

# GLQ3401 : Troisième partie

## Cours 12 : Simulations de faciès



**POLYTECHNIQUE  
MONTREAL**

UNIVERSITÉ  
D'INGÉNIERIE

# Plan du cours

1. Mise en contexte
2. Simulation de faciès
  - I. Simulation d'indicatrices
  - II. Simulation gaussienne tronquée
  - III. Simulations plurigaussiennes
3. Conditionnement aux faciès observés
  - I. Échantillonneur de Gibbs
  - II. Calage par S-STBM
4. Méthode multipoint

# Objectifs

- Décrire le fonctionnement de méthodes de simulation de faciès (simulation d'indicateur, gaussien tronqué, plurigaussien tronqué, Gibbs, multipoints);
- Décrire les avantages et inconvénients et limitations de chaque méthode;
- Associer les covariances d'indicateurs à des drapeaux de codage;
- Associer des images simulées à des drapeaux de codage;
- Décrire la méthode de Gibbs pour obtenir des réalisations conditionnelles aux faciès observés.

# Objectifs

- Décrire le fonctionnement de méthodes de simulation de faciès (simulation d'indicateur, gaussien tronqué, plurigaussien tronqué, Gibbs, multipoints);
- Décrire les avantages et inconvénients et limitations de chaque méthode;
- Associer les covariances d'indicateurs à des drapeaux de codage;
- Associer des images simulées à des drapeaux de codage;
- Décrire la méthode de Gibbs pour obtenir des réalisations conditionnelles aux faciès observés.

# 1. Mise en contexte

## Objectifs de la simulation de faciès :

Quantifier l'incertitude et les risques géologiques du réservoir pétrolier ou du gisement

- Fournir aux ingénieurs pétroliers et miniers des représentations de la distribution spatiale de l'hétérogénéité du réservoir;
- Réaliser des simulations d'écoulement ( ou de récupération) sur les simulations ( utilisant les propriétés du modèle) pour optimiser le développement du champ.

# 1. Mise en contexte

## **Contexte**

On cherche à modéliser la géologie (faciès) des réservoirs pétroliers et des gisements. ( Aussi applicable à des modèles hydrogéologiques)

### Réservoir pétrolier :

Construire un modèle maillé du réservoir contenant ses propriétés pétrophysiques (la porosité, les perméabilités, la pression capillaire...) afin de simuler son comportement lors de la production.

### Gisement :

Construire un modèle maillé du gisement contenant les propriétés minéralogiques, l'intensité des fracturations, la génération d'acide, la densité de la roche afin de simuler les comportements géologiques, géotechniques et géométallurgiques.



# 1. Mise en contexte

**Objectifs de la simulation de faciès :**

Étape de développement :

- Construire un modèle des propriétés géologiques sur une grille très fine (quasi ponctuel);
- Estimer les réserves et quantifier leur incertitude;
- Définir des scénarios pour le processus de récupération;
- Optimiser la localisation des puits / forages.

# 1. Mise en contexte

## Objectifs de la simulation de faciès :

### Début d'exploitation :

- Continuer à intégrer les informations géologiques disponibles (levés sismiques, interprétation des forages);
- Déterminer la connectivité du réservoir ou la continuité spatiale du gisement;
- Concorder la taille de la grille avec le processus de récupération choisi;
- Optimiser la localisation des puits / forages.



# 1. Mise en contexte

## Objectifs de la simulation de faciès :

### Conception finale :

- Étendre le modèle des propriétés géologiques sur grille fine vers une grille grossière pour le simulateur d'écoulement ;
- Assure la cohérence de la simulation d'un point de vue géologique;
- Rendre le processus de récupération plus efficace;
- Ajustement du modèle aux données de production (Calage, *history matching*) ;
- Optimiser les forages pour géométrie complexe

## 2. Simulations de faciès

### Méthodes possibles :

- I. Simulation séquentielle d'indicatrices } Basé sur la SGS
- II. Simulation gaussienne tronquée } Basé sur la
- III. Simulations plurigaussiennes } troncation de
- IV. Échantillonneur de Gibbs } champs gaussiens
- V. Calage des faciès observés } Basé sur le
- VI. Méthode multipoint } conditionnement
- VI. Méthode multipoint } aux faciès observés
- VI. Méthode multipoint } Inférer les propriétés d'une
- VI. Méthode multipoint } image d'entraînement aux
- VI. Méthode multipoint } simulations<sup>23</sup>

## 2. Simulations de faciès

# I. Simulation séquentielle d'indicatrices



## 2.1. Simulation séquentielle d'indicateur

### Algorithme :

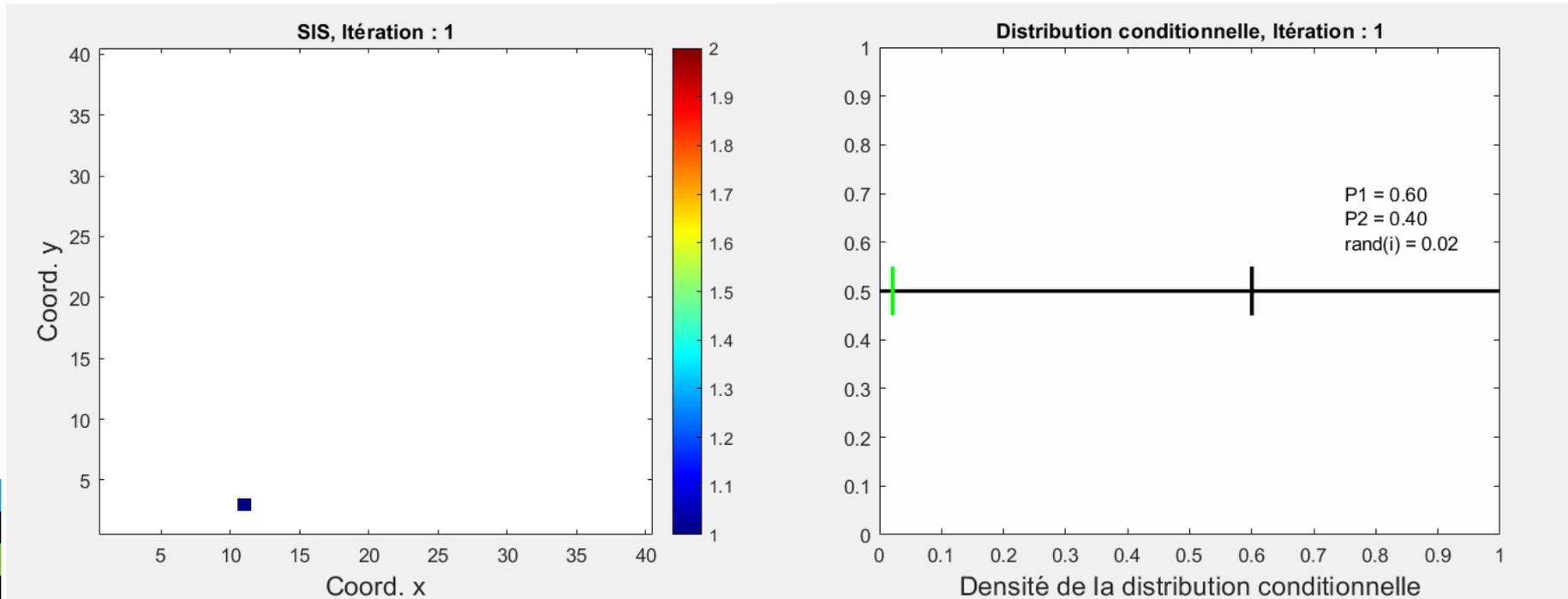
Soit  $Z(x)$  un champ de  $k$  faciès et soit  $Z(x_i), i = 1, \dots, N, N$  faciès observés :

On cherche à simuler  $Z(x_j)$  en  $n$  emplacements  $x_j, j = 1, \dots, n$ , conditionnellement à  $Z(x_i), i = 1, \dots, N$

- a) Coder chaque faciès  $k$  par une indicatrice différente ;
- b) Choisir un point  $x_j$  aléatoirement et kriger les  $k$  faciès en ce point conditionnellement aux données déjà simulées et observées  $\rightarrow p_i, i = 1, \dots, k$ ;
- c) Normaliser les probabilités  $p_i$  (t.q.  $\sum_{i=1}^k p_i = 1$  et  $p_i \geq 0, \forall i$ );
- d) Tirer une valeur aléatoire de la loi  $U(0,1)$  ce qui détermine le faciès au point  $x_j$ ;
- e) Introduire le point  $x_j$  aux données simulées et refaire le processus pour tous les points  $x_j$  restants (retour à l'étape b).

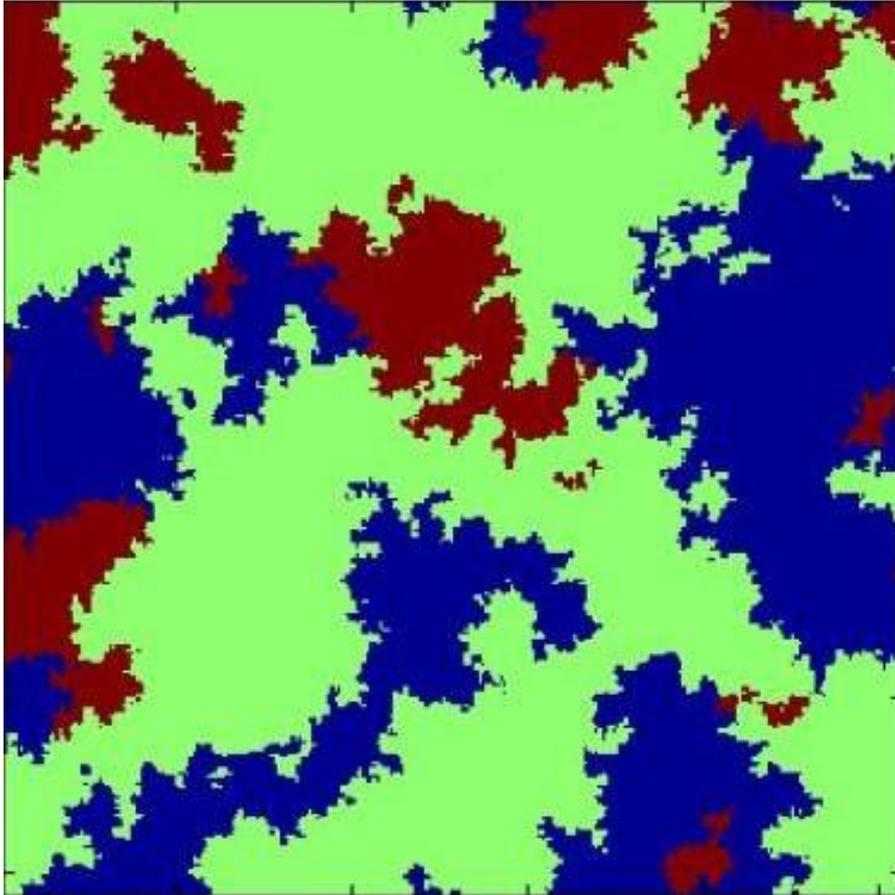
## 2.1. Simulation séquentielle d'indicateur

**Animation** : simulation d'un champ 40x40 avec un modèle sphérique isotrope ( $a=10$ ) pour les deux variogrammes d'indicateurs. Les proportions sont 0.6 pour le faciès 1 et 0.4 pour le faciès 2.



