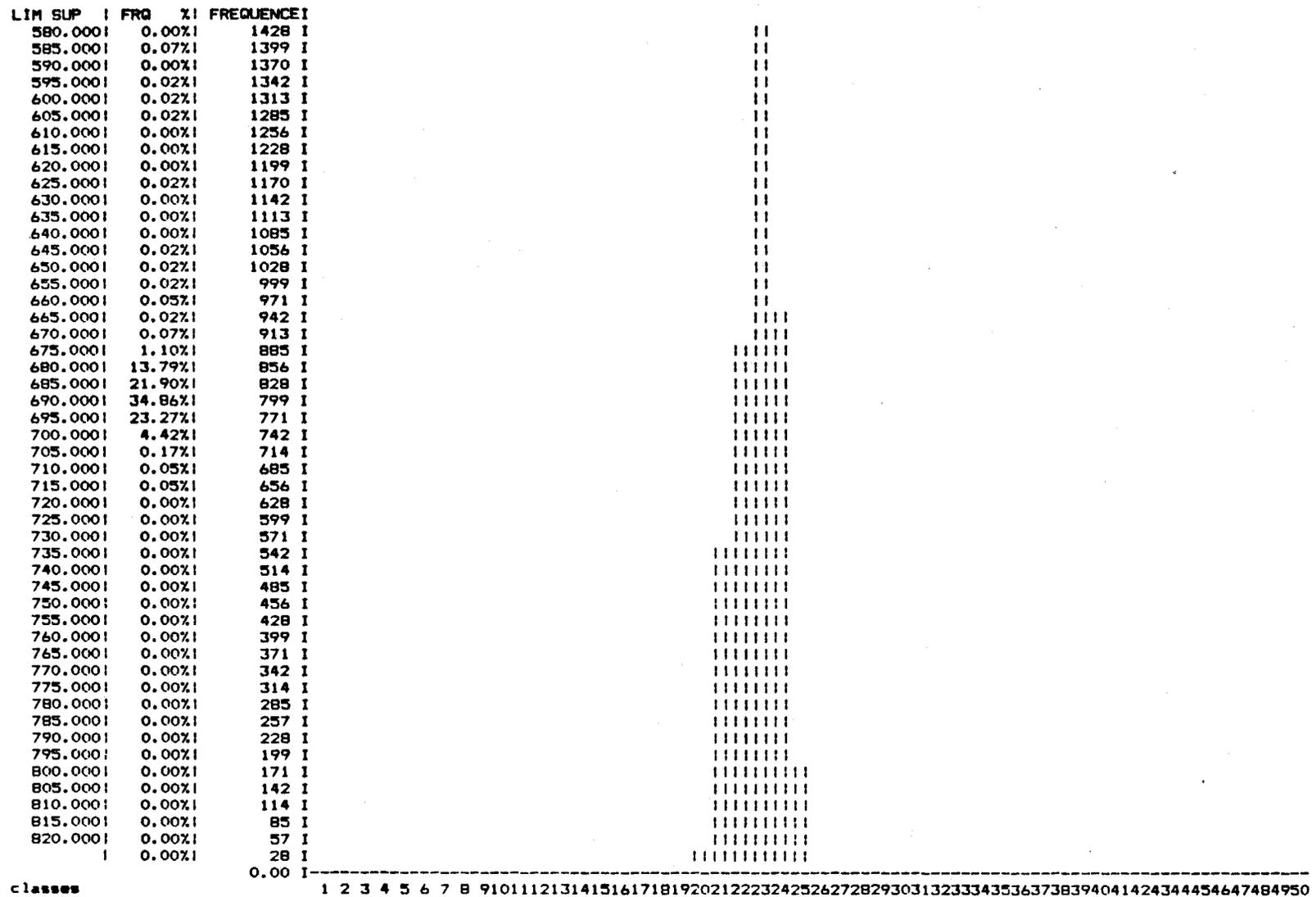


Figure B2. Histogramme des 4096 valeurs vraies de l'image-culture C35.

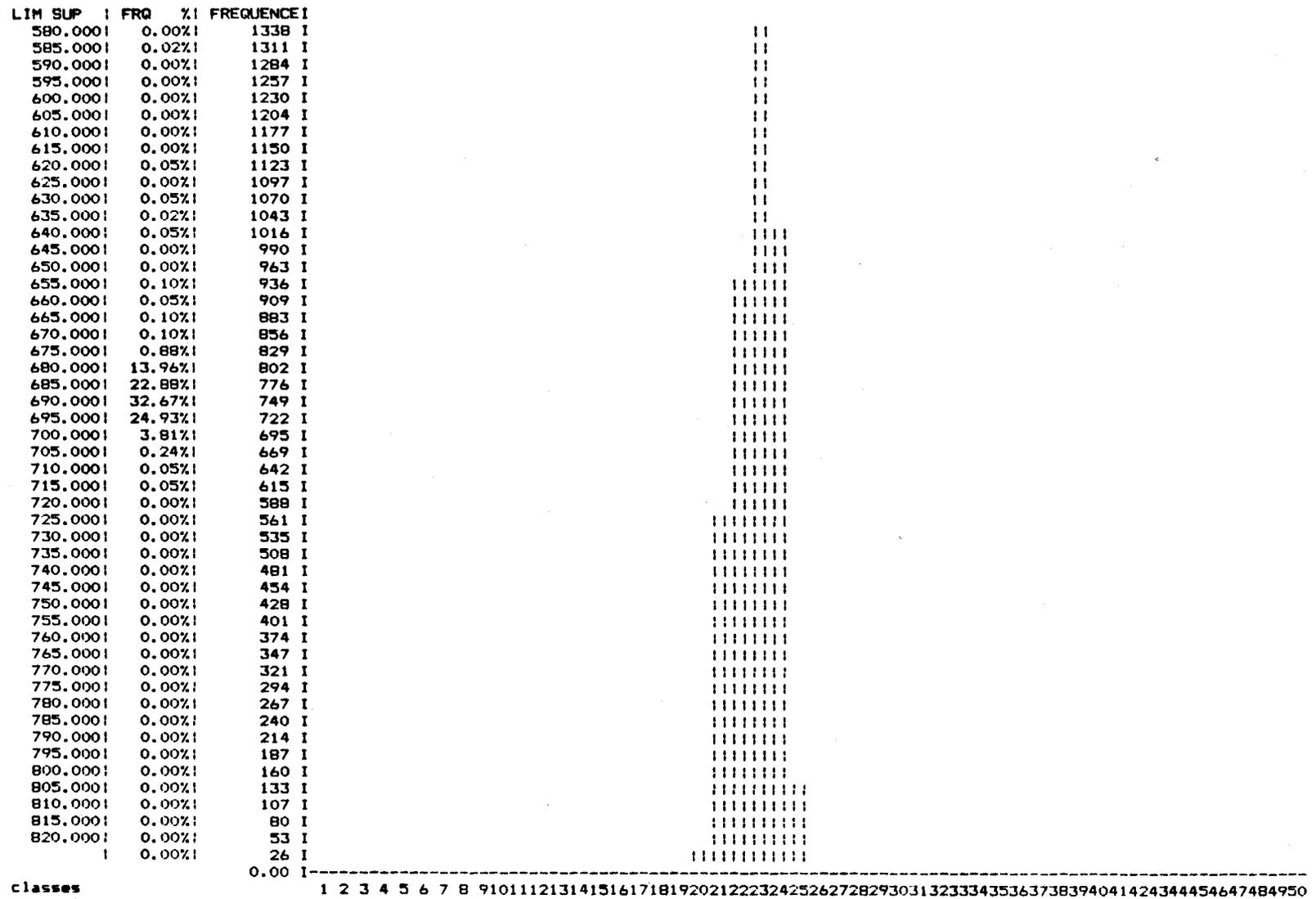


Figure B3. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image-culture C35.

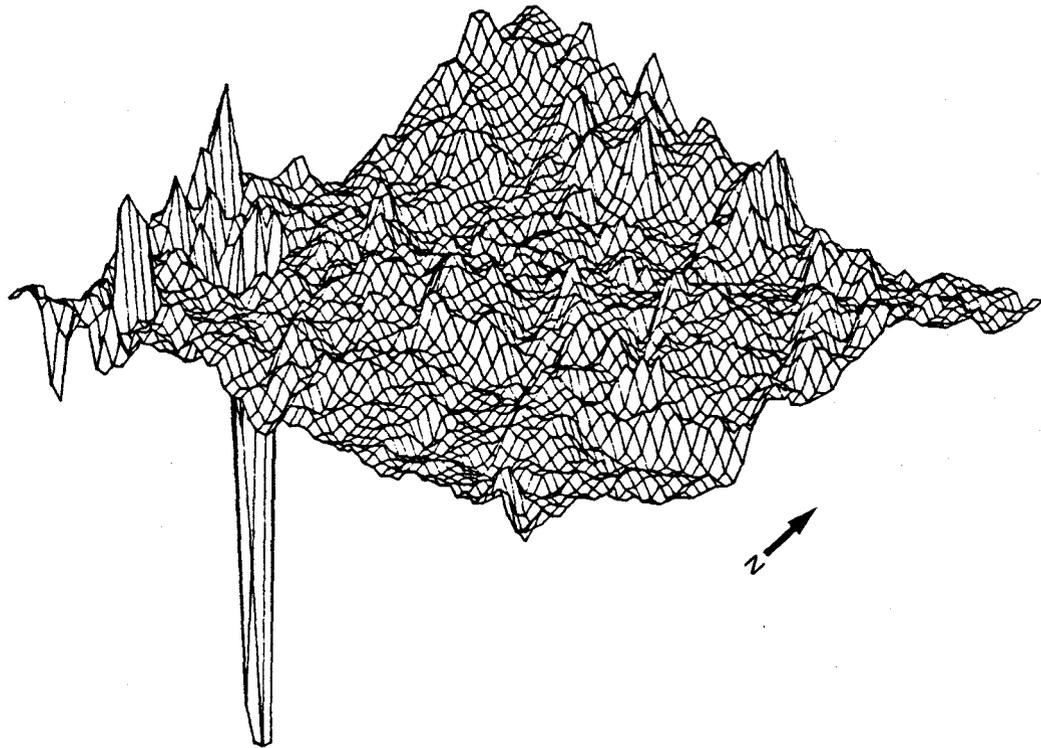


Figure B4. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image-culture C35.

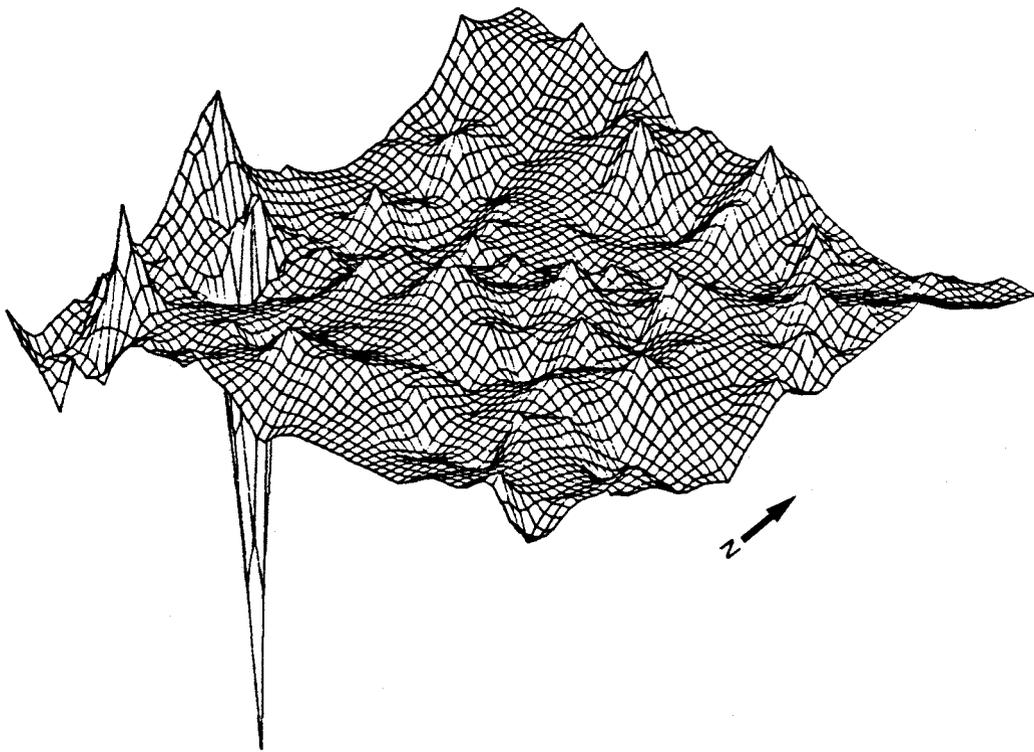


Figure B5. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image-culture C35.

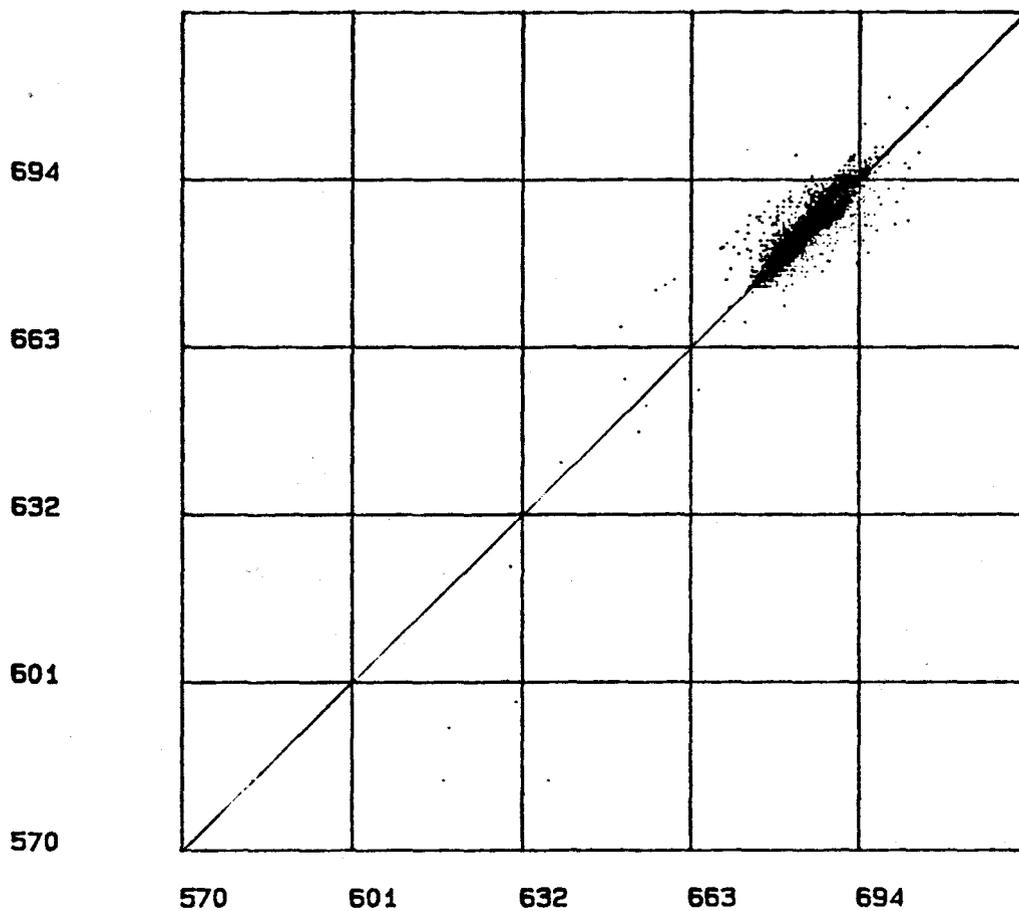


Figure B6. Scattérogramme de l'image C35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image C35 - coefficient de corrélation de .912.

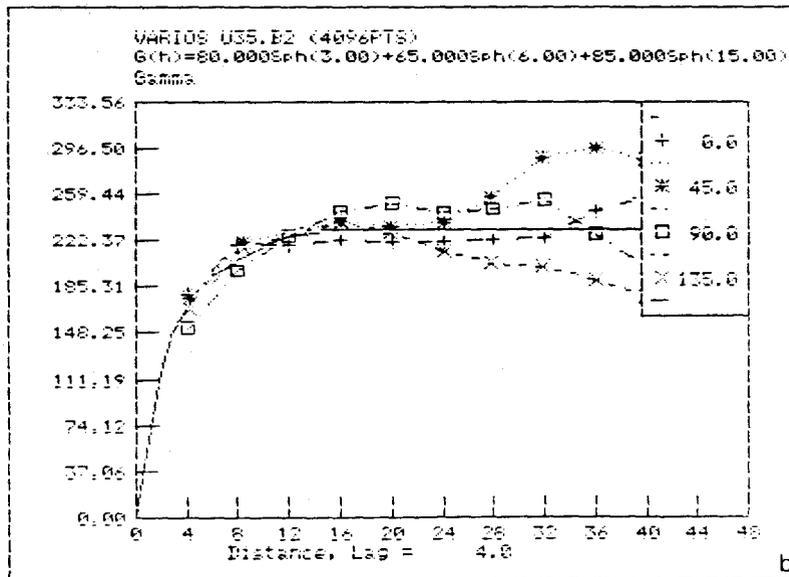
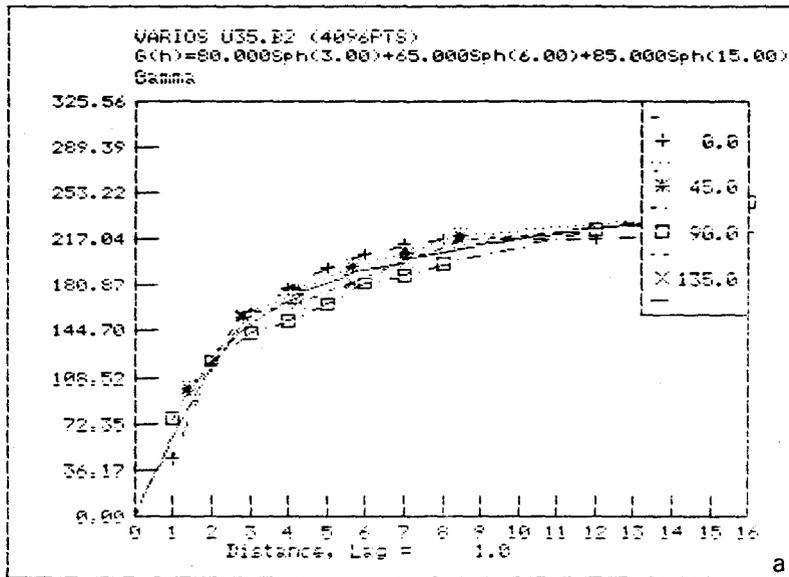


Figure B7. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour l'image urbaine U35.

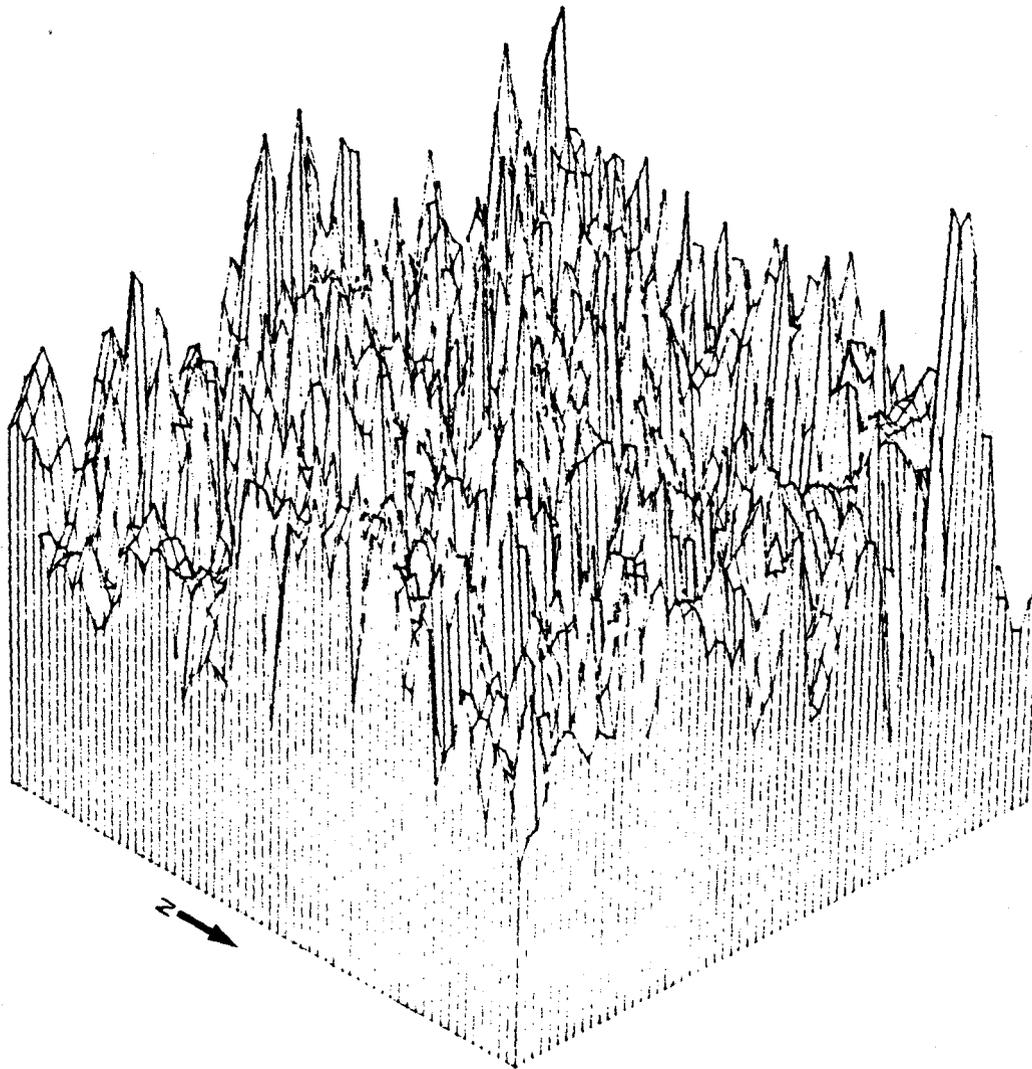


Figure B10. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image urbaine U35.

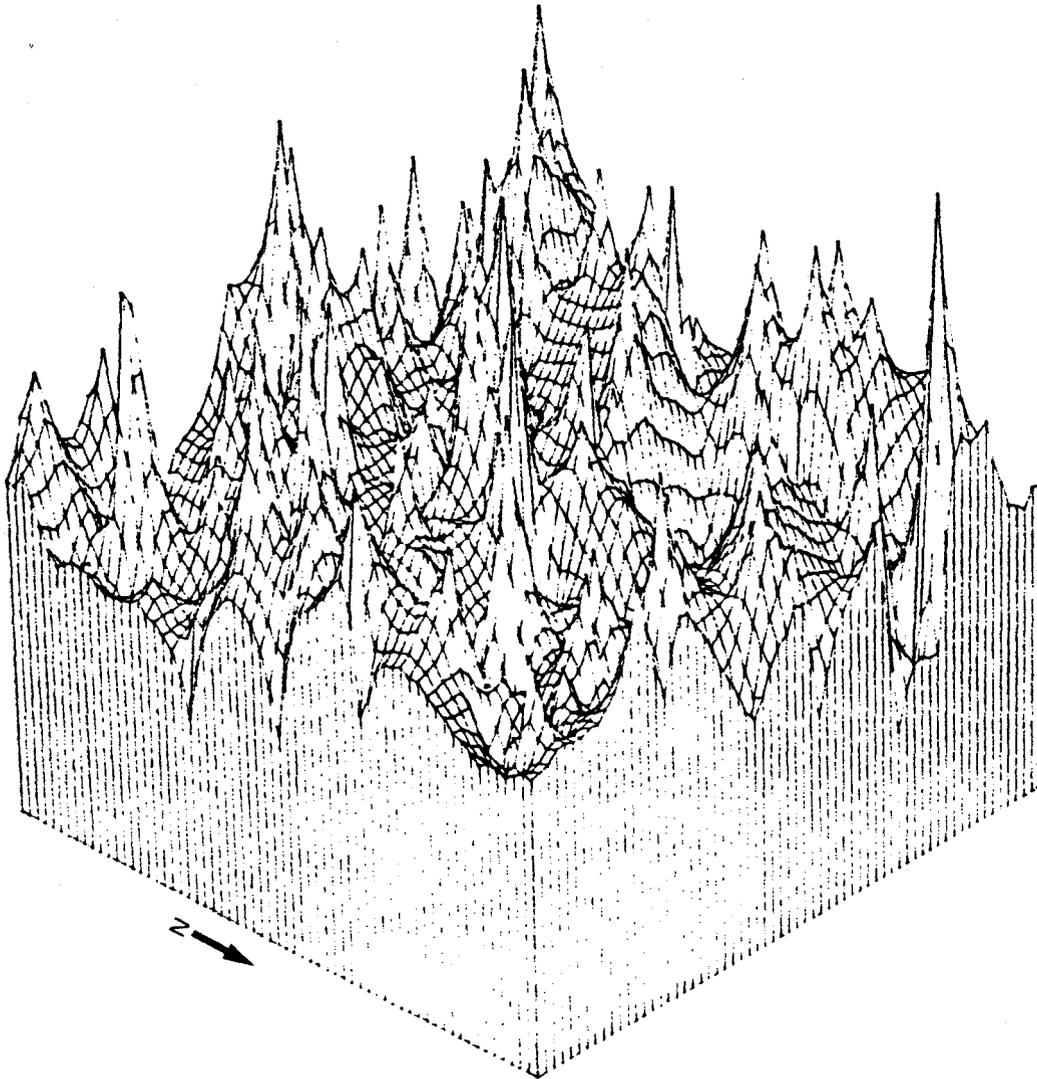


Figure B11. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image urbaine U35.

