
Introduction à la géostatistique et variogrammes

Automne 2006

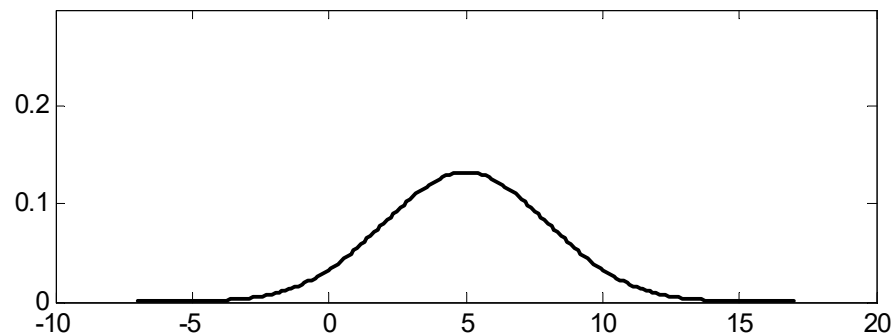
Plan

- Rappels statistiques
 - 1 v.a.
 - 2 v.a.

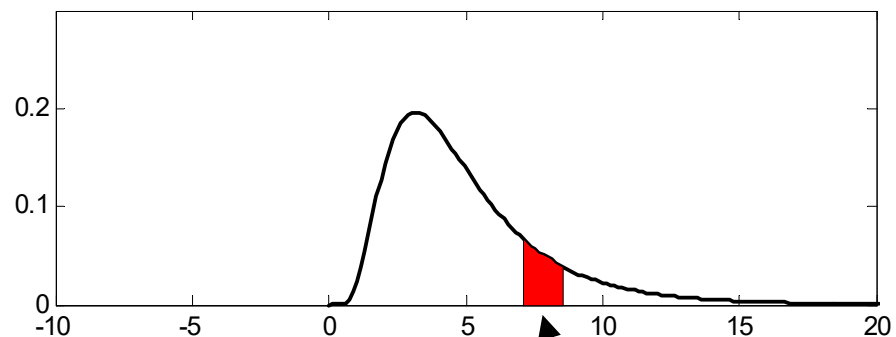
- Point de vue géostat
 - Gisement vs modèle stat
- Historique
- Effet support
- Effet information
- Géostatistique linéaire
 - Hypothèse de stationnarité
 - Variogramme expérimental
 - Modèles
 - Problèmes et stratégie de modélisation

Une v.a. (continue) est entièrement caractérisée par sa fonction de densité

Loi normale, $m=5$, $\sigma=3$



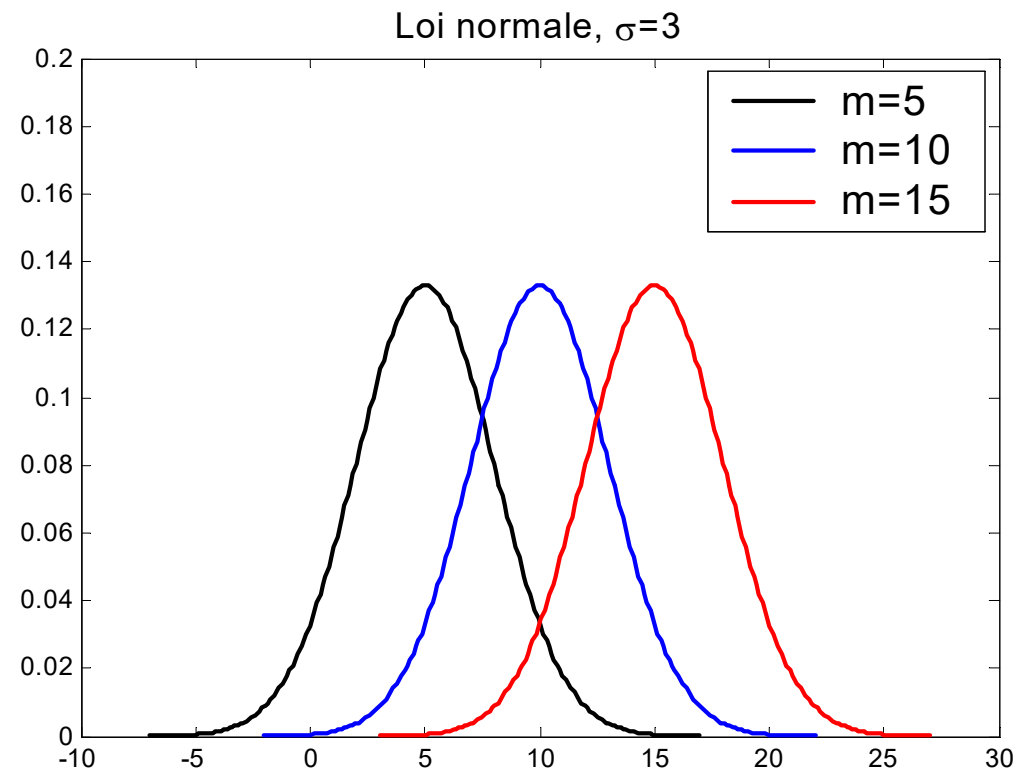
Loi lognormale, $m=5$, $\sigma=3$



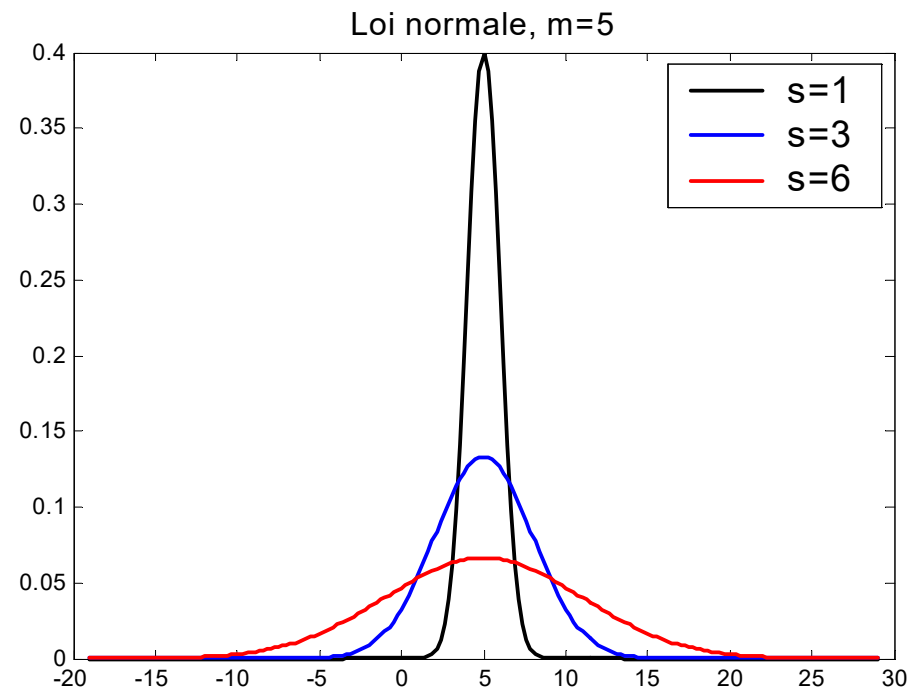
Intégrale: probabilité

Résumer une distribution par certaines statistiques

Tendance centrale (moyenne)

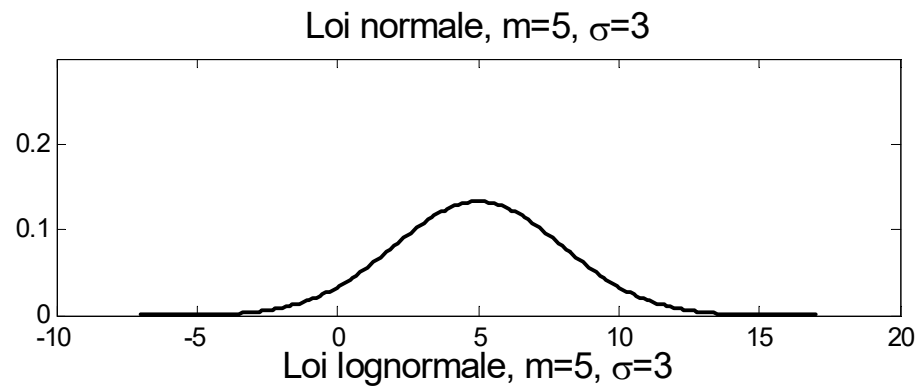


Dispersion autour de la moyenne (écart-type)

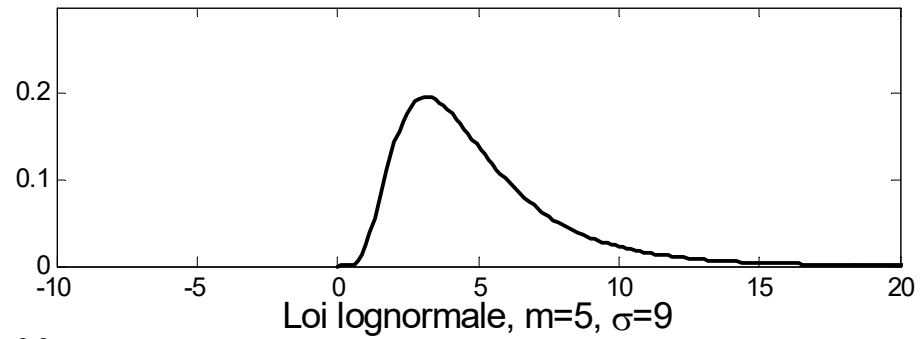


Asymétrie

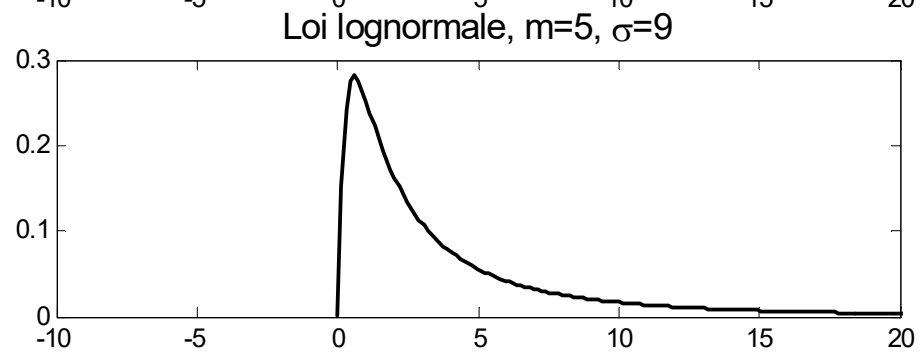
= 0



= 0.44



= 3.84



Le type de loi peut avoir une grande influence sur les ressources et la valeur d'un gisement.

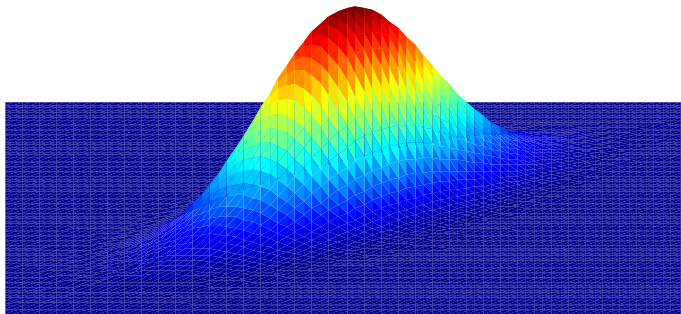
Exemple : gisement $m=2$, $\sigma=2$, t.coupure = 1

	Normale	Lognormale
Tonnage/T0	0.69	0.66
Teneur	3.02	2.70
Profit conv	1.40	1.13

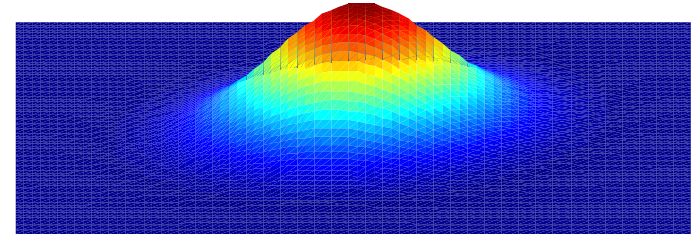
Deux v.a.

- Un couple de v.a. X et Y (continues) est entièrement caractérisé par la loi de densité conjointe $f(x,y)$

Loi binormale, $\sigma_1=2$ $\sigma_2=5$ $\rho=0.8$



Loi binormale, $\sigma_1=2$ $\sigma_2=5$ $\rho=0.2$



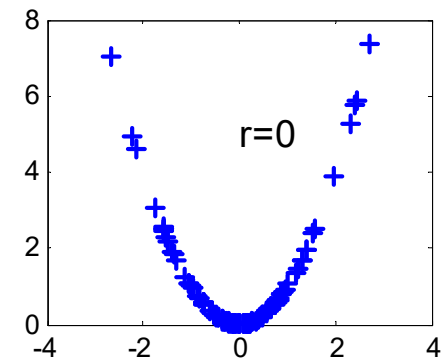
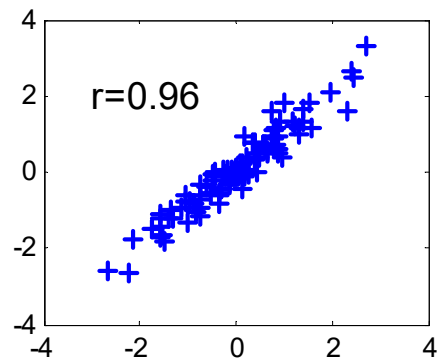
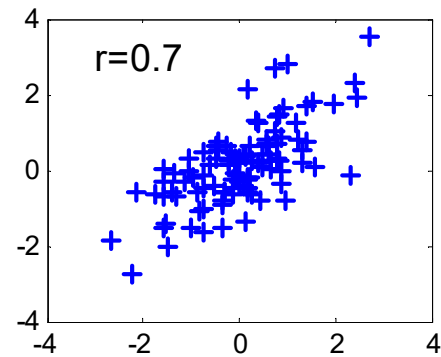
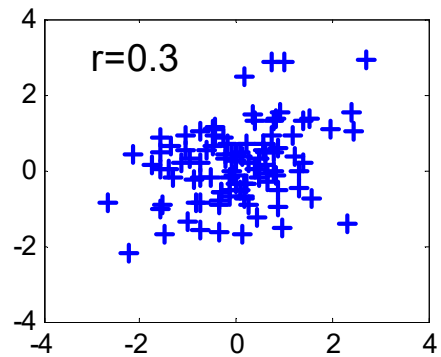
On peut résumer une distribution bivariable par différentes statistiques dont :

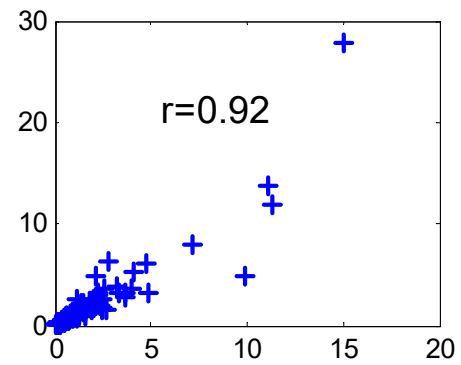
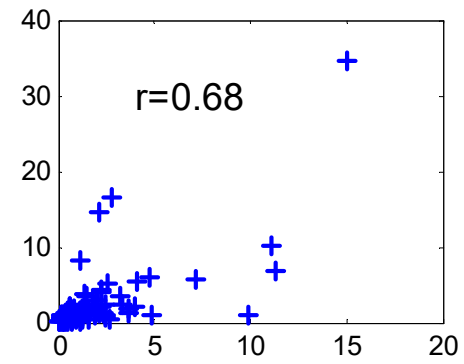
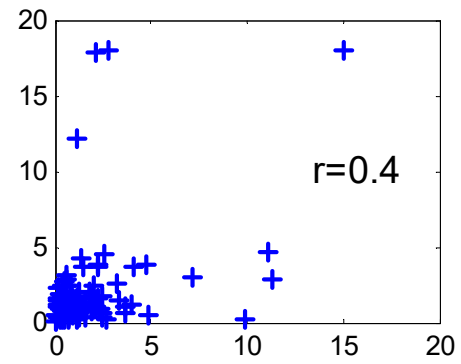
- moyennes des 2 variables
- écart-types (ou variances) des 2 variables
- corrélation (ou covariance) entre les 2 variables

La covariance mesure le degré d'association entre 2 v.a.

La corrélation est la covariance entre 2 v.a. normalisées pour présenter un écart-type de 1

$$\rho_{XY} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$





Espérance mathématique

- Notion fondamentale

$$E[X] = \int x f_X(x) dx$$

$$E[g(X)] = \int g(x) f_X(x) dx$$

$$E[g(X, Y)] = \iint g(x, y) f_{X,Y}(x, y) dx dy$$

- Si $g(X) = (X - m)^2 \Rightarrow E[g(X)] = \text{Var}(X)$
- Si $g(X, Y) = (X - m_x)(Y - m_y) \Rightarrow E[g(X, Y)] = \text{Cov}(X, Y)$

Propriétés de l'espérance mathématique

- E est un opérateur linéaire =>

$$E[c g(X)] = c E[g(X)]$$

$$E[g(X) + h(X)] = E[g(X)] + E[h(X)]$$

$$E[g(X, Y) + h(X, Y)] = E[g(X, Y)] + E[h(X, Y)]$$

En particulier

$$\text{Var}(X_1 + X_2) = \text{Var}(X_1) + \text{Var}(X_2) + 2 * \text{Cov}(X_1, X_2)$$

$$\text{Var}(aX_1 + bX_2) = a^2 \text{Var}(X_1) + b^2 \text{Var}(X_2) + 2ab * \text{Cov}(X_1, X_2)$$

$$\text{Var}\left(\sum_{i=1}^n a_i X_i\right) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_i a_j \text{Cov}(X_i, X_j)$$



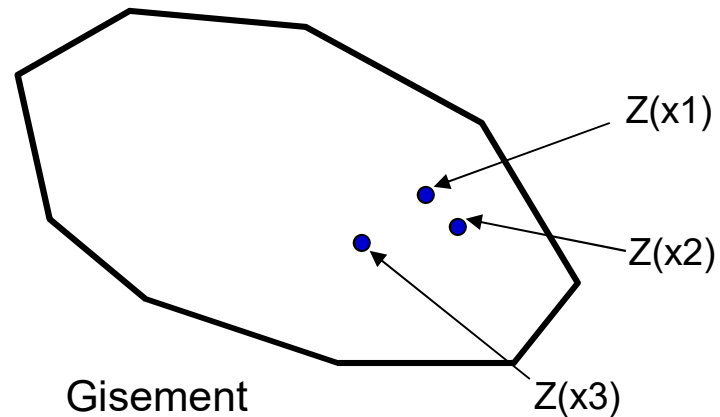
Une des expressions
qui revient le plus
souvent en géostat

$$\text{Var}\left(c \int Z(x) dx\right) = c^2 \iint \text{Cov}(Z(x), Z(y)) dx dy$$

← Une autre expression
qui revient souvent en
géostat

$$\text{Cov}\left(a \int Z(x) dx, b \int Z(y) dy\right) = ab \iint \text{Cov}(Z(x), Z(y)) dx dy$$