## 2.1. Simulation séquentielle d'indicateur

Caractéristiques :



**Vos observations ?**

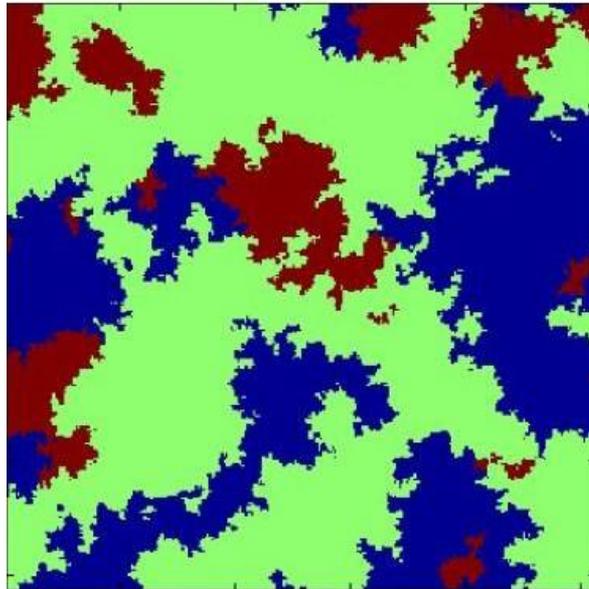
simulation avec  $p_1 = \frac{1}{3}$ ,  $p_2 = \frac{1}{2}$  et  $p_3 = \frac{1}{6}$ ,  
variog. sphérique avec  $\alpha = 50$

Bleu :  $p_1$ ; vert :  $p_2$  ; Brun :  $p_3$

## 2.1. Simulation séquentielle d'indicateur

### Caractéristiques :

- Spatialement, **toutes** les **transitions** entre faciès sont **possibles**;
- Reproduit les **variogrammes d'indicateurs**, mais pas les covariances croisées entre les indicateurs (on ne les utilise pas).



Toutes les transitions possibles sont observées dans les deux sens et dans toutes les directions.

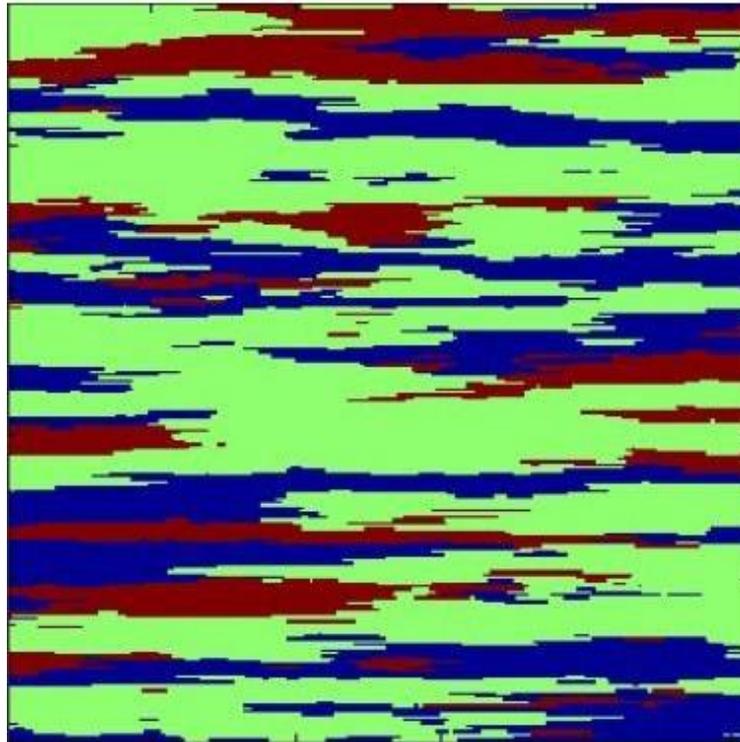
simulation avec  $p_1 = \frac{1}{3}$ ,  $p_2 = \frac{1}{2}$  et  $p_3 = \frac{1}{6}$ ,  
variog. sphérique avec  $a = 50$

Bleu :  $p_1$ ; vert :  $p_2$  ; Brun :  $p_3$

## 2.1. Simulation séquentielle d'indicateur

### Caractéristiques :

- Un peu plus réaliste d'un cas sédimentaire, mais **néanmoins toutes les transitions sont possibles**



Sphérique avec anisotropie  
( $a_x = 200, a_y = 10$ )

# 1. Simulations de faciès

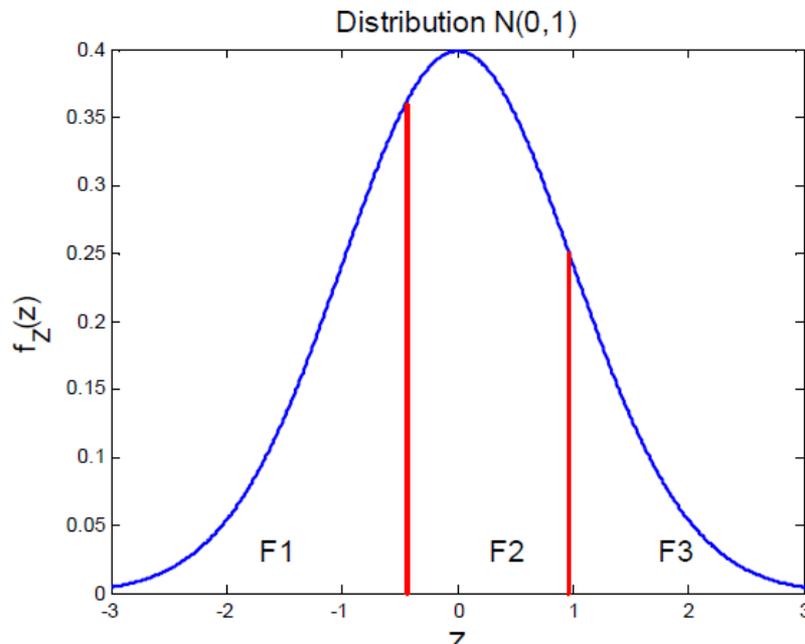
## II. Simulation gaussienne tronquée



## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

**Idée :**

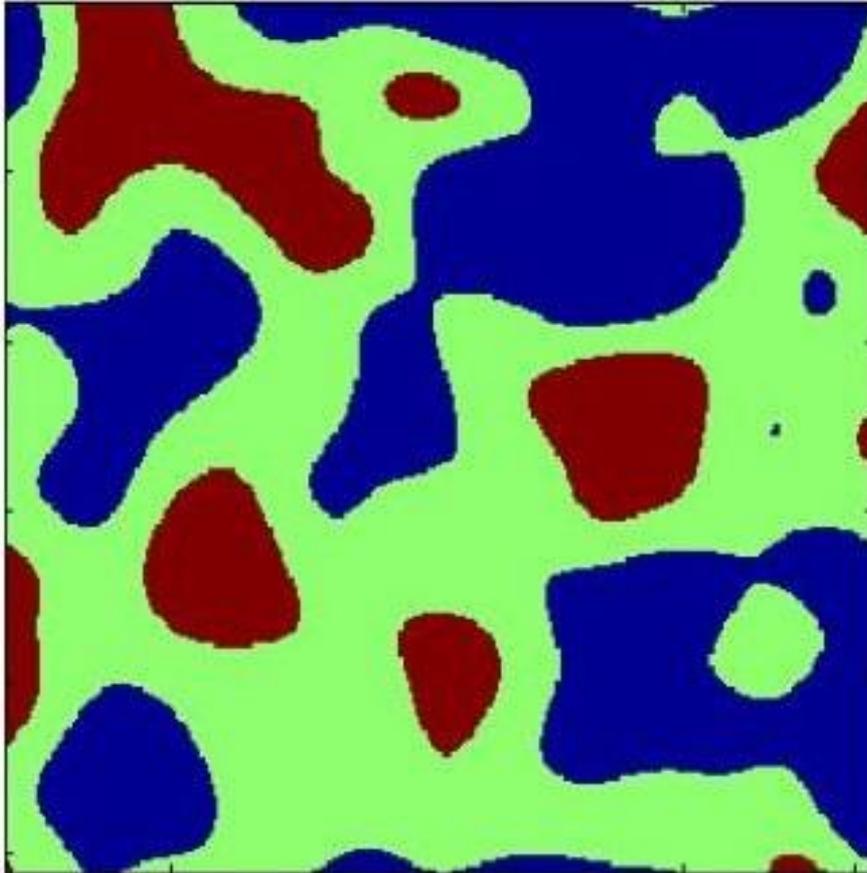
Seuiller la distribution d'un champ gaussien ou chaque seuil définit la frontière entre deux faciès et les proportions de chaque faciès



$$\text{avec } p_1 = \frac{1}{3}, p_2 = \frac{1}{2} \text{ et } p_3 = \frac{1}{6}$$

## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

Visuellement :



**Vos observations ?**

Champ gaussien  
Variogramme gaussien ( $a = 50$ )

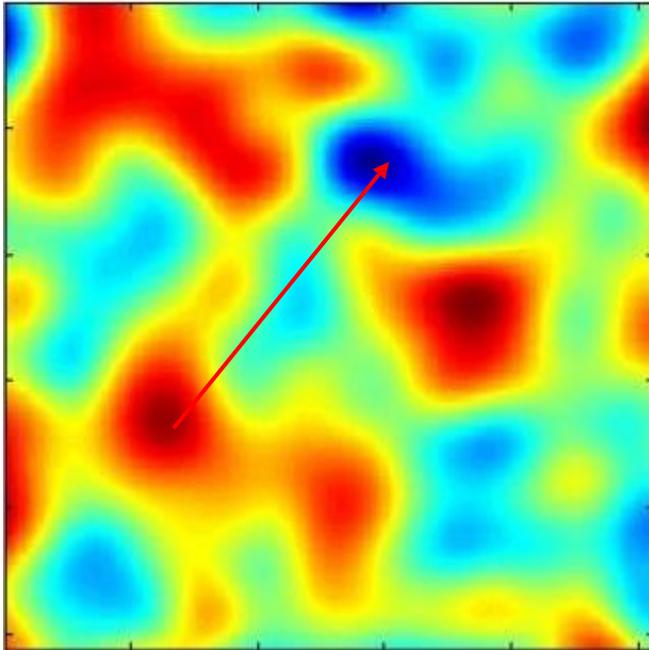
Faciès simulés  
avec  $p_1 = \frac{1}{3}$ ,  $p_2 = \frac{1}{2}$  et  $p_3 = \frac{1}{6}$

Bleu :  $p_1$ ; vert :  $p_2$  ; Brun :  $p_3$

## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

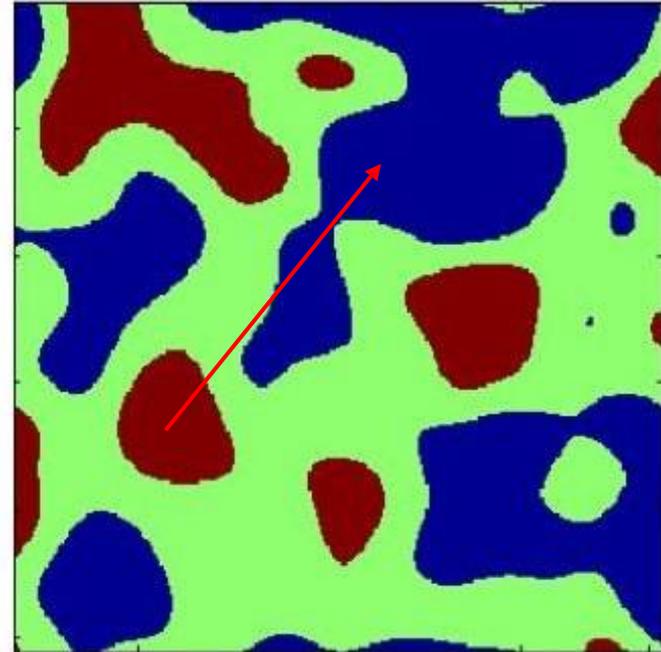
**Visuellement :**

Champ gaussien  
Variogramme gaussien ( $\alpha = 50$ )



Tronqué  
→

Faciès simulés  
avec  $p_1 = \frac{1}{3}$ ,  $p_2 = \frac{1}{2}$  et  $p_3 = \frac{1}{6}$



Les faciès brun et bleu ne se touchent jamais. On doit passer par l'intermédiaire en vert.