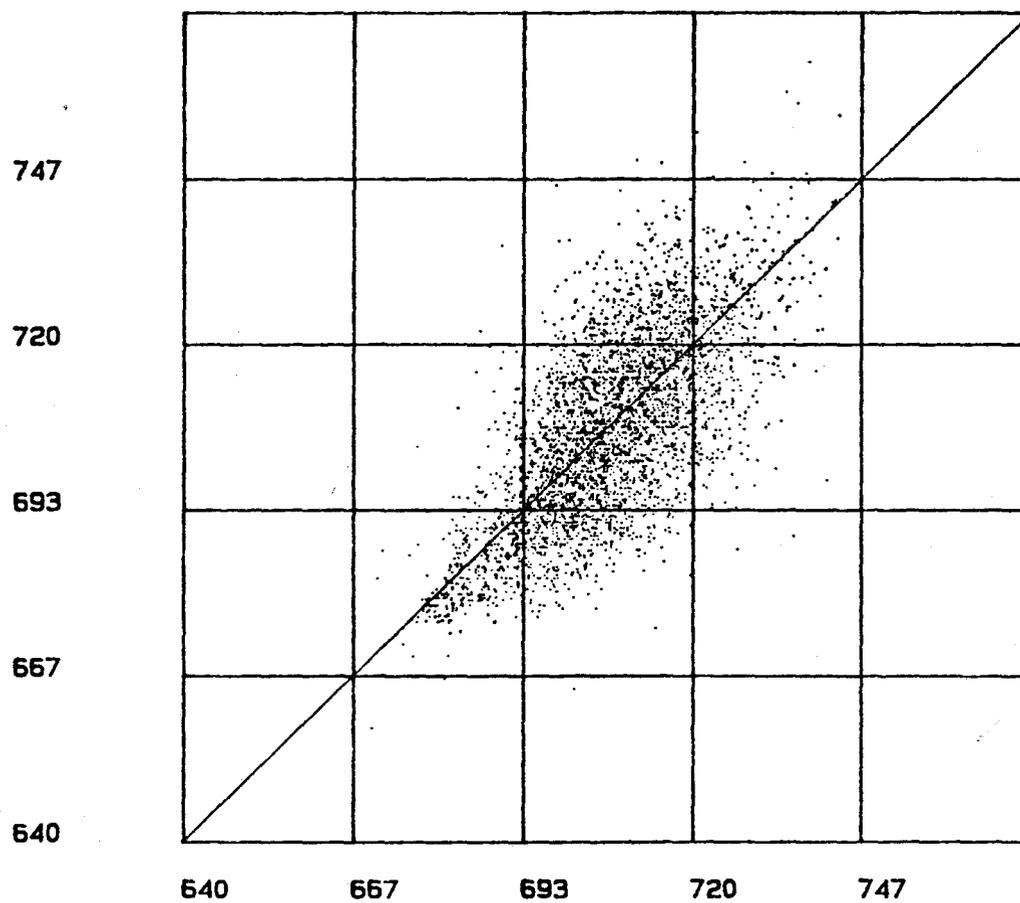


Figure B12. Scattérogramme de l'image U35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image U35 - coefficient de corrélation de .742.

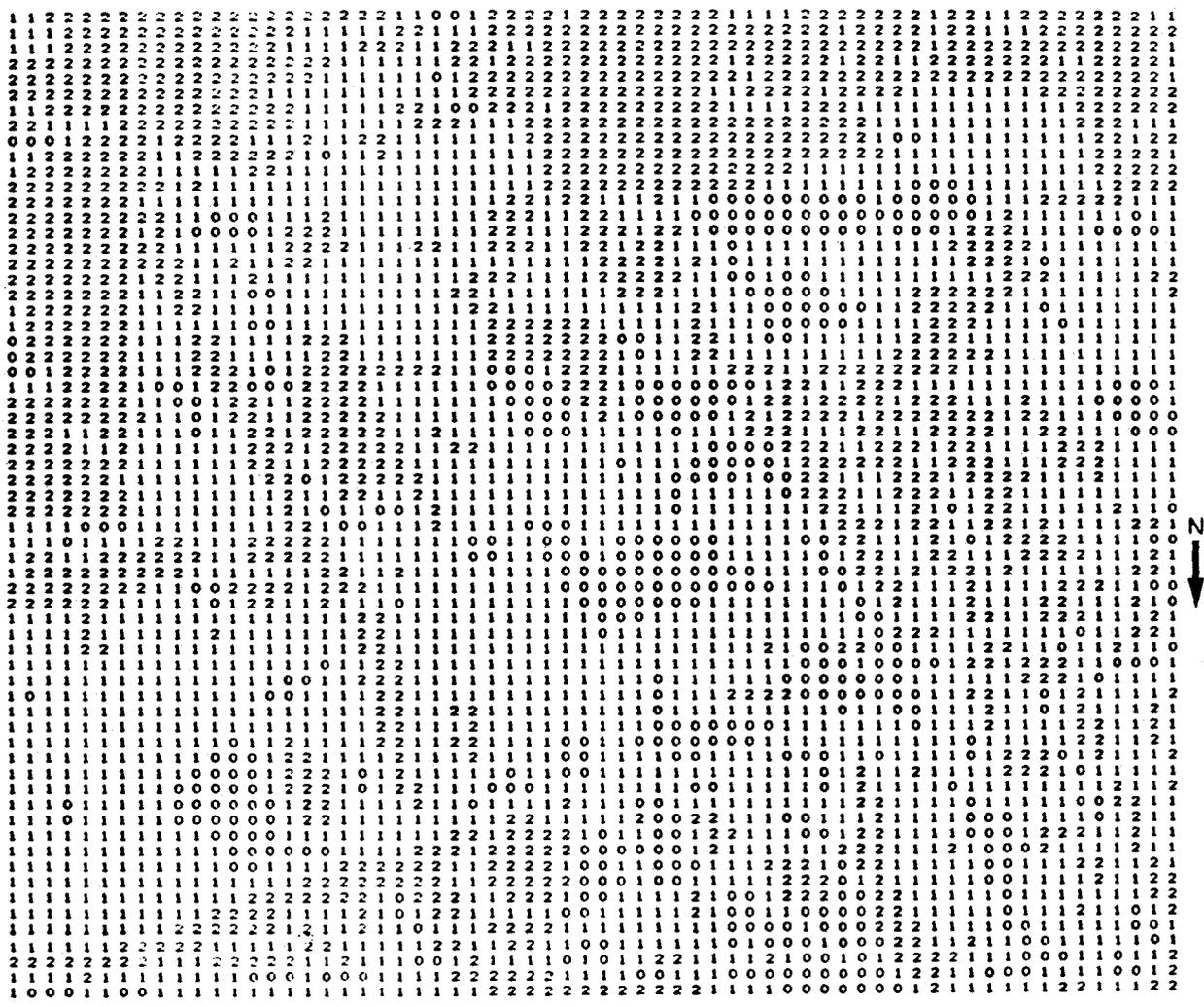


Figure C2. Matrice indicatrice issue de la classification des pixels de l'image R35 en couverts forestier (0), agricole (1) et urbain (2).

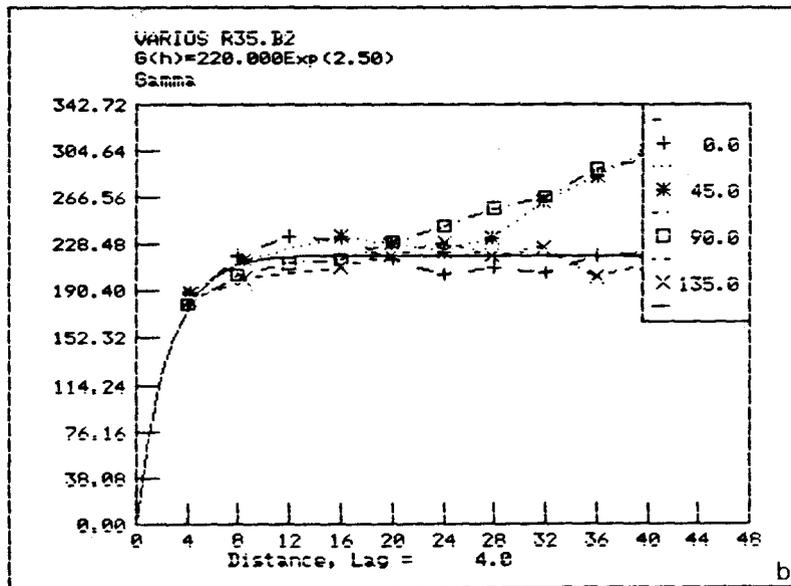
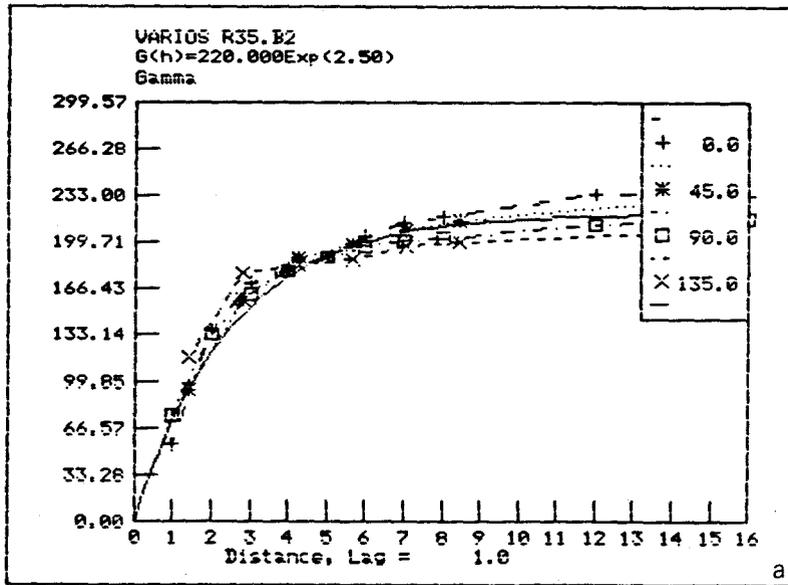


Figure C3. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image R35 - traitement 1.

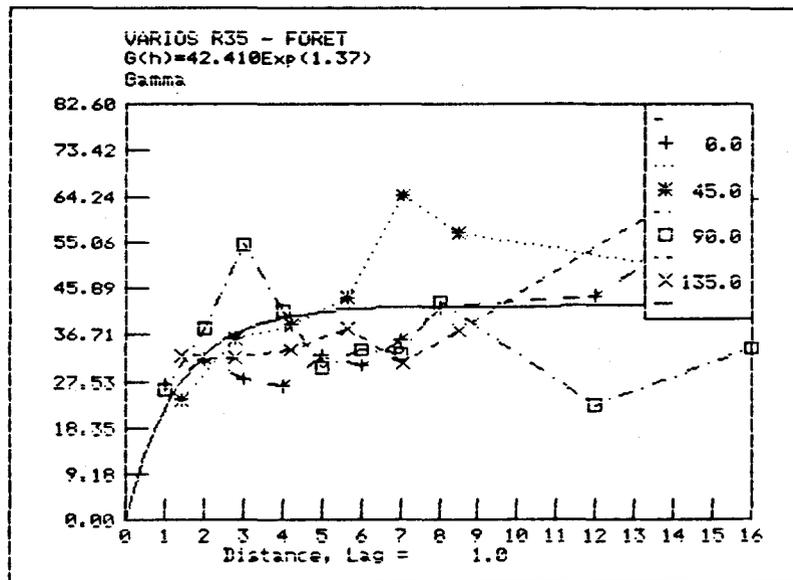


Figure C4. Semi-variogrammes directionnels à pas variable et modèle isotrope pour le couvert forestier de l'image R35 - traitement 2.

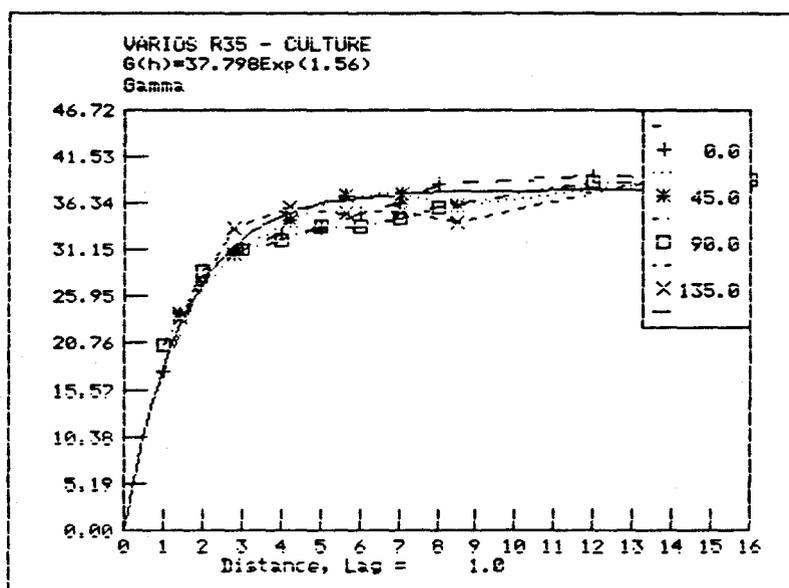


Figure C5. Semi-variogrammes directionnels à pas variable et modèle isotrope pour le couvert agricole de l'image R35 - traitement 2.

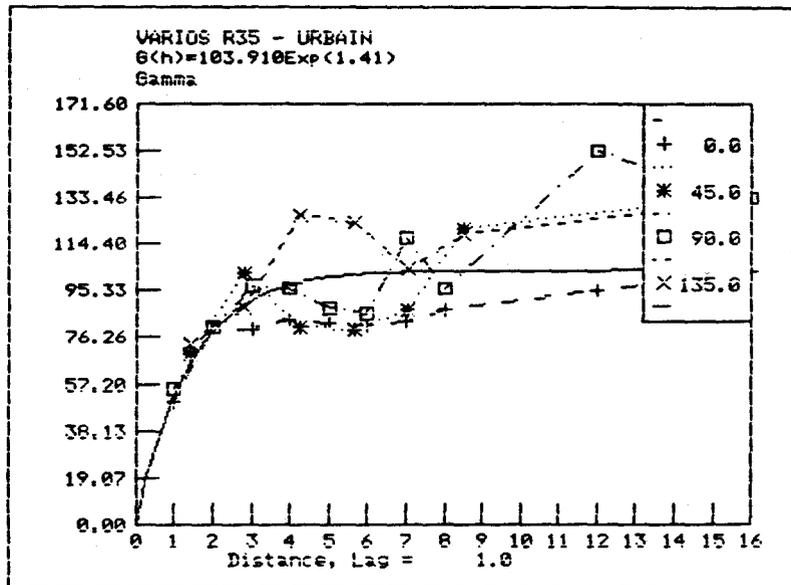


Figure C6. Semi-variogrammes directionnels à pas variable et modèle isotrope pour le couvert urbain de l'image R35 - traitement 2.

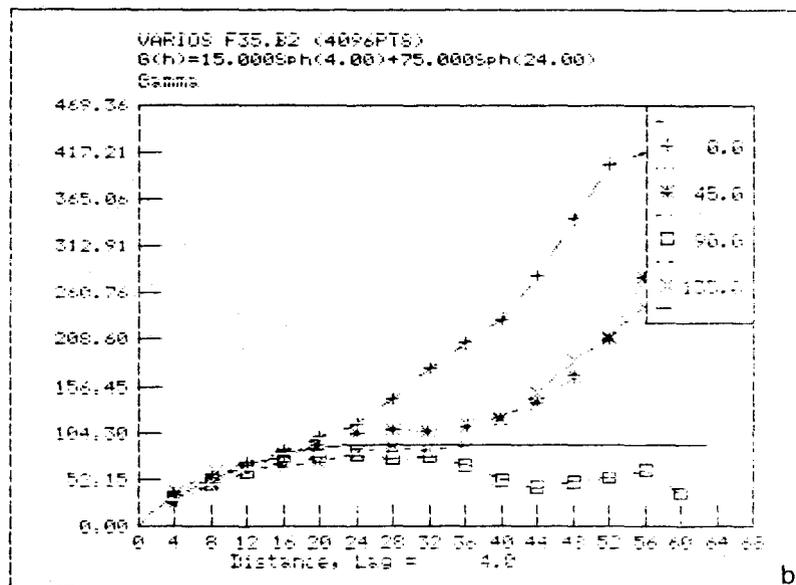
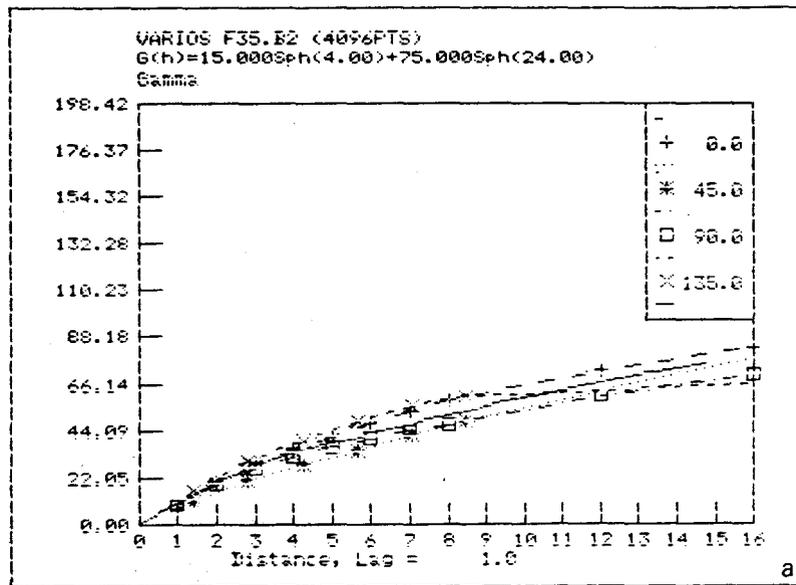


Figure C7. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-forêt F35 utilisés pour le traitement 3 de l'image R35.

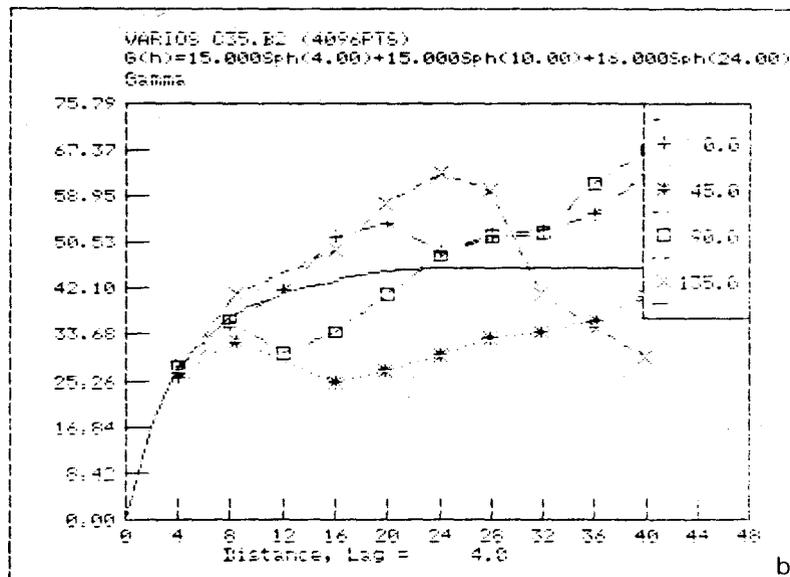
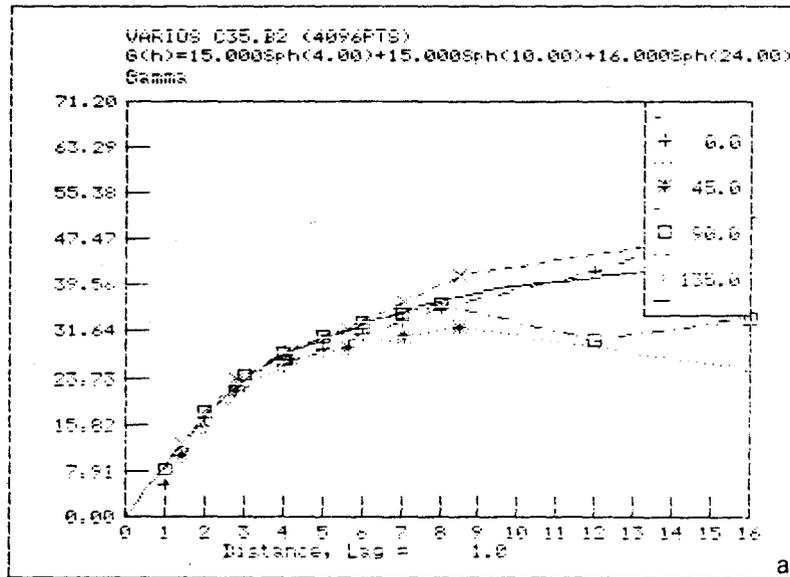


Figure C8. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-culture C35 utilisés pour le traitement 3 de l'image R35.

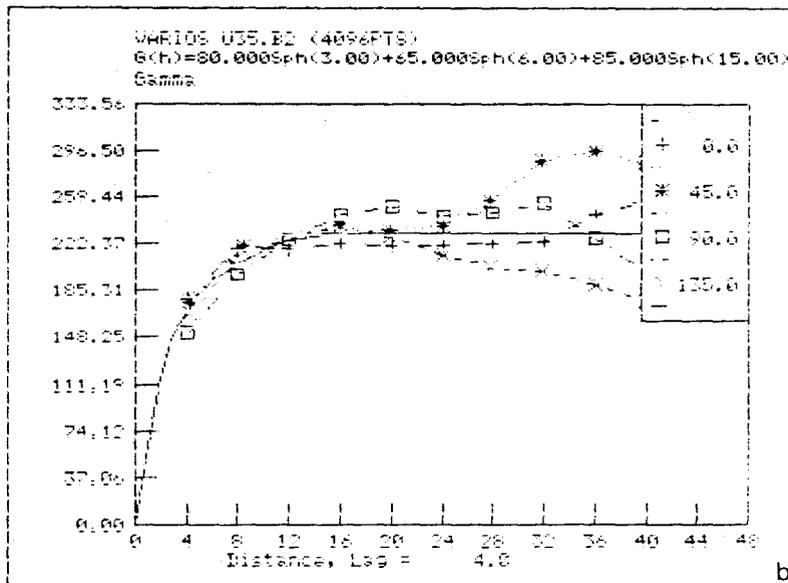
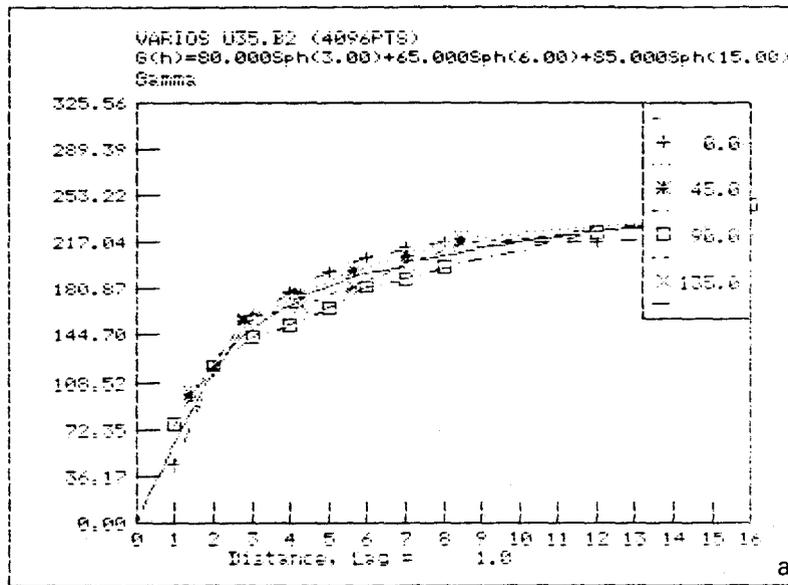


Figure C9. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image urbaine U35 utilisés pour le traitement 3 de l'image R35.