Point de vue de la géostat

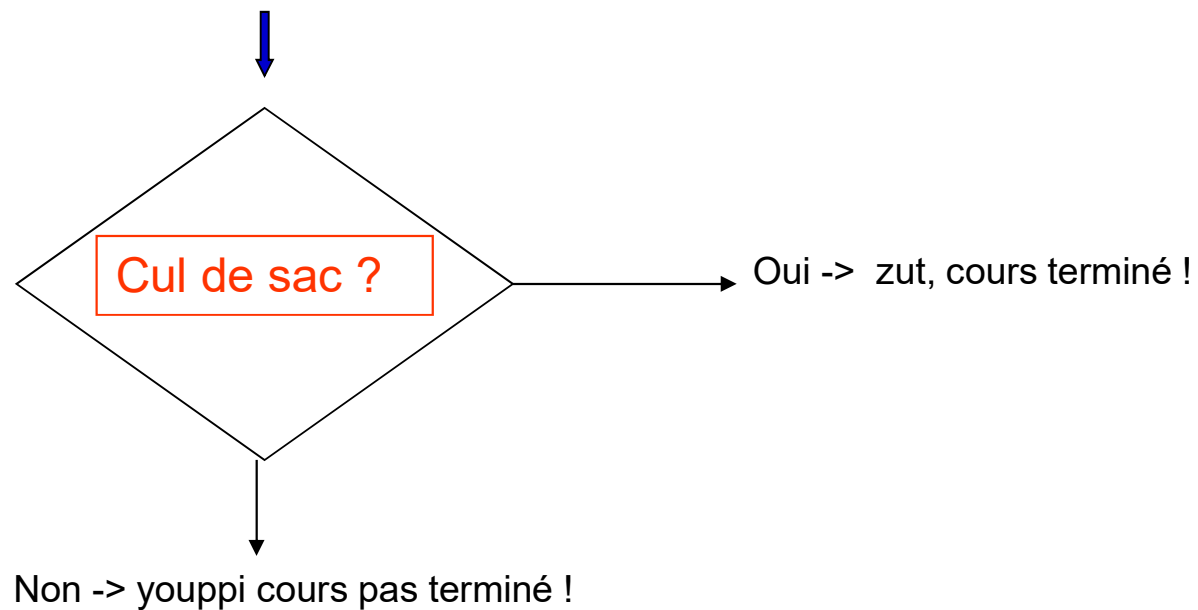


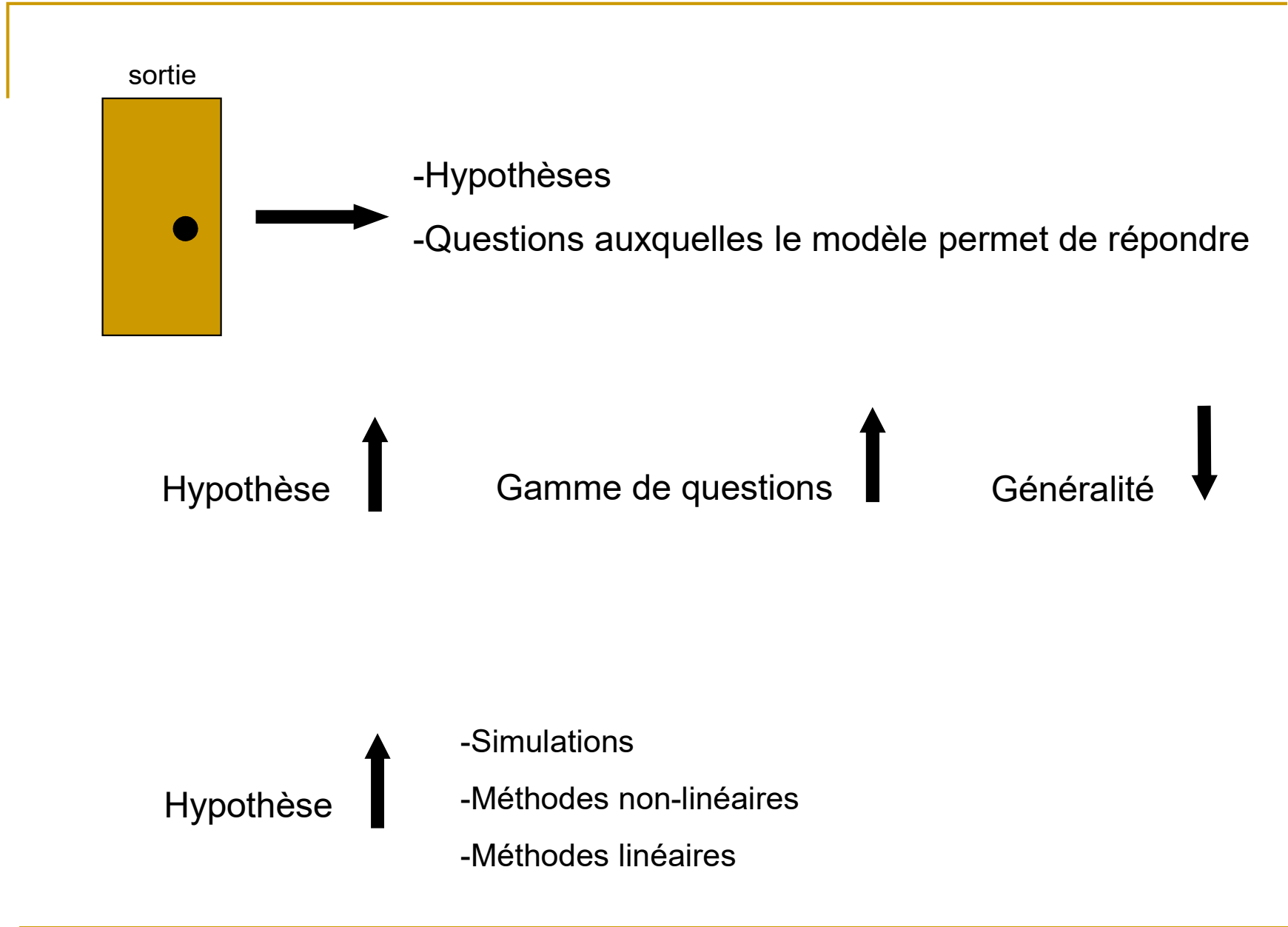
Gisement => infinité de points ou très grand nombre de « quasi-points »
x : emplacement géographique
chaque point -> teneur -> $Z(x)$
chaque teneur -> v. a. (ensemble forme une fonction aléatoire (de x))

Impossible d'estimer à partir des données la loi de densité conjointe

Impossible d'estimer à partir des données la loi de densité bivariable

Impossible d'estimer à partir des données la loi de densité d'une variable





Historique de la géostatistique

- 1930-1950 Théorie des fonctions aléatoires (Kolmogorov, Wiener)
- 1955 Daniel Krige : approche empirique (régression) pour corriger problèmes de biais conditionnel observé dans les mines

Pourquoi moins que prévu ?

Comment prévoir et tenir compte de l'effet support ?

- 1960-1970 Matheron (mines), Matern (foresterie), Gandin (météorologie) développent ensemble d'outils => naissance de la géostat linéaire stationnaire. Réponse aux questions de Krige.

Matheron donne le nom de « krigeage » à la méthode d'estimation qu'il développe.

- 1970 Polytechnique est la 1ère Université en A. du N. à enseigner la géostat (M. David)

Historique (suite)

- 1973 géostat linéaire non-stationnaire *
- 1975 géostat non-linéaire
- 1977 1er livre en anglais de géostat (M. David)
- 1980 géostat linéaire multivariable *
- 1985 simulations *

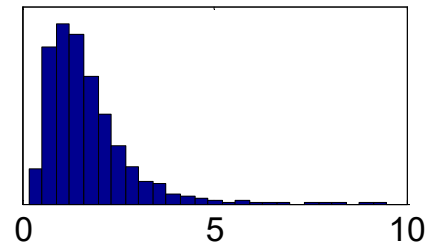
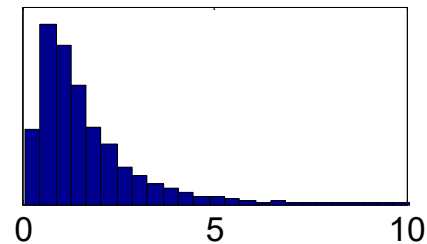
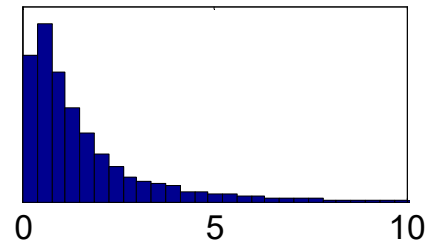
* *Domaines encore actifs de recherche*

- Aujourd'hui, la géostat est appliquée dans une foule de domaines (mines, pétrole, foresterie, agriculture, environnement, hydrogéologie, géotechnique, pêches, biologie, biomédical,...)

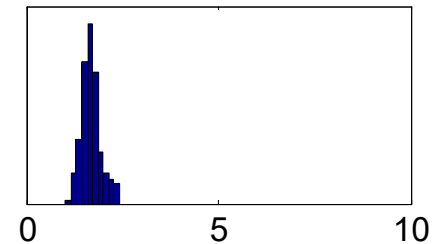
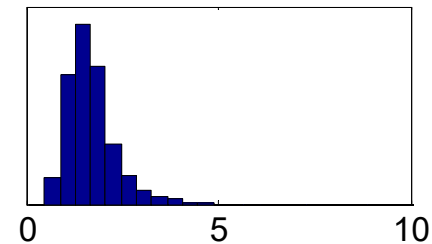
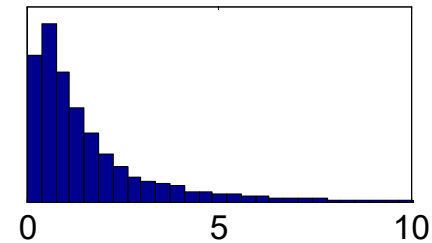
Effet support



Gisement A

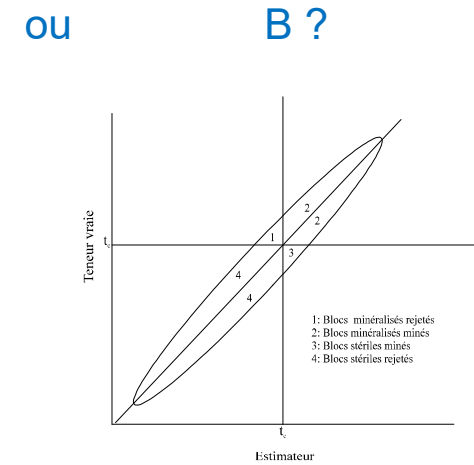
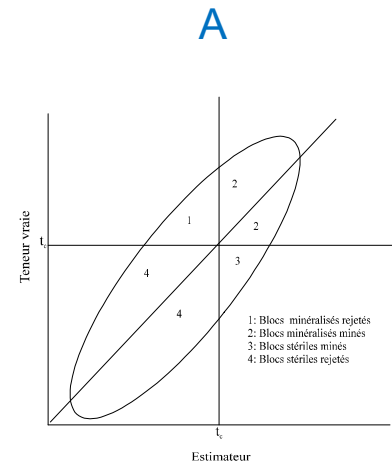
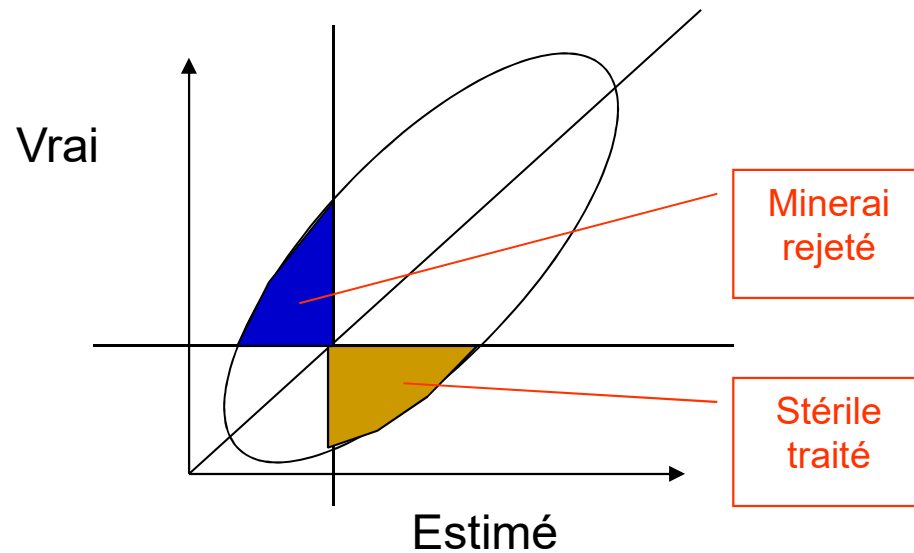


Gisement B



Comment prévoir ces comportements différents ?
Quel est l'impact \$\$?

Effet information



Prévoir l'étendue des plages d'erreur et pertes en \$?
Évaluer \$ en information pour réduire les pertes ?

On mine à partir d'estimés mais on récolte des valeurs vraies !

À tonnage extrait égal

⇒ on récupère toujours moins de métal avec des gros blocs qu'avec des petits blocs (effet support)

⇒ on récupère toujours moins de métal avec des estimés qu'avec les vraies valeurs (effet information)

La géostatistique permet théoriquement

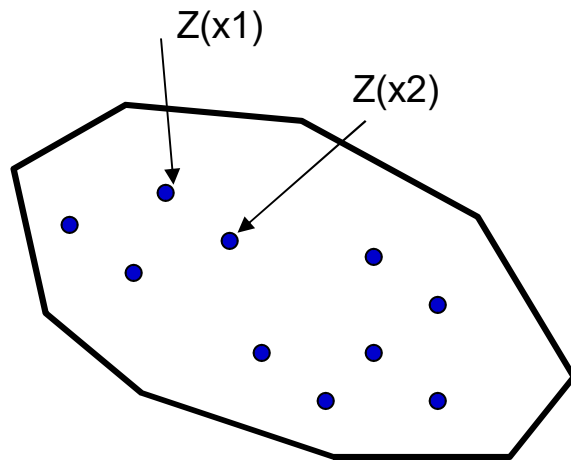
- Prévoir l'ampleur de ces effets
- Minimiser ces effets
- Prendre des décisions éclairées au vu de ces effets

Géostatistique linéaire

- Questions
 - Estimation de teneurs ponctuelles ou blocs
 - Précision associée à ces estimations
- Hypothèse
 - Stationnarité du second ordre

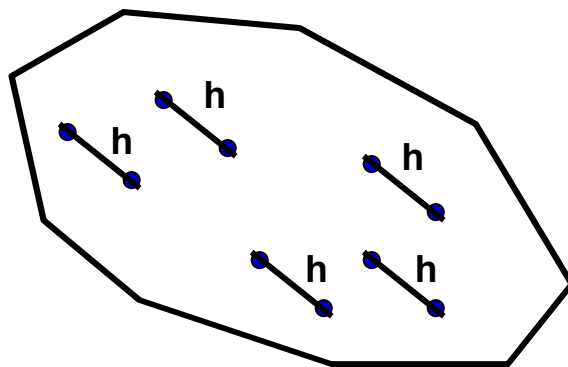
Les caractéristiques sont moyenne, variance et covariance

Deux paires de points espacés d'un même vecteur « h » ont des caractéristiques semblables



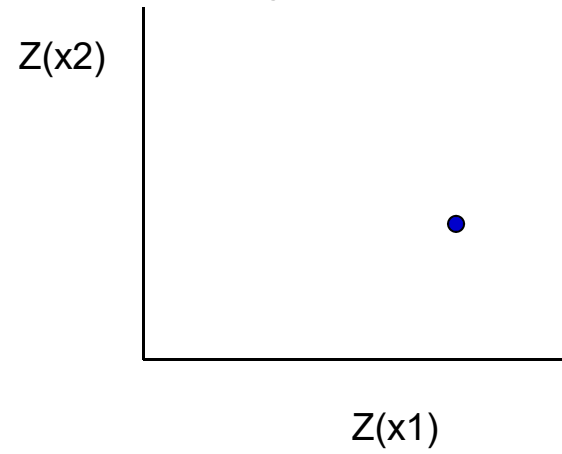
Gisement

+ hypothèse stationnarité



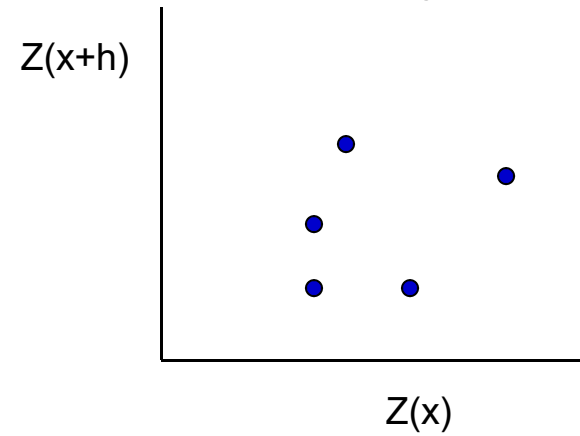
Gisement

Diagramme binaire

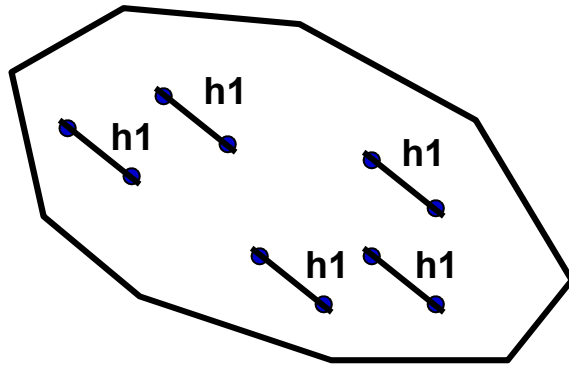


Moyenne ? Variance ? Covariance?