Bleu :  $p_1$  ; vert :  $p_2$  ; Brun :  $p_3$

## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

### Remarque et questions :

Le modèle implique que seuls les faciès successifs peuvent être contigus spatialement. Ainsi la transition  $F1 - F3$  ne peut être observée. Le choix de l'ordre des faciès doit respecter les relations observées.

Deux questions à résoudre:

- a) Comment décider du variogramme de la variable gaussienne?
- b) Comment tenir compte des faciès observés aux points échantillons (quelles valeurs gaussiennes simuler aux points échantillons)?

## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

**Ajustement du variogramme de la variable gaussienne :**

Réponse question a)

On note que :

$$\begin{aligned} p_{ij}(h) &= E[I_i(x)I_j(x+h)] = P(I_i(x) = 1 \cap I_j(x+h) = 1) \\ &= P(\{c_{i-1} < Z(x) \leq c_i\} \cap \{c_{j-1} < Z(x+h) \leq c_j\}) \end{aligned}$$

$E[I_i(x)I_j(x+h)]$ : calculé à partir des faciès observés

$P(\{c_{i-1} < Z(x) \leq c_i\} \cap \{c_{j-1} < Z(x+h) \leq c_j\})$ : calculé à partir de la loi binormale si on connaît  $C(h)$

## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

a) Ajustement du variogramme de la variable gaussienne :

$E[I_i(x)I_j(x+h)]$ : calculé à partir des faciès observés

$P(\{c_{i-1} < Z(x) \leq c_i\} \cap \{c_{j-1} < Z(x+h) \leq c_j\})$ : calculé à partir de la loi binormale si on connaît  $C(h)$

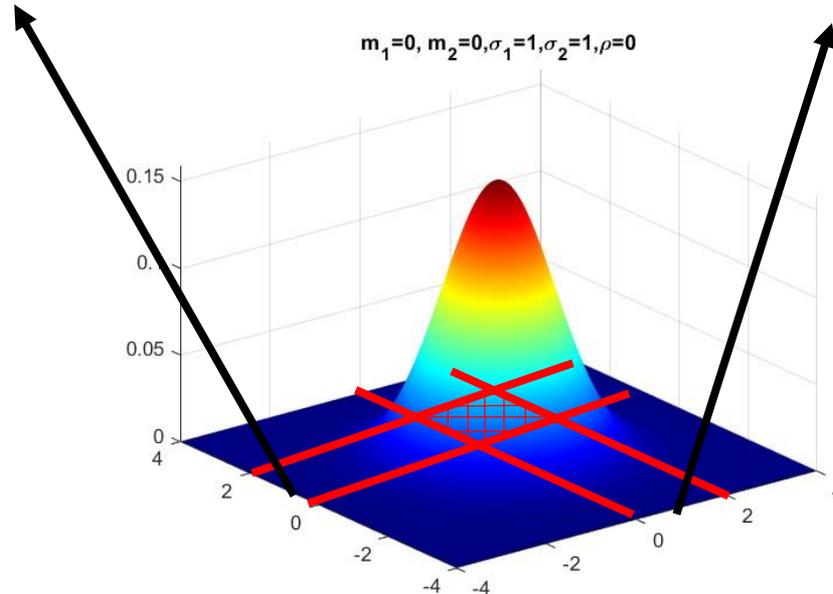
Choisir  $C(h)$  telle que les deux termes soit presque d'égalité pour toutes les distances  $h$ .

## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

a) Ajustement du variogramme de la variable gaussienne :

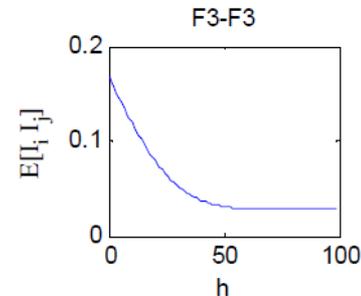
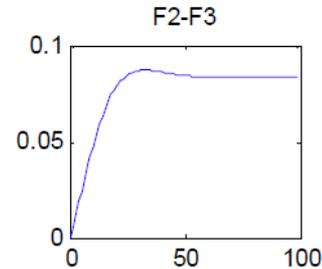
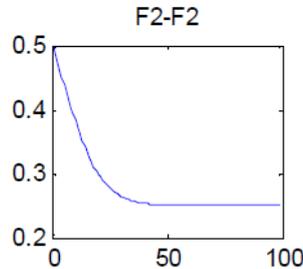
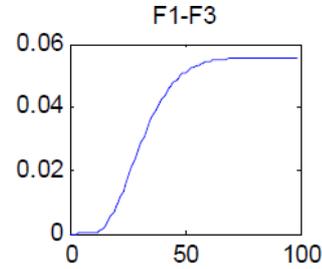
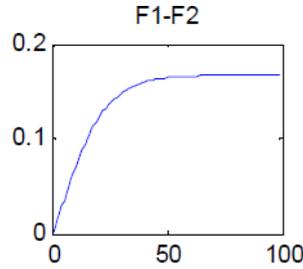
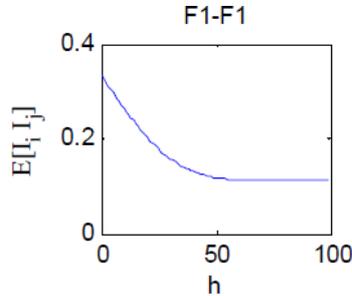
$$E[I_i(x)I_j(x+h)]$$

$$P(\{c_{i-1} < Z(x) \leq c_i\} \cap \{c_{j-1} < Z(x+h) \leq c_j\})$$



## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

Ajustement du variogramme de la variable gaussienne :



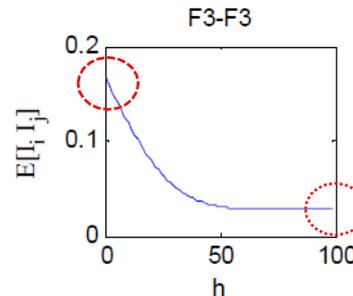
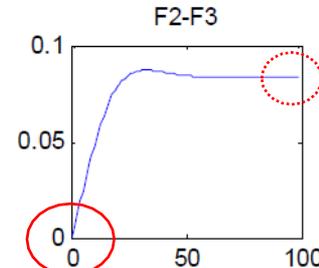
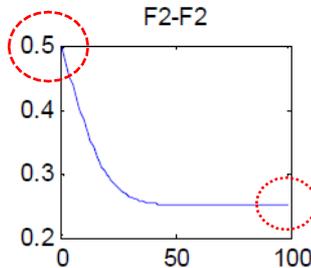
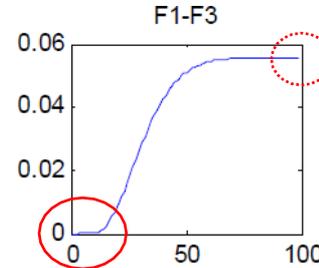
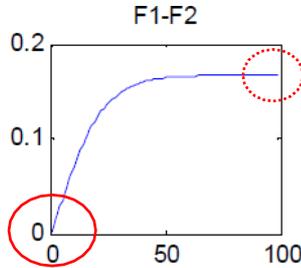
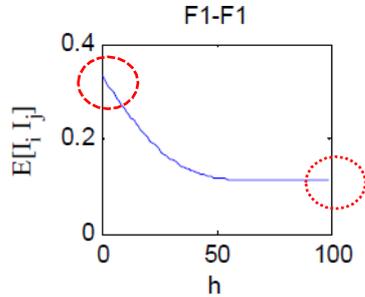
$$p_1 = \frac{1}{3}, p_2 = \frac{1}{2} \text{ et } p_3 = \frac{1}{6}$$

Variogramme gaussien ( $a = 50$ )

**Vos observations ?**

# 2.II. Simulation gaussienne tronquée

## Ajustement du variogramme de la variable gaussienne :



= 0

=  $p_i$

=  $p_i p_j$

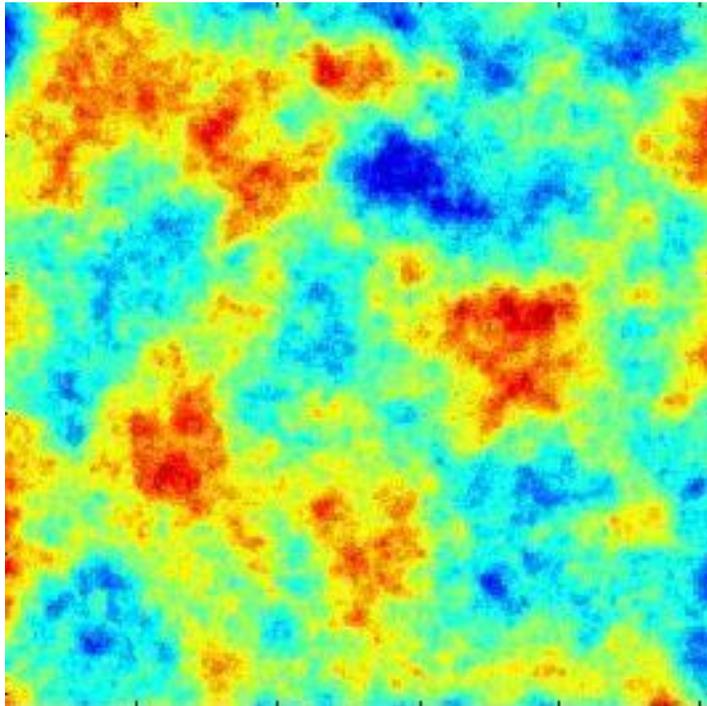
$$p_1 = \frac{1}{3}, p_2 = \frac{1}{2} \text{ et } p_3 = \frac{1}{6}$$

Variogramme gaussien ( $a = 50$ )

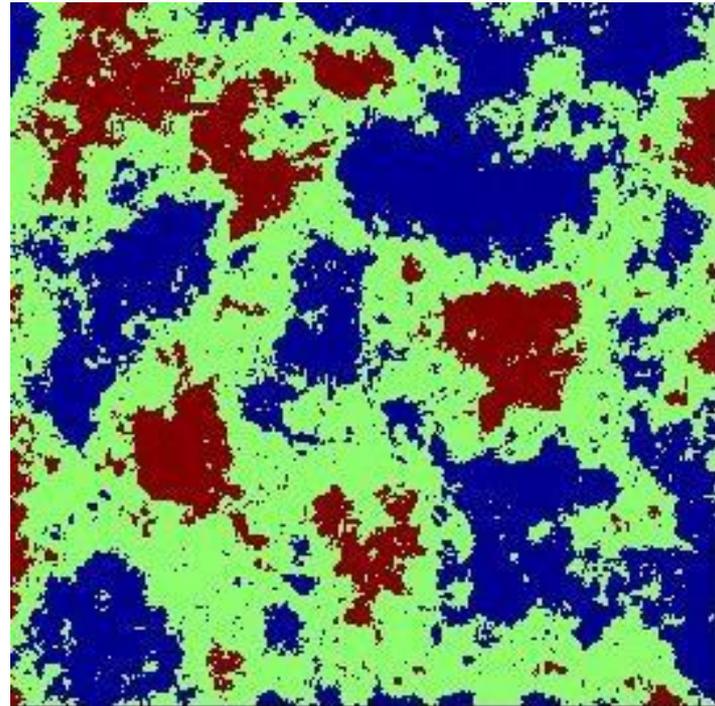
## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

D'autres exemples :

Champ gaussien  
Variogramme sphérique ( $\alpha = 50$ )



Faciès simulés  
avec  $p_1 = \frac{1}{3}$ ,  $p_2 = \frac{1}{2}$  et  $p_3 = \frac{1}{6}$