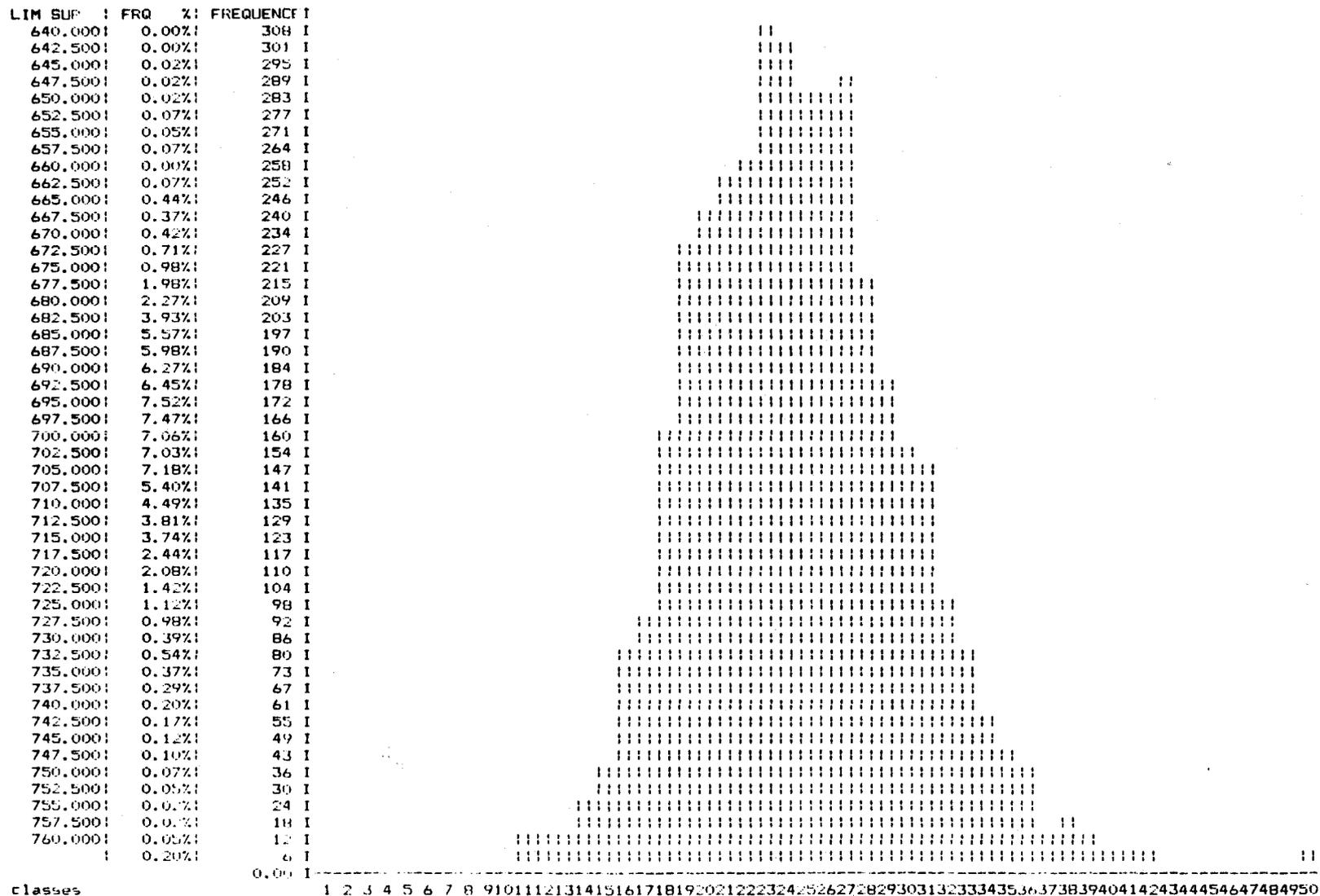


Figure C10. Histogramme des 4096 valeurs krigées de l'image R35 - traitement 1.

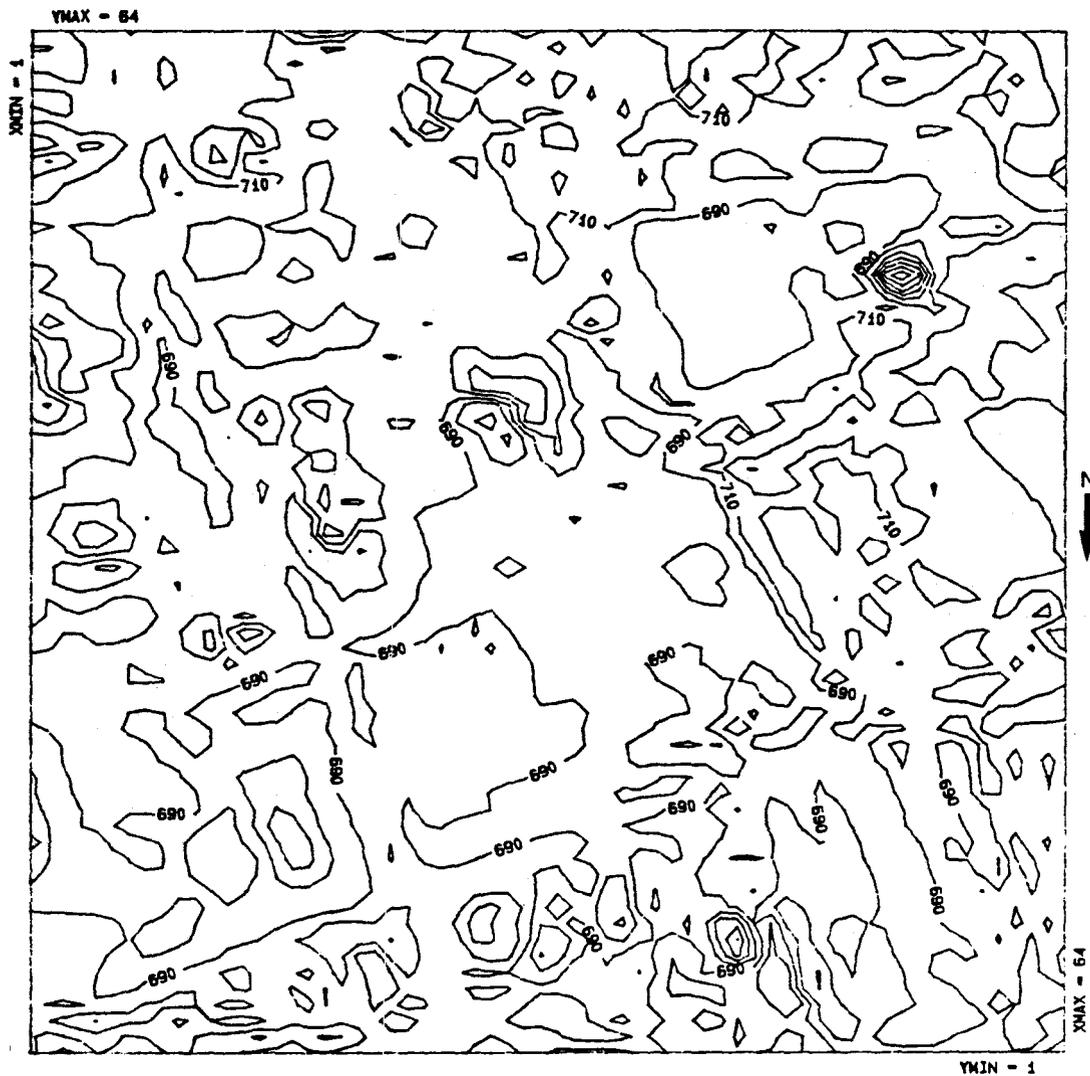


Figure C13. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image R35.

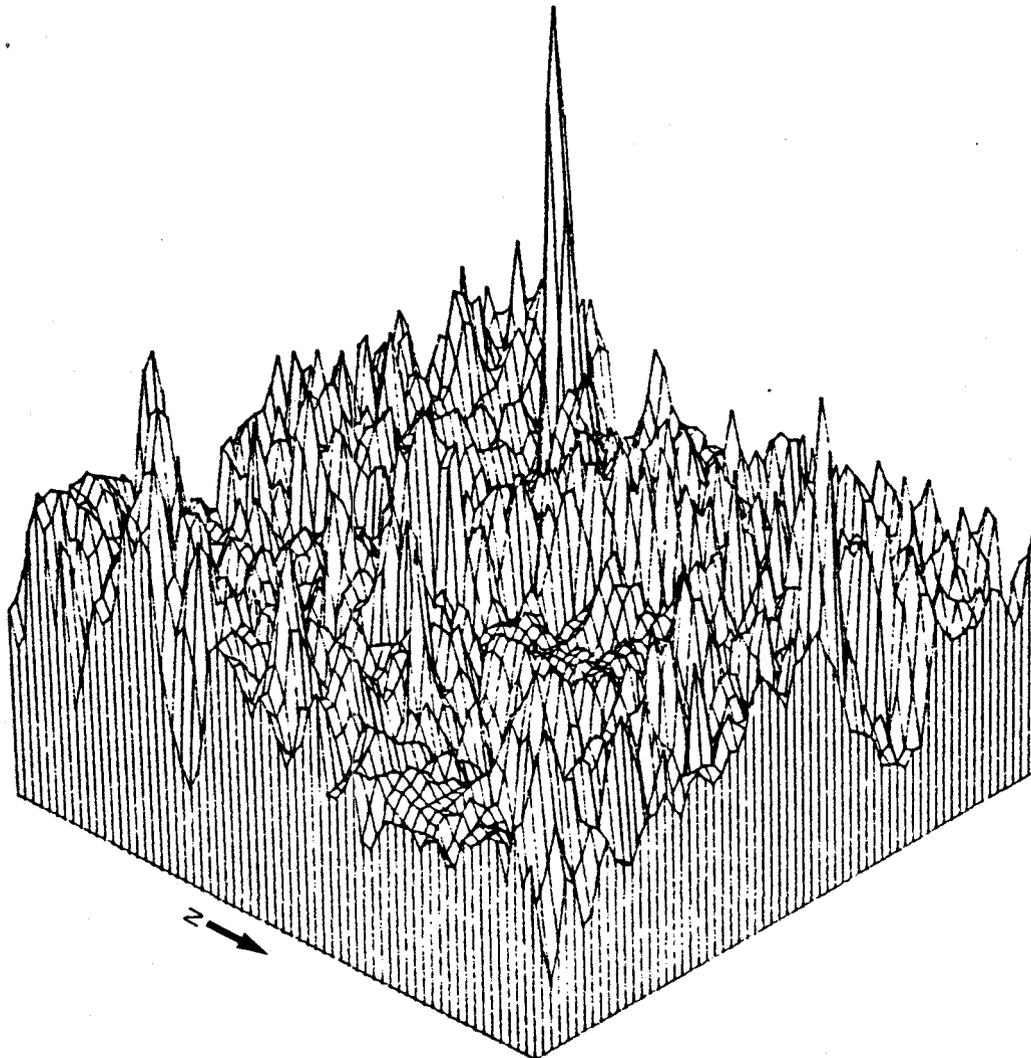


Figure C14. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image R35.

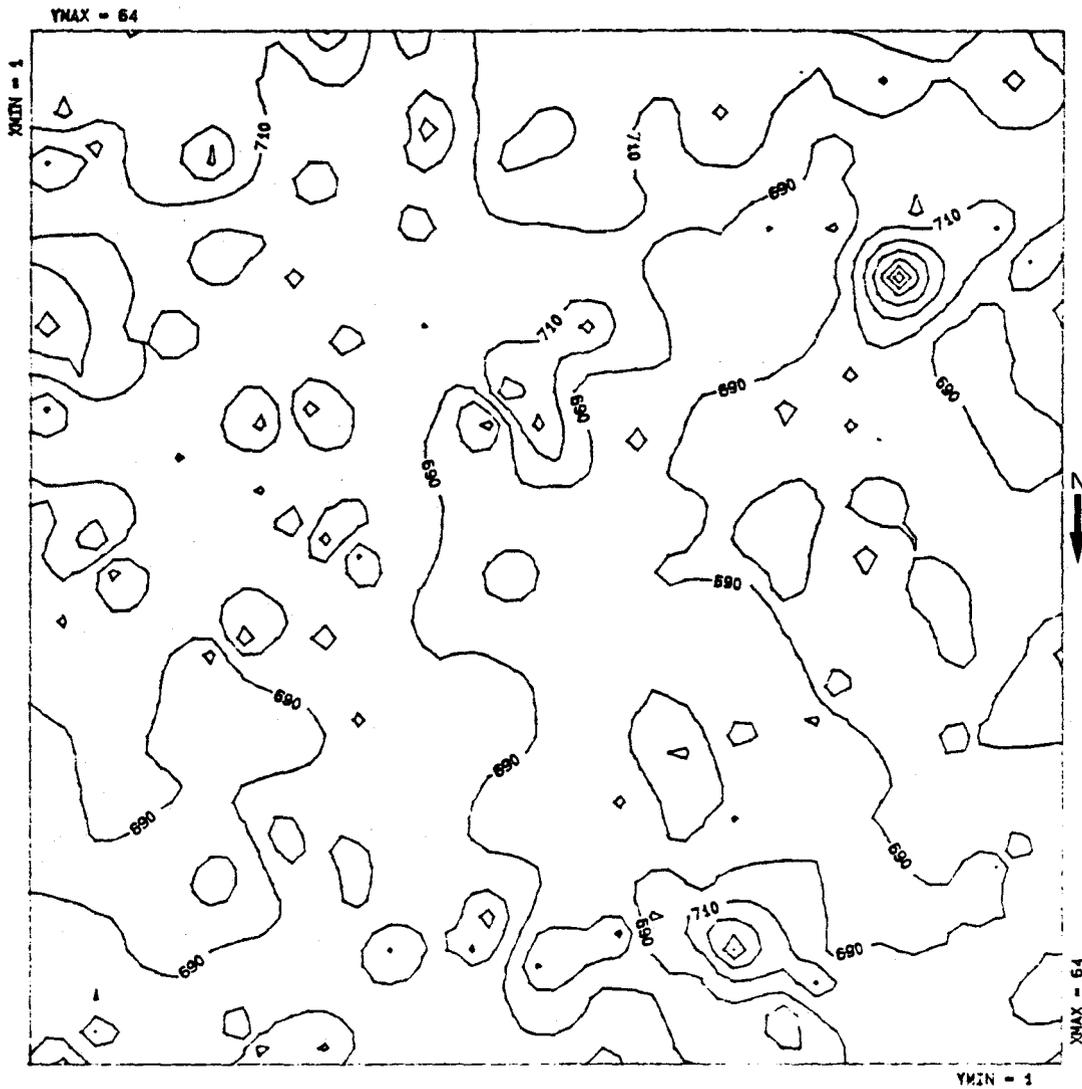


Figure C15. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en µF) de l'image R35 - traitement 1.

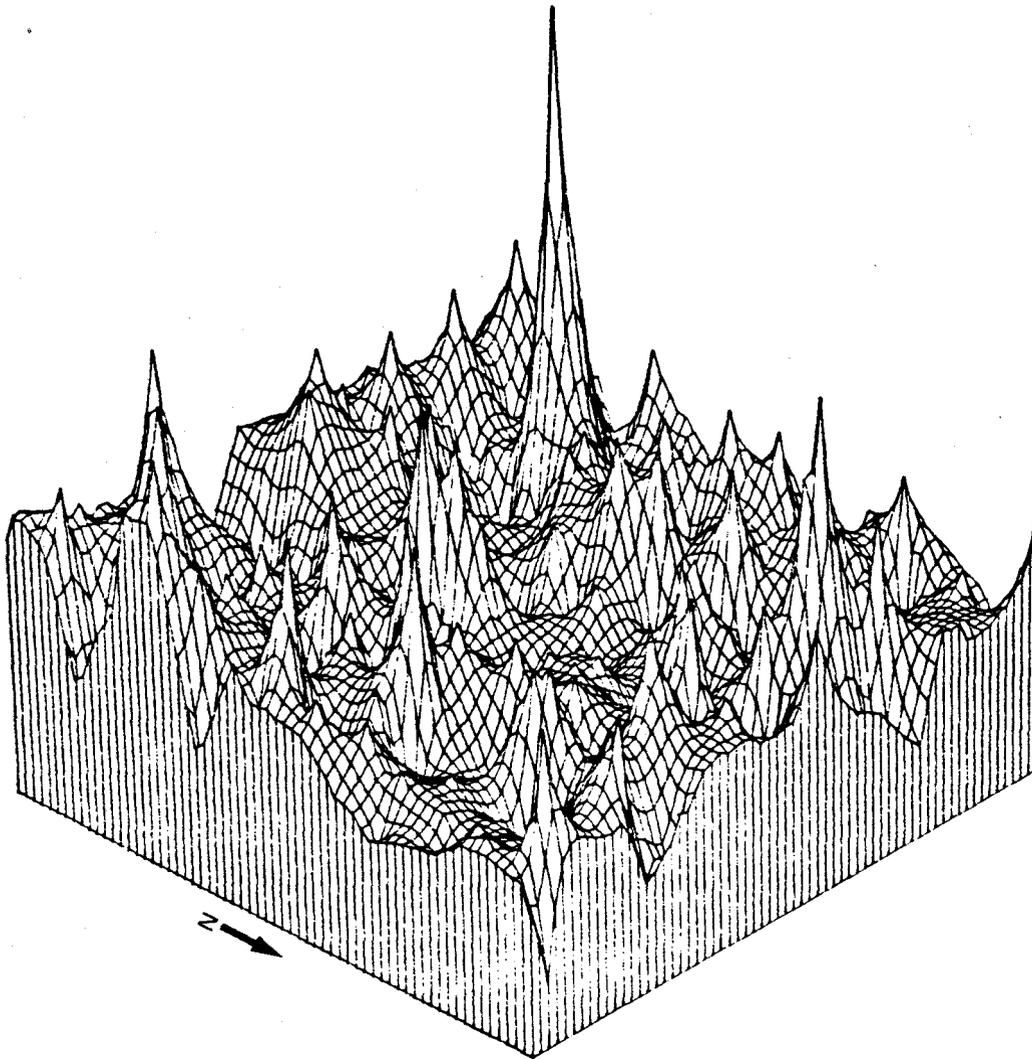


Figure C16. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 1.

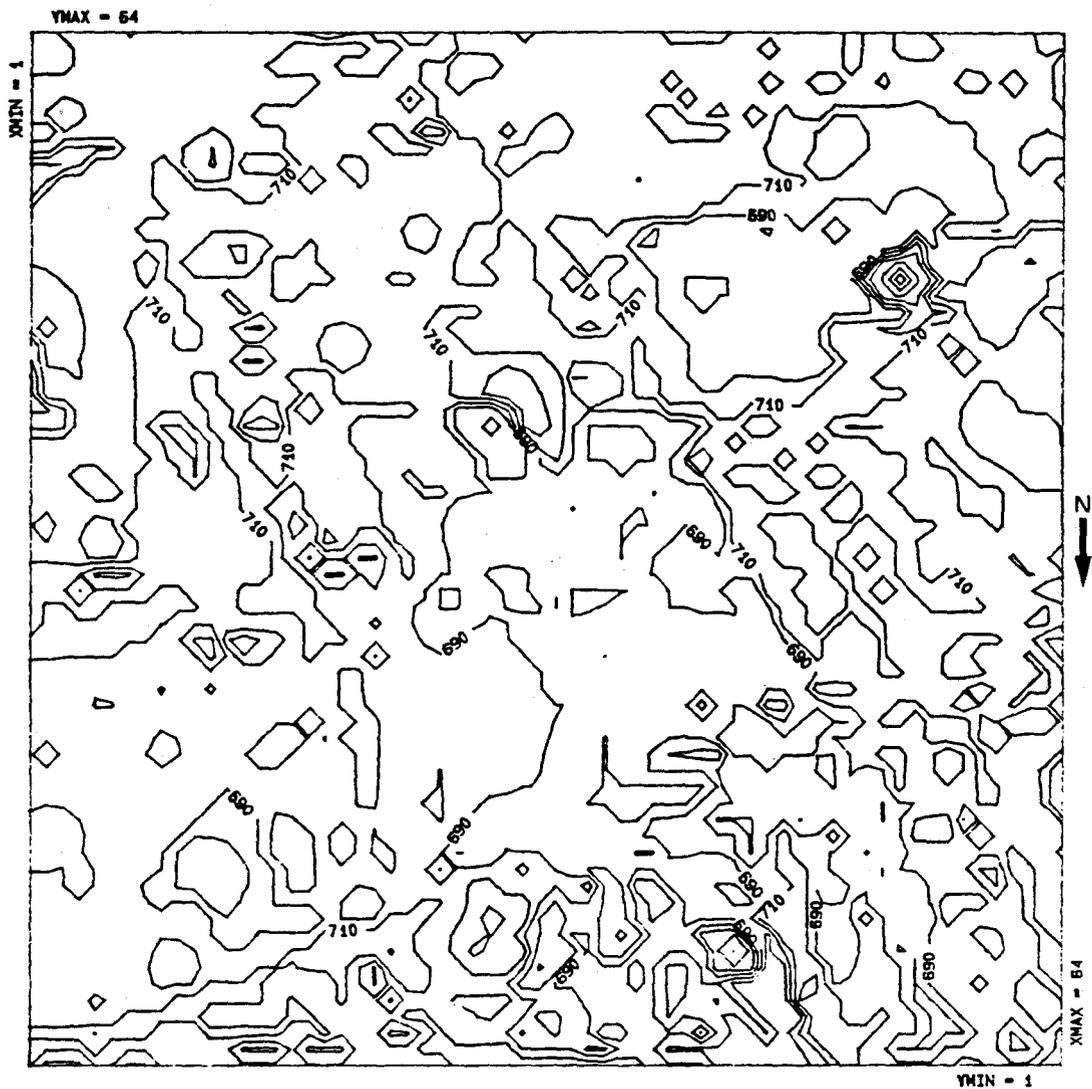


Figure C17. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 2.