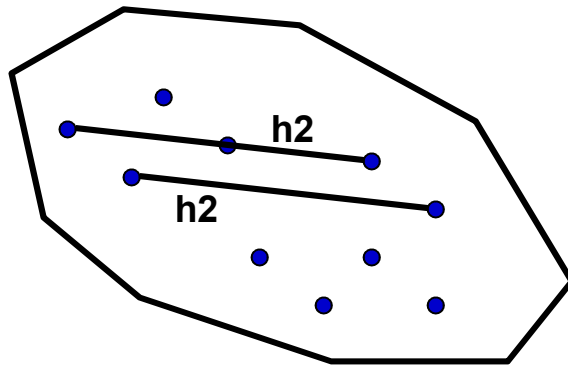
« h scattergram »



Faire varier « h »

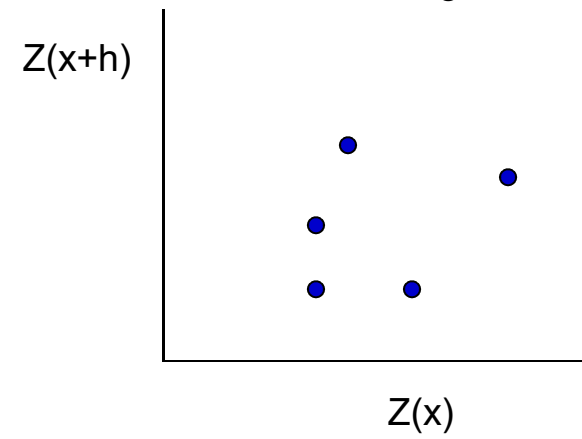


Gisement

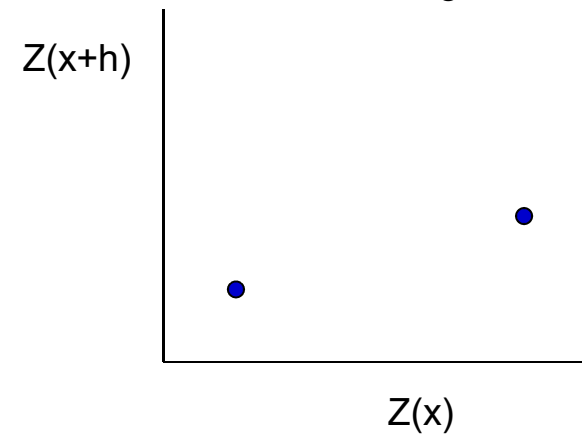


Gisement

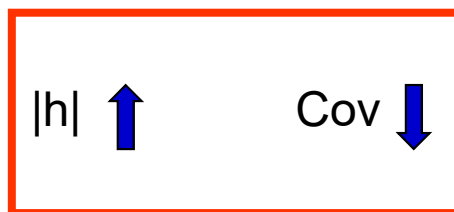
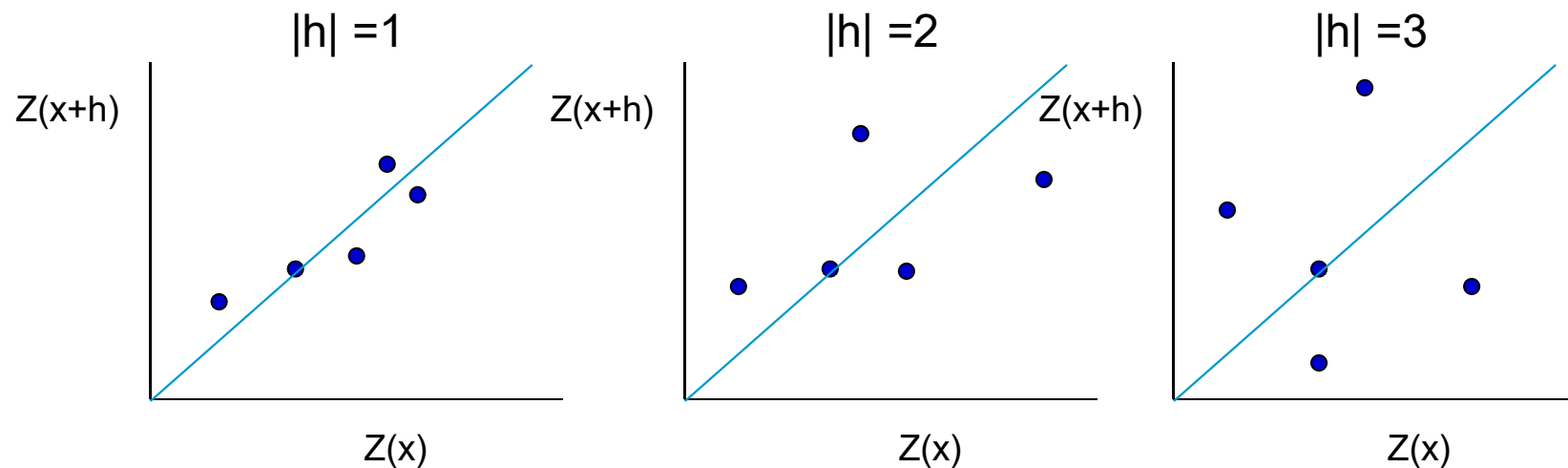
« h1 scattergram »



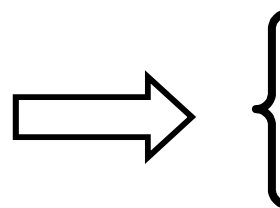
« h2 scattergram »



« h » peut varier en direction et en module.

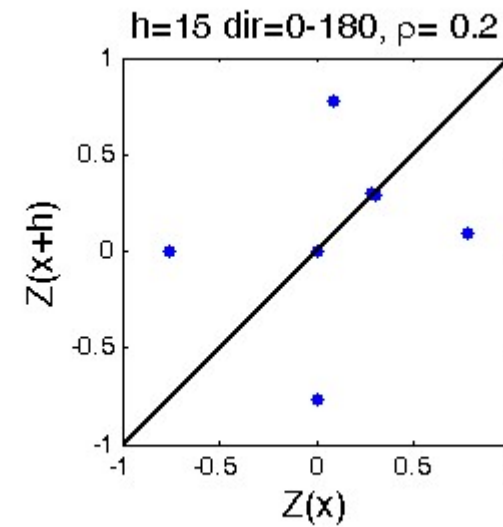
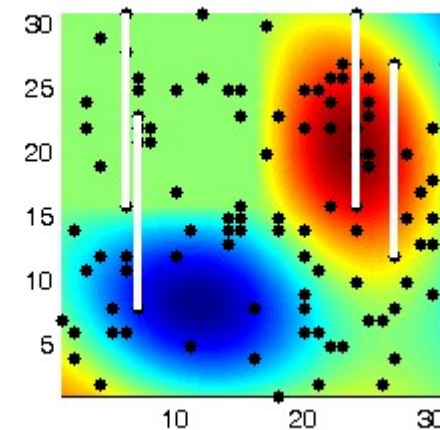
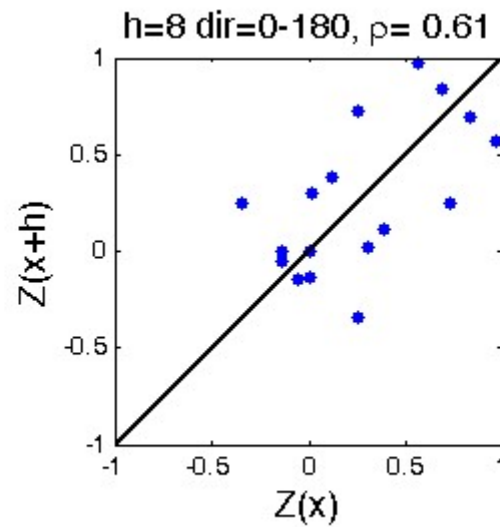
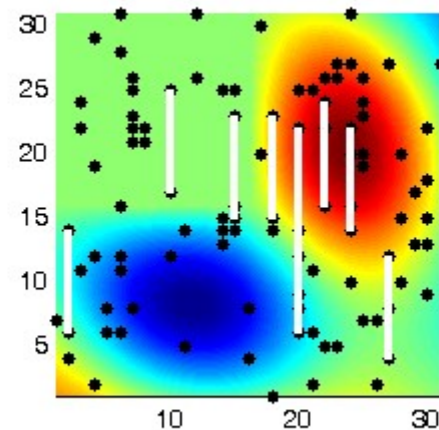
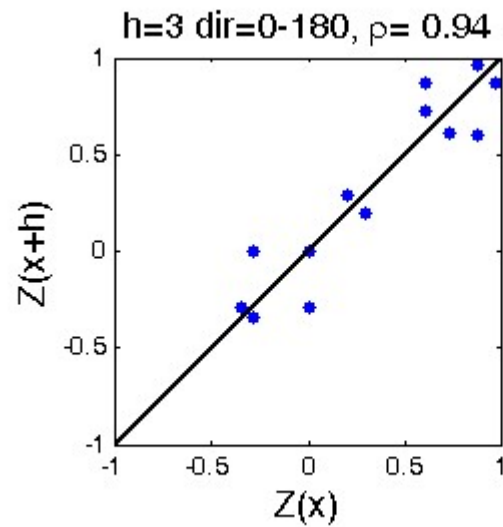
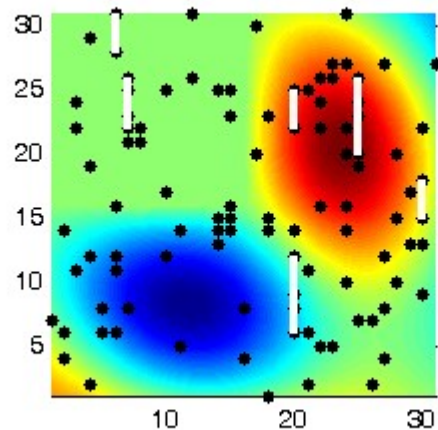


On cherche si possible avoir au moins 30 points sur chaque diagramme

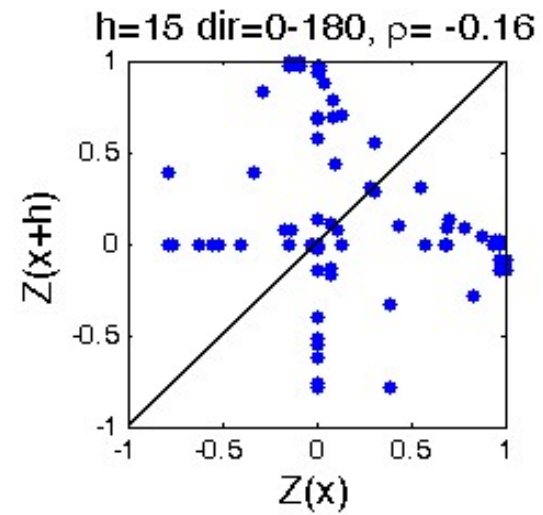
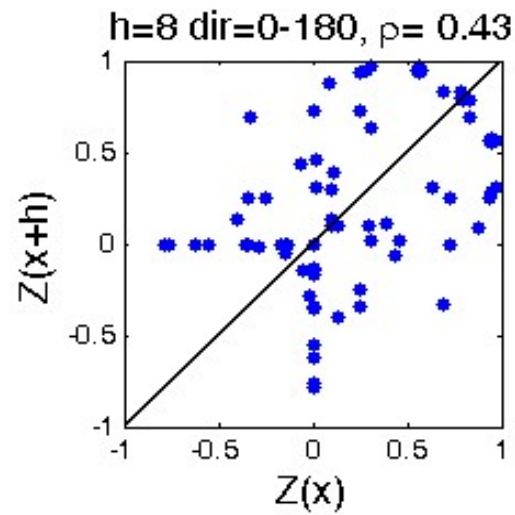
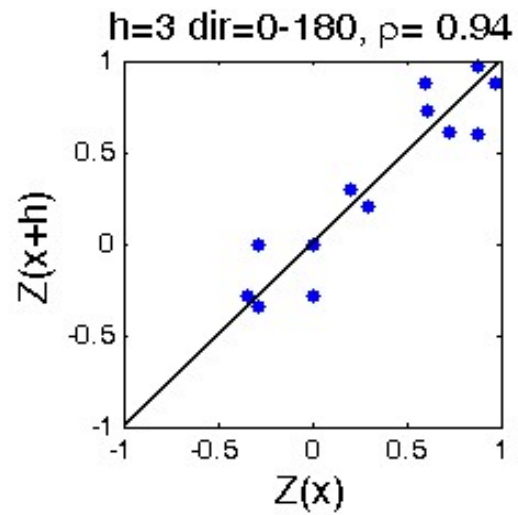
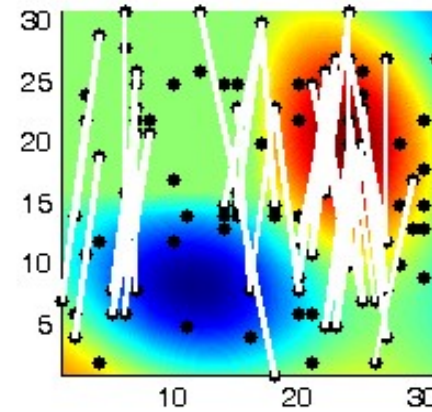
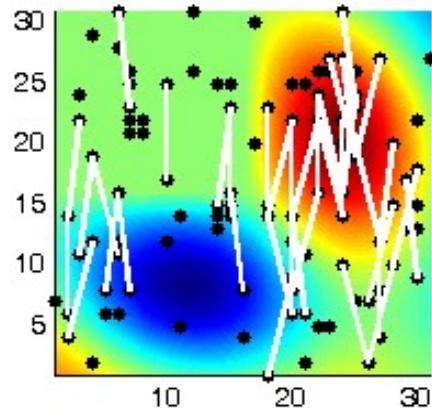
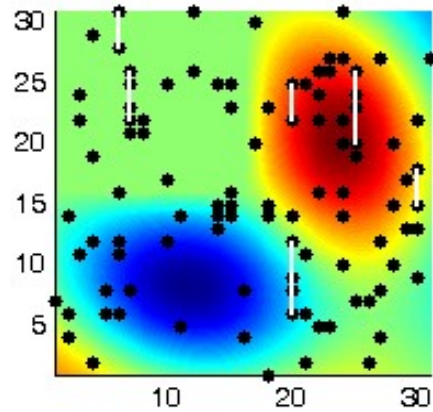


- Tolérance sur la direction
- Tolérance sur le module

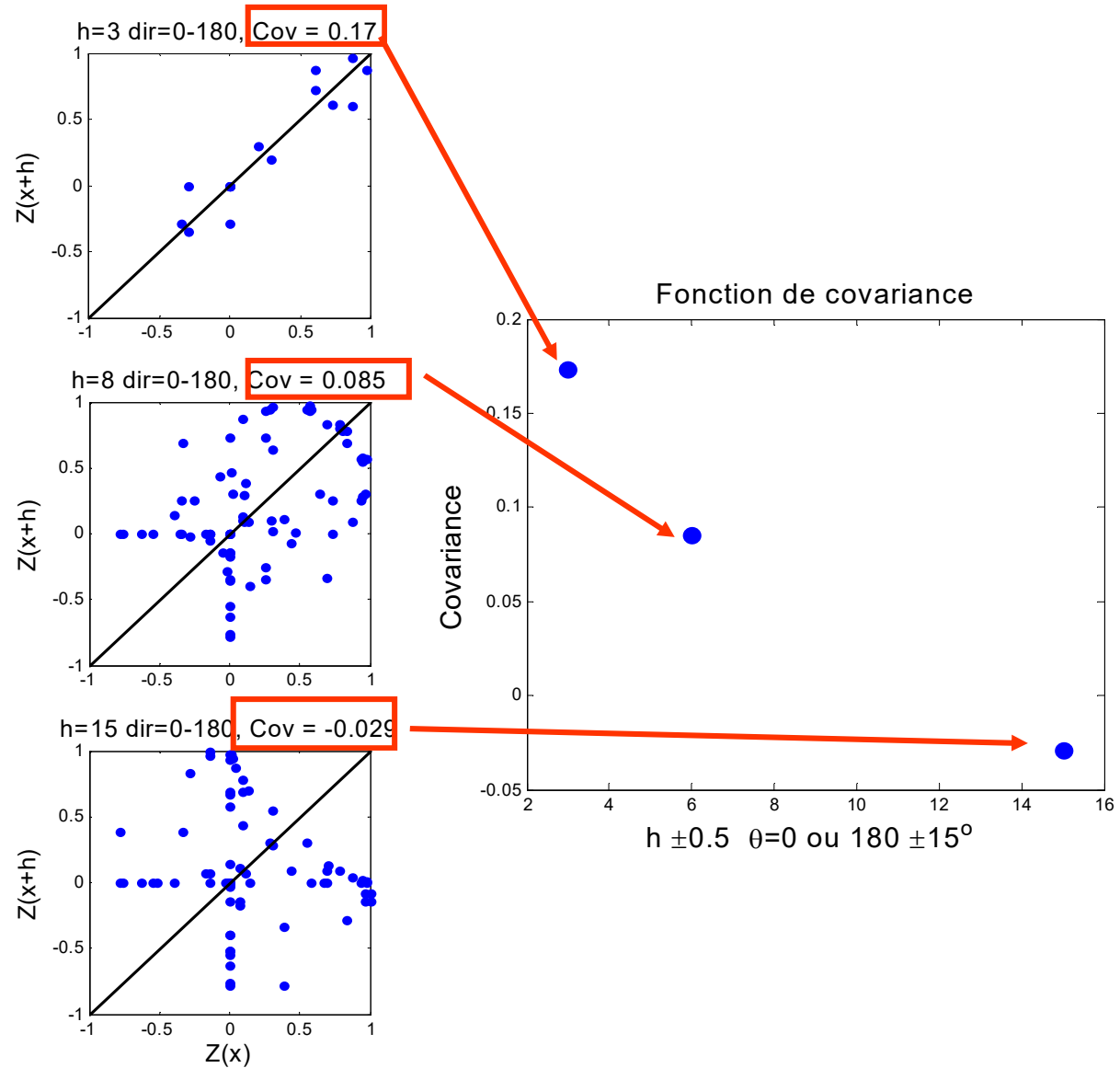
Exemple



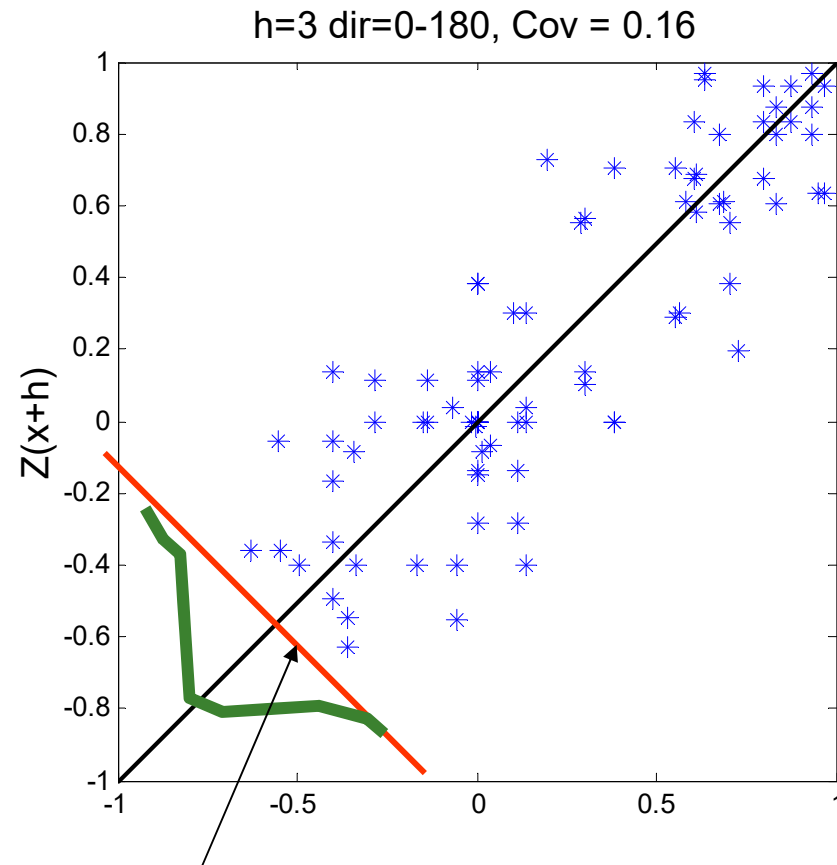
Avec tolérance de 0.5 sur $|h|$ et 15° sur direction



En pratique, on ne s'intéresse qu'à la covariance (corrélation)