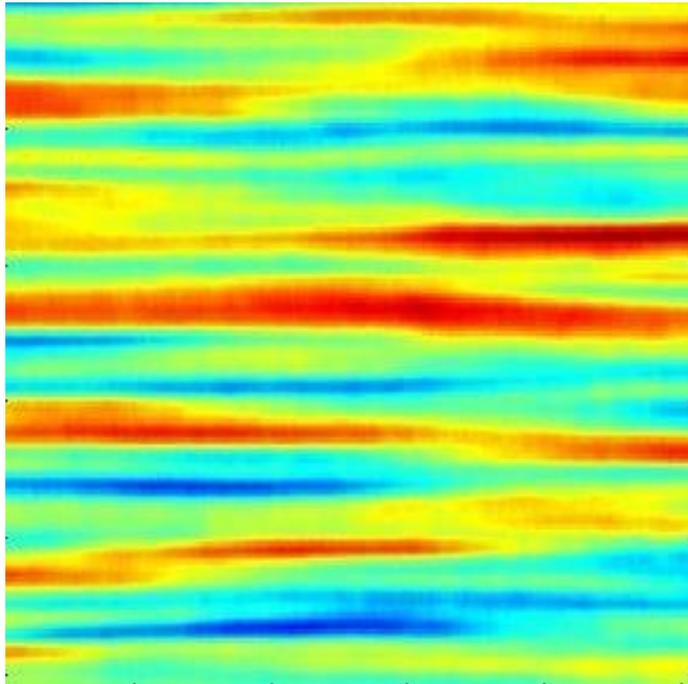
Bleu :  $p_1$  ; vert :  $p_2$  ; Brun :  $p_3$

## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

**D'autres exemples :**

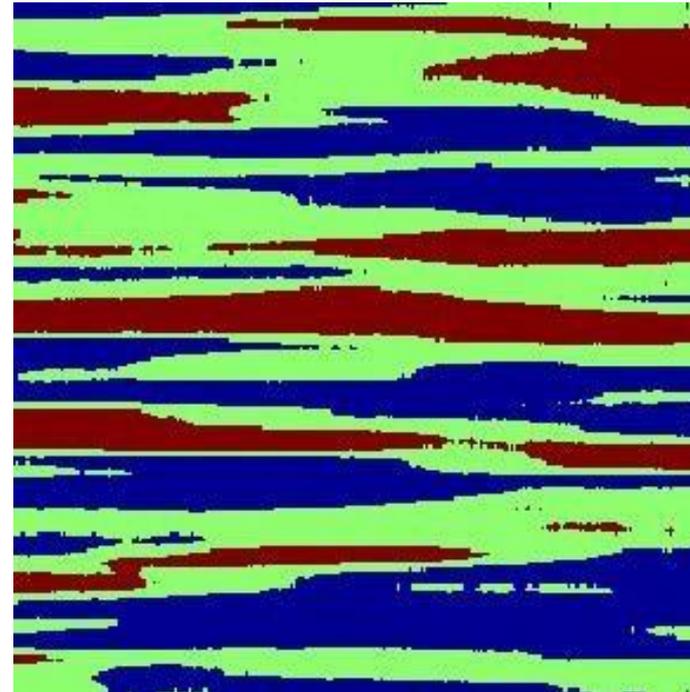
Champ gaussien

Variogramme gaussien anisotrope



Faciès simulés

avec  $p_1 = \frac{1}{3}$ ,  $p_2 = \frac{1}{2}$  et  $p_3 = \frac{1}{6}$

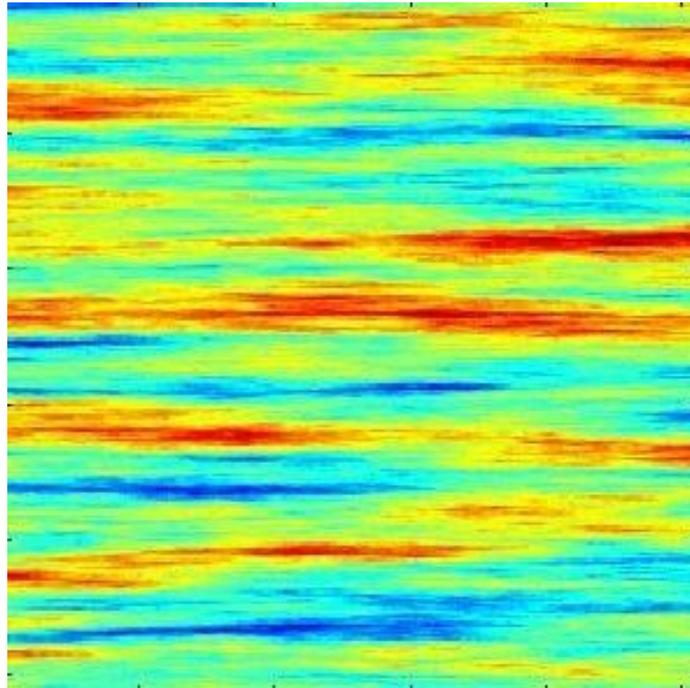


Bleu :  $p_1$  ; vert :  $p_2$  ; Brun :  $p_3$

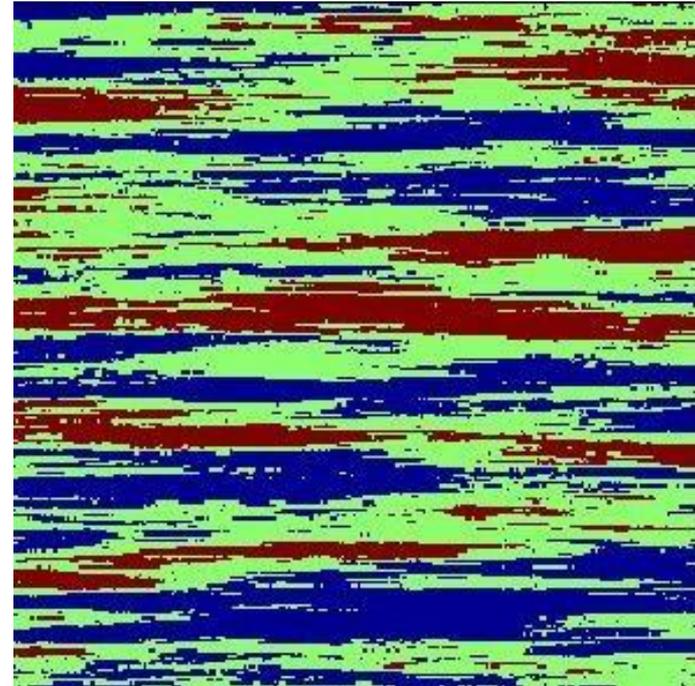
## 2.II. Simulation gaussienne tronquée

D'autres exemples :

Champ gaussien  
Variogramme sphérique anisotrope



Faciès simulés  
avec  $p_1 = \frac{1}{3}$ ,  $p_2 = \frac{1}{2}$  et  $p_3 = \frac{1}{6}$



Bleu :  $p_1$  ; vert :  $p_2$  ; Brun :  $p_3$

## III. Simulation plurigaussienne

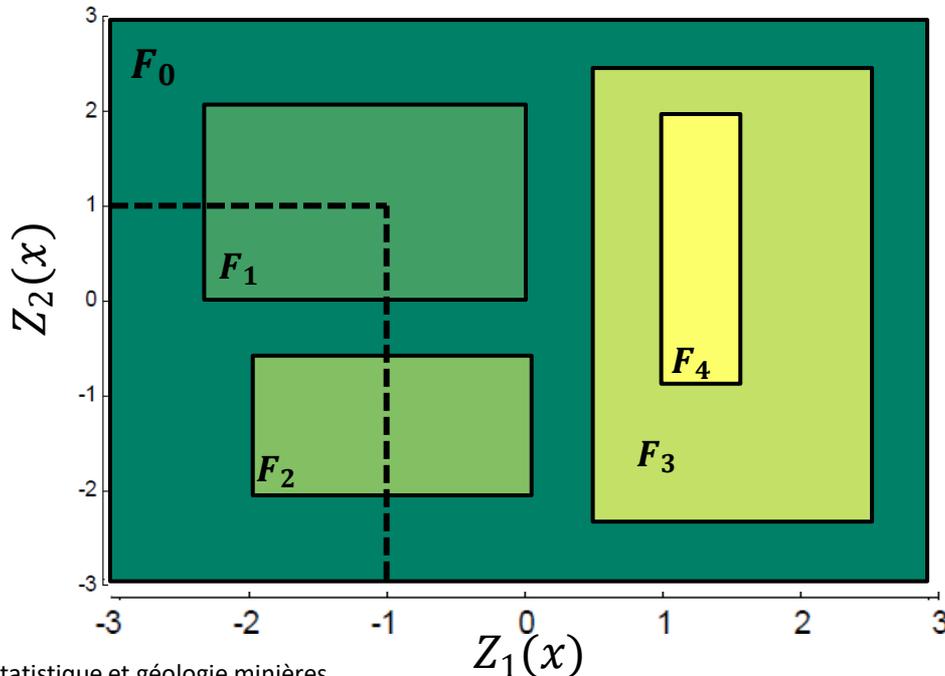


## 2.III. Simulation plurigaussienne

Idée :

Généraliser la simulation gaussienne tronquée à plusieurs champs gaussiens et ajouter plus de flexibilité à l'agencement des faciès

Exemple avec deux variables aléatoires gaussiennes :



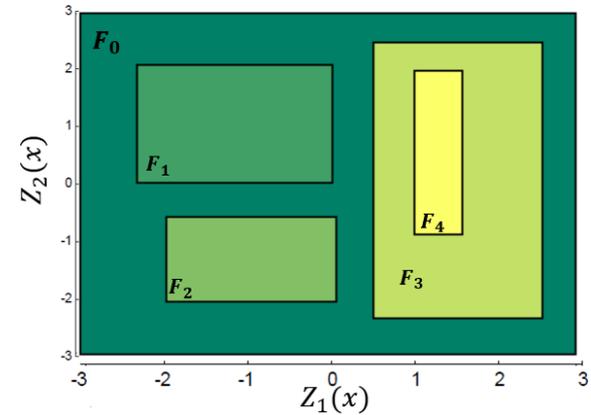
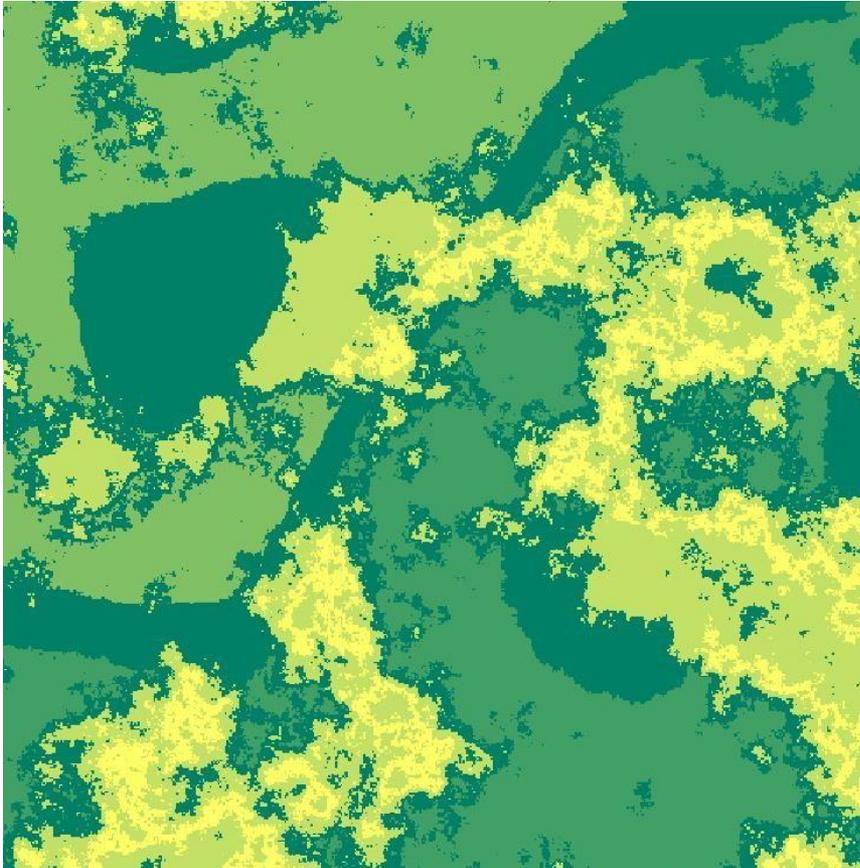
$$Z_1(x_1) = -1$$
$$Z_2(x_1) = 1$$