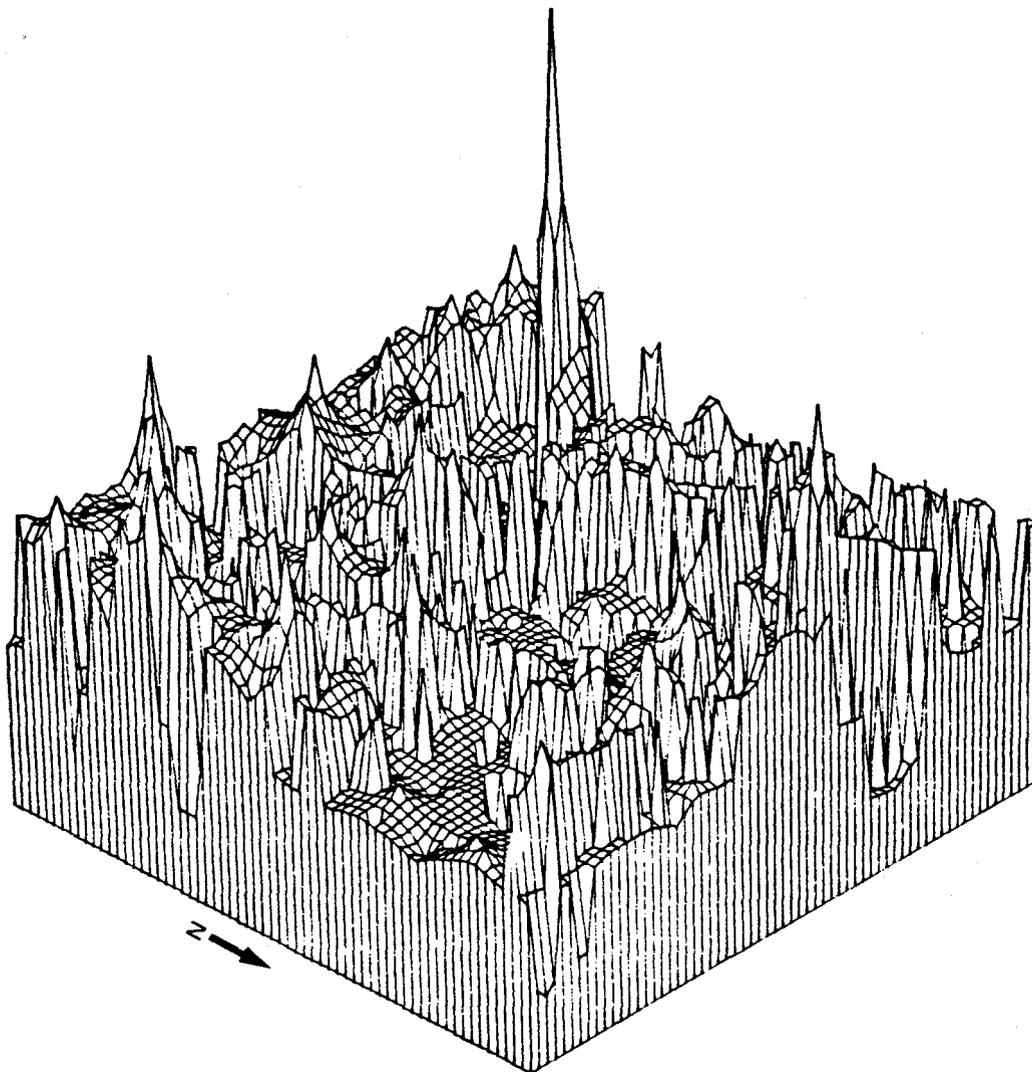


Figure C18. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 2.

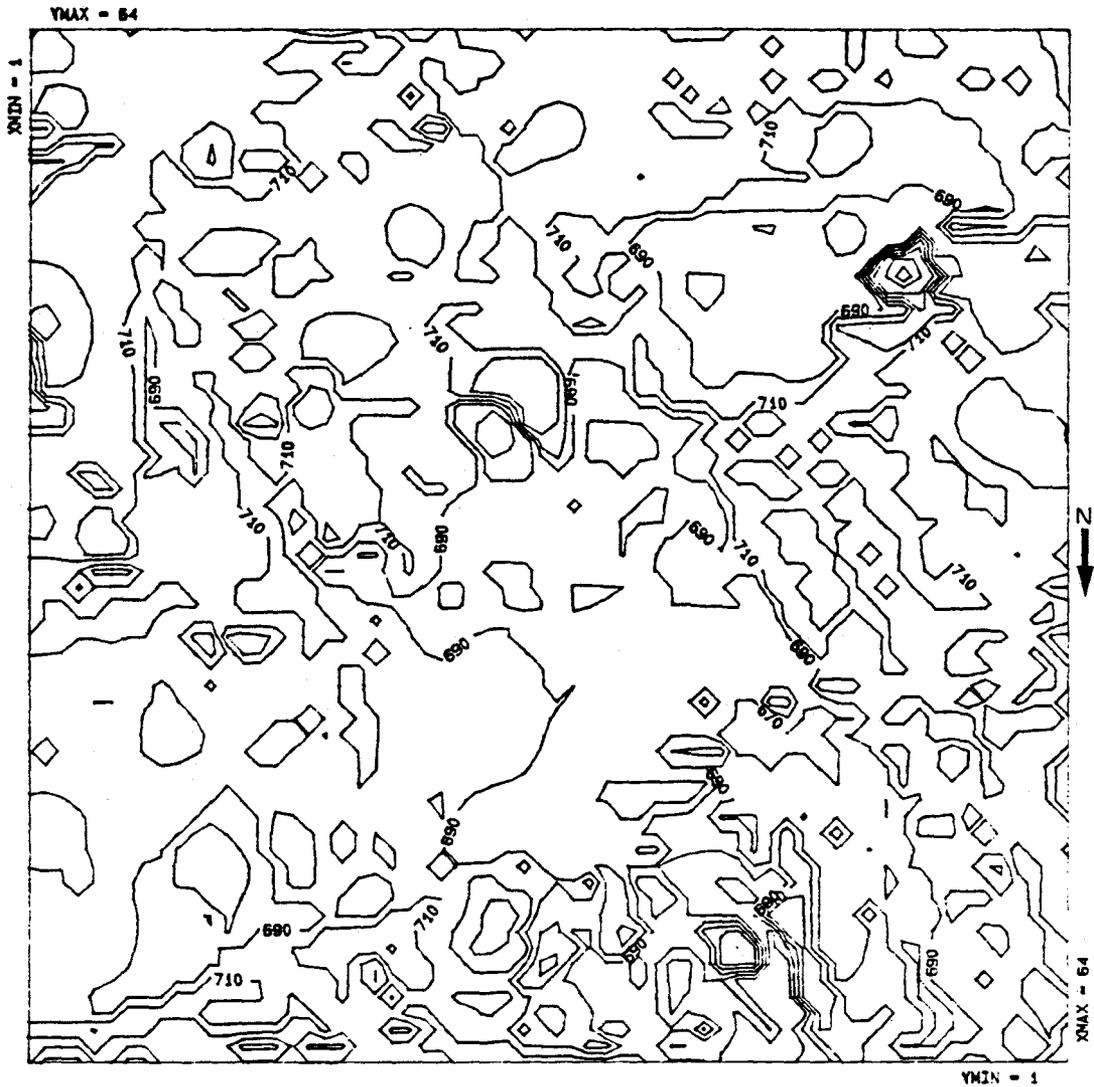


Figure C19. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 3.

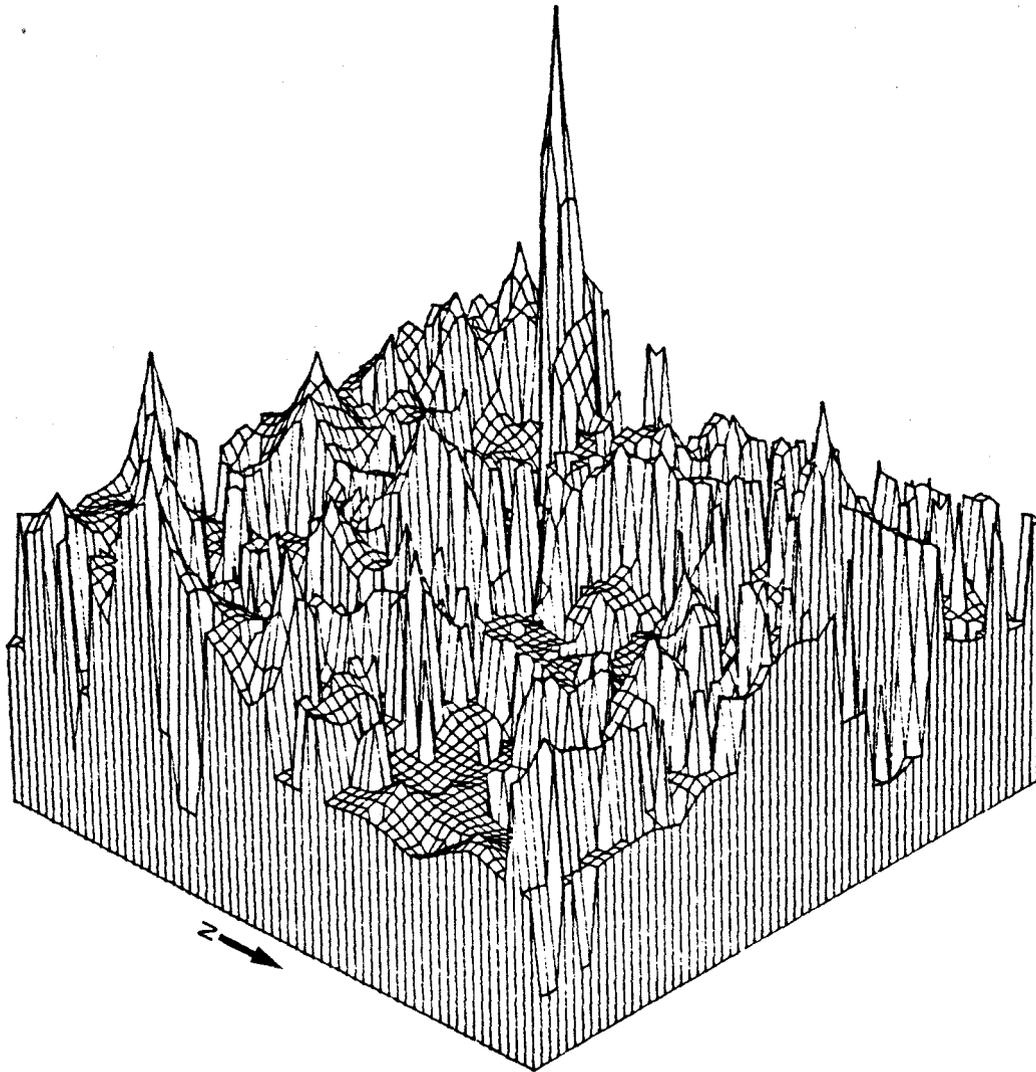


Figure C20. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image R35 - traitement 3.

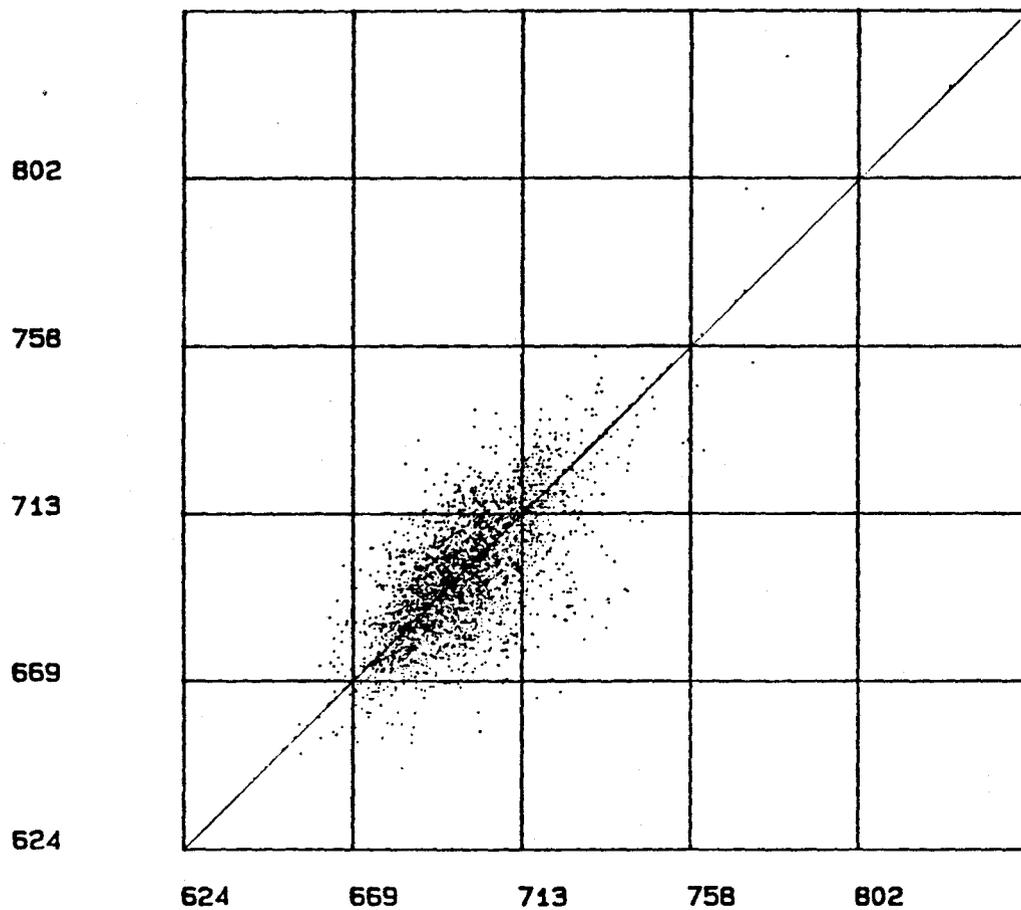


Figure C21. Scattérogramme 1 de l'image R35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image R35 issues du traitement 1 - coefficient de corrélation de .753.

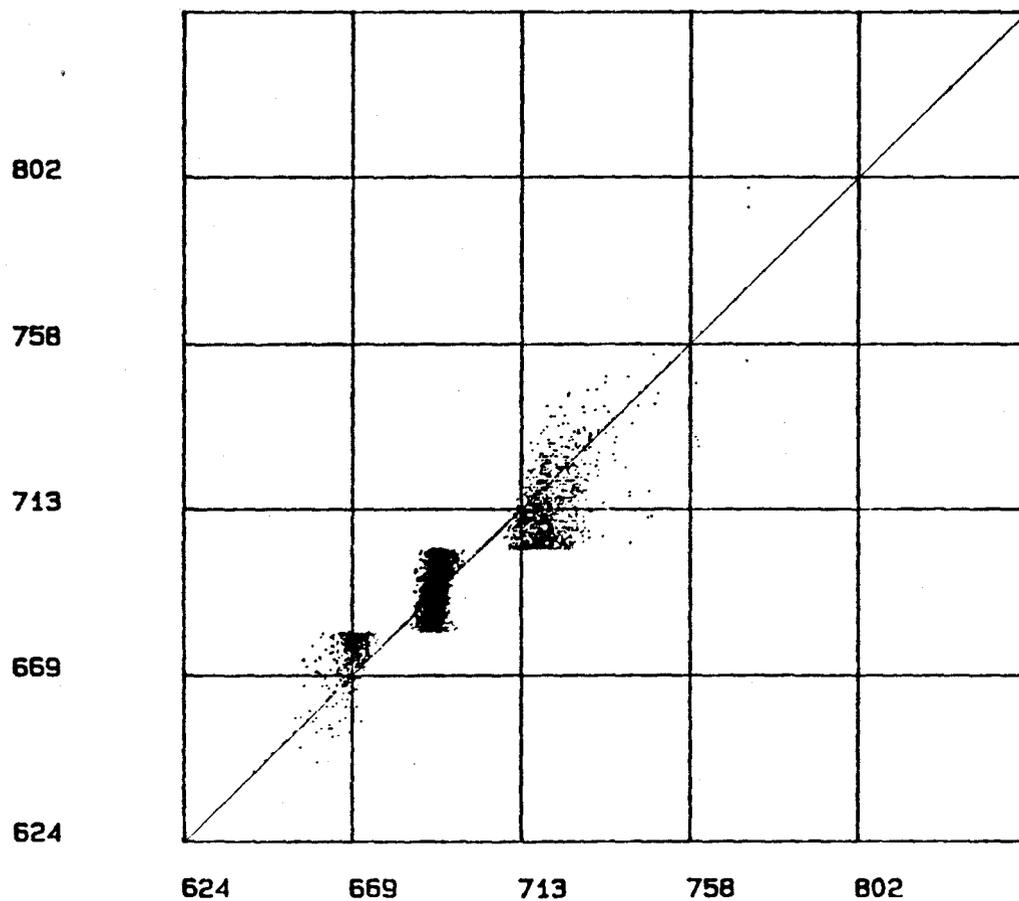


Figure C22. Scattérogramme 2 de l'image R35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image R35 issues du traitement 2 - coefficient de corrélation de .911.

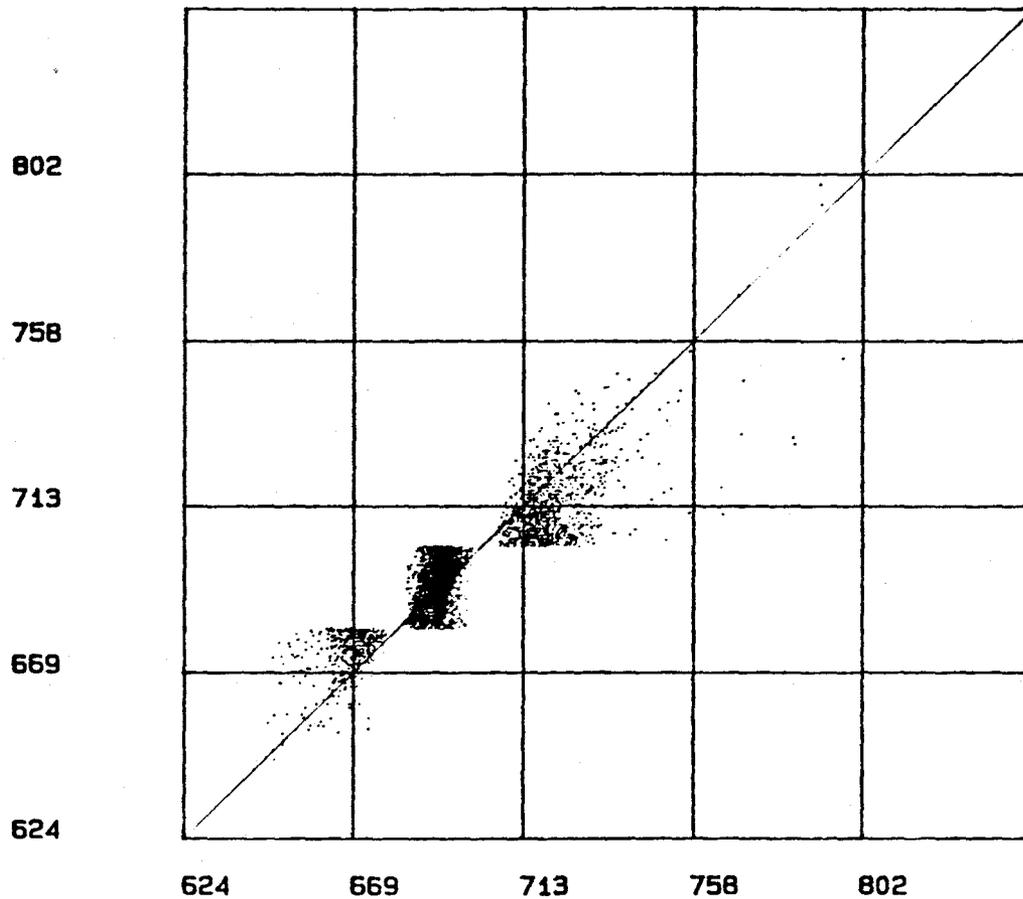


Figure C23. Scattérogramme 3 de l'image R35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image R35 issues du traitement 3 - coefficient de corrélation de .907.

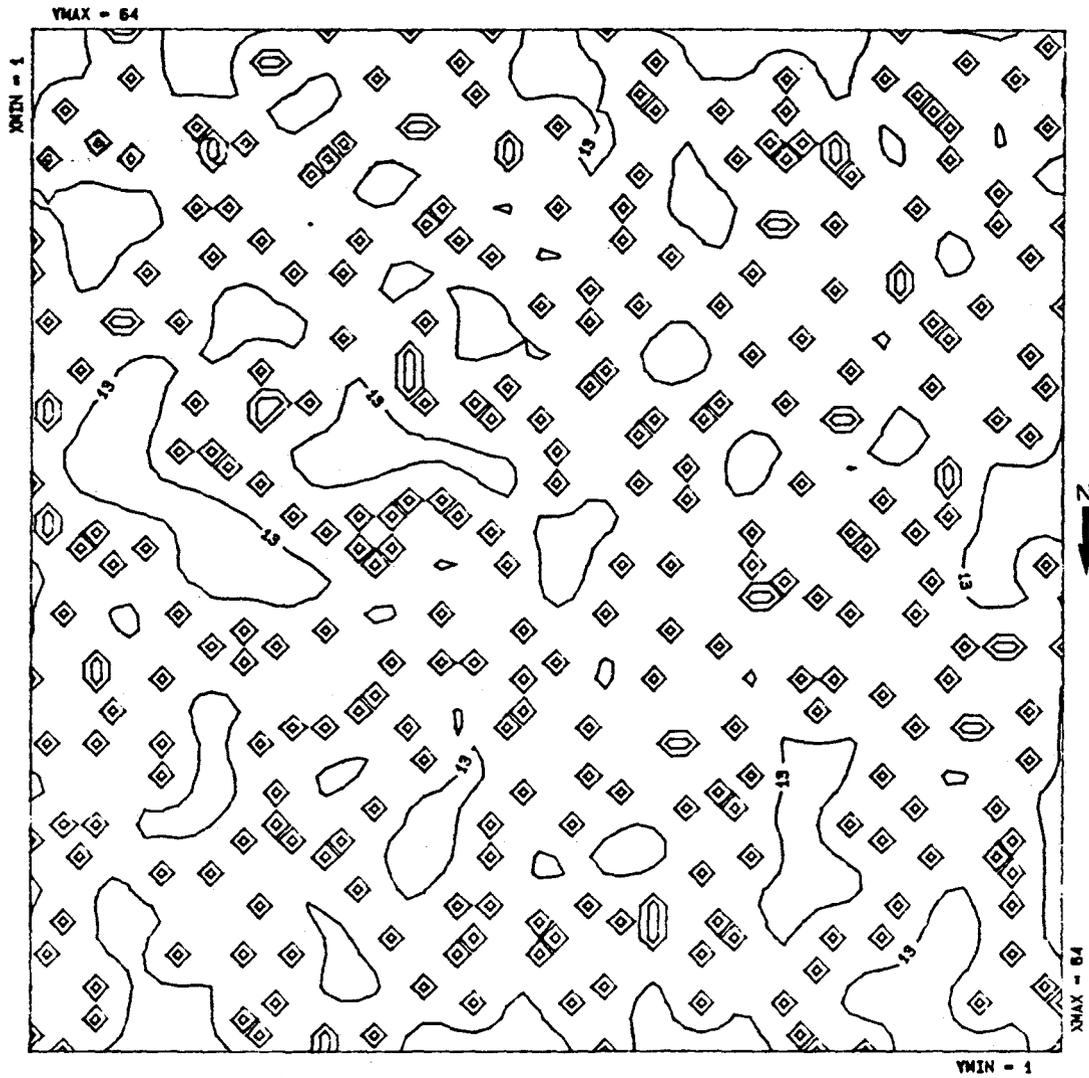


Figure C24. Isolignes (3,8,13 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image R35 - traitement 1.