Le variogramme



Mesure la dispersion sur cette droite

Variogramme : définition

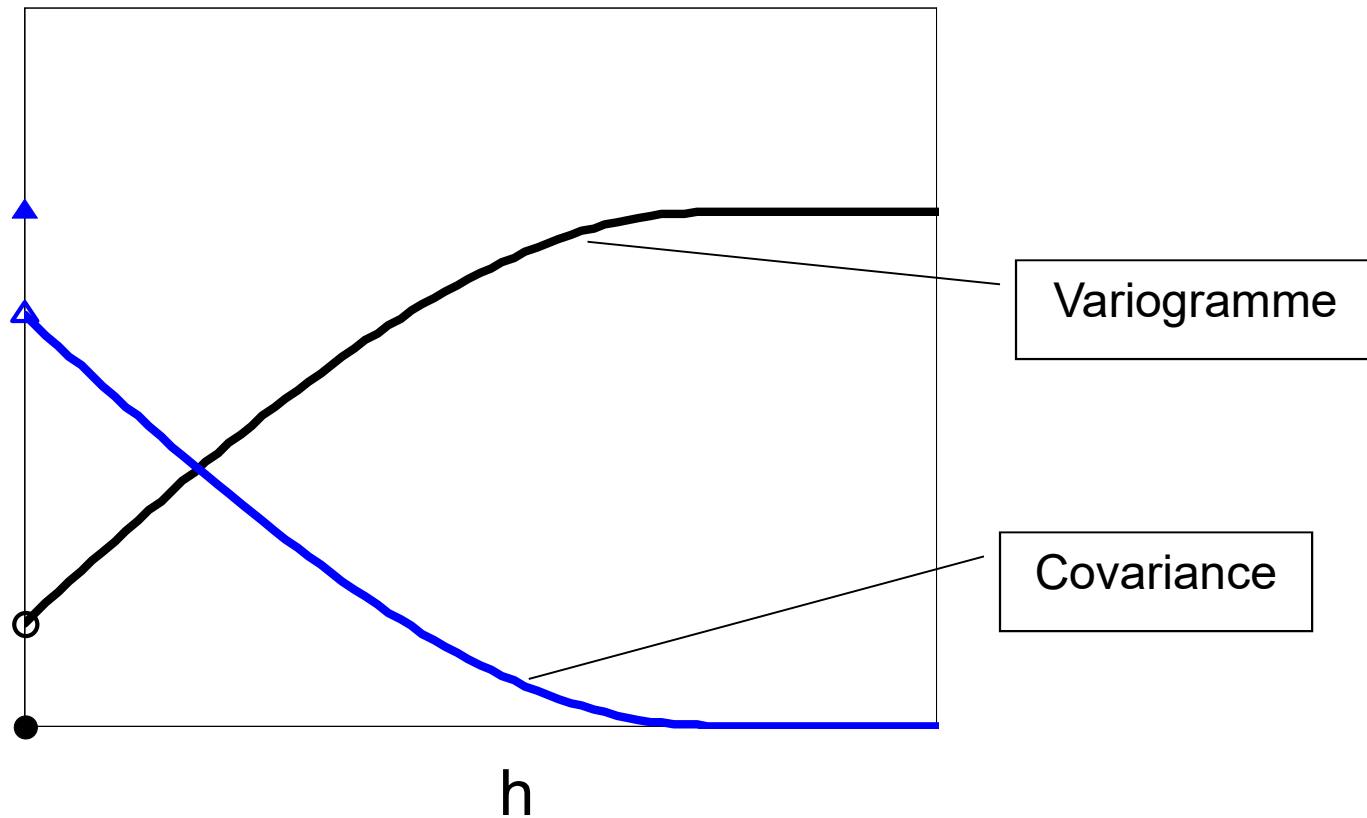
Si
 $E[Z(x)] = m$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E[(Z(x) - Z(x+h))^2]$$

	Variogramme	Covariance
m	Constante	Constante connue
Var	Si existe = palier	Doit exister = Cov(h=0)
h	Croît (généralement)	Décroît (généralement)

Lien entre variogramme et covariance

$$\gamma(h) = \sigma^2 - \text{Cov}(h)$$



Variogramme expérimental

Choisir une direction + tolérance angulaire

Discrétiser $|h|$ en classes distinctes

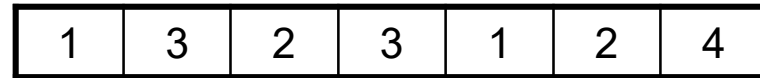
Répartir les paires dans les classes

$$\gamma_e(h) = \frac{1}{2 N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

$N(h)$: nombre de paires dans la direction considérée et dans la classe de distance h

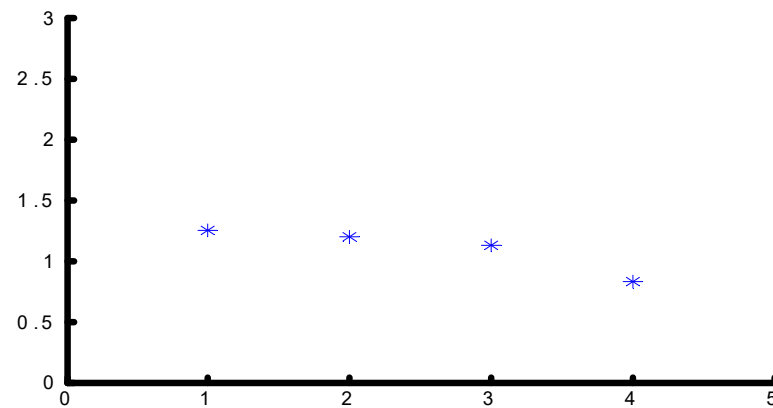
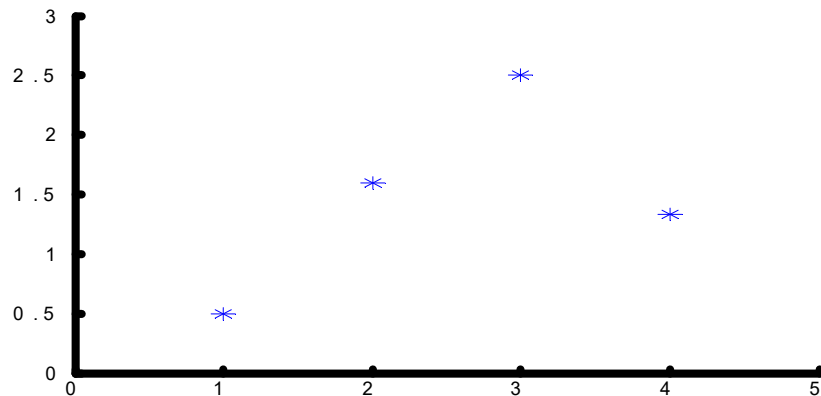
Example

$h=1$

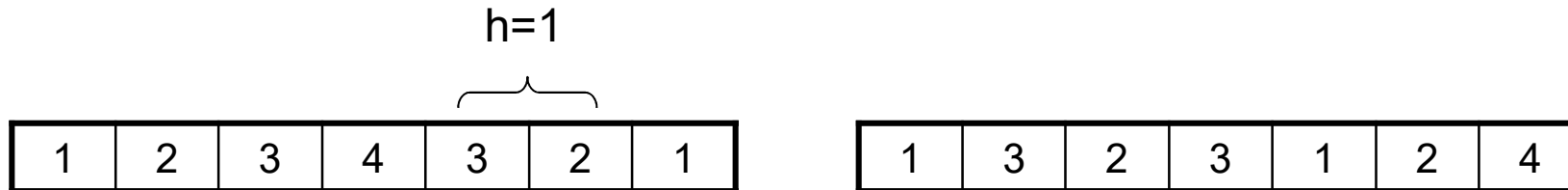


h	N(h)	$\gamma(h)$
1	6	0.5
2	5	1.6
3	4	2.5
4	3	1.33

h	N(h)	$\gamma(h)$
1	6	1.25
2	5	1.2
3	4	1.125
4	3	0.83



Exemple



Données ponctuelles => variance exp. (avec division par n) vaut **1.06** pour les deux séries

Blocs se chevauchant de taille 2

1.5 2.5 3.5 3.5 2.5 1.5 => **var = 0.67** vs 2 2.5 2.5 2 1.5 3 => **var = 0.23**

Blocs se chevauchant de taille 3

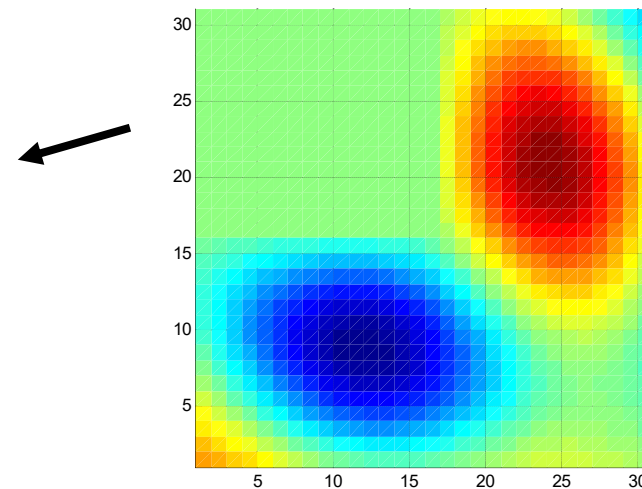
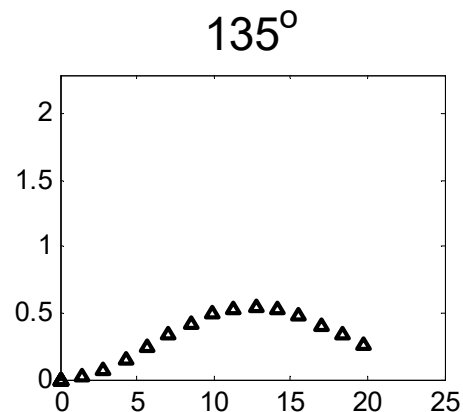
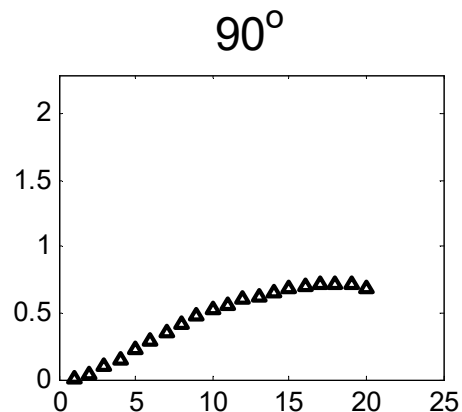
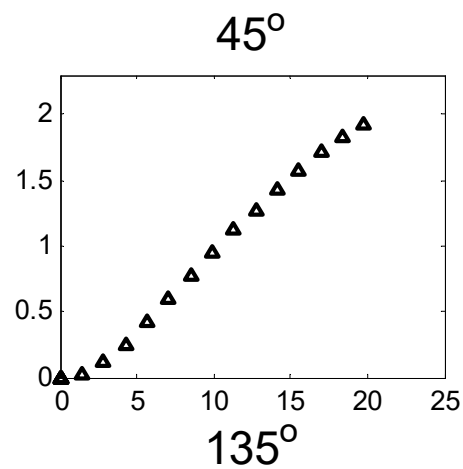
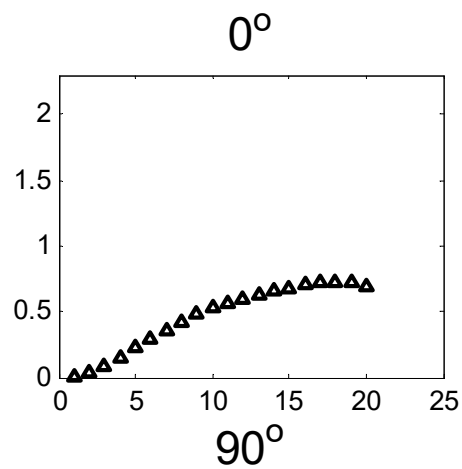
2 3 3.33 3 2 => **var = 0.31** vs 2 2.7 2 2 2.33 => **var = 0.07**

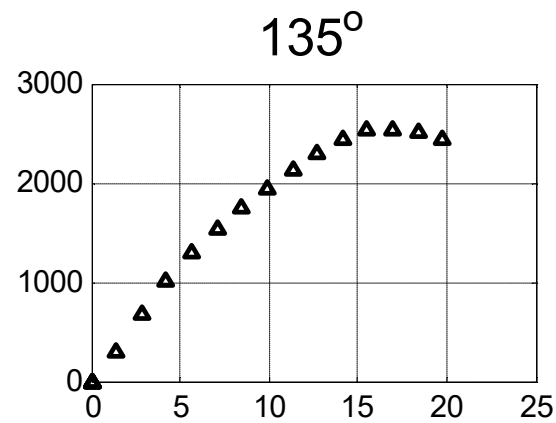
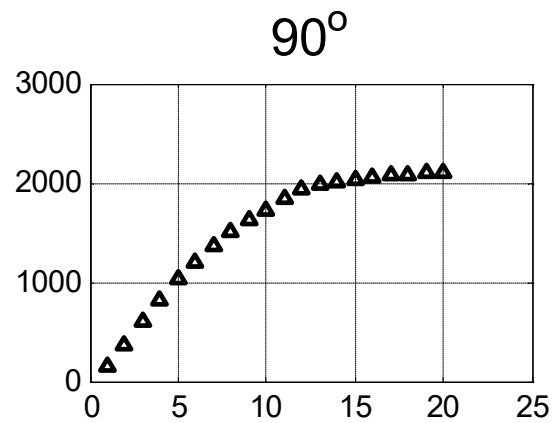
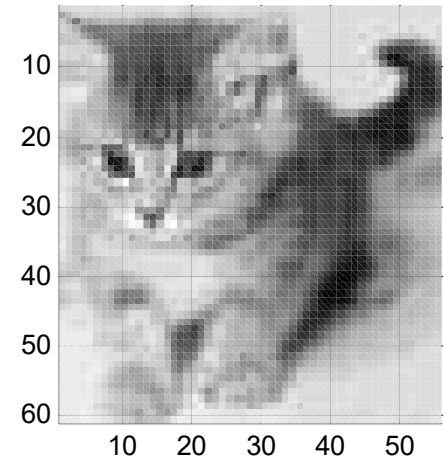
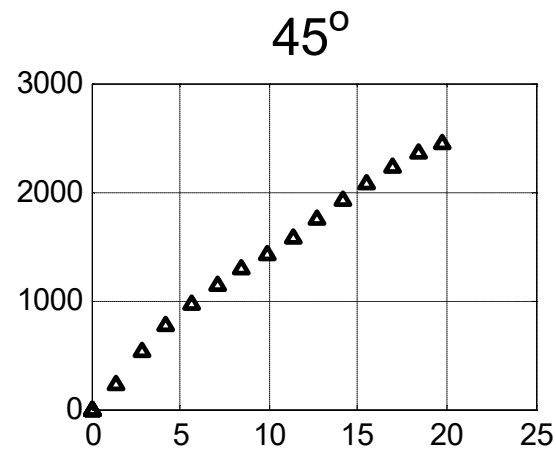
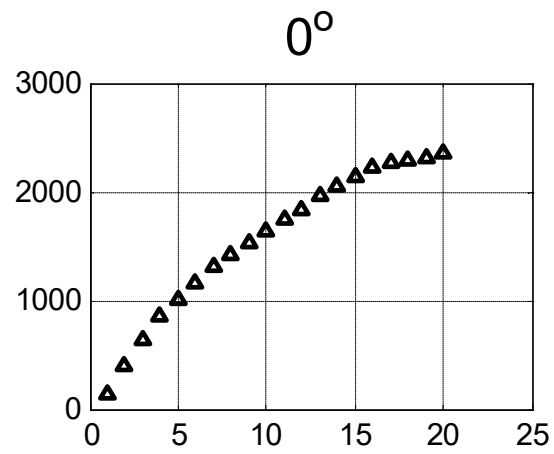
Blocs se chevauchant de taille 4

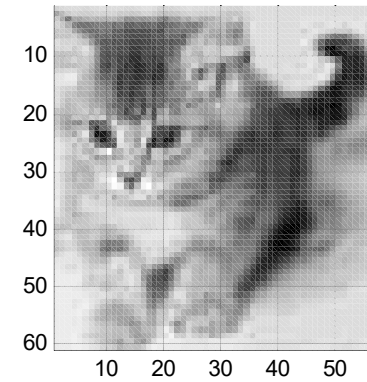
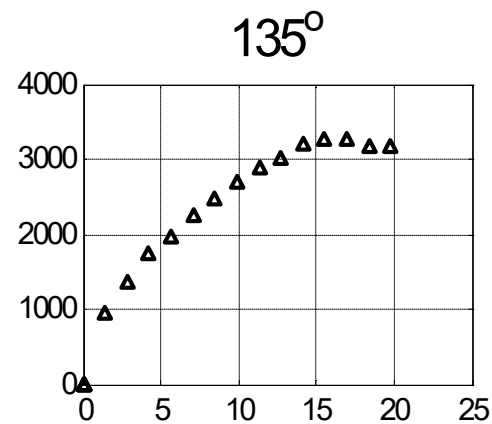
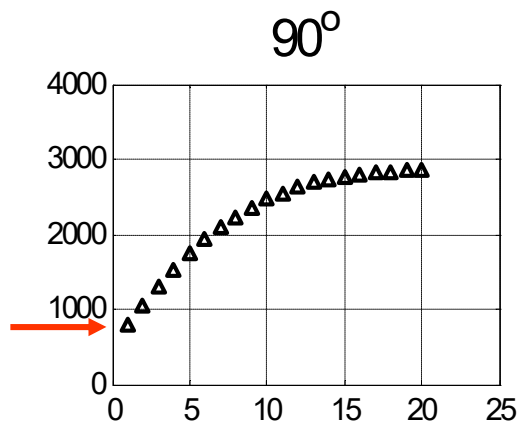
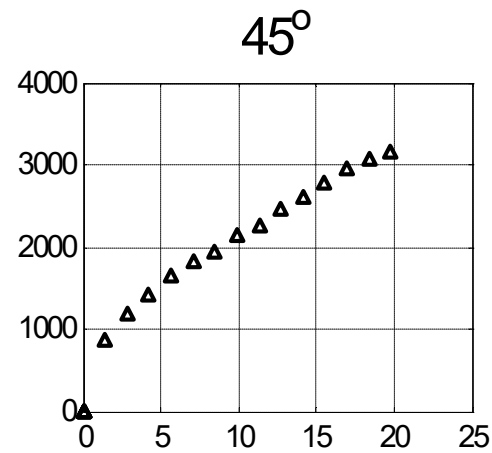
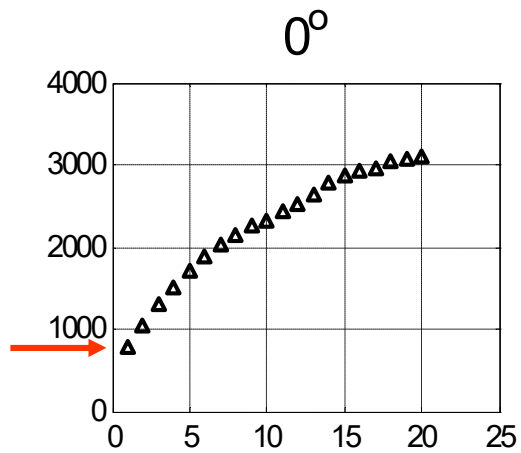
2.5 3 3 2.5 => **var = 0.06** vs 2.25 2.25 2 2.5 => **var = 0.03**

Plus la continuité spatiale est grande plus les teneurs de blocs demeurent variables

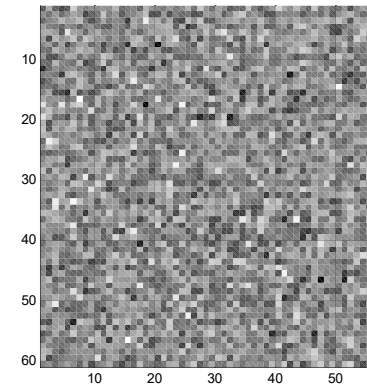
Le variogramme décrit la continuité spatiale du phénomène