Donc,

$$I(x_1) = F_1$$

## 2.III. Simulation plurigaussienne

Exemples :



$Z_1$  a un variogramme sphérique  $a = 150$

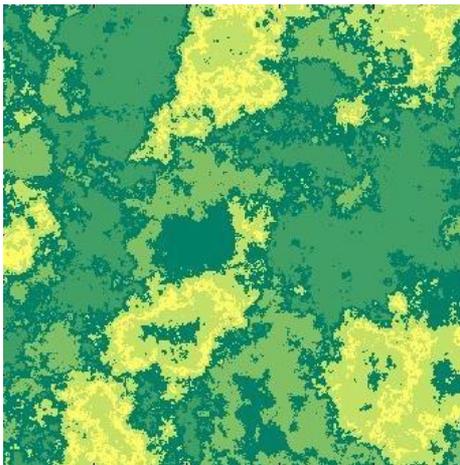
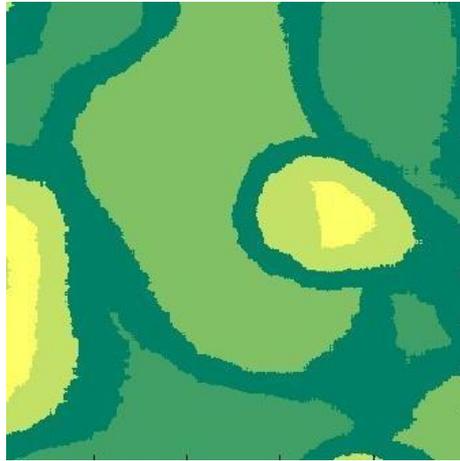
$Z_2$  a un variogramme gaussien  $a = 260$

Grille :  $500 \times 500$

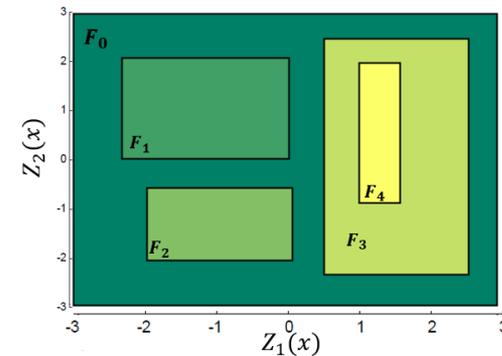
32

## 2.III. Simulation plurigaussienne

Exemples :



Même drapeau, mais  $Z_1$  et  $Z_2$  ont  
Variogramme gaussien avec  $\alpha = 260$

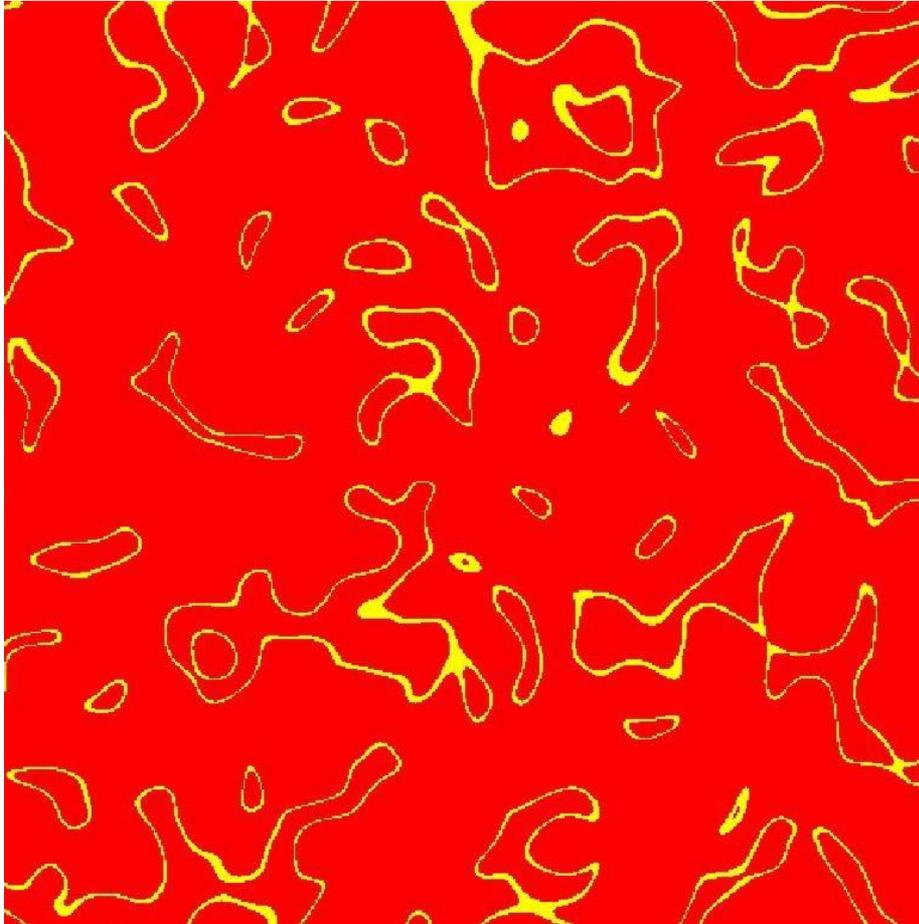


Même drapeau, mais  $Z_1$  et  $Z_2$  ont  
Variogramme sphérique avec  $\alpha = 150$

Grille :  $500 \times 500$

## 2.III. Simulation plurigaussienne

**Exemples :**



## 2.III. Simulation plurigaussienne

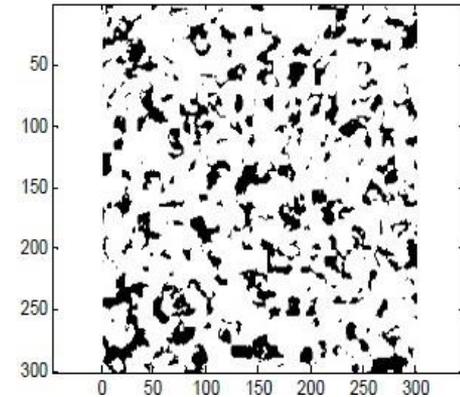
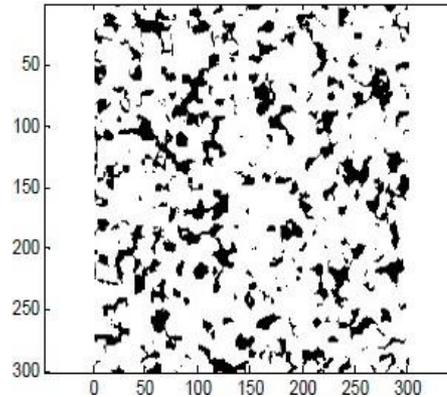
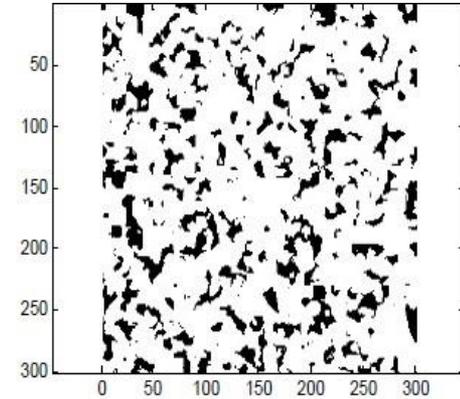
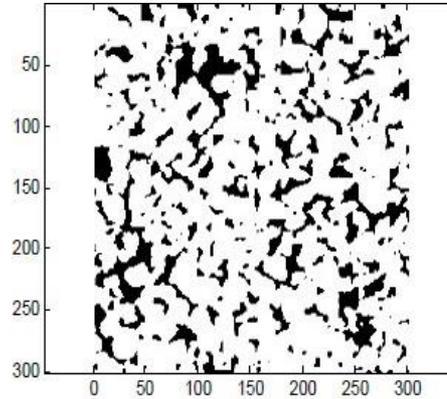
### **Exercice en équipe**

- 1) Différence visuelle entre simulations séquentielles d'indicatrices et simulations plurigaussiennes
- 2) Comprendre l'impact des patrons de coupure sur les simulations plurigaussiennes

## 2.III. Simulation plurigaussienne

Tests : identifier l'image réelle parmi les 4 images

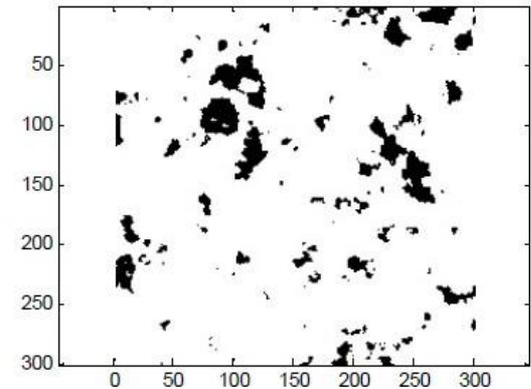
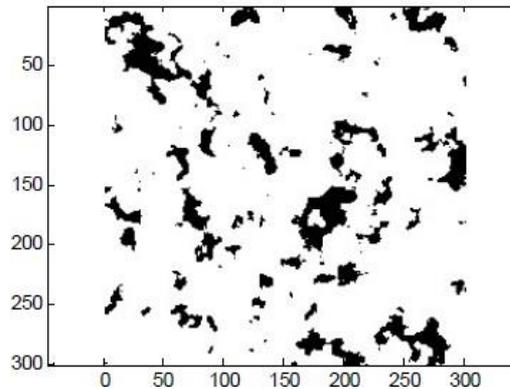
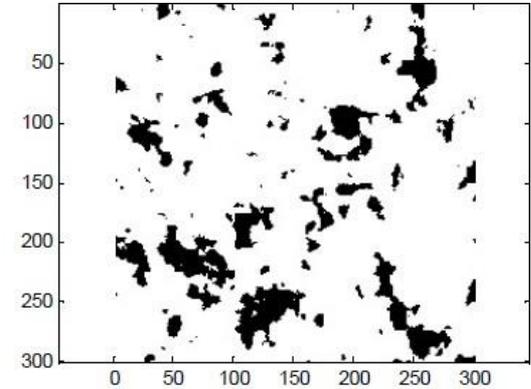
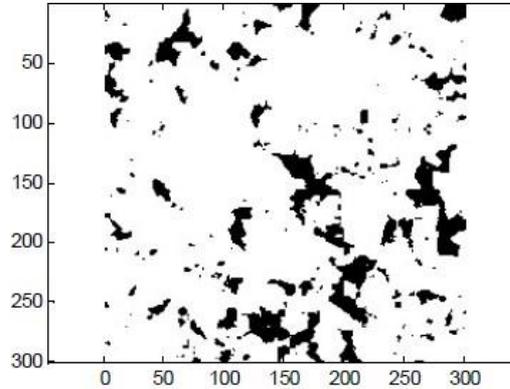
Image réelle : un grès  
Noir : les pores