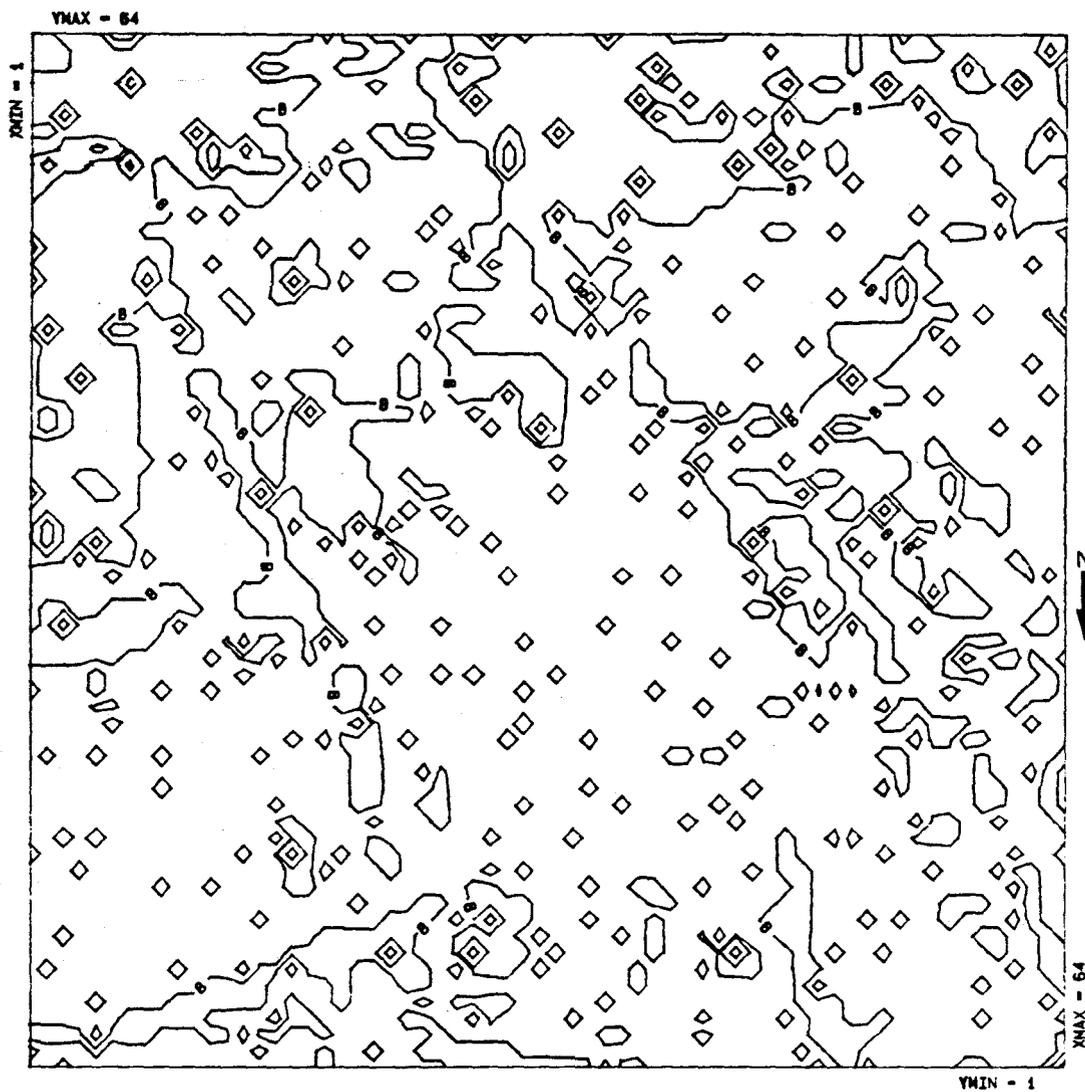


Figure C25. Isolignes ($3,8 \mu\text{F}$) des écarts-types d'estimation de l'image R35 - traitement 2.

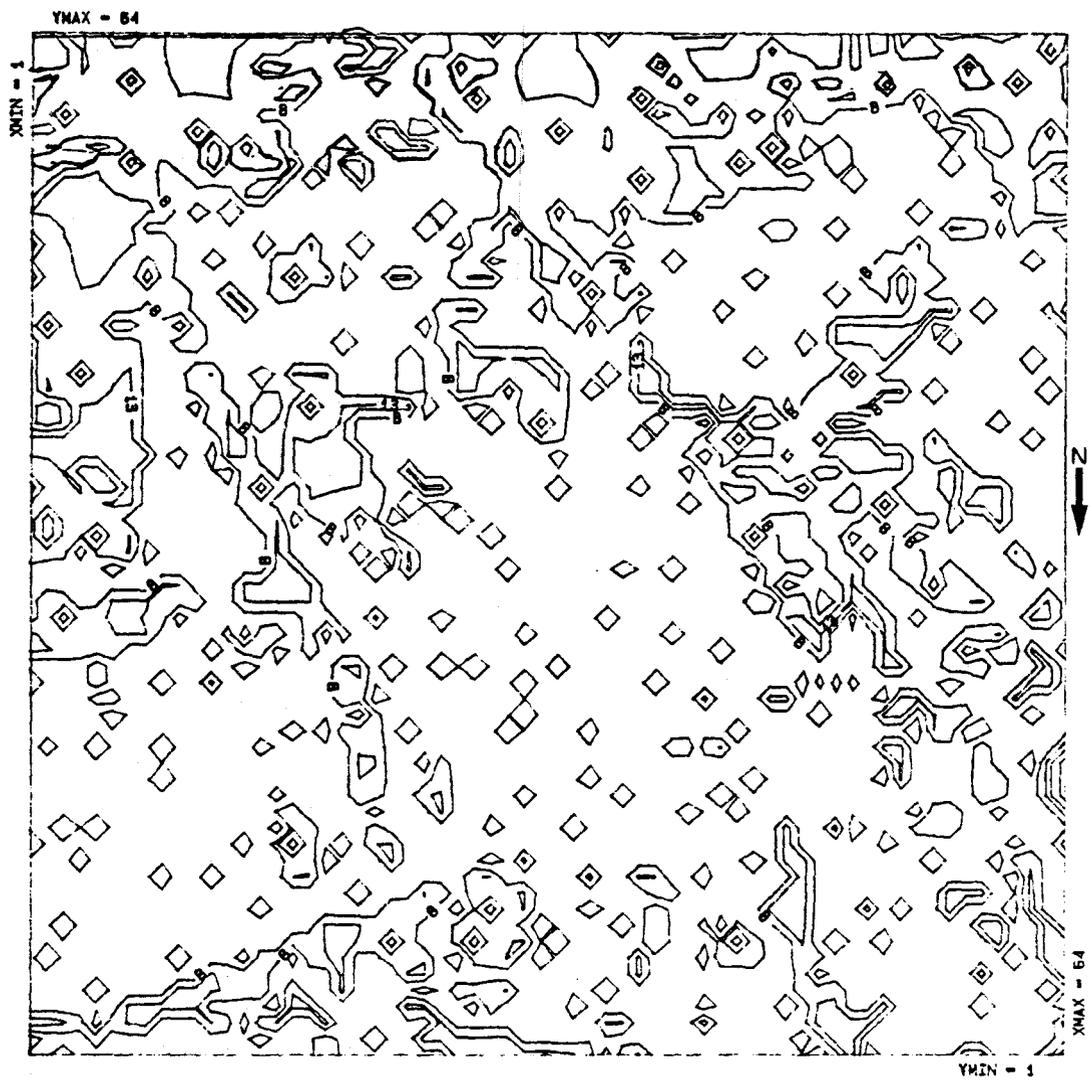


Figure C26. Isolignes (3,8,13 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image R35 - traitement 3.

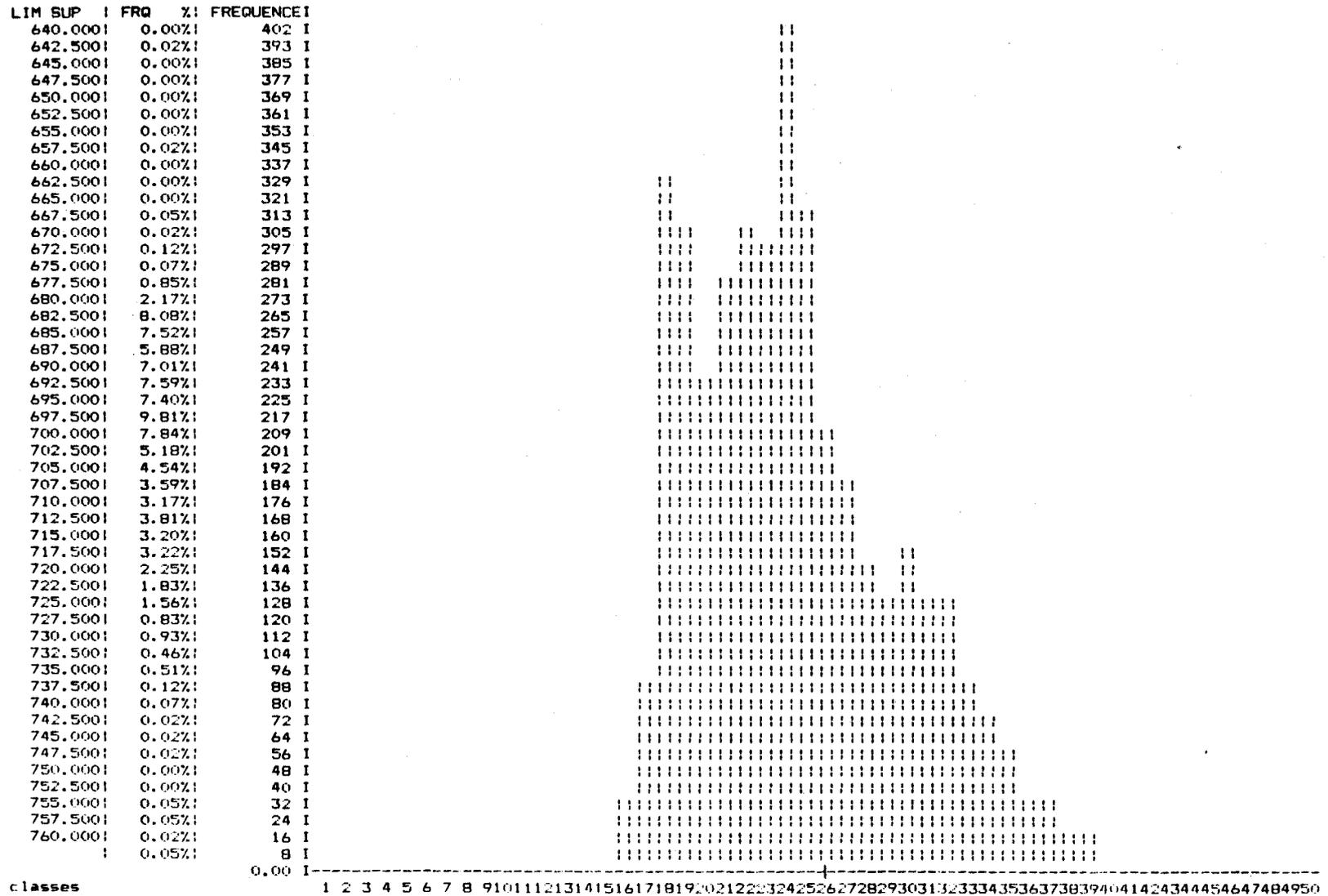


Figure C27. Histogramme des 4096 valeurs vraies de l'image X35.

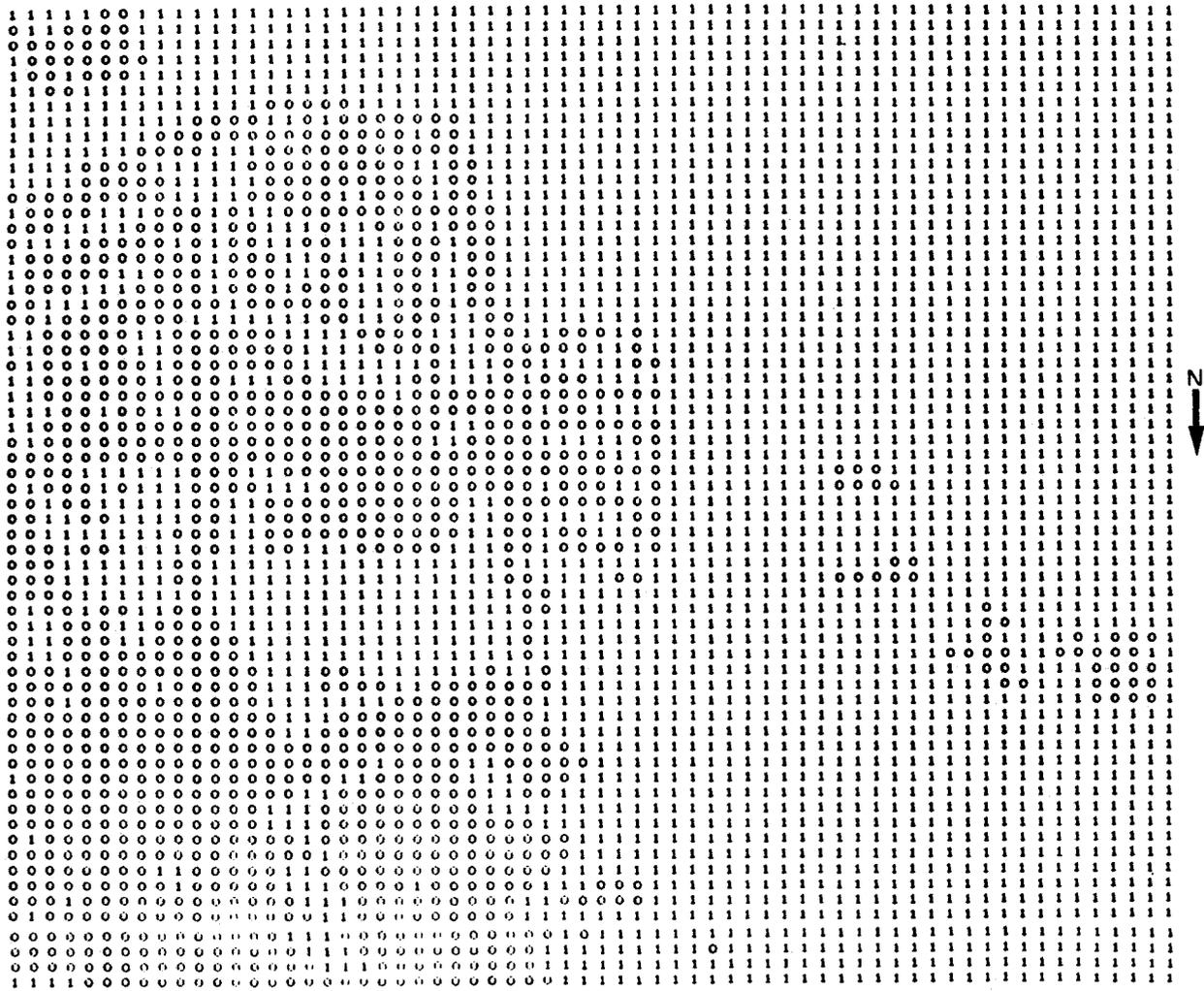


Figure C28. Matrice indicatrice issue de la classification des pixels de l'image X35 en couverts urbain (0) et agricole (1).

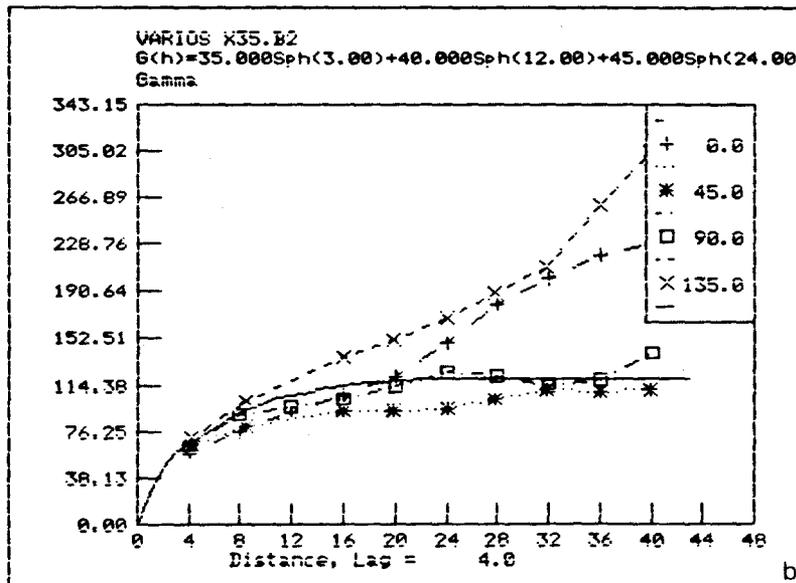
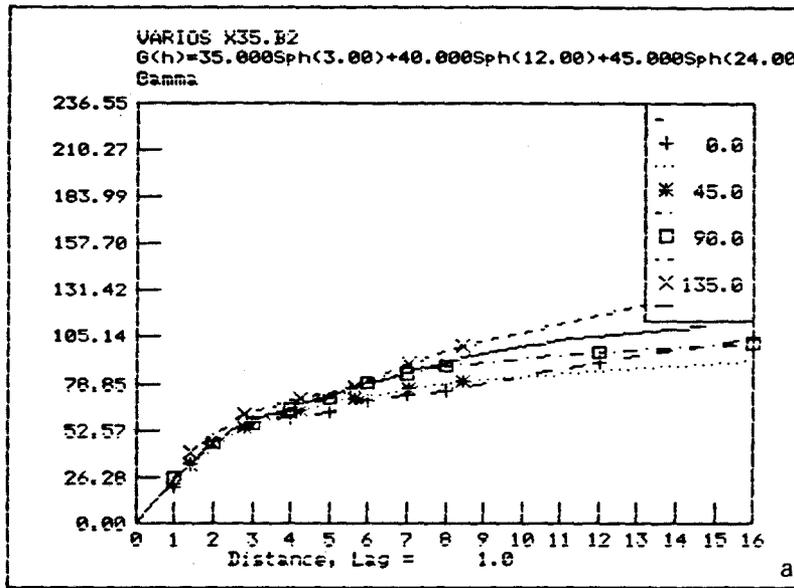


Figure C29. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image X35 - traitement 1.

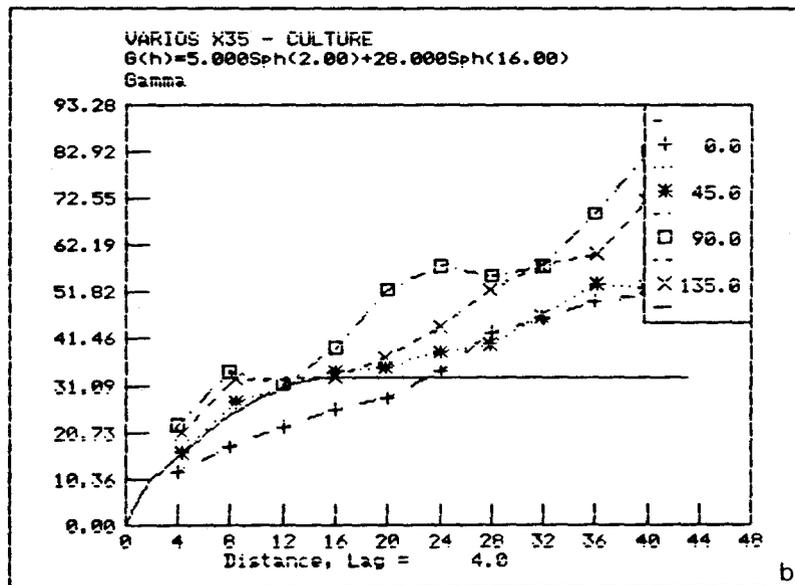
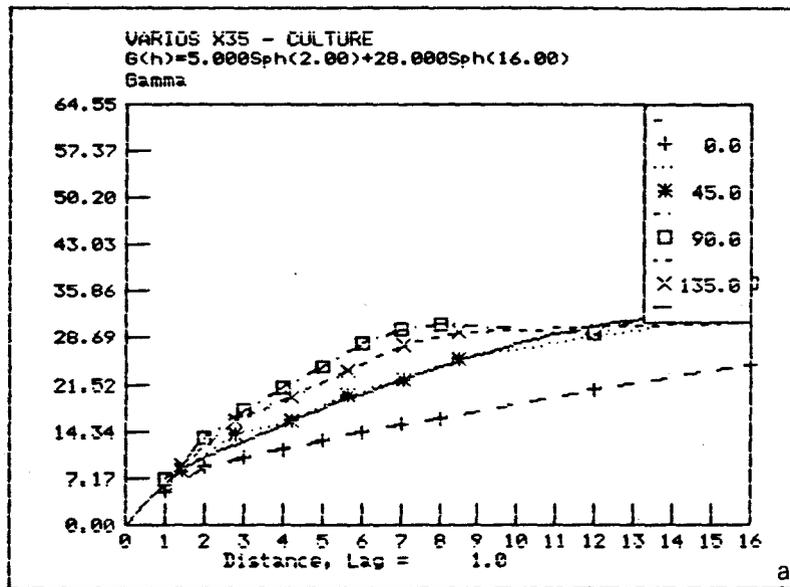


Figure C30. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert agricole de l'image X35 - traitement 2.

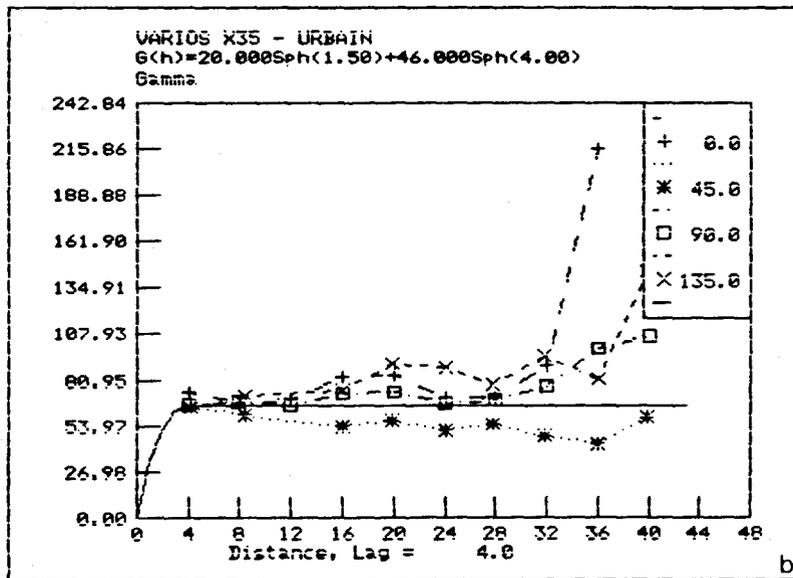
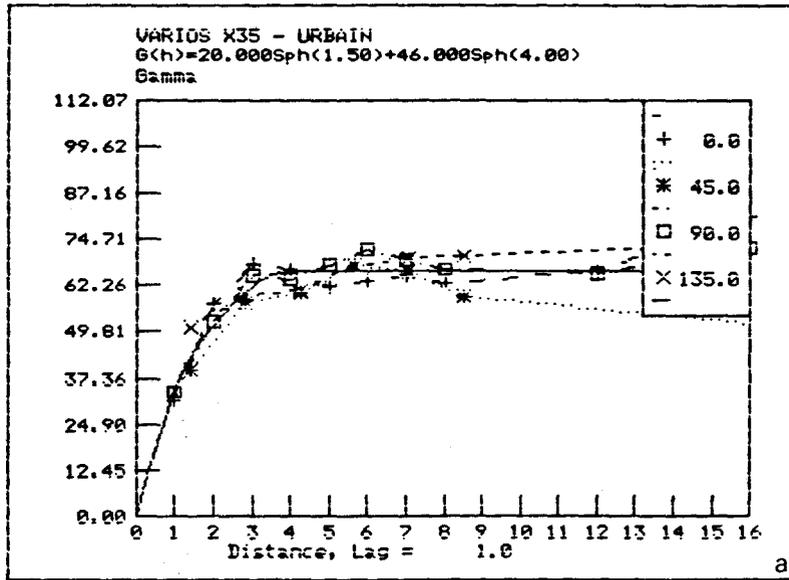


Figure C31. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope pour le couvert urbain de l'image X35 - traitement 2.

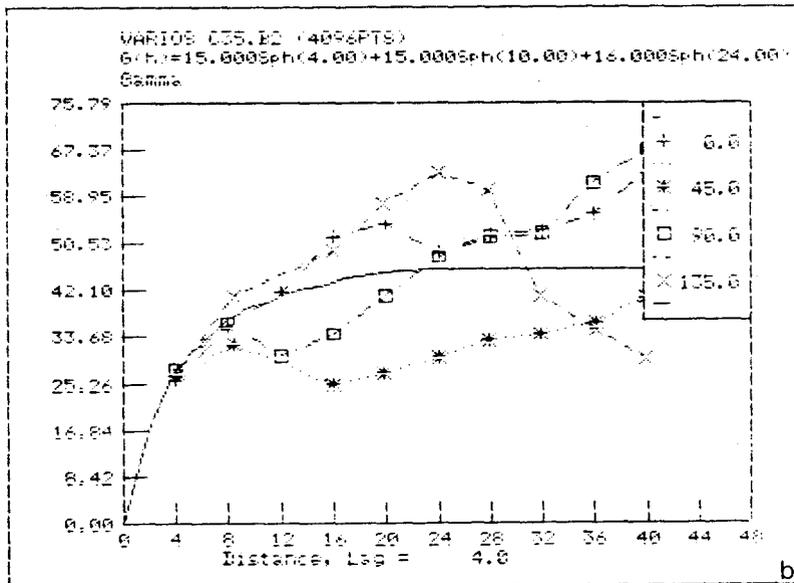
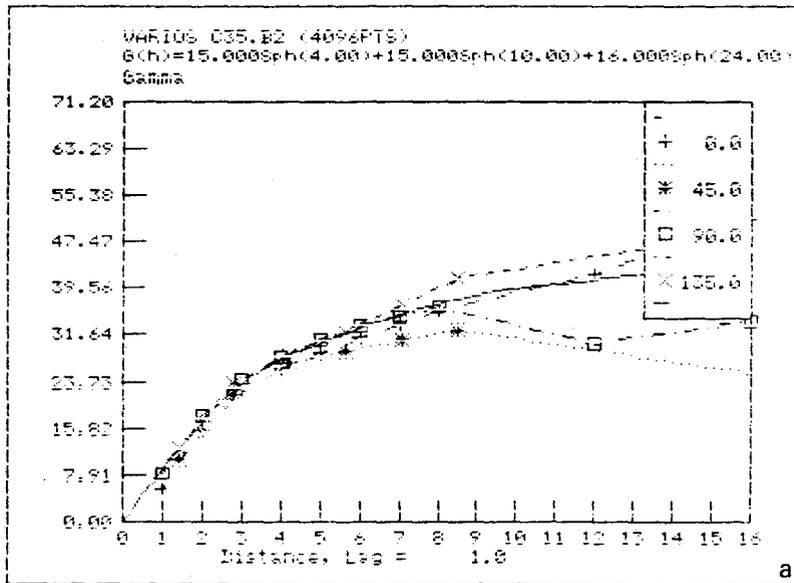


Figure C32. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image-culture C35 utilisés pour le traitement 3 de l'image X35.