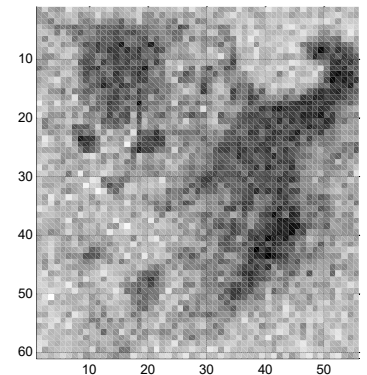




+

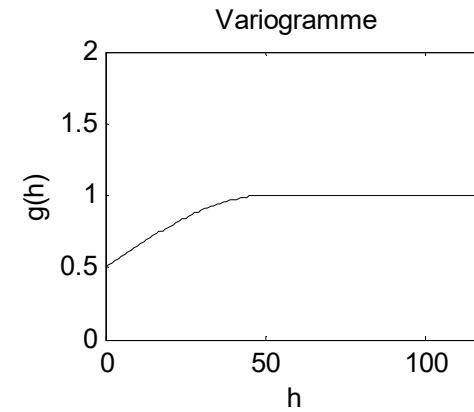
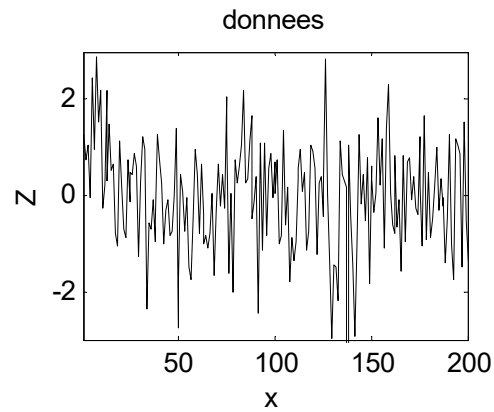
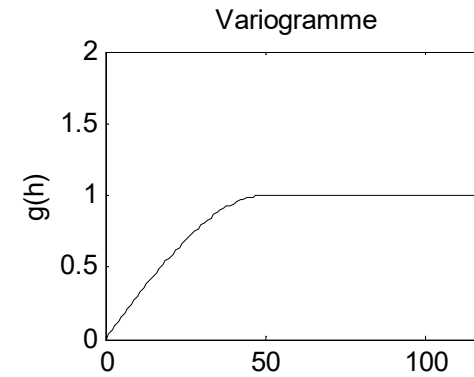
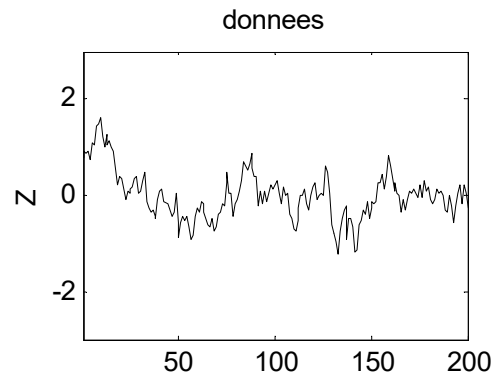
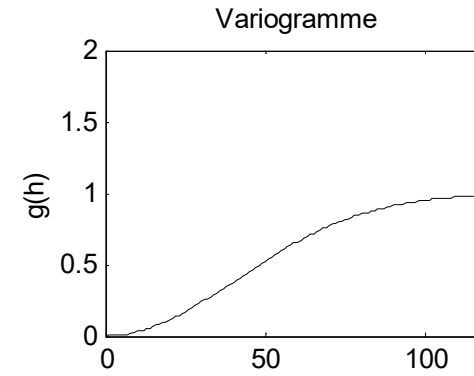
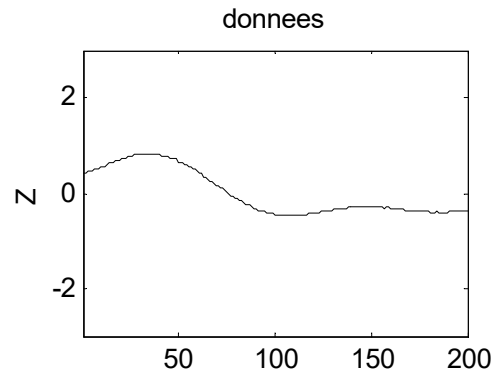


=



Effet pépite causé par le bruit ajouté
 Notez comme la structure sous-jacente
 demeure très visible

3 exemples en 1D

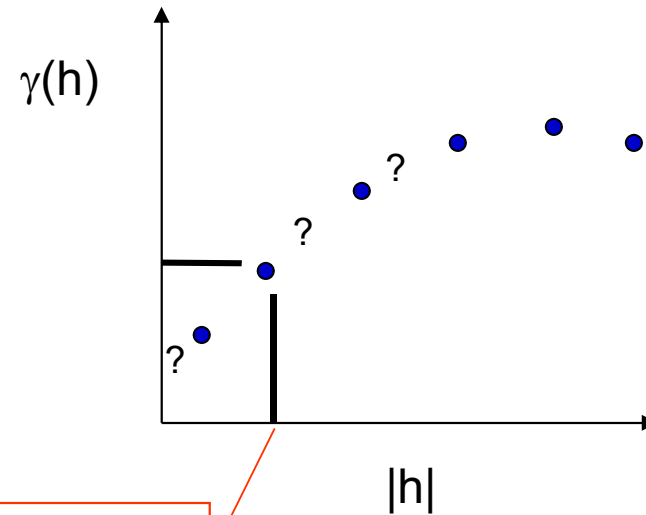


Le variogramme est une statistique d'ordre 2

Ce n'est pas suffisant pour caractériser tous les aspects d'une image ou d'un processus

e.g. on peut créer plusieurs images ayant même « m », même variogramme et présentant pourtant des textures très différentes

Variogramme expérimental

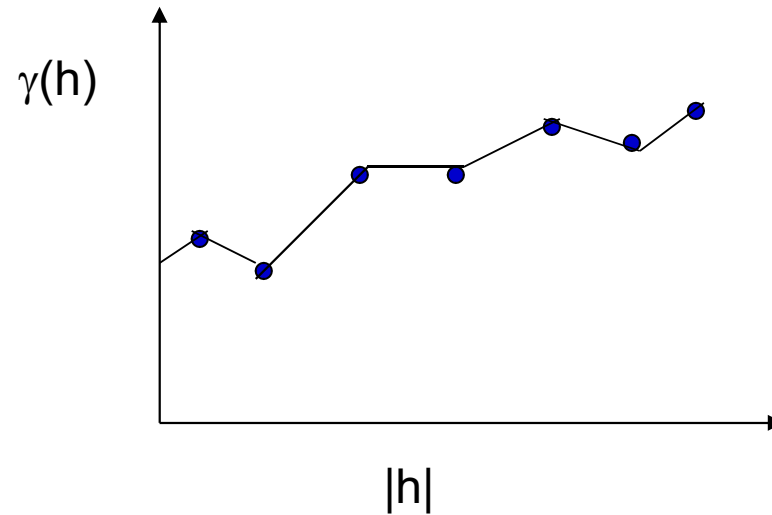


h moyen dans
la classe

Dans les calculs géostat, on doit connaître Cov ou γ pour **tout** « h »

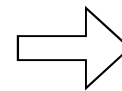


Modèle



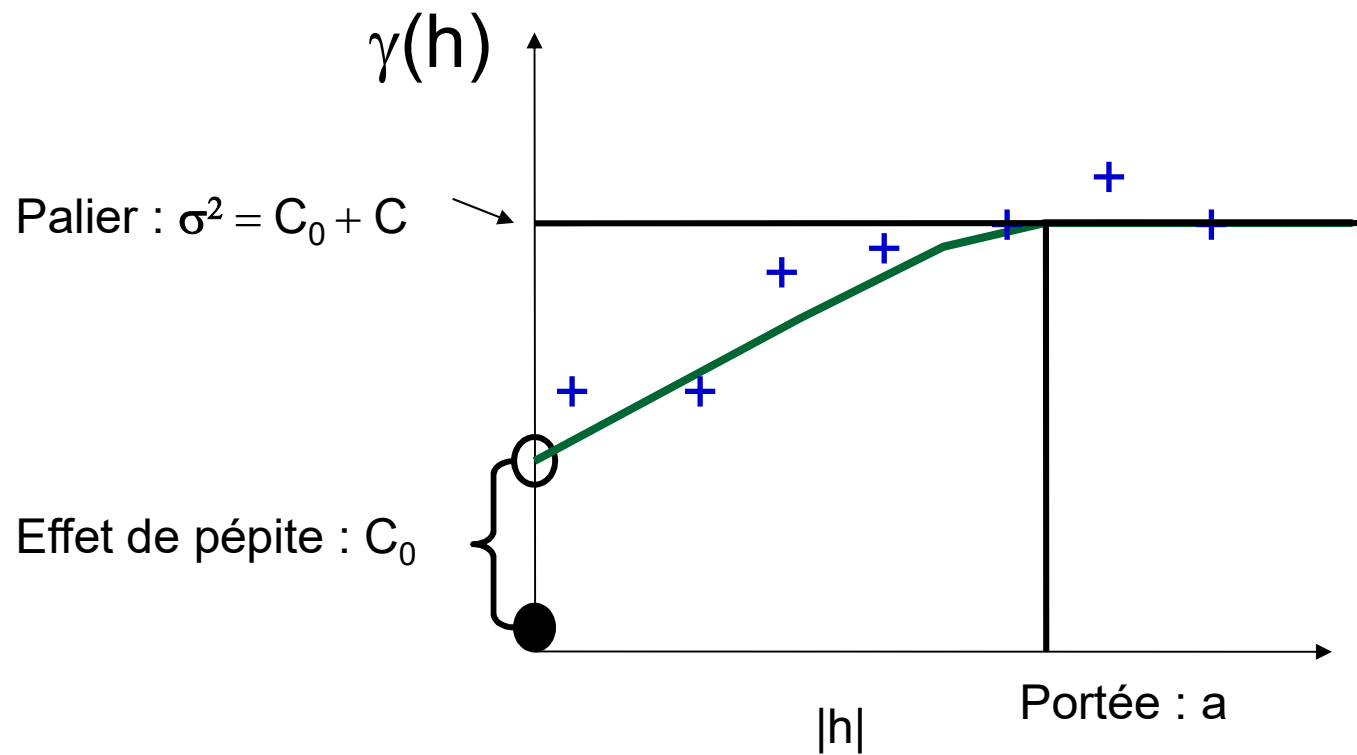
Non, le modèle doit être admissible

Modèle admissible : modèle assurant que toute variance calculée à partir de celui-ci est positive

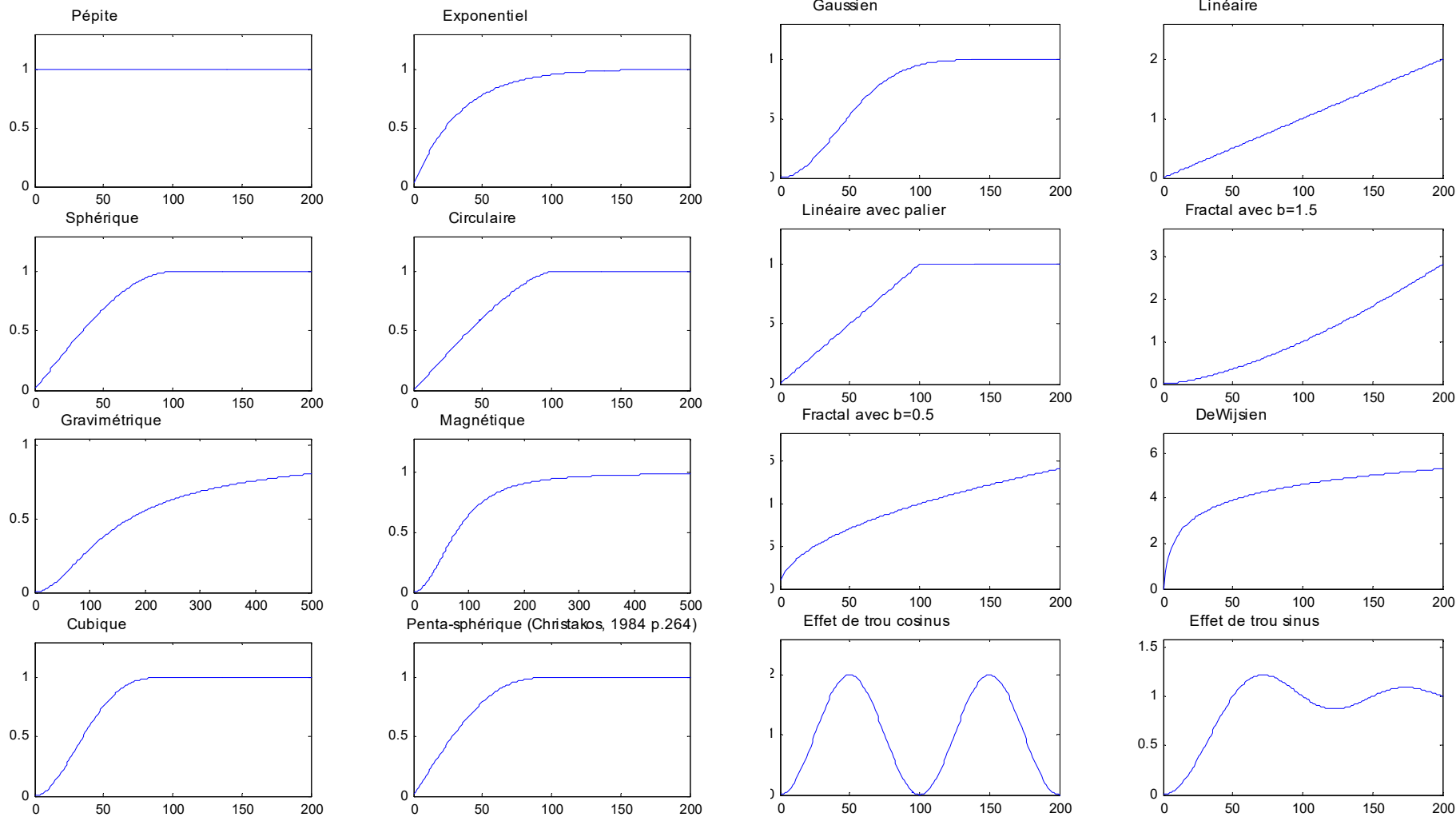


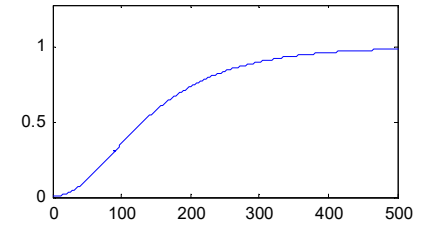
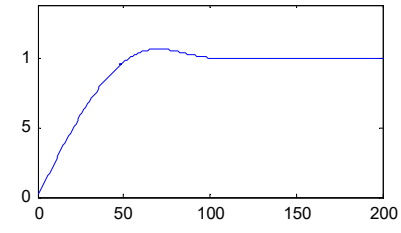
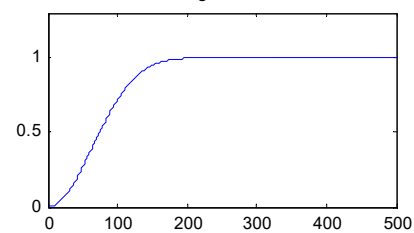
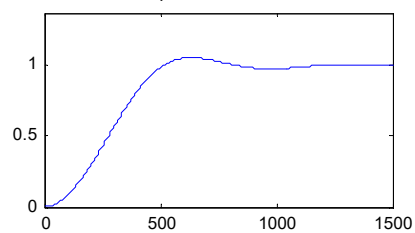
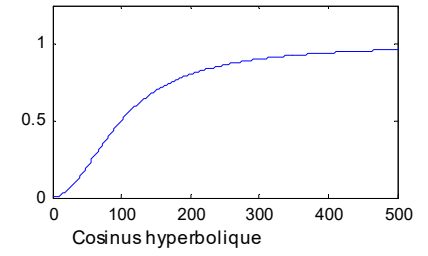
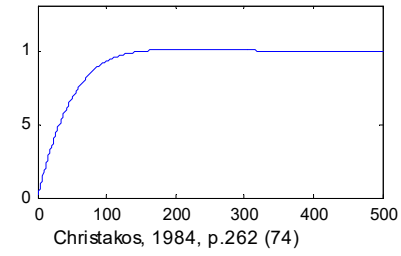
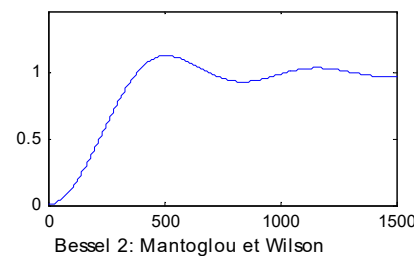
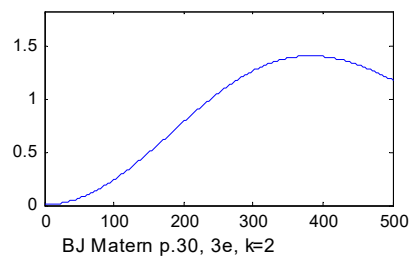
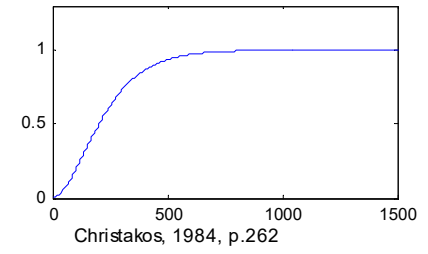
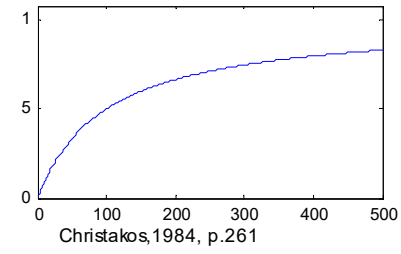
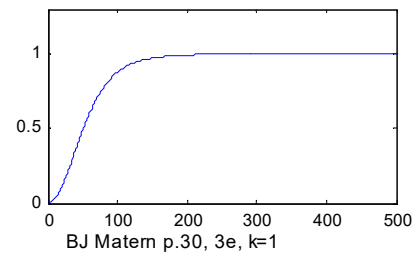
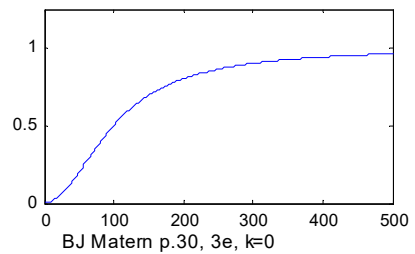
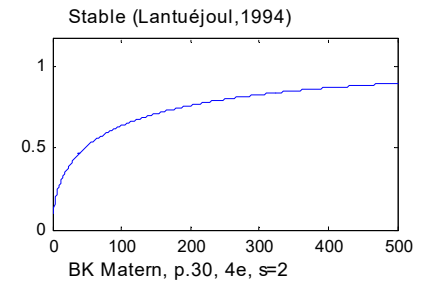
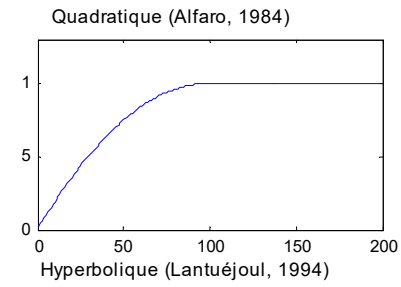
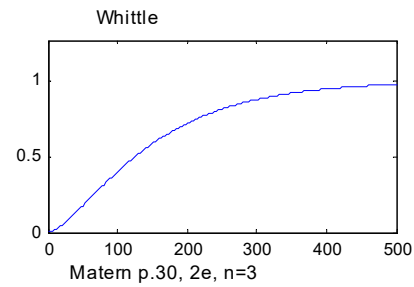
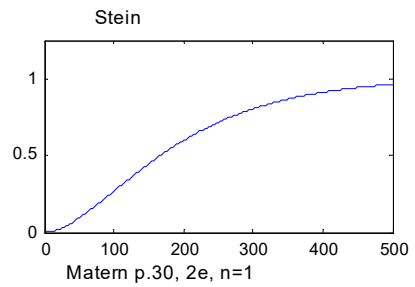
Modèles démontrés admissibles

Généralement,



Exemples de modèle





Toute somme (coefficients positifs) de modèles de variogramme est admissible

Toute somme (coefficients positifs) de modèles de covariance est admissible

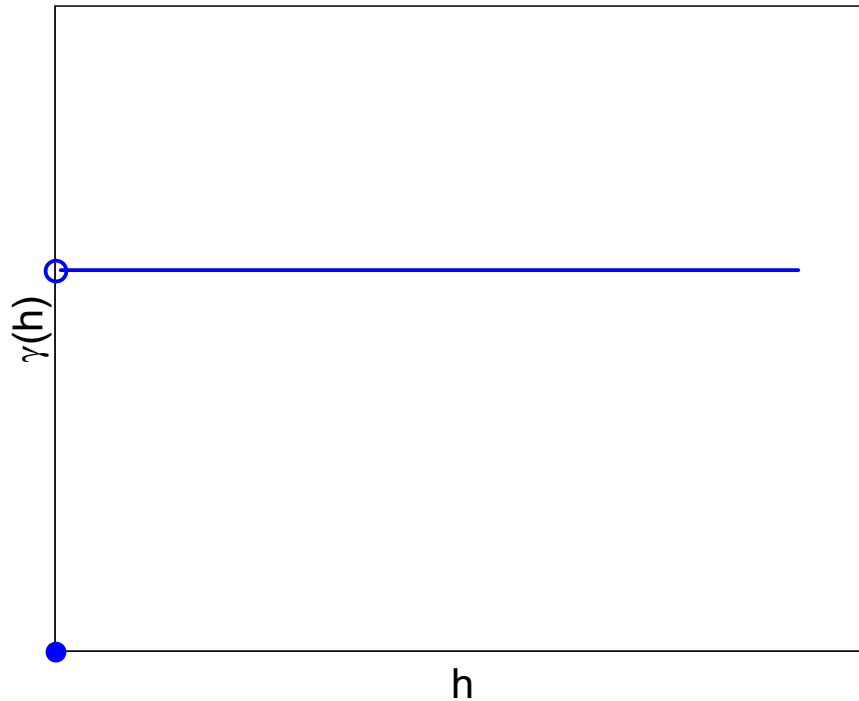
Tout produit (coefficients positifs) de modèles de covariance est admissible

Chaque modèle peut être isotrope ou anisotrope, les directions d'anisotropie peuvent varier d'un modèle à l'autre

Un modèle peut être admissible en 1D et non-admissible en 2D, 3D,....Par contre, s'il est admissible en 3D il l'est aussi en 2D et 1D.