## 2.III. Simulation plurigaussienne

Tests : identifier l'image réelle parmi les 4 images

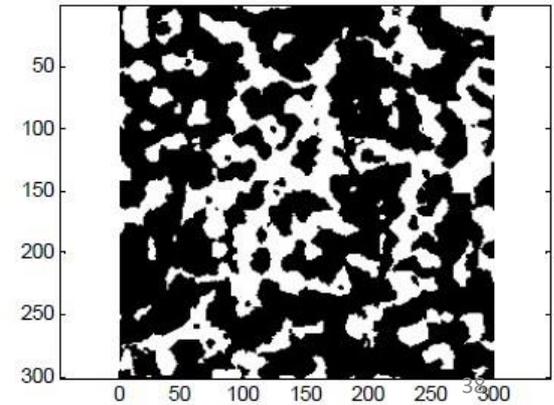
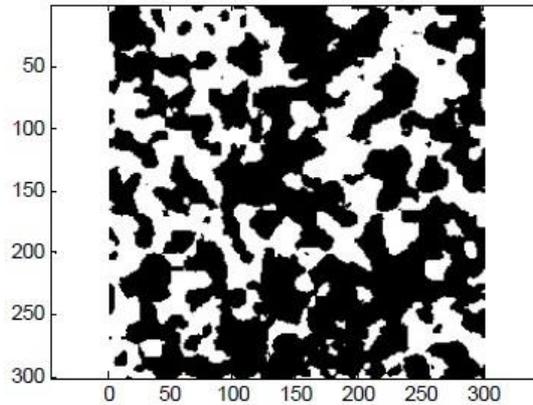
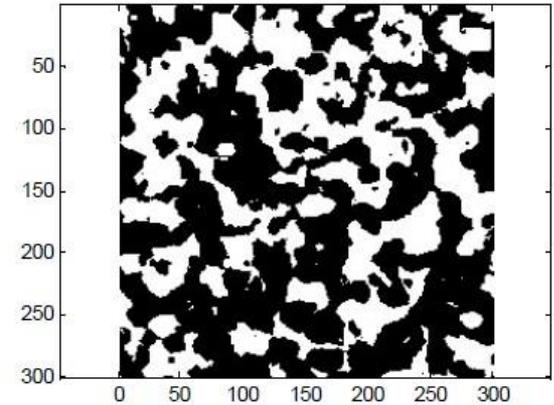
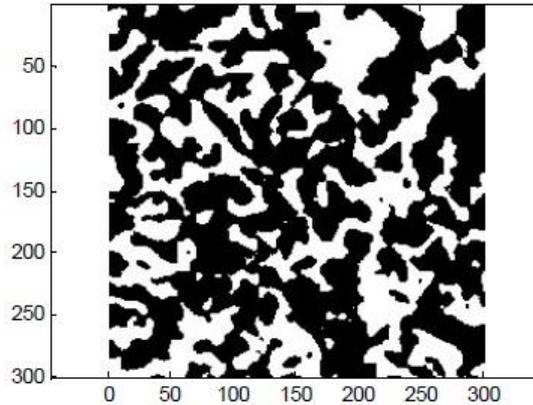
Image réelle : un  
carbonate  
Noir : les pores



## 2.III. Simulation plurigaussienne

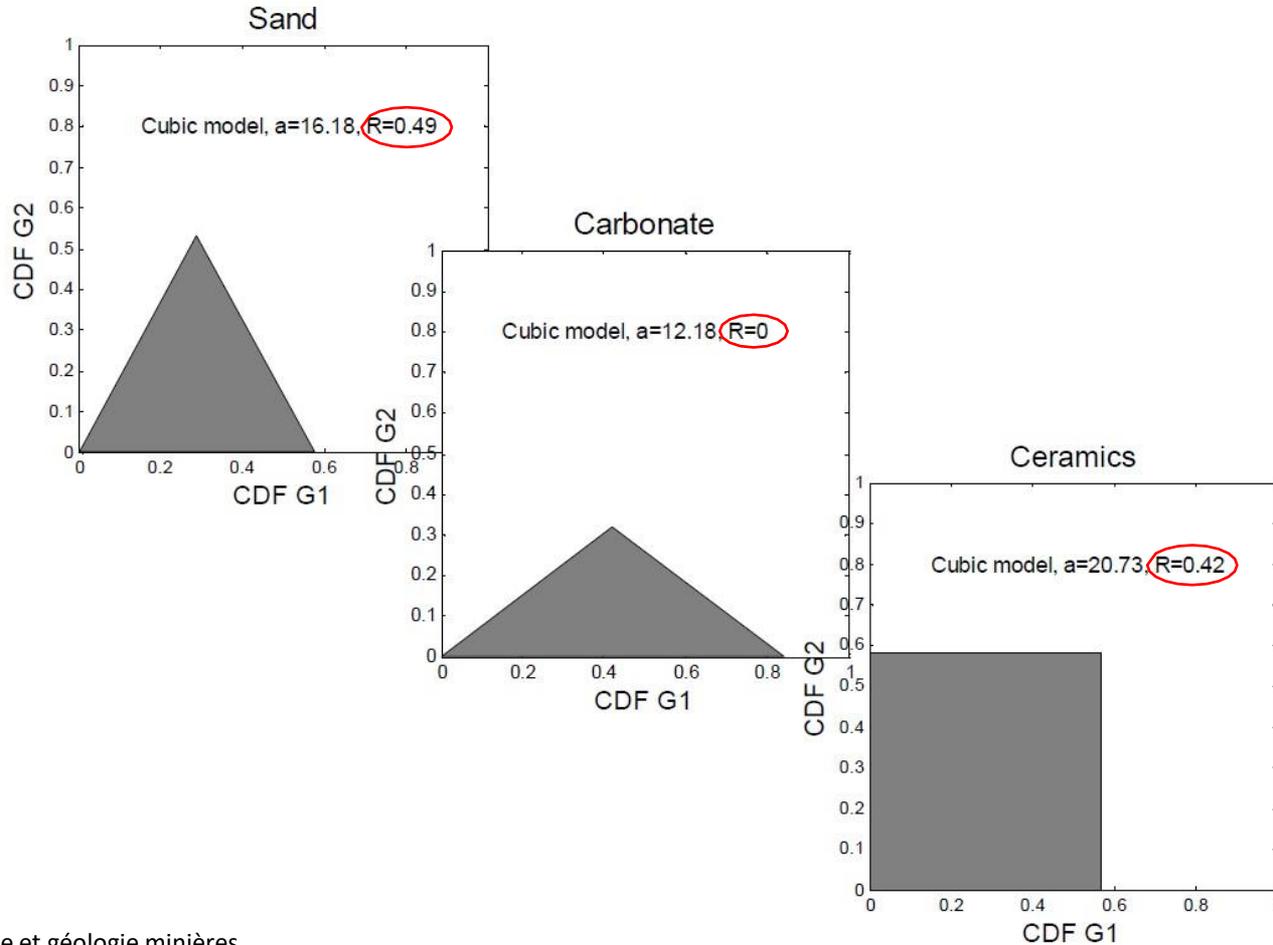
Tests : identifier l'image réelle parmi les 4 images

Image réelle : une  
céramique  
Noir : les pores



## 2.III. Simulation plurigaussienne

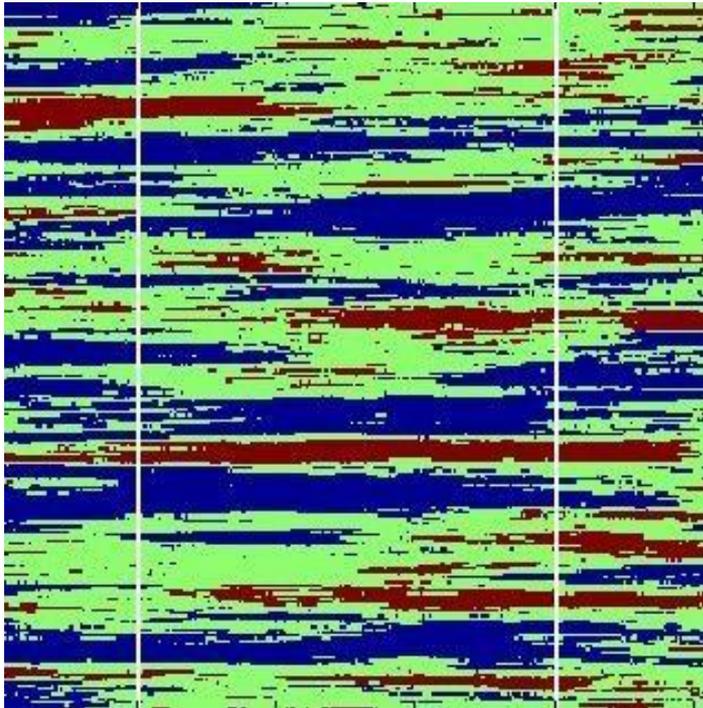
Tests : identifier l'image réelle parmi les 4 images



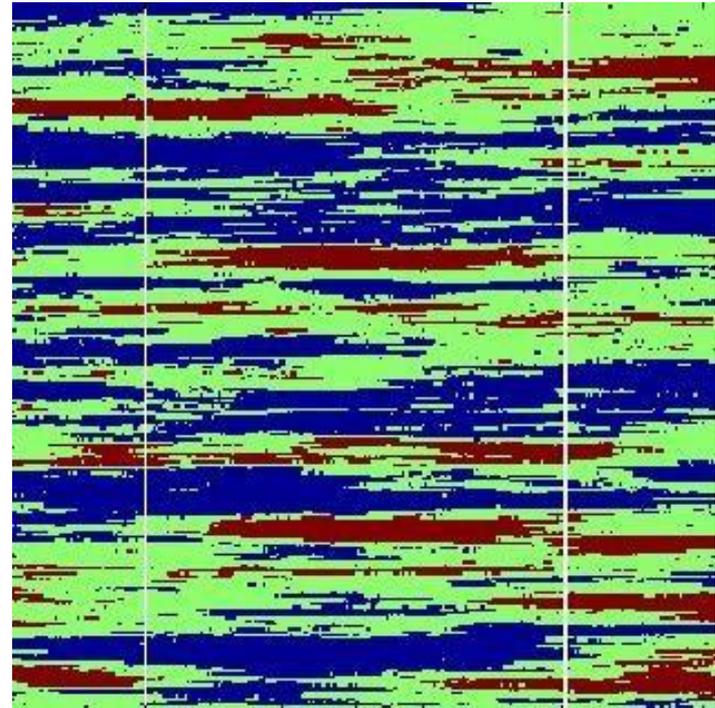
### 3. Conditionnement aux faciès observés

b) Tenir compte des faciès aux points échantillonnés :

Réalité



Faciès simulé



# 3. Conditionnement aux faciès observés

**Il existe deux méthodes pour générer des simulations de faciès conditionnelles aux faciès observés. Les deux sont itératives.**

## 1. L'échantillonneur de Gibbs

- a. Génère un champ dont les contraintes sont respectées dès la première itération;
- b. Par la suite, l'échantillonneur de Gibbs itère afin d'introduire la corrélation spatiale.

## 2. Le calage par S-STBM

- a. Génère un champ dont la corrélation spatiale est assurée par construction;
- b. Par la suite, le calage itère afin de respecter les contraintes, soit les faciès observés.



## 3.1 Échantillonneur de Gibbs

### b) Tenir compte des faciès aux points échantillonnés :

Soit  $Z(x)$  un champ gaussien, soit  $z(x_i), i = 1, \dots, N$ ,  $N$  faciès observés et soit un patron de codage  $\mathcal{U}$  :

On cherche à conditionner  $Z(x)$  aux observations  $z(x_i)$  selon le patron de codage  $\mathcal{U}$ .