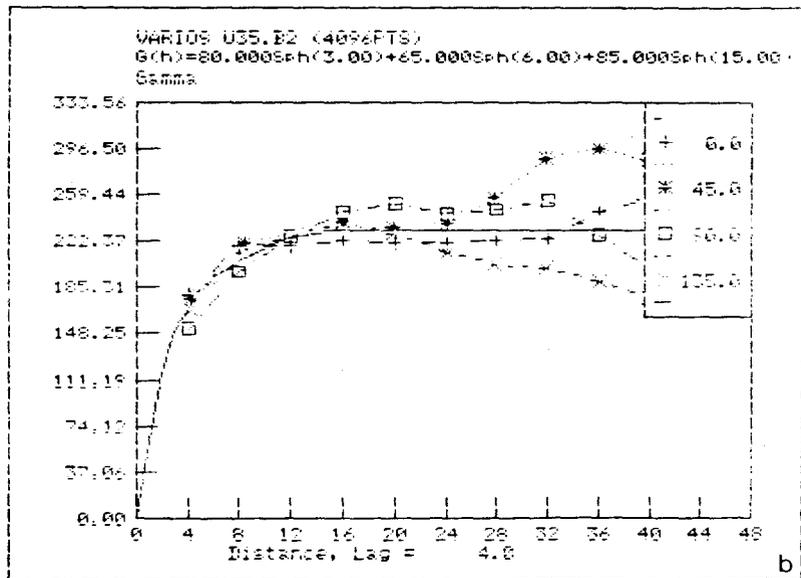
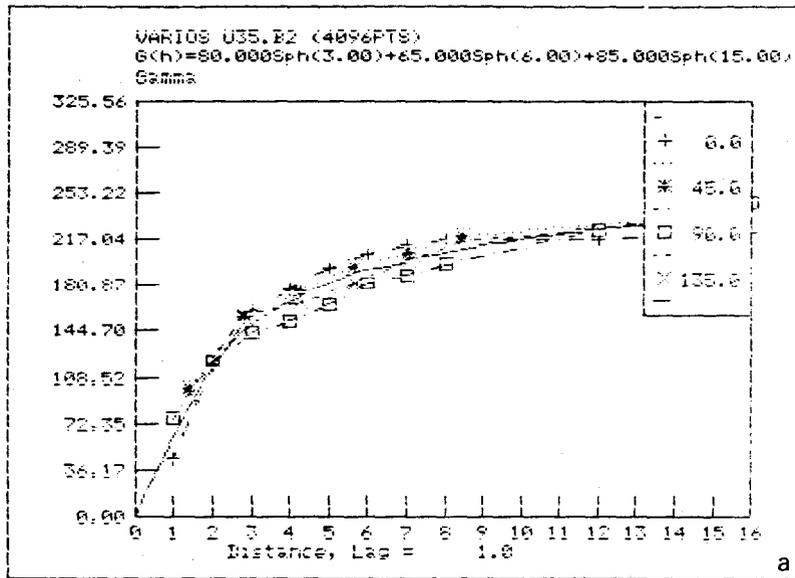


Figure C33. Semi-variogrammes directionnels à pas variable (a) et constant (b) et modèle isotrope de l'image urbaine U35 utilisés pour le traitement 3 de l'image X35.

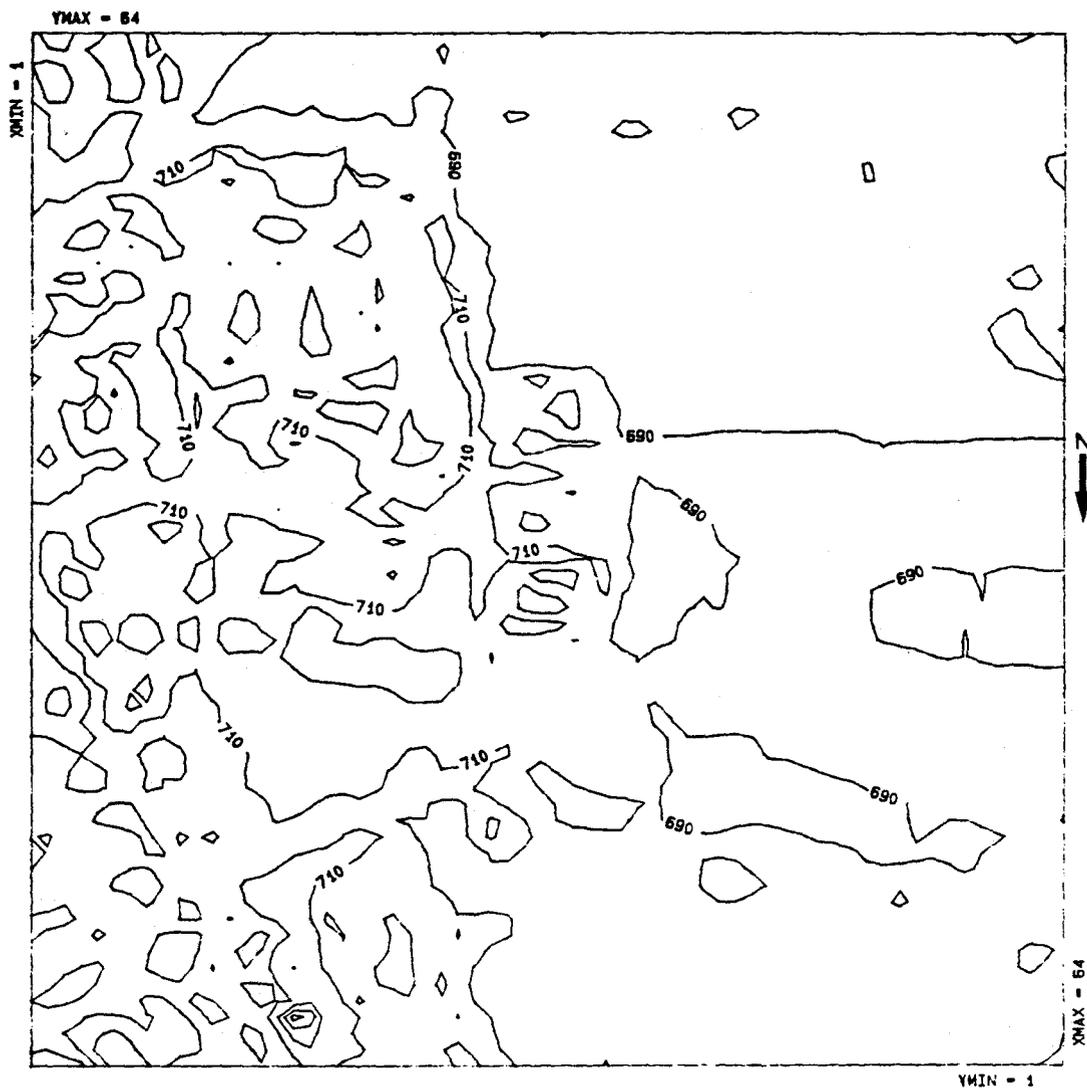


Figure C37. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image X35.

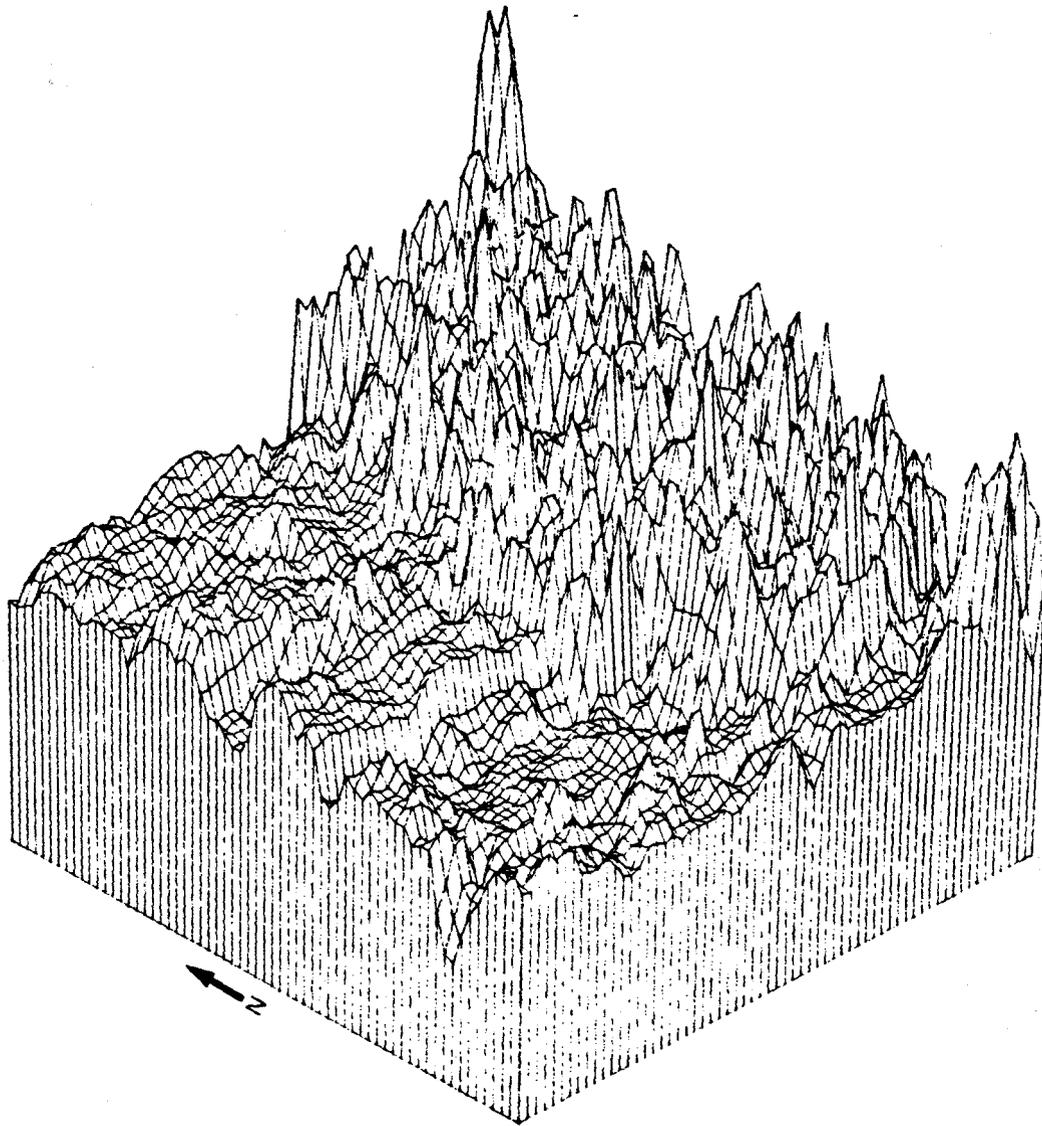


Figure C38. Vue en 3 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image X35.

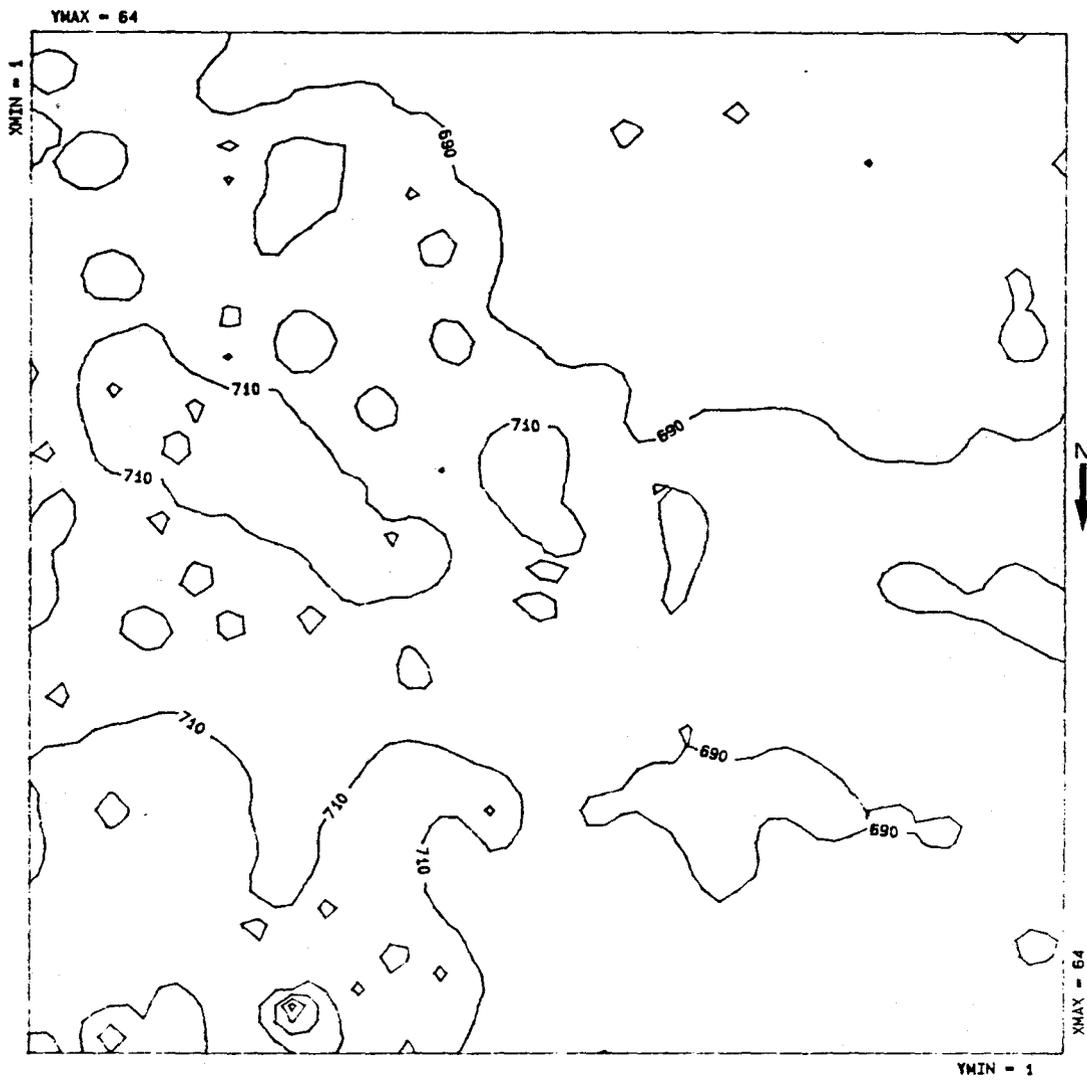


Figure C39. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 1.

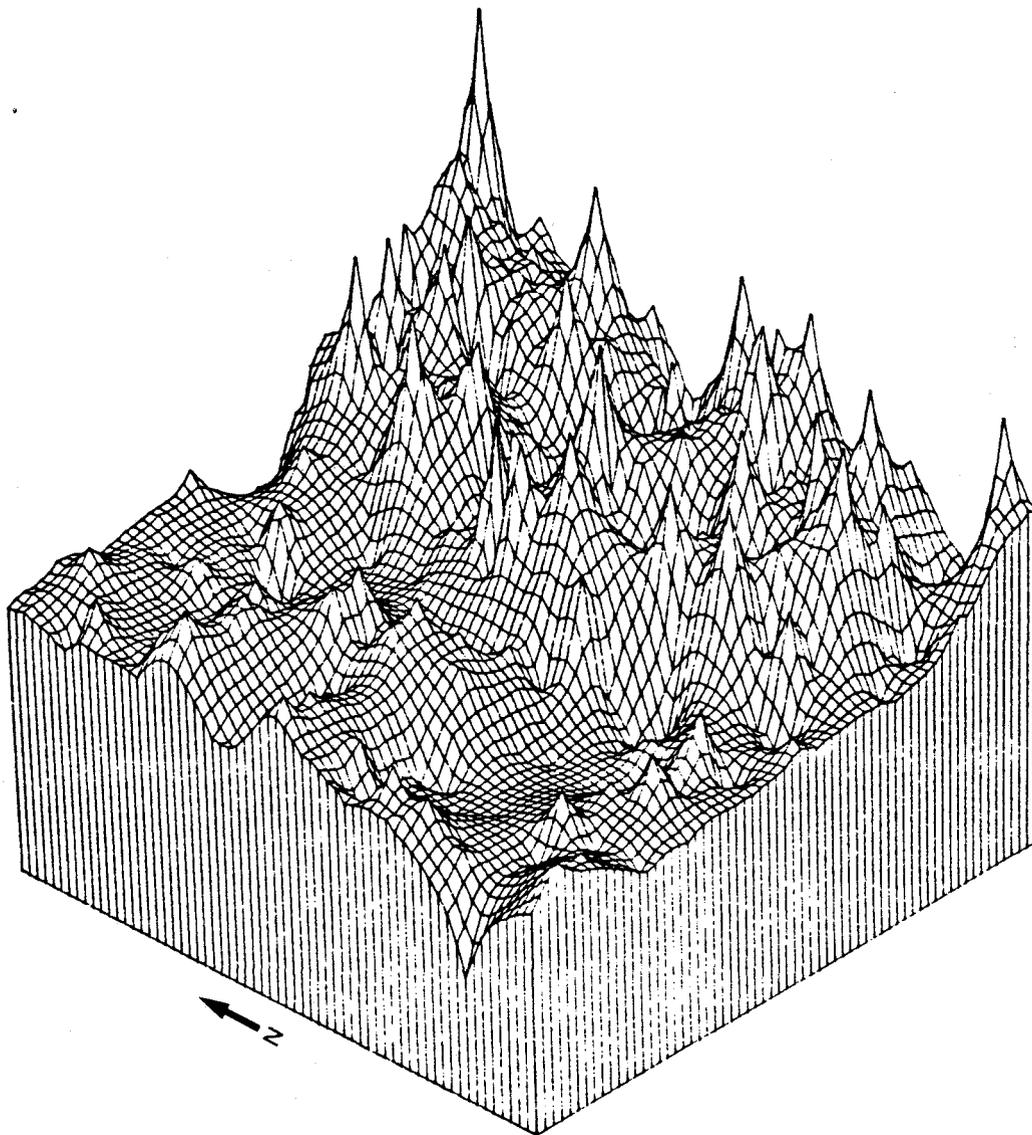


Figure C40. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 1.

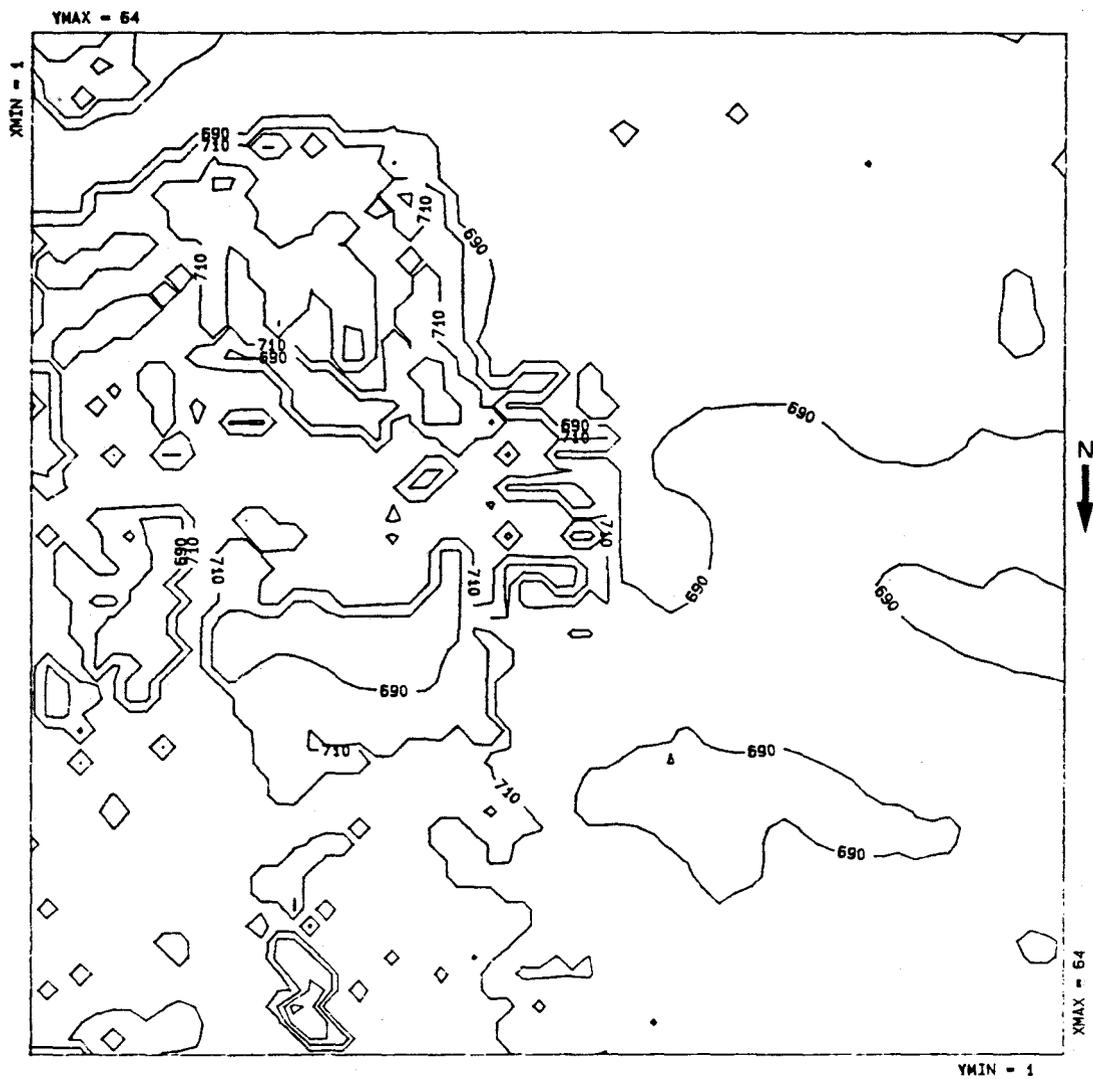


Figure C41. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 2.