Modèles de base en mine

Effet de pépité

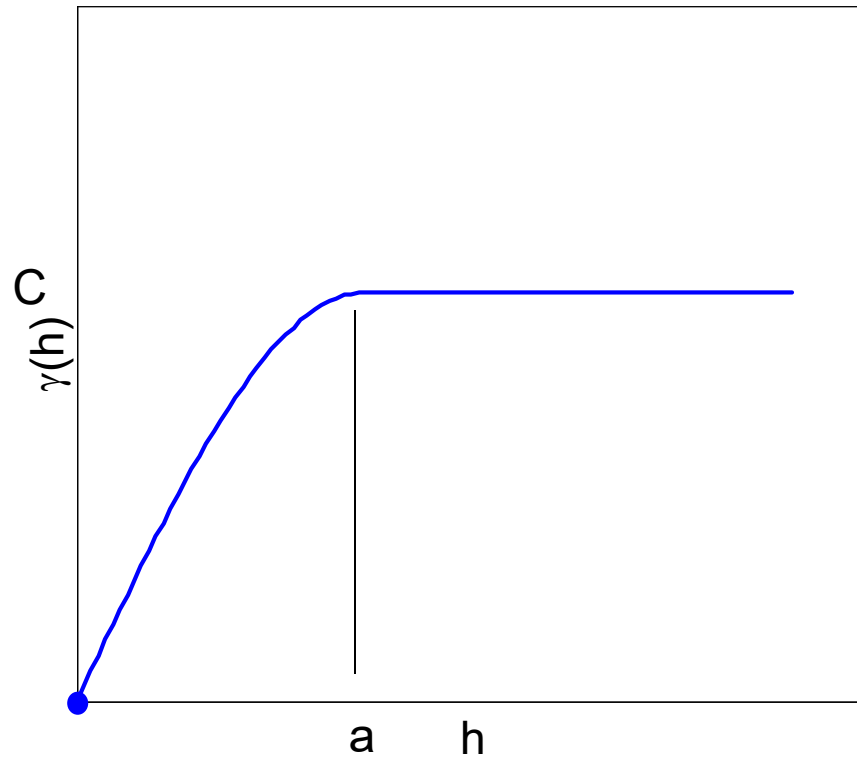


$$\gamma(h) = 0 \quad \text{si } h = 0$$
$$C_0 \quad \text{si } h > 0$$

- Erreurs de mesure
- Erreurs de localisation
- Erreurs d'analyse (Gy)
- Microstructure non-identifiable dû au manque de données

Presque toujours présent mais
rarement seul
Effet de pépité pur =>
estimation impossible

Sphérique



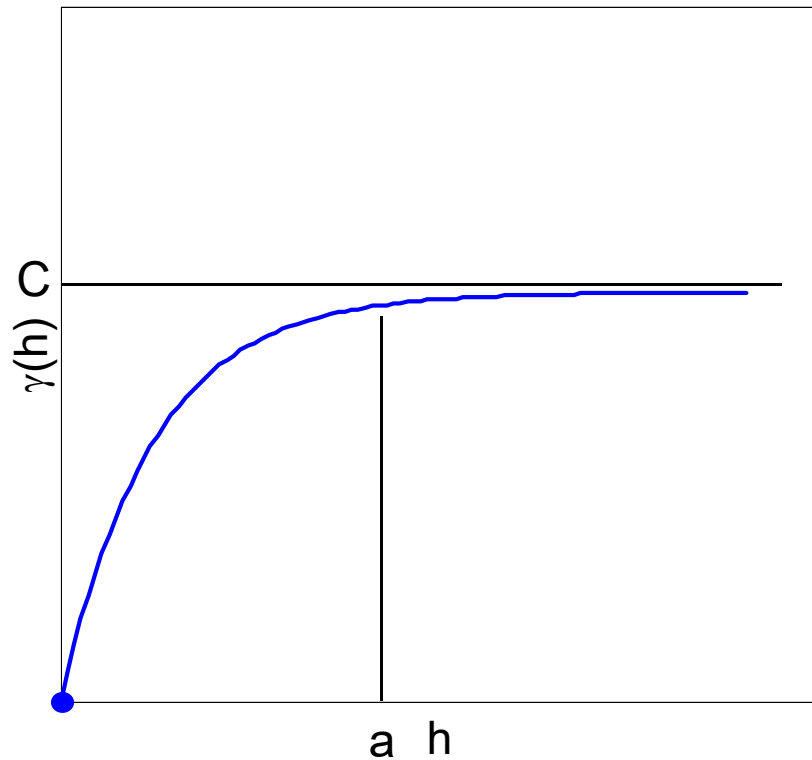
Modèle le + fréquent

e.g. teneur, épaisseur, ...

Combiné avec effet pépité

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h = 0 \\ C \left(1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right) & \text{si } 0 < h < a \\ C & \text{si } h \geq a \end{cases}$$

Exponentiel

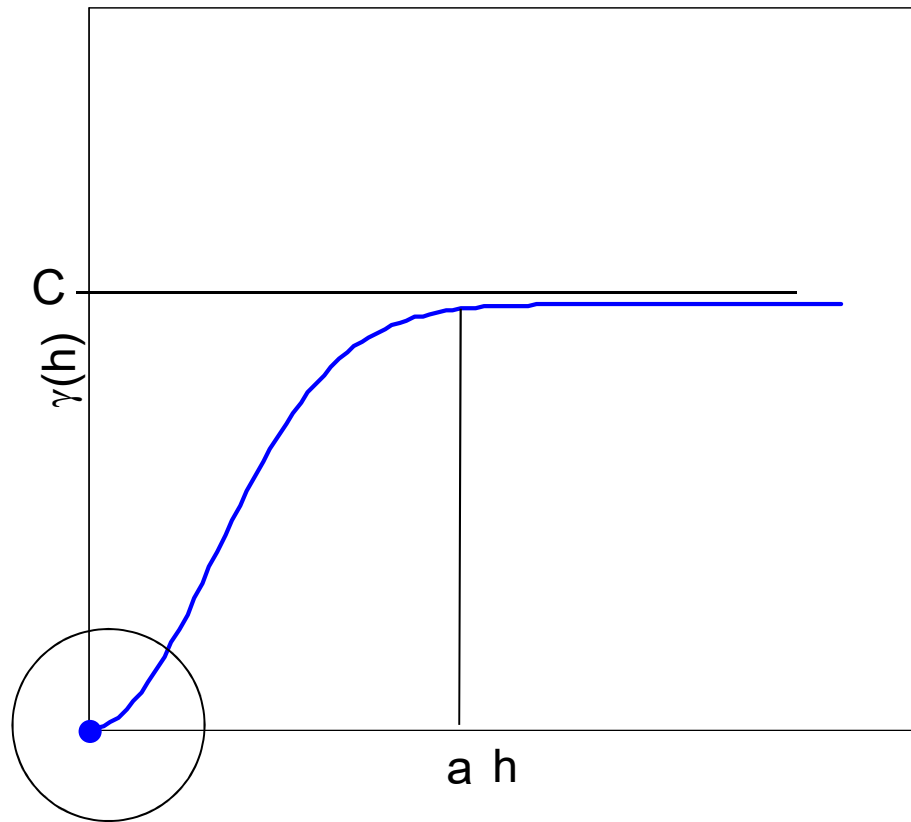


Assez commun

Semblable au sphérique

$$\gamma(h) = C \left(1 - \exp\left(\frac{-|h|}{a'}\right) \right) \text{ ou } C \left(1 - \exp\left(\frac{-3|h|}{a}\right) \right) \left. \begin{array}{l} a: \text{ portée effective } \gamma(h)=0.95 \cdot C \\ a'=a/3 \end{array} \right\}$$

Gaussien

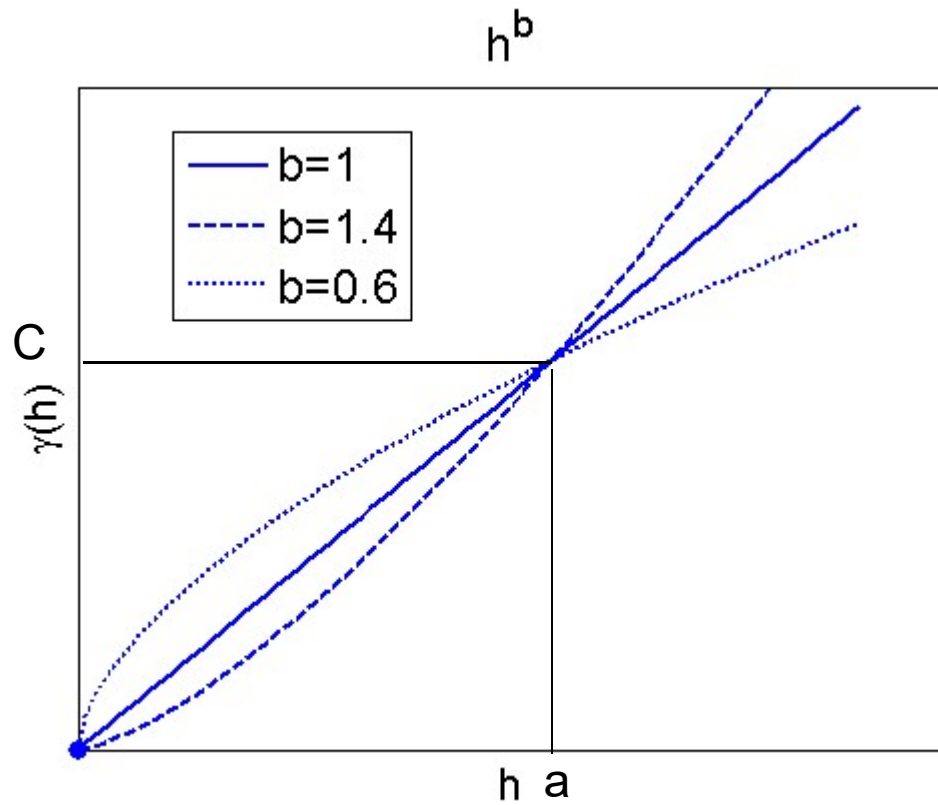


- Peu fréquent en mine
- Variables très continues : e.g. topographie, gravimétrie, magnétisme, épaisseur,...
- Problèmes numériques si absence d'effet de pépite

a: portée effective $\gamma(h)=0.95*C$

$$a'=a/3^{0.5}$$

$$\gamma(h) = C \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{|h|}{a'} \right)^2 \right) \right) \text{ ou } C \left(1 - \exp \left(- 3 \left(\frac{|h|}{a} \right)^2 \right) \right)$$



- Modèles sans palier
- Moyenne, variance et covariance non définies

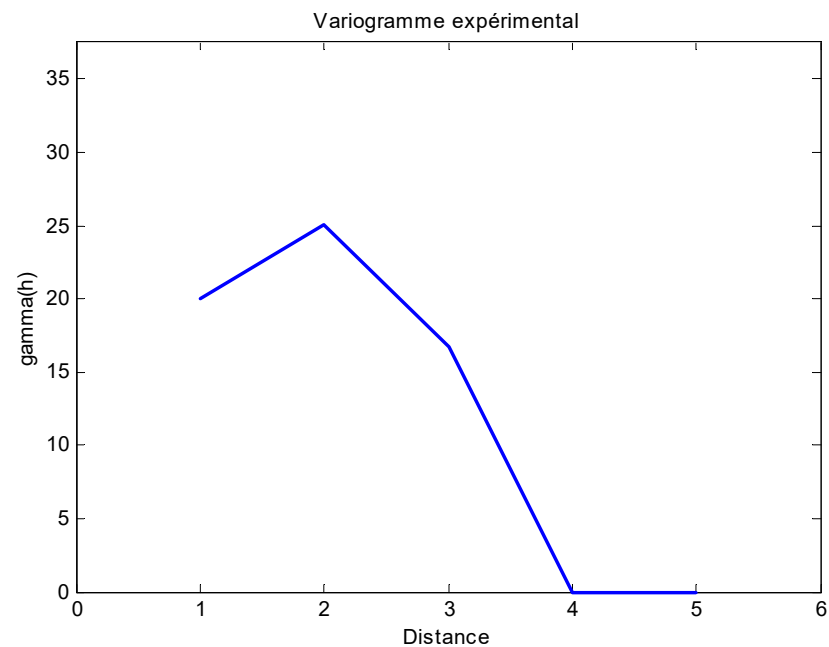
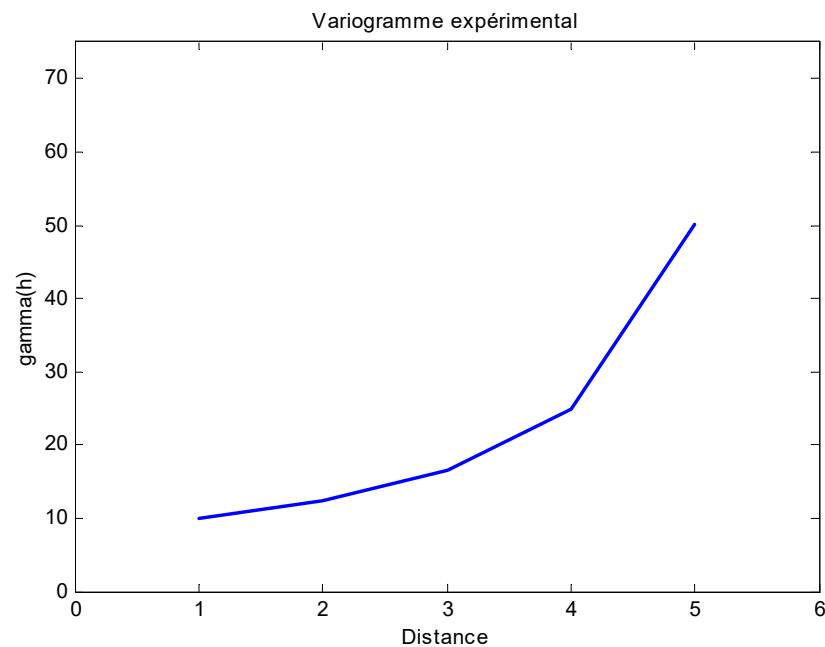
$$\gamma(h) = C \left(\frac{|h|}{a} \right)^b \quad |h| > 0, \quad 0 \leq b < 2$$

Problèmes Problèmes Problèmes...

Données extrêmes influencent beaucoup le variogramme

10	0	0	0	0	0
----	---	---	---	---	---

0	0	10	0	0	0
---	---	----	---	---	---

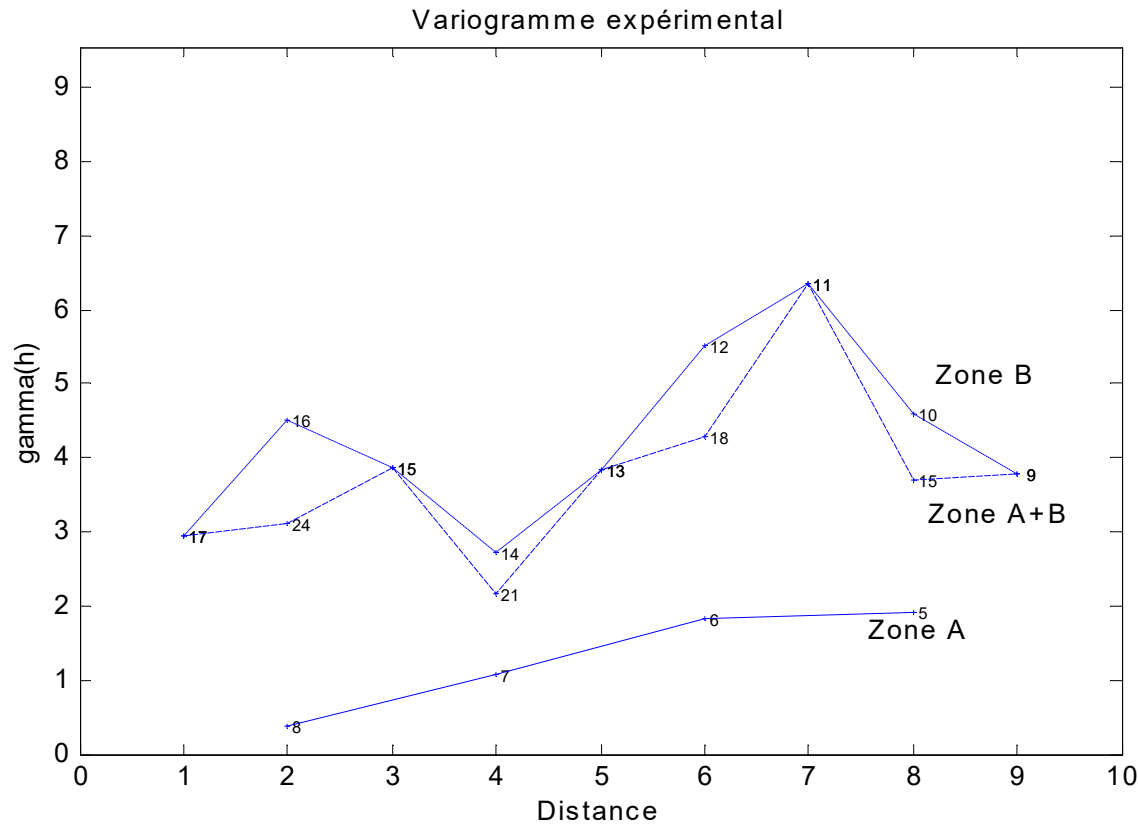


Zone A: (pas de 2m)