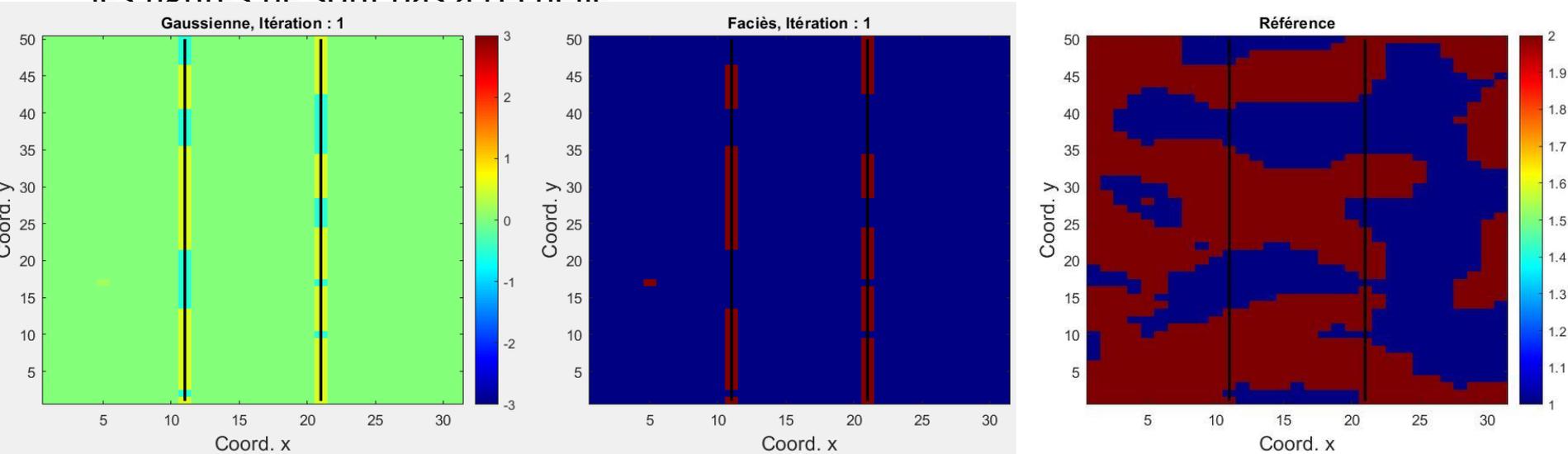
Initialisation : Choisir aléatoirement des valeurs gaussiennes dans l'intervalle appropriées (selon le patron de codage  $\mathcal{U}$ ) compte tenu des faciès observés;

1. Sélectionner un point aléatoirement, le retirer et estimer par KS sa distribution conditionnelle;
2. Tirer une valeur aléatoire de la distribution conditionnelle en respectant les contraintes en ce point.
3. Remplacer l'ancienne valeur par celle tirée de la distribution conditionnelle ;
4. Évaluer un critère d'arrêt: arrêter ou retourner à 1)

# 3.1 Échantillonneur de Gibbs

## b) Tenir compte des faciès aux points échantillonnés :

Animation : conditionner une simulation (31x50) à deux forages par calage. Attention les figures ne sont pas à l'échelle



Note : l'algorithme n'a pas encore atteint la corrélation spatiale désirée. La convergence sera atteinte environ autour de 72 000 000 itérations. Lorsque chaque point aura été visité 40 000 fois. Peut-être même 100 000 visites seront requises par point. L'échantillonneur de Gibbs est généralement très lent. Ici, chaque point a été visité 100 fois seulement.

## 3.1. Échantillonneur de Gibbs

### b) Tenir compte des faciès aux points échantillonnés :

Comme pour la SGS, tirer de la distribution conditionnelle assure que l'on génère un champ gaussien ayant la bonne structure spatiale.

Critère d'arrêt :

- Il faut **visiter un très grand nombre de fois** tous les points (voir des milliers de fois);
- Les valeurs sont **modifiées** à chaque itération d'une **toute petite quantité** (puisque la variance conditionnelle est la variance de krigeage et que les données observées sont proches);
- La **perturbation du champ est lente**. Il faut plusieurs modifications sur chaque point pour s'approcher d'un état stationnaire comme souhaité.

## 3.2. Calage par S-STBM

### **b) Tenir compte des faciès aux points échantillonnés :**

Il existe aujourd'hui une alternative beaucoup plus rapide que l'échantillonneur de Gibbs pour contraindre des champs à des faciès observés.

L'échantillonneur de Gibbs assure par construction l'observation des faciès et introduit itérativement la corrélation spatiale.

Une alternative serait d'assurer la corrélation spatiale par construction et de perturber les valeurs gaussiennes afin qu'ils correspondent au patron de codage désiré.



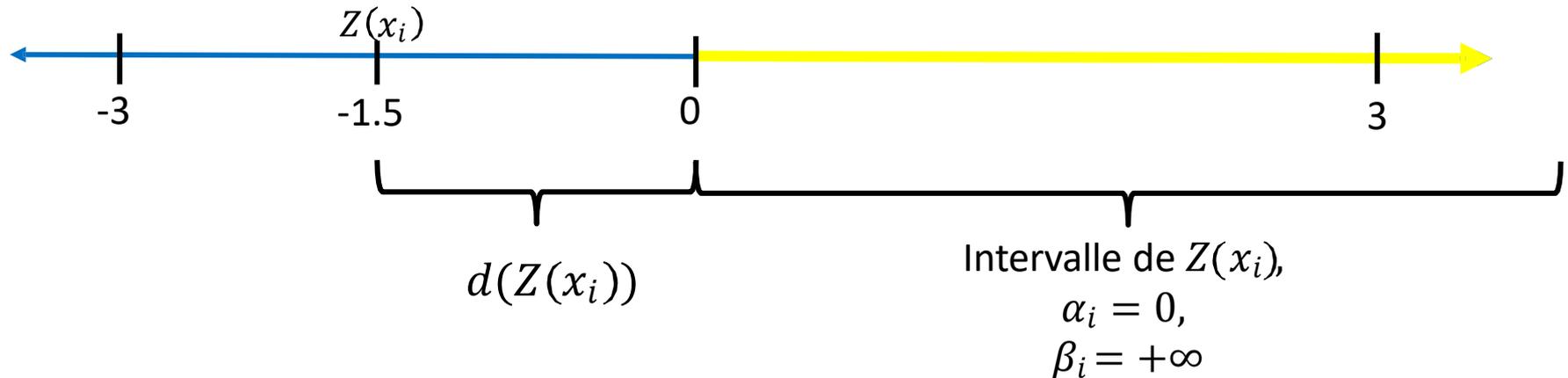
## 3.2. Calage par S-STBM

### b) Tenir compte des faciès aux points échantillonnés : Exemple 2 faciès, 1 champ

Soit le faciès jaune observé au point  $x_i$

On veut donc perturber la valeur gaussienne  $Z(x_i)$  afin de la déplacer vers l'intervalle  $y$  en jaune.

On peut mesurer la distance entre l'intervalle et  $Z(x_i)$

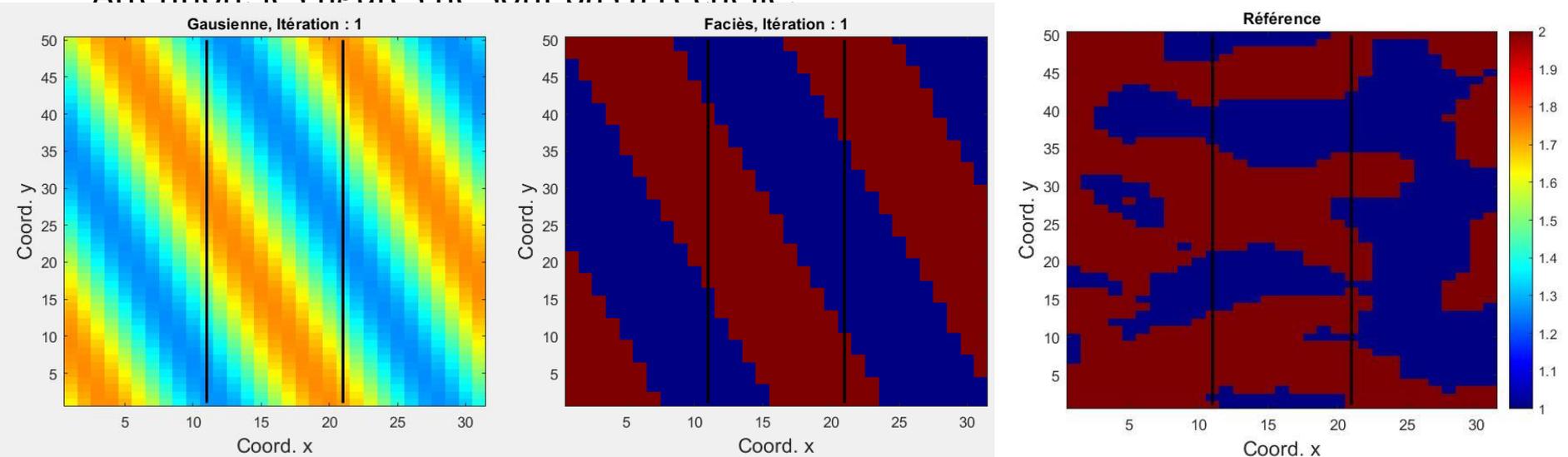


## 3.2. Calage par S-STBM

### b) Tenir compte des faciès aux points échantillonnés : Exemple 2 faciès, 1 champ

Animation : conditionner une simulation (31x50) à deux forages par calage.

Attention, les figures ne sont pas à l'échelle



Note : on aurait pu arrêter l'algorithme après 1 000 itérations. Contrairement au Gibbs, le calage par S-STBM perturbe tous les points à chaque itération. Donc, on a performé ,ici, environ 1 550 000 perturbations, contrairement aux 72 000 000 requis par l'échantillonneur de Gibbs. Un gain très important. Selon la corrélation spatiale, le gain est d'environ de 2 à 3 Ordres de grandeur au niveau du temps de calcul.

## 3.2. Calage par S-STBM

### b) Tenir compte des faciès aux points échantillonnés :

Cette alternative est très rapide lorsque combinée avec la méthode des bandes tournantes spectrales séquentielles (S-STBM, Lauzon et Marcotte (2020)).

Il suffit de minimiser la fonction objectif suivante :

$$FO(Z(x)) = \lambda \underbrace{\left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\max\{\alpha_i - Z(x_i), 0\} + \max\{Z(x_i) - \beta_i, 0\}) \right]}_{\text{Terme pour respecter les faciès observés}} + \underbrace{(1 - \lambda) |S_j^2 - S_{j,u}^2|}_{\text{Terme pour préserver la variance de la simulation}}$$

$\alpha_i$  et  $\beta_i$ : Borne inférieure et supérieure de l'intervalle au point  $x_i$ .

Lauzon, D., & Marcotte, D. (2020). The sequential spectral turning band simulator as an alternative to Gibbs sampler in large truncated- or pluri-Gaussian simulations. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, 1939–1951. doi:10.1007/s00477-020-01850-9.

# 3. Conditionnement aux faciès observés

## b) Tenir compte des faciès aux points échantillonnés :

Quoi retenir :

### L'échantillonneur de Gibbs :

- Exact;
- Simple à programmer;
- Séquentielle, point par point;
- Très lent à introduire la corrélation spatiale.

### Calage

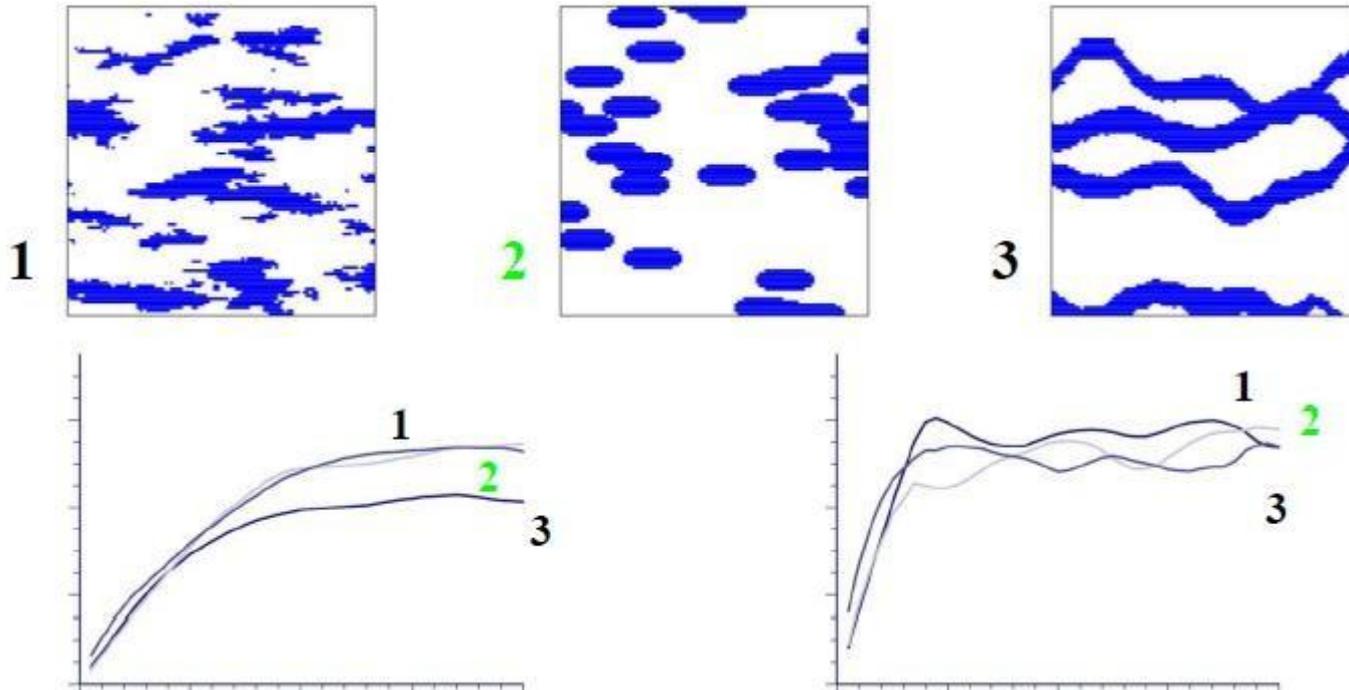
- Approximatif (recours au T-SGS pour rendre exact);
- Complexe à programmer;
- Les perturbations sont globales lorsqu'appliquées avec S-STBM;
- Très rapide comparativement à l'échantillonneur de Gibbs.