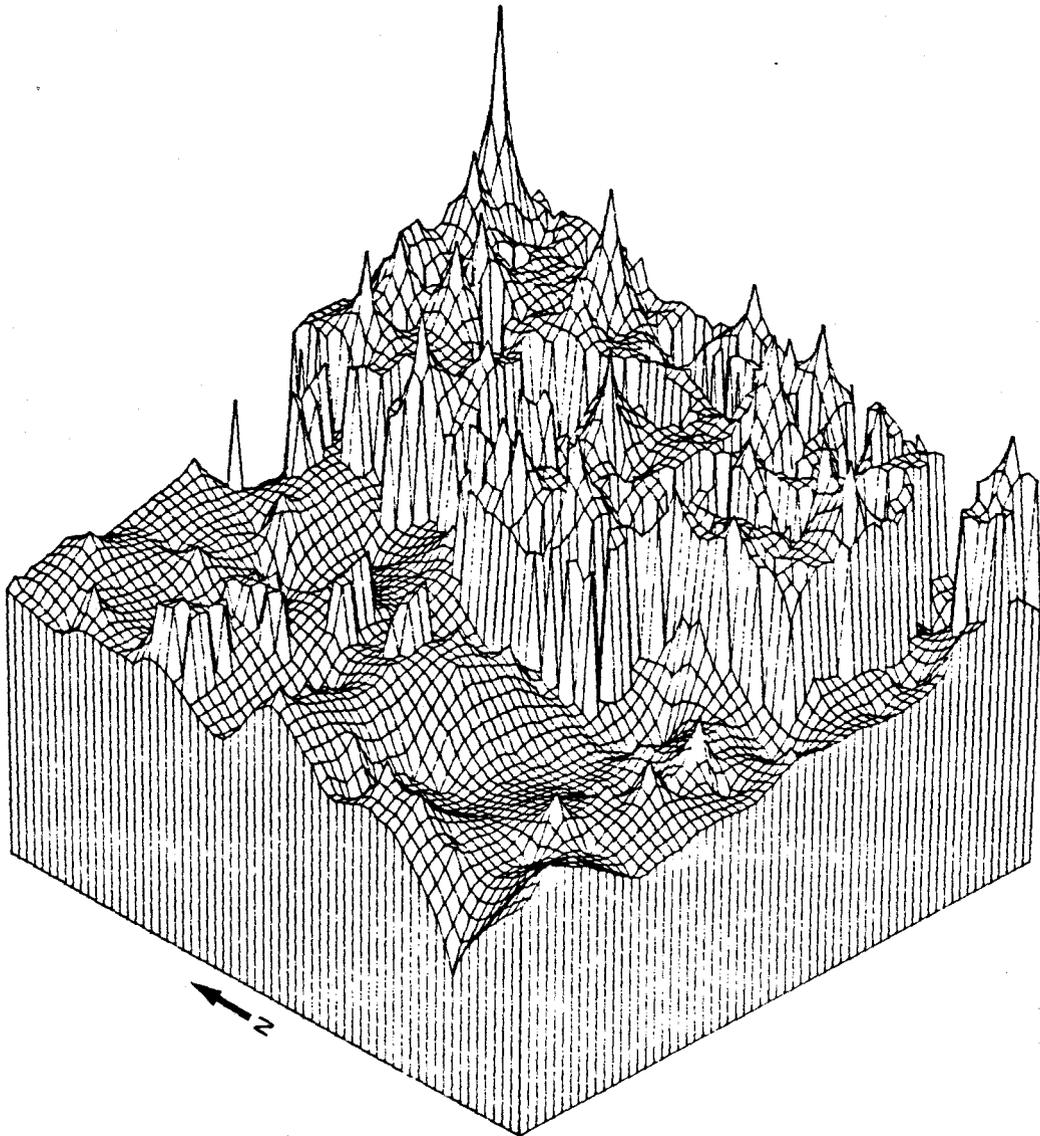


Figure C42. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 2.

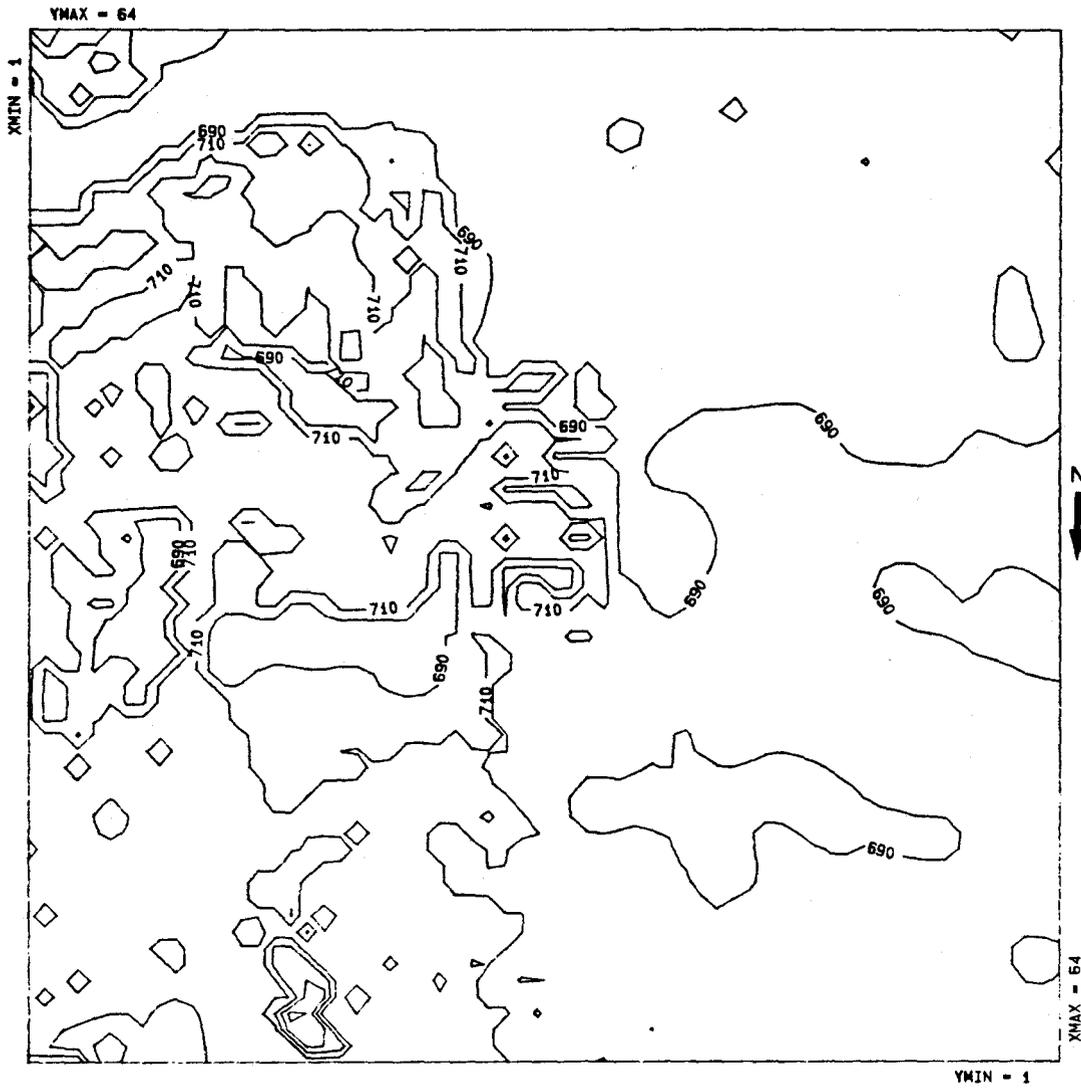


Figure C43. Vue en 2 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 3.

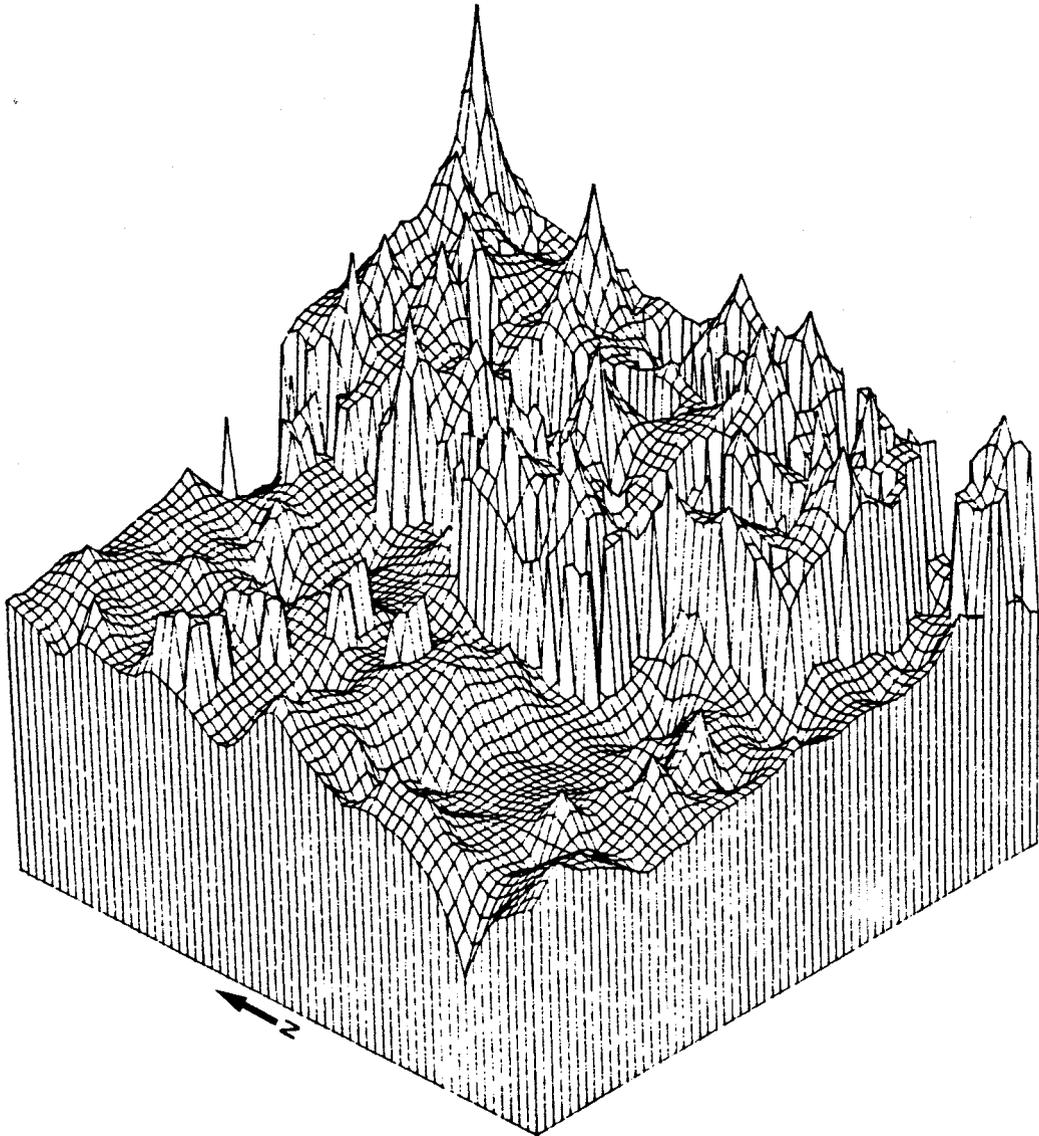


Figure C44. Vue en 3 dimensions des valeurs krigées (en μF) de l'image X35 - traitement 3.

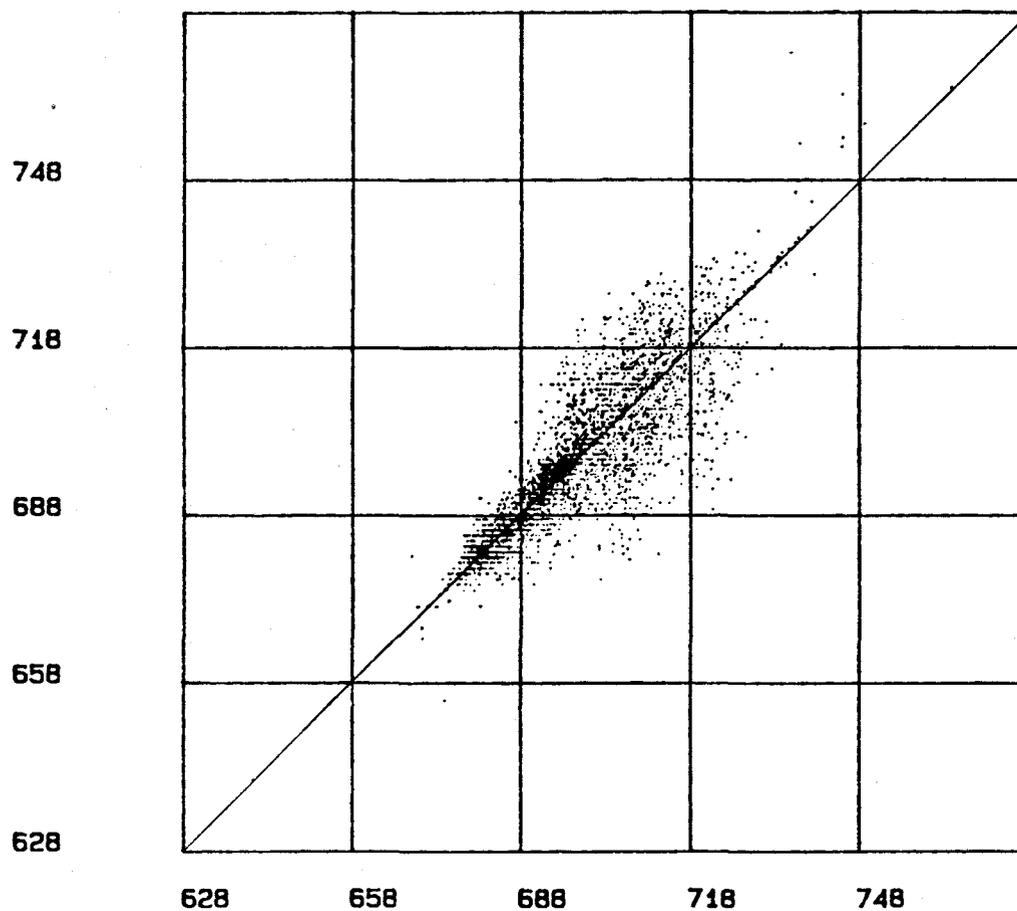


Figure C45. Scattérogramme 1 de l'image X35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image X35 issues du traitement 1 - coefficient de corrélation de .883.

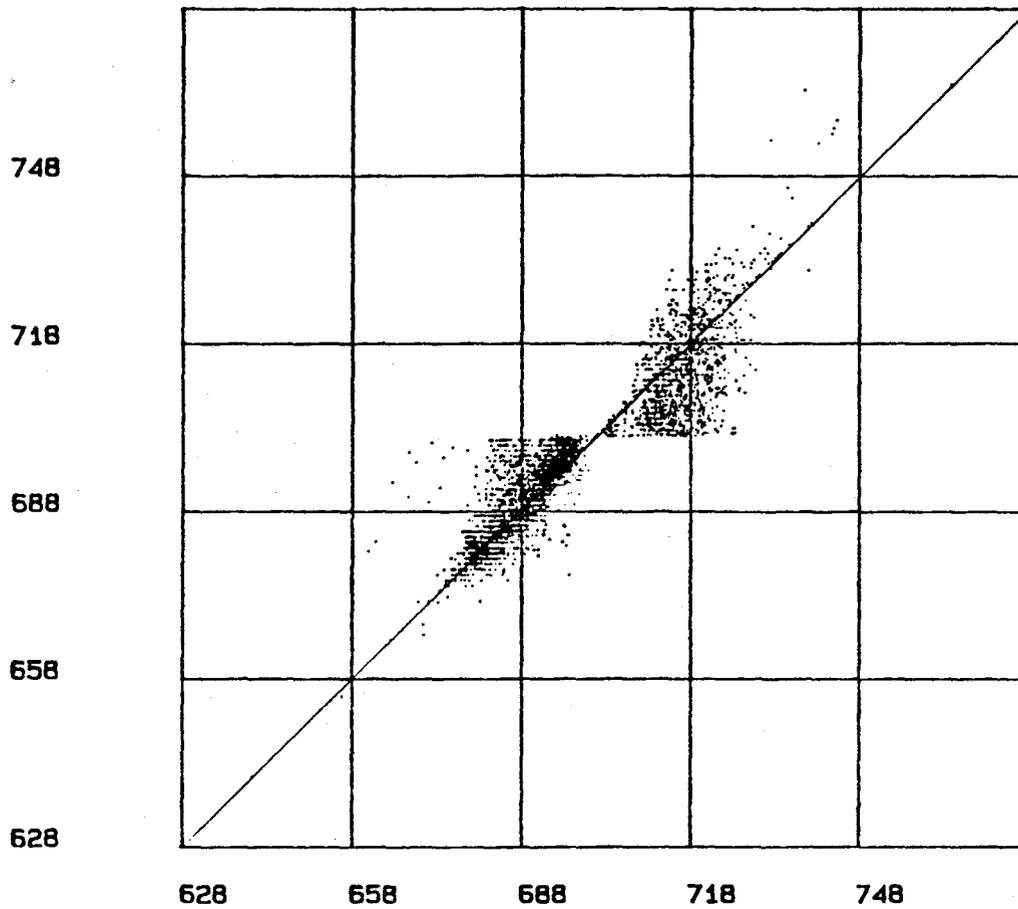


Figure C46. Scattérogramme 2 de l'image X35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image X35 issues du traitement 2 - coefficient de corrélation de .920.

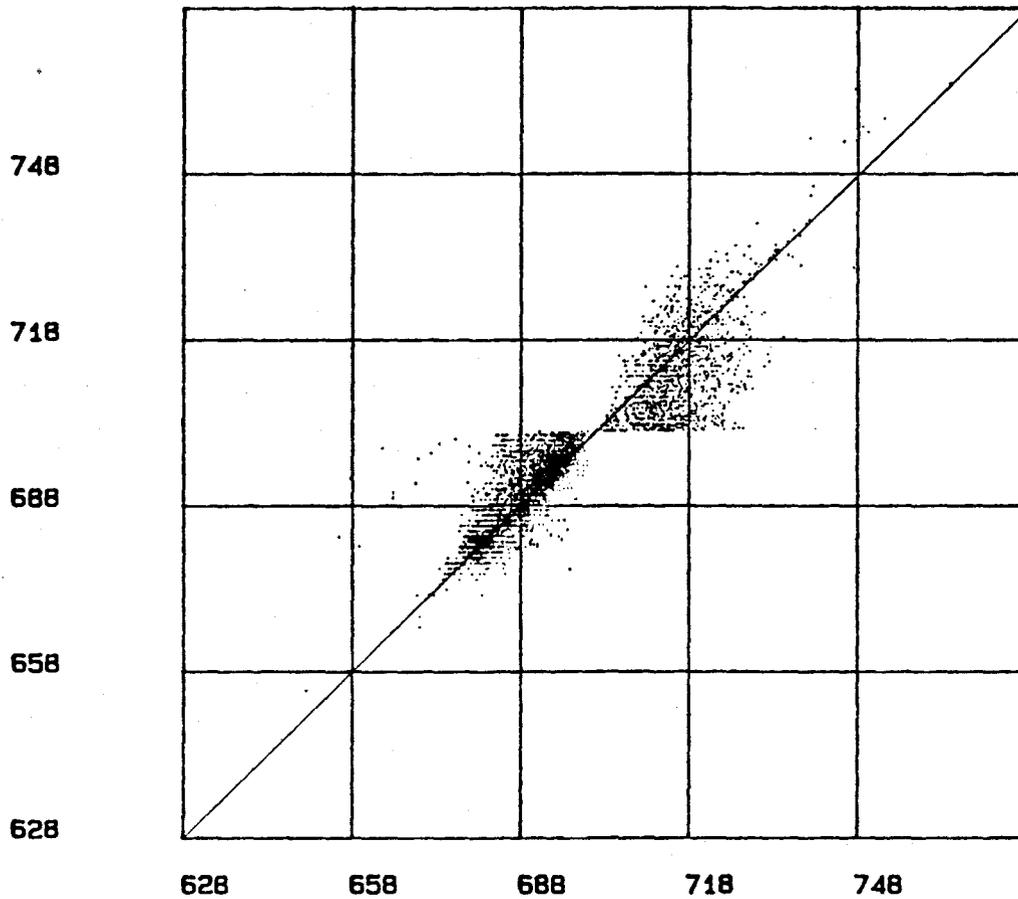


Figure C47. Scattérogramme 3 de l'image X35: 4096 valeurs vraies et krigées (ordonnée et abscisse, en μF) de l'image X35 issues du traitement 3 - coefficient de corrélation de .918.

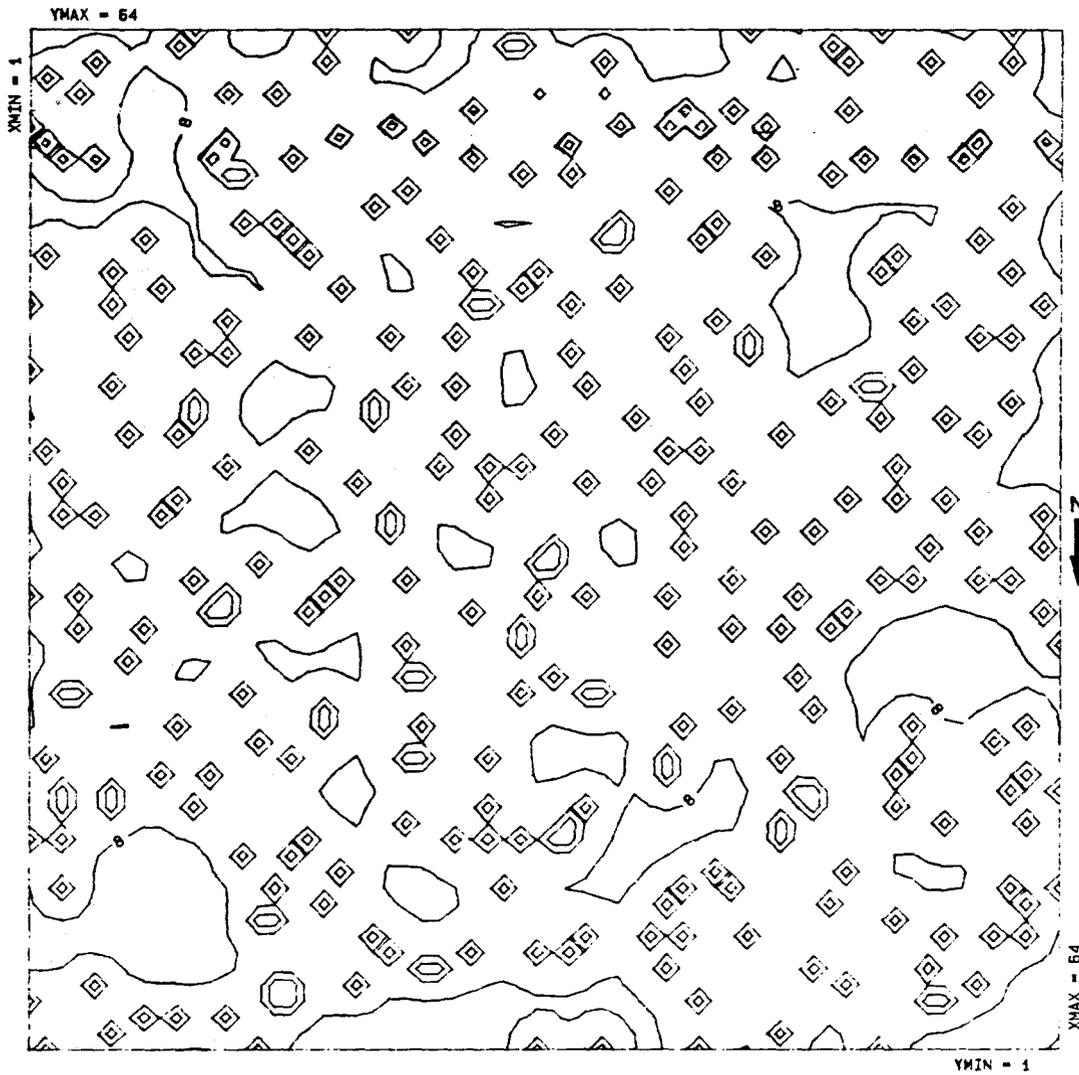


Figure C48. Isolignes (2,5,8,11 μ F) des écarts-types d'estimation de l'image X35 - traitement 1.