4	4	5	6	6	7	6	5	4
---	---	---	---	---	---	---	---	---

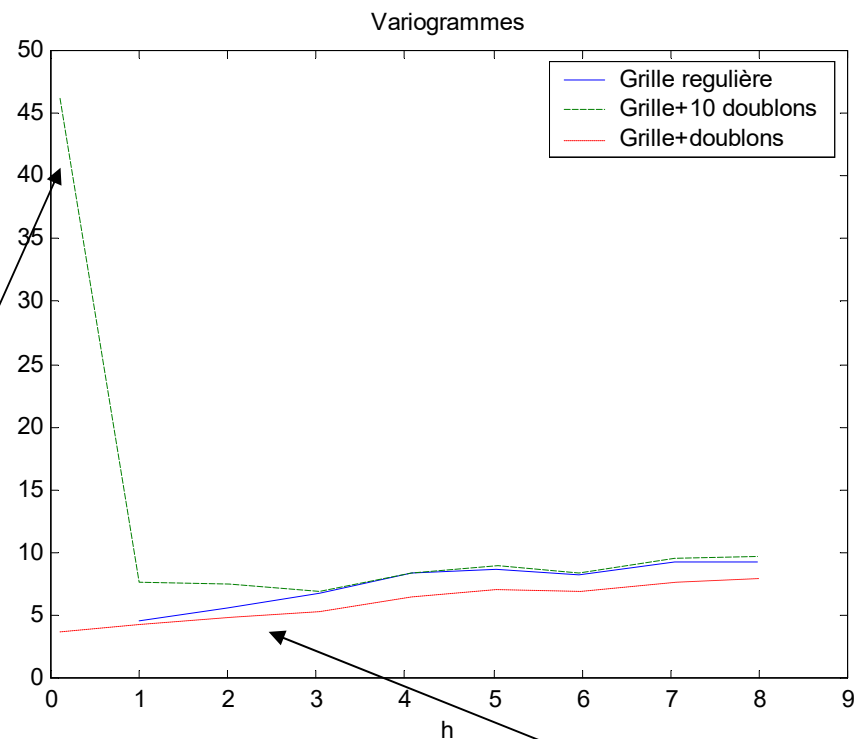
Zone B: (pas de 1m), zone +variable

8	6	8	10	12	8	10	12	14	10	8	6	12	8	10	10	8	10
---	---	---	----	----	---	----	----	----	----	---	---	----	---	----	----	---	----



-Étudier les zones séparément ?
-Sous-échantillonner la zone B

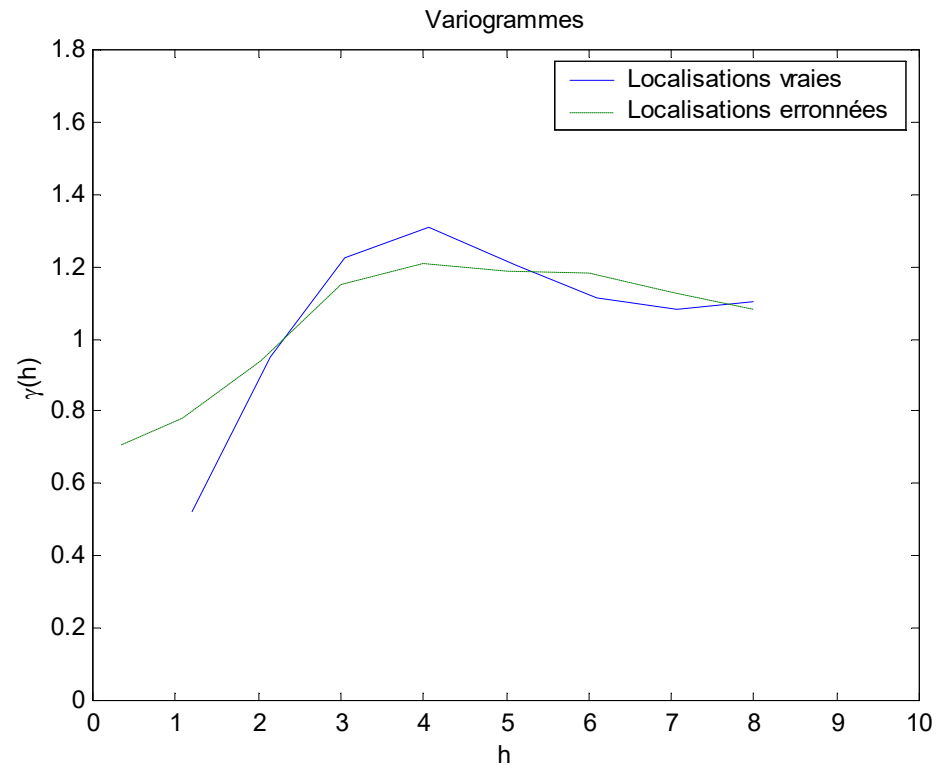
Pratique de « confirmer » préférentiellement les teneurs riches



A pour effet de fournir beaucoup de paires à petite distance et montrant de très fortes variations

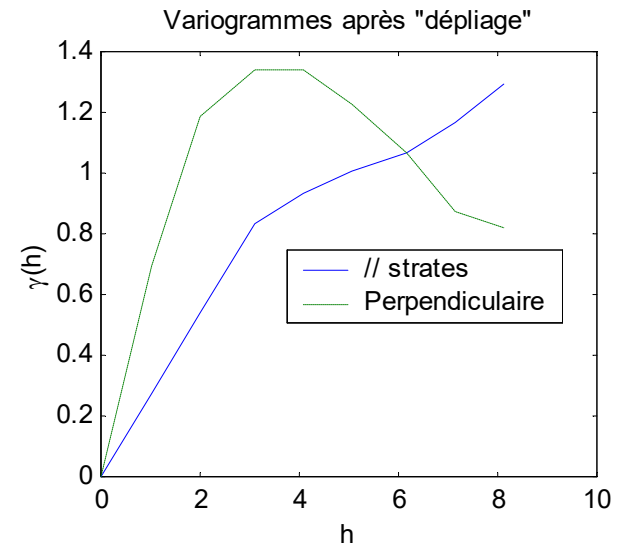
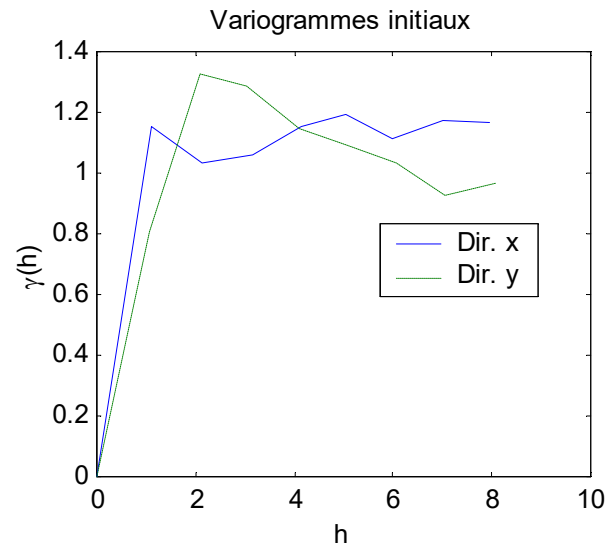
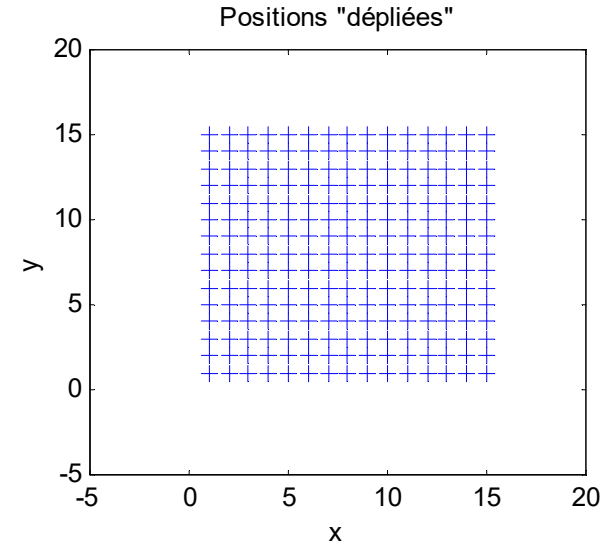
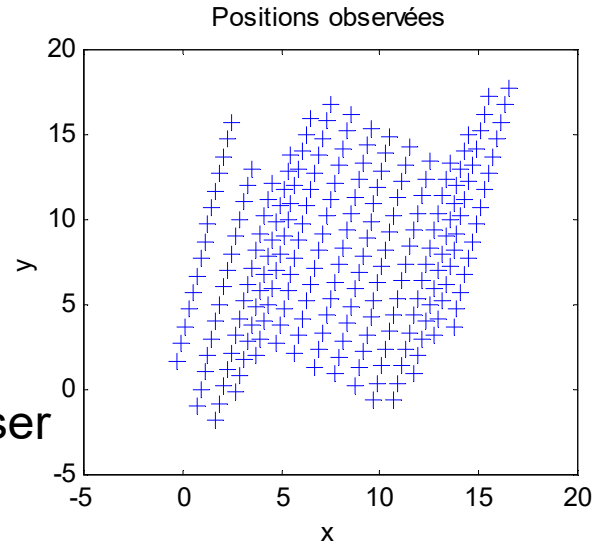
Si on rééchantillonne chaque point, pas de problème

Erreurs de localisation



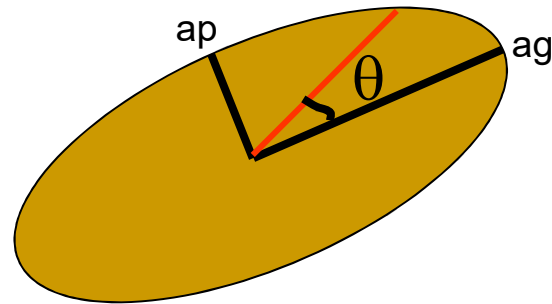
La géologie ne collabore pas toujours

Certains logiciels permettent de passer à un système de coordonnées géologiques

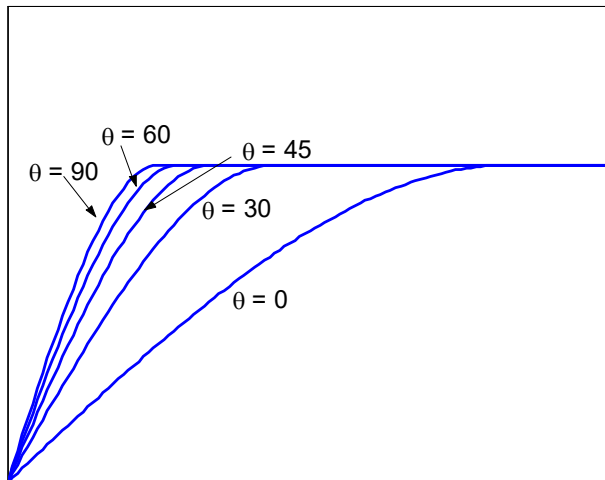


Anisotropies

1- Géométrie : les portées décrivent une ellipse

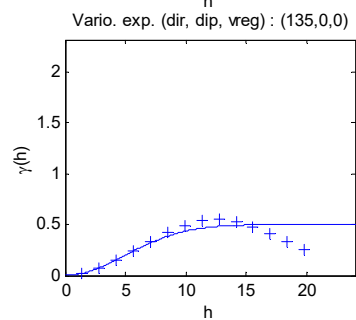
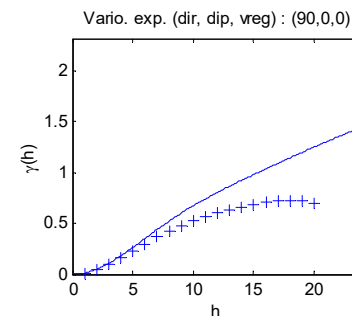
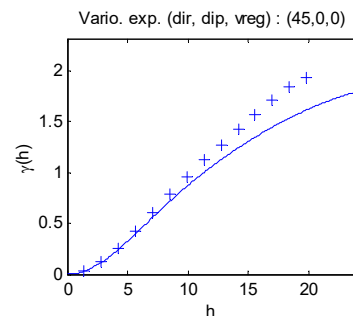
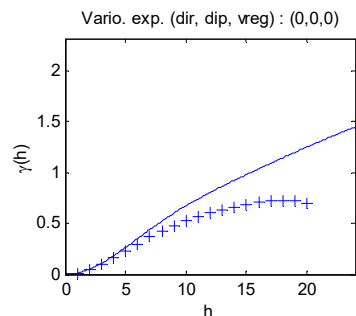


$$a_{\theta} = \frac{a_g a_p}{\left\{ a_p^2 \cos^2 \theta + a_g^2 \sin^2 \theta \right\}^{1/2}}$$



2- zonale : toute anisotropie qui n'est pas géométrique

=> somme de composantes isotropes et avec anisotropies géométriques



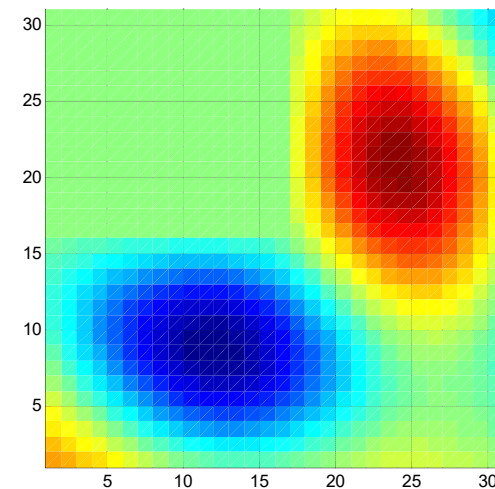
Gaussien isotrope $a=7$, $C=0.5$

+

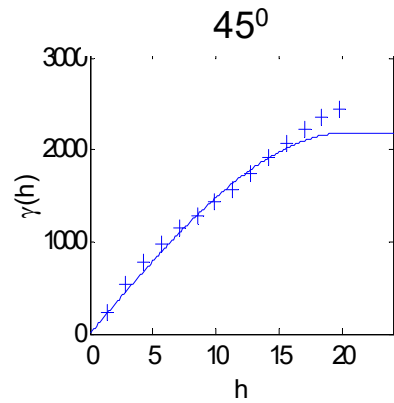
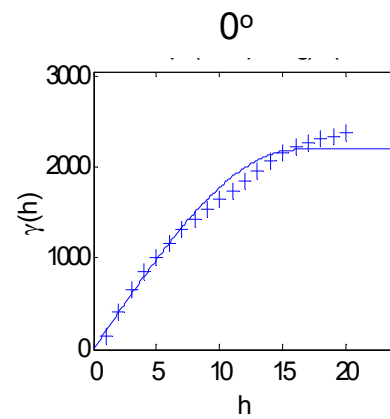
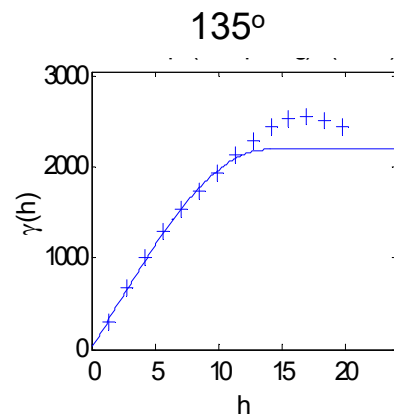
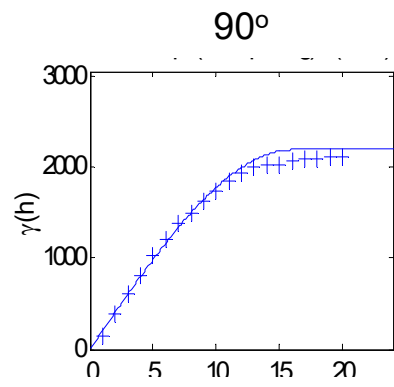
Gaussien aniso géom. $C=1.5$

$a_{45}=17$

$a_{135}=\infty$

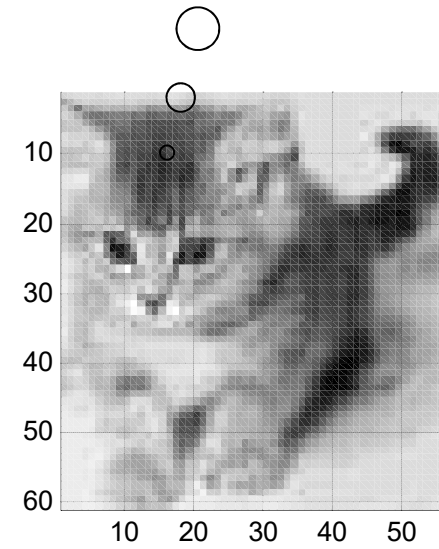


Ajustement assez bon pour 0-5 pixels dans toutes les directions



Modèle sphérique avec
anisotropie géométrique
 $a(45)=20.4$, $a(135)=13.8$

Oh non, je ne
vais pas
encore me
faire
variographier!



Stratégie de modélisation

- Définition minutieuse du domaine
- Examen des données, données extrêmes ?
- Au besoin sous-échantillonnage des données pour éviter de sur-représenter des zones particulières
- Variogramme omnidirectionnel => modèle isotrope candidat
- Déterminer directions géologiques principales
- Calculer variogrammes directionnels (au moins 4 directions) *attention aux paramètres de calculs (classes de distance et tolérance)*
- Comparer variogrammes directionnels au modèle isotrope candidat
 - acceptable => terminé
 - Inacceptable => ajuster un modèle anisotrope (géométrique)
 - anisotrope (géométrique) acceptable => terminé
 - Inacceptable => anisotropie zonale ?