# 4. Méthode multipoint

Problème :

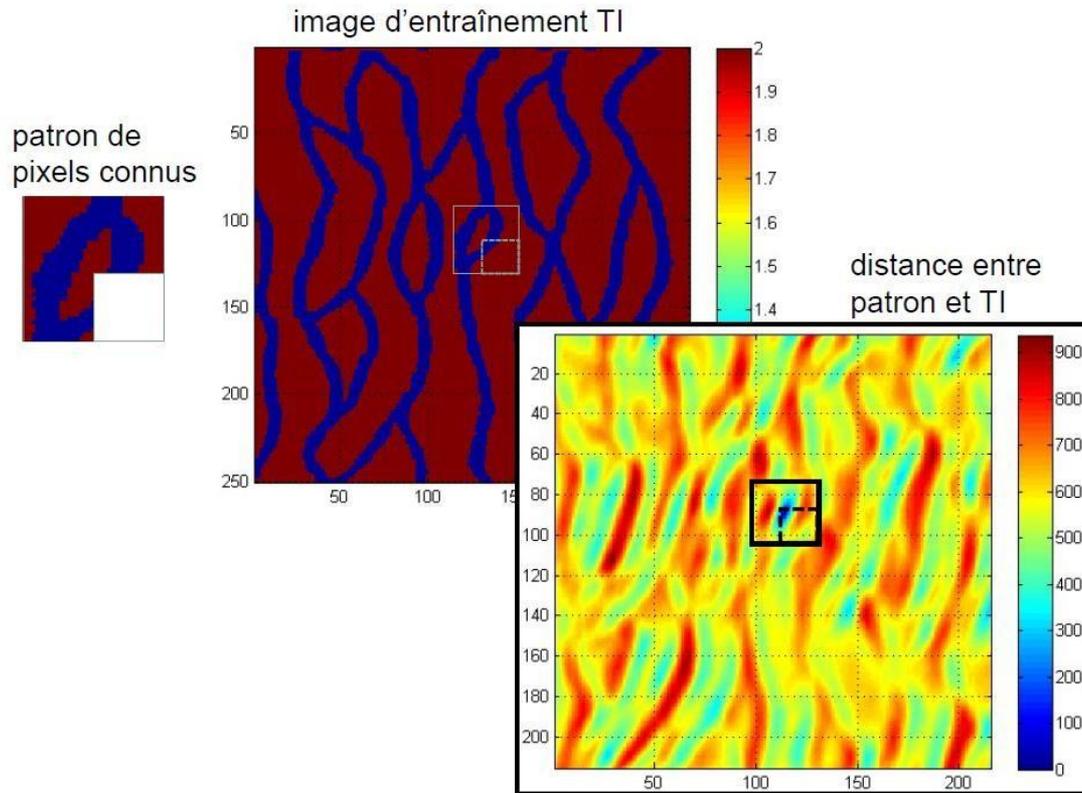
Le variogramme ne suffit pas à saisir toutes les caractéristiques d'un champ donné



# 4. Méthode multipoint

**Idée :**

Utiliser des images d'entraînement qui servent de base pour générer des configurations possibles de faciès



## 4. Méthode multipoint

### Exemple :

Soit l'image d'entraînement suivante :

0 0 1 1 0 1 1 0 0 0 0 1 1 1 1 0 1 0 1 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 1 1

On a observé la séquence 0 1  $x_0$  0 1. Quel faciès simuler au point  $x_0$ ?

- 1) On parcourt la TI à la recherche de signal présentant la configuration 0 1 ? 0 1;
- 2) On identifie les occurrences;
- 3) On simule le faciès 1 au point  $x_0$ , car seulement le faciès 1 est observé pour la séquence 0 1 ? 0 1.

## 4. Méthode multipoint

### Problème d'occurrence :

Très souvent on ne trouve aucune occurrence du patron recherché dans la TI.

Dans ce cas on prend le groupe de pixels étant le plus proche ou on en choisit un au hasard parmi les plus proches.

Cela peut impliquer une répétition de certains patrons, surtout lors du conditionnement.

On n'a pas un bon contrôle sur la variabilité des réalisations obtenues. Souvent les réalisations montrent de grandes similarités l'une envers l'autre, ce qui est contraire à l'objectif poursuivi.

# 4. Méthode multipoint

## Approches : deux grandes classes

### 1) Pixel par pixel (p. ex. *direct sampling* de G. Mariethoz )

#### Avantages

- Conditionnement assuré
- Plus adaptable localement
- Extension au cas 3D plus directe

#### Inconvénients

- Plus lent
- Présence de discontinuités visibles sur les images simulées

### 2) Groupe de pixels contigus ( bloc ou pièce )

#### Avantages

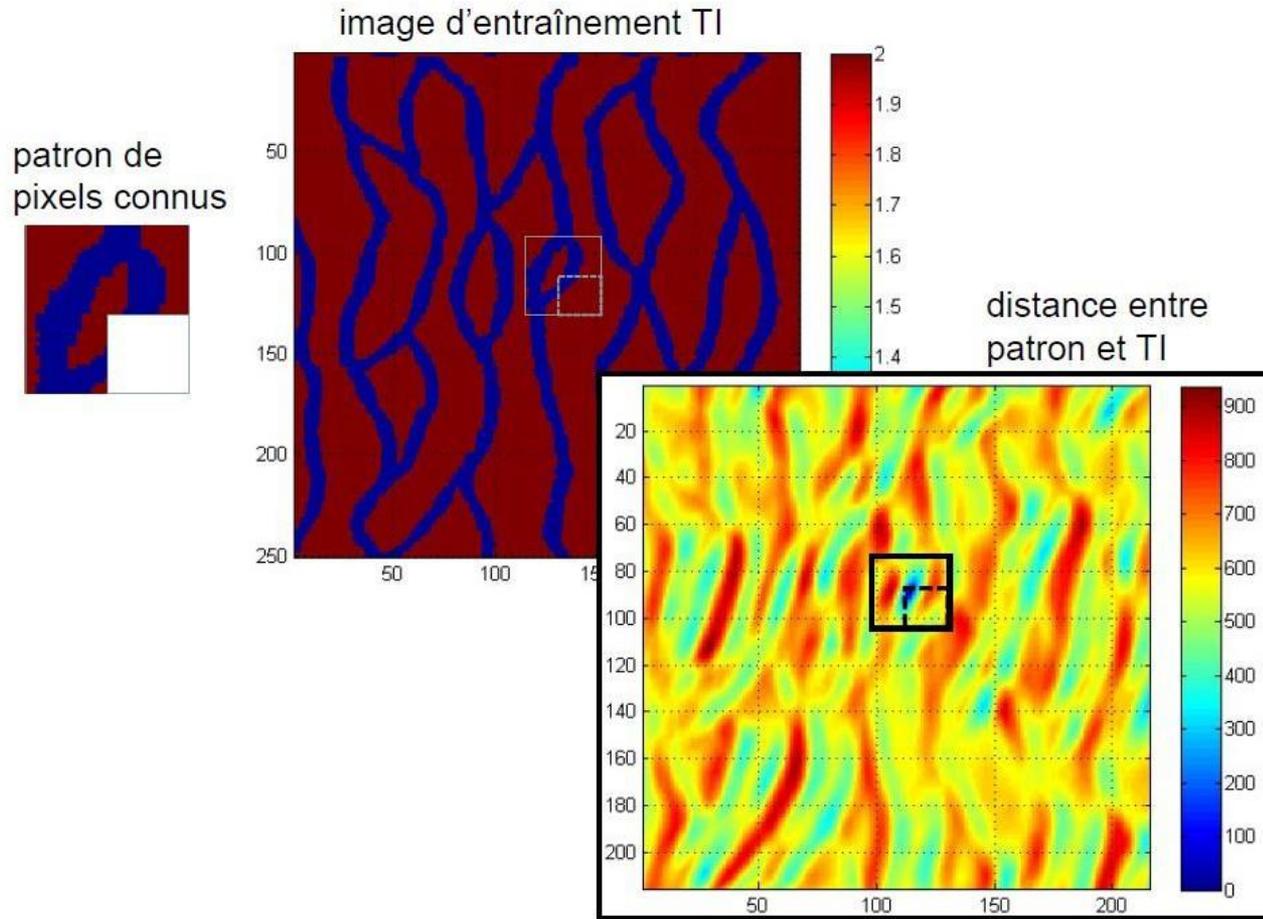
- Plus rapide
- Images simulées plus continues
- Permet de générer des images alternatives à la TI

#### Inconvénients

- Conditionnement plus difficile
- Plus rigide
- Extension au cas 3D possible, mais plus complexe

# 4. Méthode multipoint

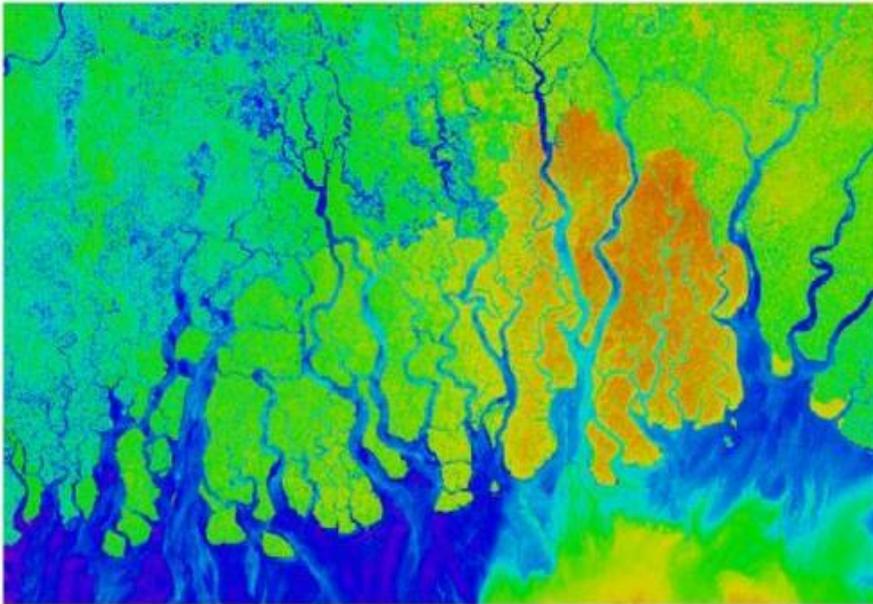
## Exemples d'occurrences d'un bloc :



# 4. Méthode multipoint

## Sources possibles de TI :

en 2D souvent : images satellites, images d'affleurement



en 3D: des modèles d'objets simulés