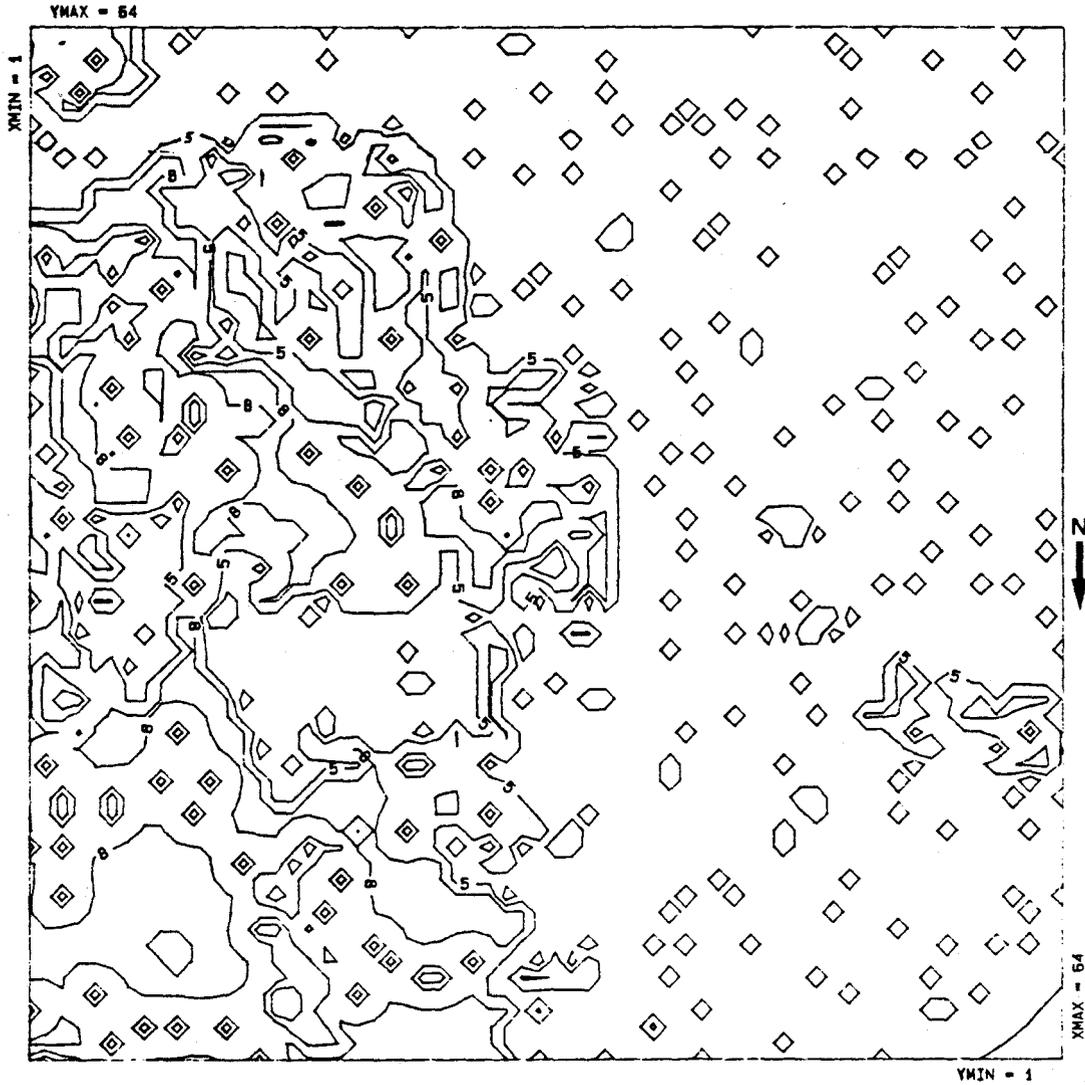


Figure C49. Isolignes (2,5,8 μF) des écarts-types d'estimation de l'image X35 - traitement 2.

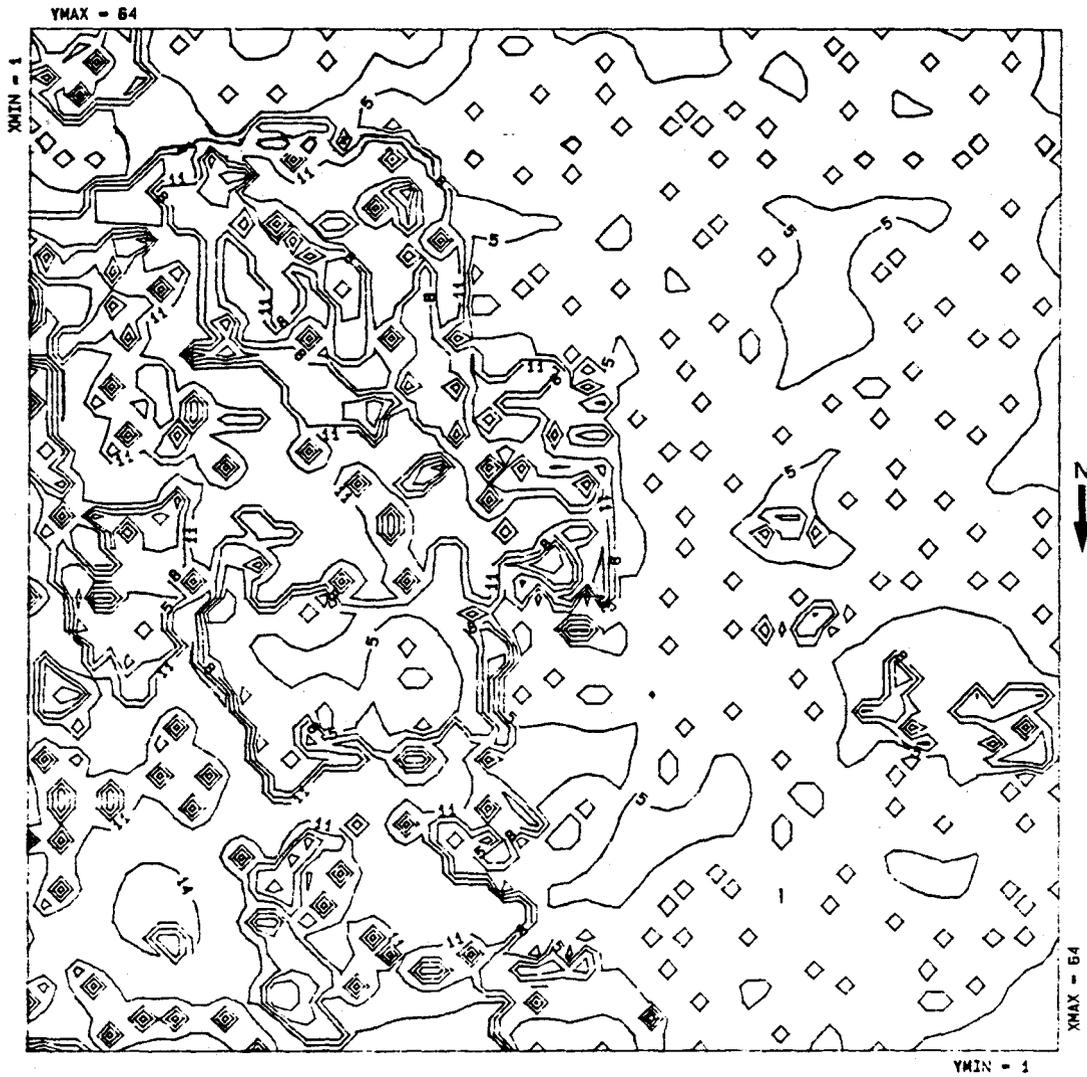


Figure C50. Isolignes (2,5,8,11,14 μF) des écarts-types d'estimation de l'image X35 - traitement 3.

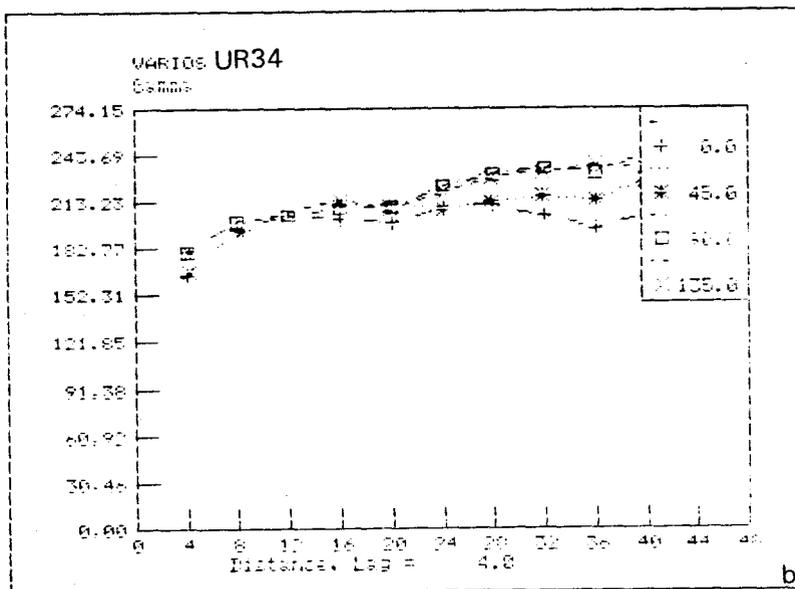
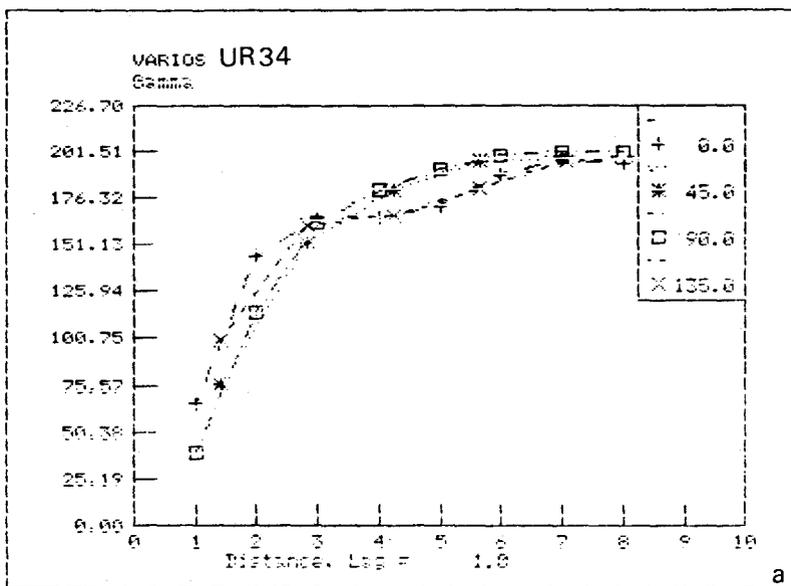


Figure D1. Semi-variogrammes directionnels à pas constants de 1 (a) et 4 (b) pixels pour l'image urbaine UR34 - vol est-ouest.

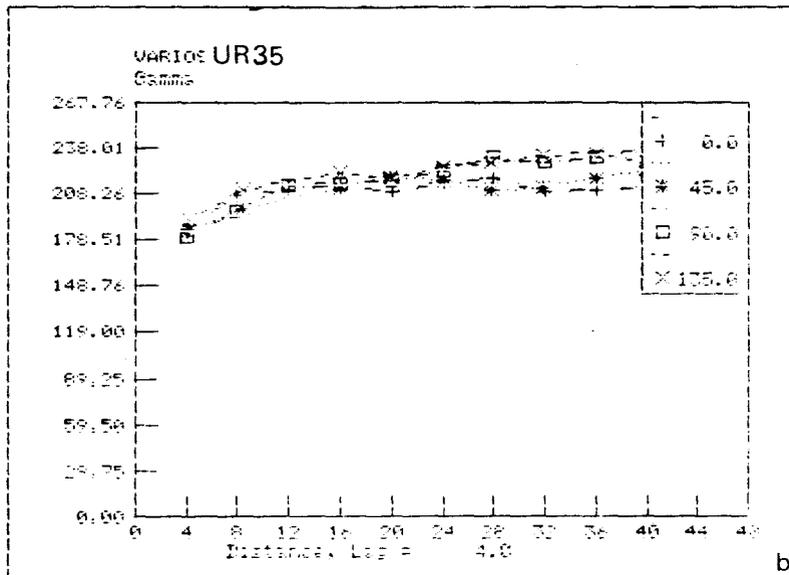
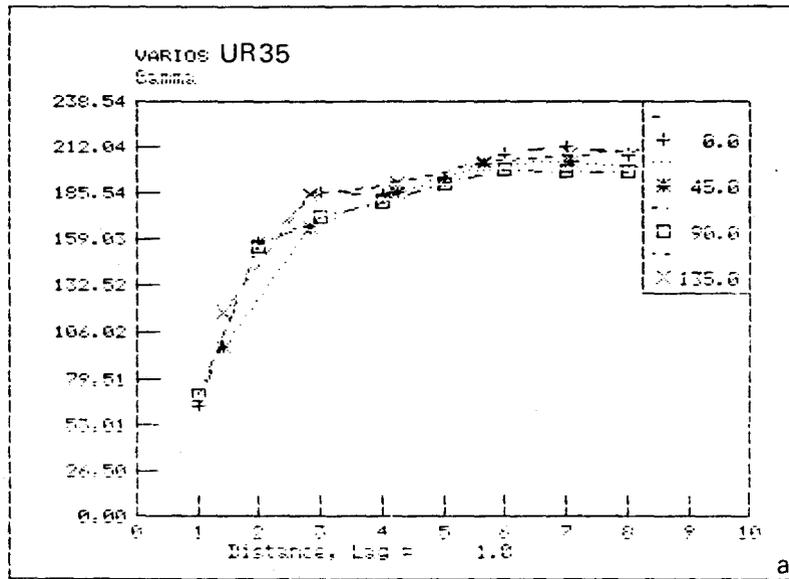


Figure D2. Semi-variogrammes directionnels à pas constants de 1 (a) et 4 (b) pixels pour l'image urbaine UR35 - vol nord-sud.

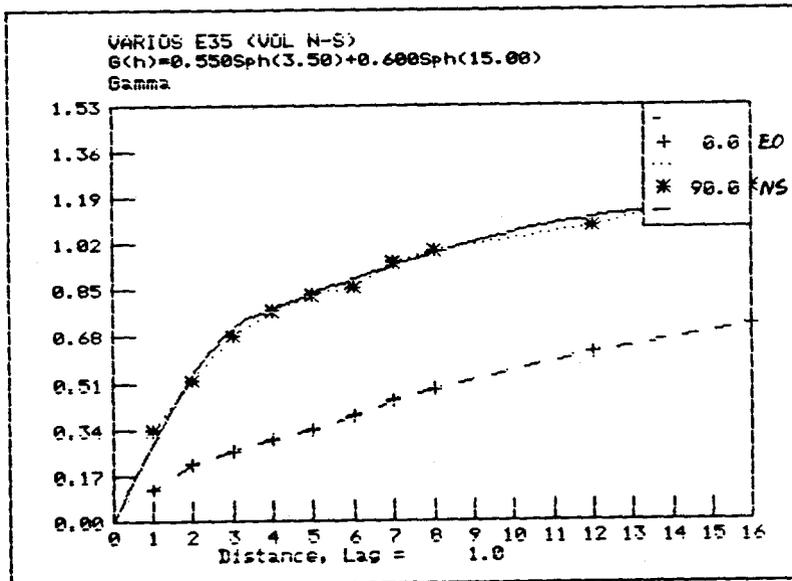
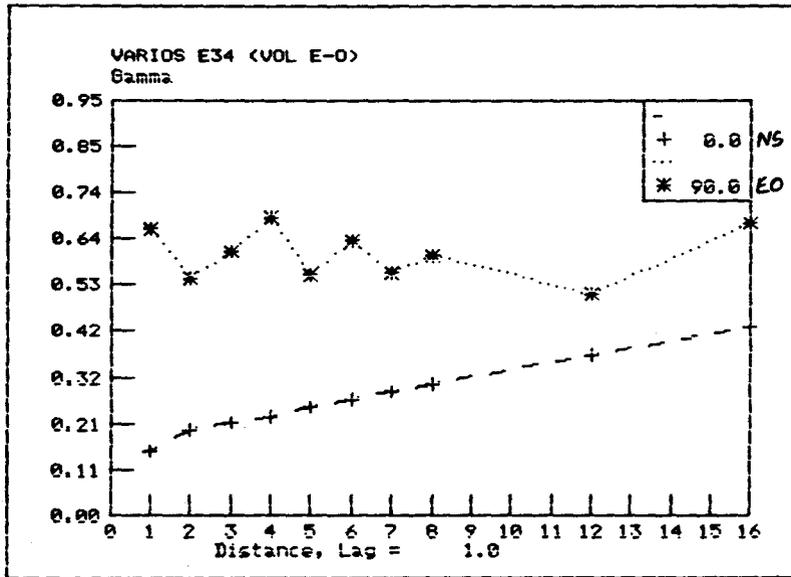


Figure D3. Semi-variogrammes directionnels à pas variable pour l'image-eau E34 - vol est-ouest.

Figure D4. Semi-variogrammes directionnels à pas variable pour l'image-eau E35 - vol nord-sud.

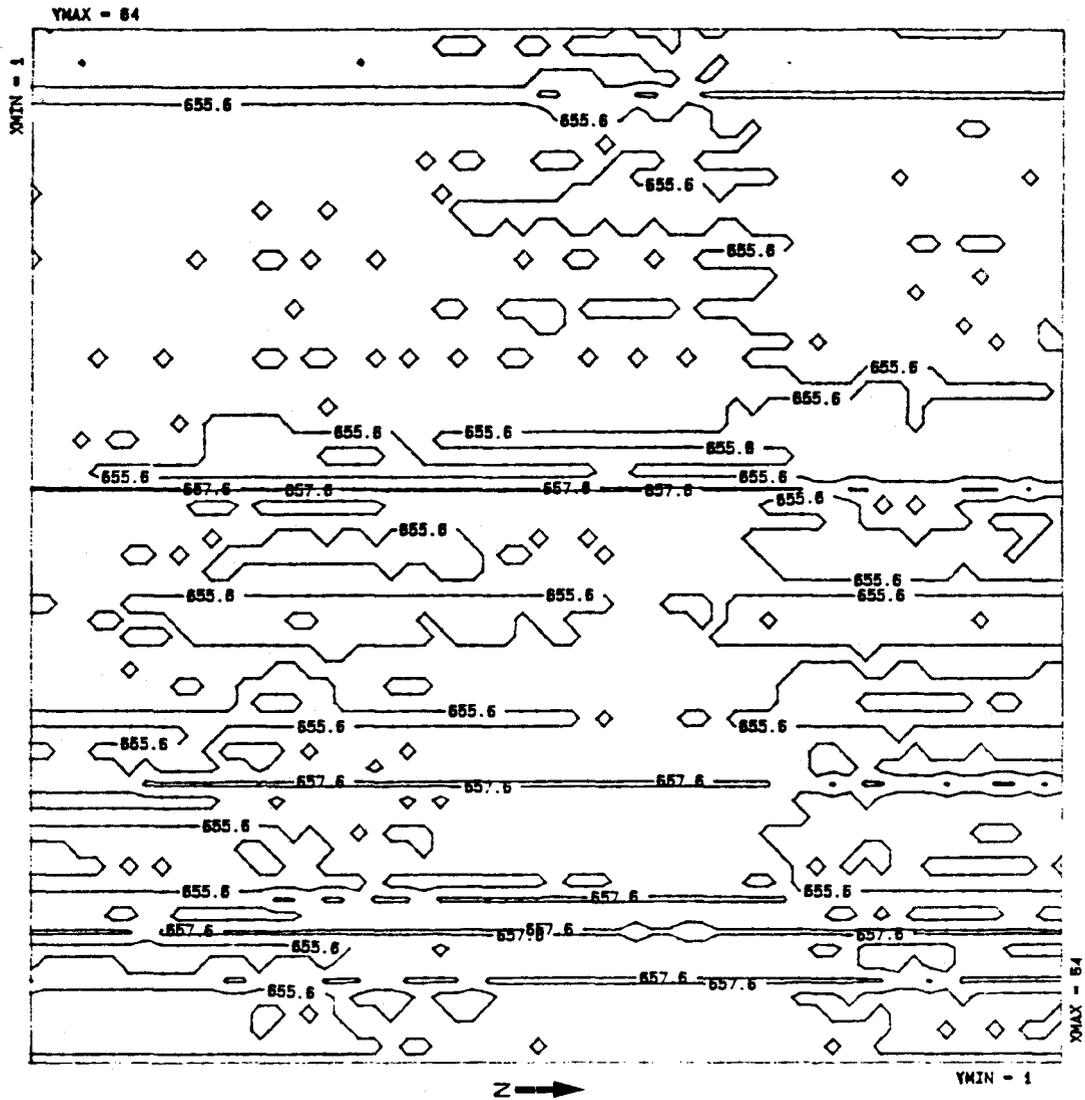


Figure D5. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image-eau E34 (vol est-ouest) avec alignement des isolignes dans la direction nord-sud.

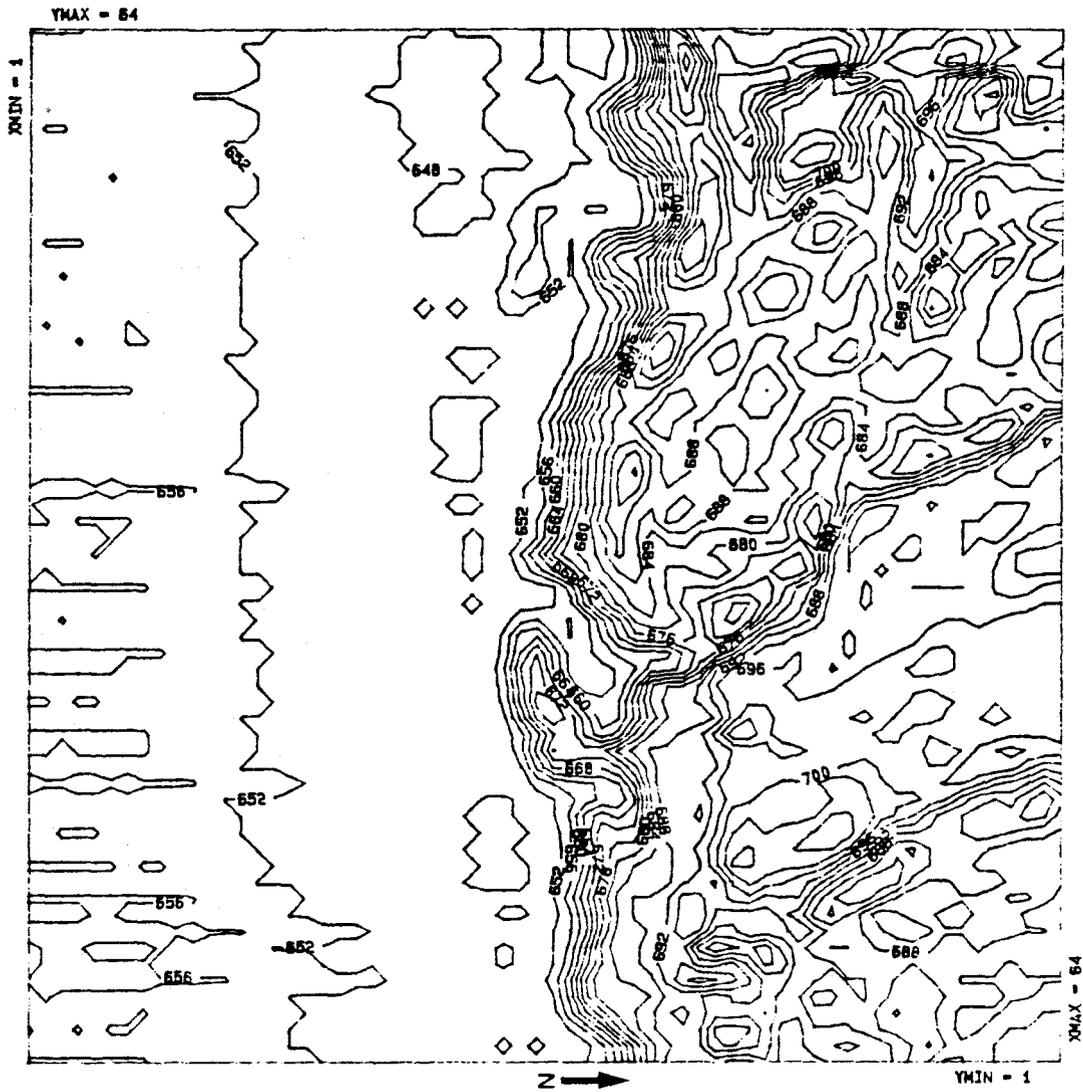


Figure D7. Vue en 2 dimensions des valeurs vraies (en μF) de l'image eau-urbaine B34 (vol est-ouest) avec le seul alignement des iso-lignes du milieu aquatique dans la direction nord-sud.