Dans tous les cas, il importe surtout d'ajuster les premiers points du variogramme
Éviter de « surajuster » les données

Remarques concernant le calcul des variogrammes

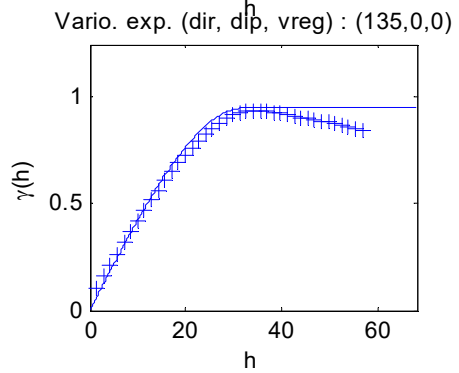
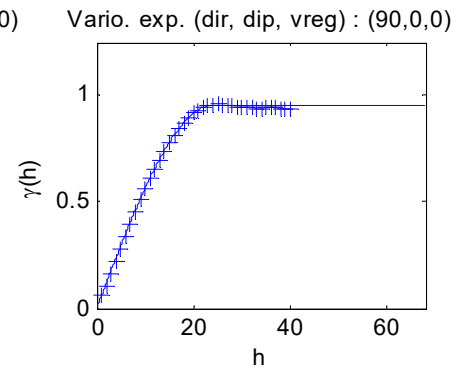
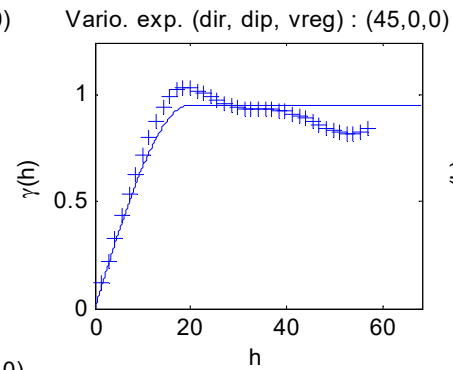
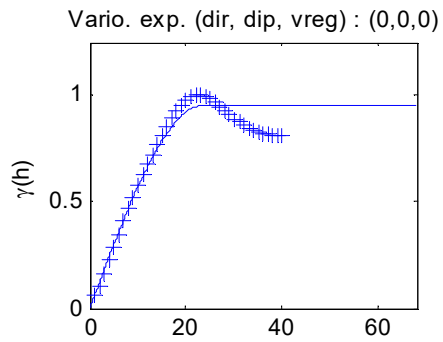
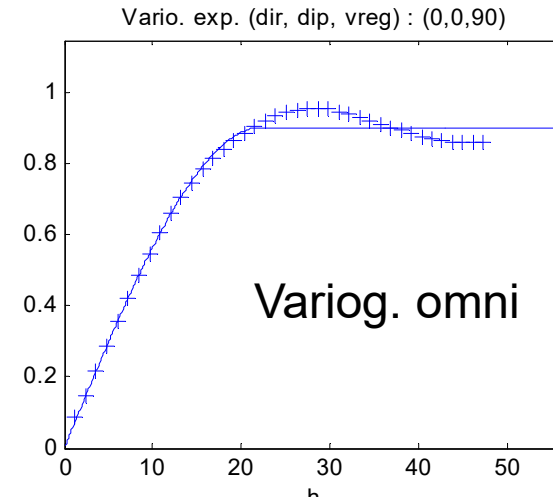
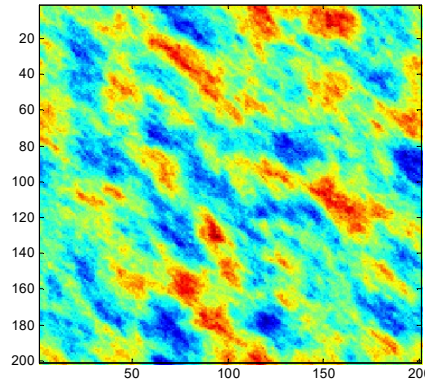
Objectifs:

- au moins 30 paires pour la plupart des points du variogramme
- 4-6 points avant le palier pour pouvoir ajuster modèle
- $h < h_{\max}/2$



- Doit avoir un minimum de données
 - >30 pour variogramme omnidirectionnel
 - >60 pour variogrammes directionnels
- Influence le choix de largeur des classes

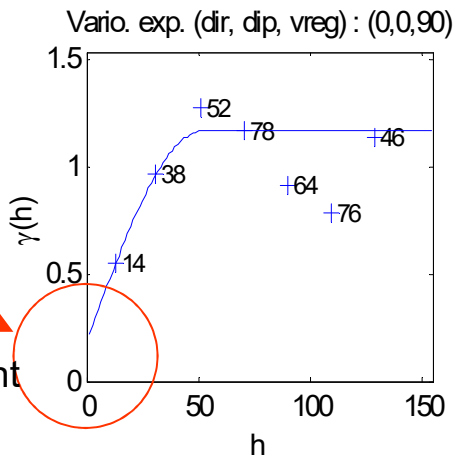
Exemple



Variog. Directionnels

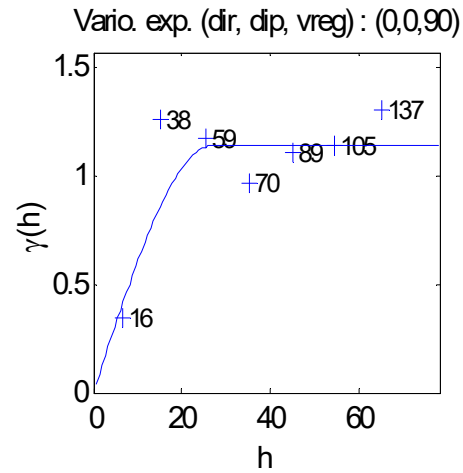
Modèle sphérique $a_{45}=20$, $a_{135}=35$

N=30

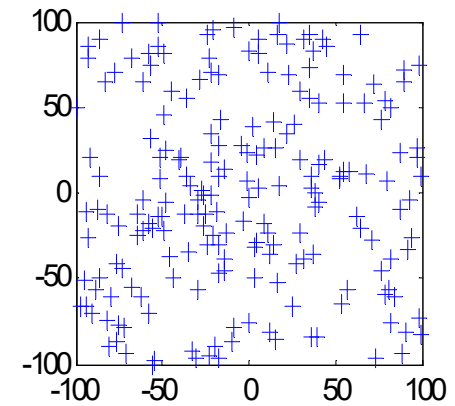
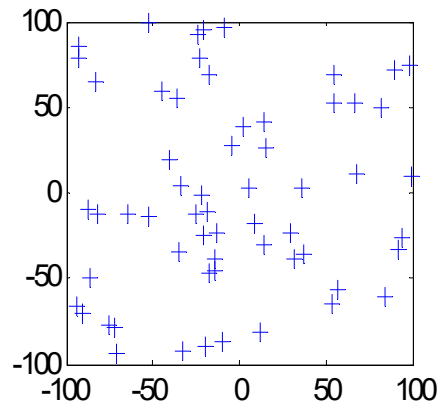
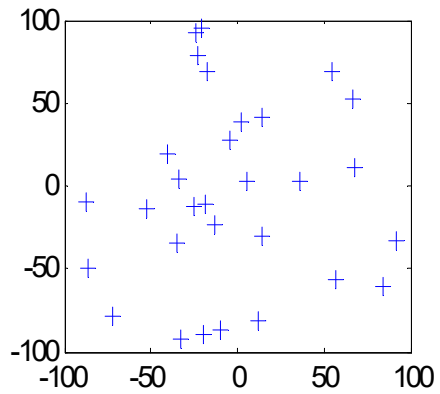
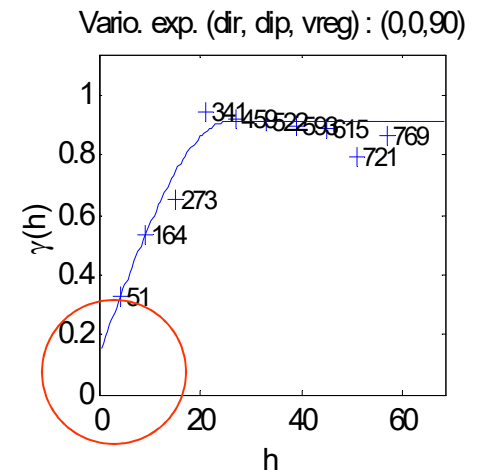


Effet de pépité apparent

N=60

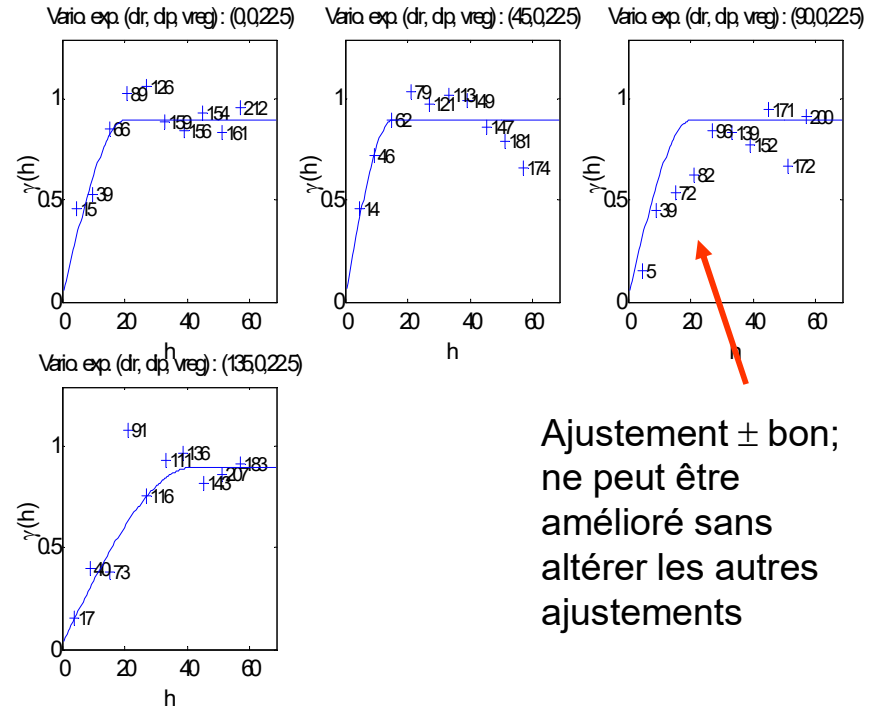
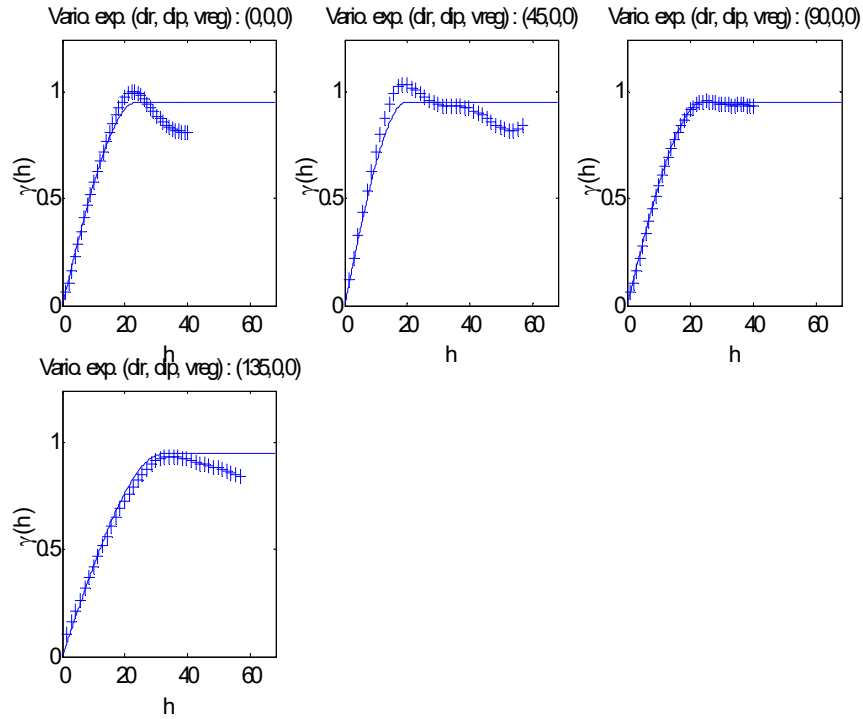


N=200



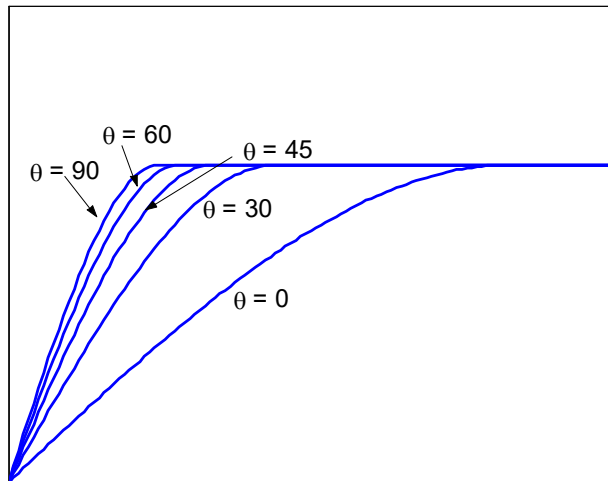
N=40000

N=200

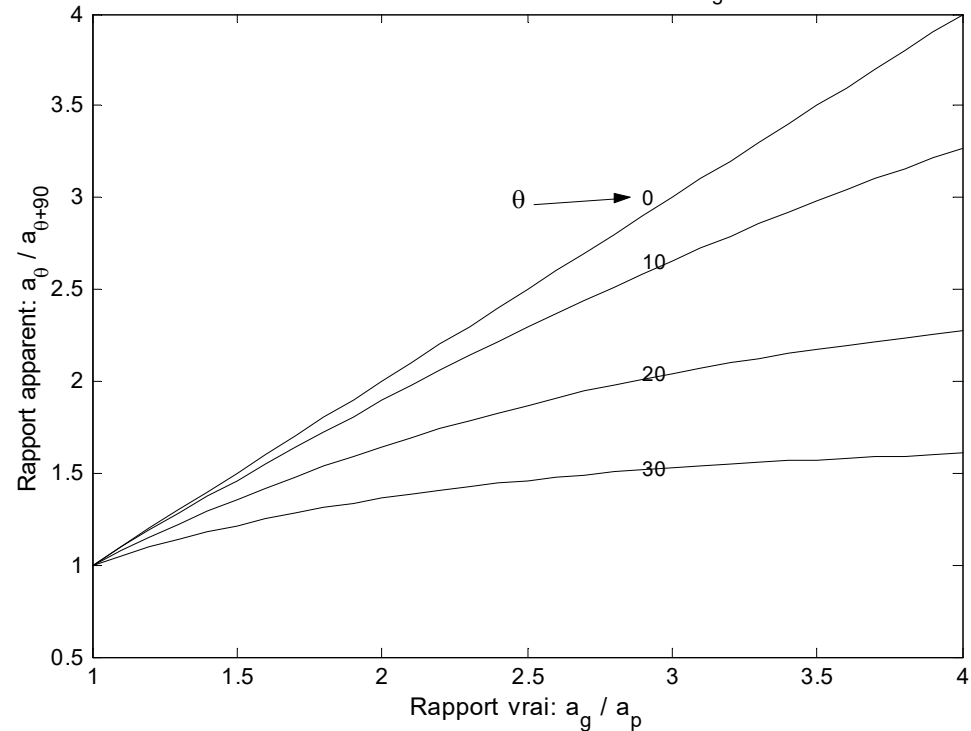


Ajustement ± bon;
ne peut être
amélioré sans
altérer les autres
ajustements

Pour détecter une anisotropie, il faut pouvoir calculer le variogramme dans la direction de meilleure continuité. Celle-ci n'est pas toujours connue.



Rapport apparent en fonction de la direction (θ : angle avec a_g) et du rapport d'anisotropie



Tout écart => sous-
estimation de l'anisotropie

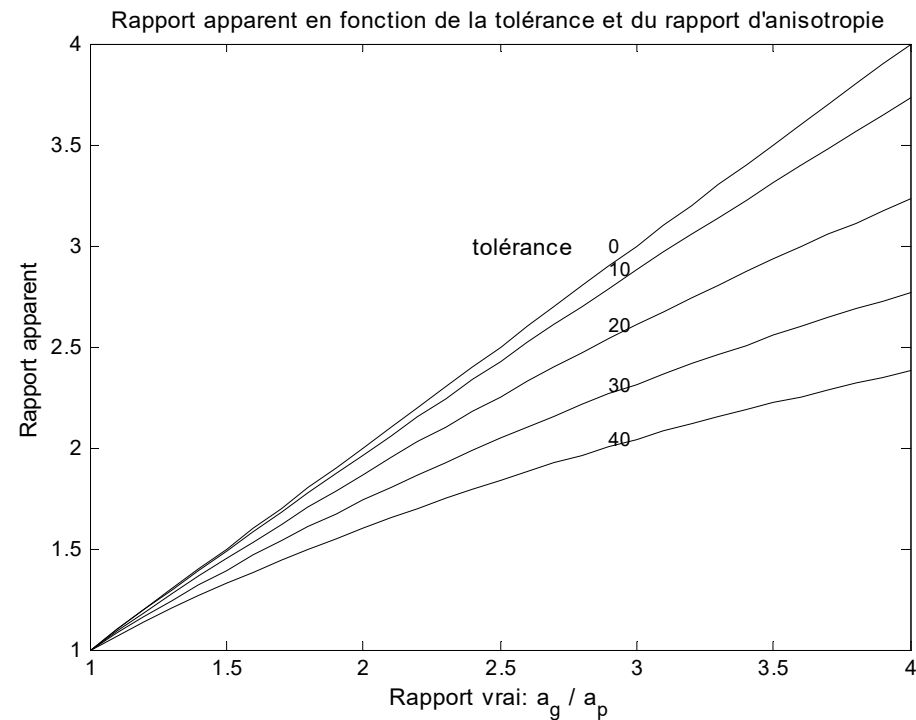
Faible anisotropie peut
passer inaperçue

Tolérance angulaire doit être maintenue faible <22.5, idéalement 0-10.

Tolérance trop grande

=> variogrammes peu directionnels

=> sous-estimation de l'anisotropie



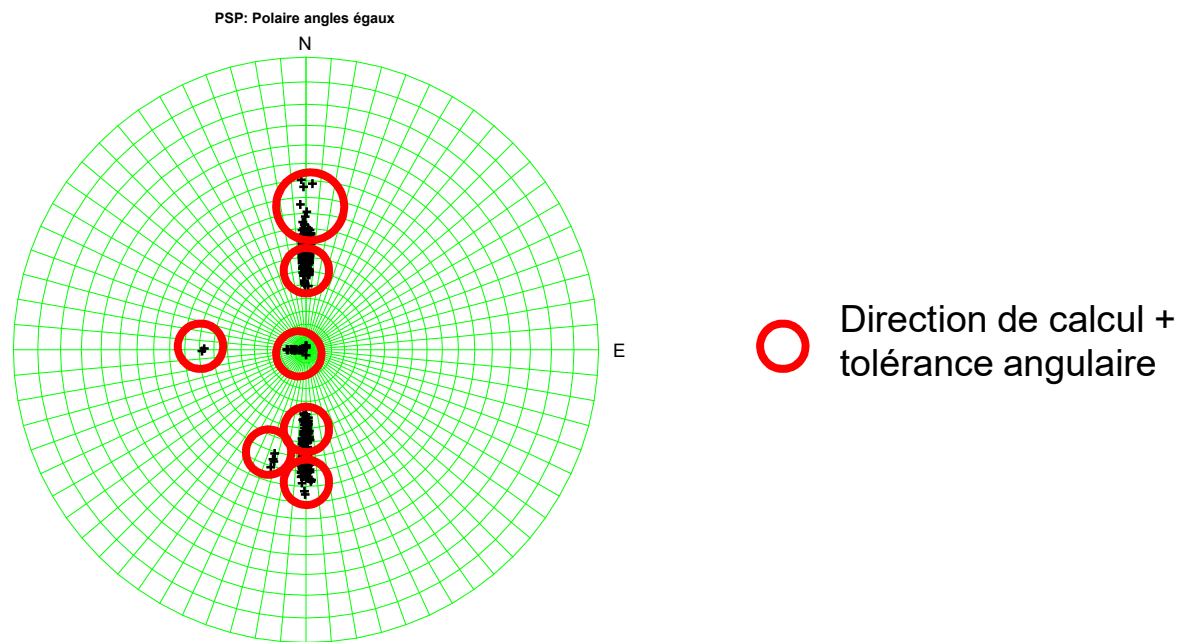
En 3D

Meilleures directions pour le calcul => directions des forages

- Permet de bien estimer le variogramme à petite distance
- Erreurs de localisation et de direction ont moins d'impacts sur le variogramme car les distances inter-carottes demeurent inchangées

Hic: - Nécessite des forages ayant différentes directions pour pouvoir modéliser l'anisotropie

Utile de représenter les mesures de direction des forages sur un stéréonet



Autres outils utiles

- Validation croisée de modèles candidats (krigeage); e.g. Tester un modèle isotrope vs anisotrope; tester un effet de pépité de 10% vs 30%;...
- Modèle permet de prédire les variances des composites de tailles différentes ?
- Modèle permet de prédire les variances des valeurs krigées ?
- Variogramme des log(teneurs) pour identifier les anisotropies possibles, la (les) portée, l'importance approximative de l'effet de pépité
- Variogramme d'une transformation des teneurs (e.g. rang), même chose que les log