

# La modélisation géostatistique de la variabilité spatiale et ses applications

Jean-Paul Chilès

École des Mines de Paris - Centre de Géostatistique

---

Soutenance d'habilitation à diriger des recherches  
Université Pierre et Marie Curie, 26 mars 2004

# La géostatistique

- ◆ Méthodes probabilistes pour l'étude de phénomènes corrélés dans l'espace
- ◆ Créée par Georges Matheron dans les années 60 pour résoudre des problèmes d'estimation minière
- ◆ Domaines d'application :
  - mine, hydrogéologie, pétrole, environnement
  - halieutique, épidémiologie, bioinformatique

# La géostatistique

- ◆ Une démarche orientée prédiction :
  - caractériser la variabilité spatiale
  - la modéliser
  - prédire
- ◆ Plusieurs niveaux de complexité :
  - méthodes linéaires stationnaires
  - méthodes non stationnaires
  - méthodes multivariables
  - méthodes non linéaires
  - simulations conditionnelles
  - problèmes inverses

# Plan

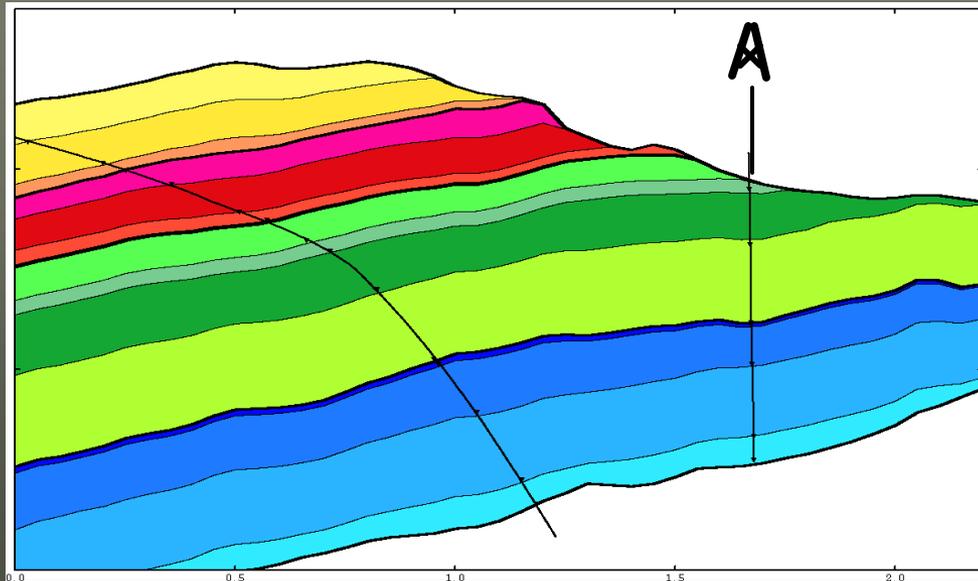
- ◆ Modélisation géologique multicouche
- ◆ Modélisation géologique 3D par champs de potentiel
- ◆ Simulation conditionnelle de faciès et de propriétés pétrophysiques
- ◆ Modélisation de réseaux de fractures

# Modélisation géologique multicouche

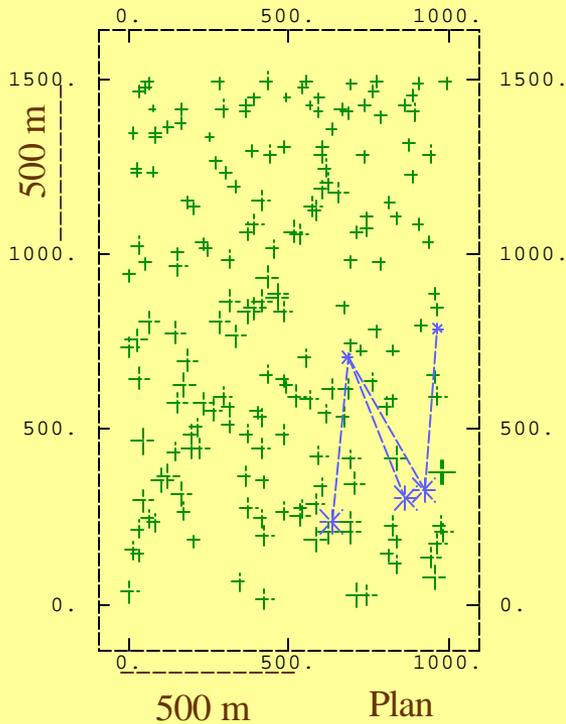
# Modélisation géologique multicouche

## ◆ Objectifs

- Interpoler conjointement le toit ou les épaisseurs des formations comme des variables  $z(x, y)$
- Intégrer sismique et données de forage
- Quantifier la précision de l'interpolation



# Modélisation géologique multicouche



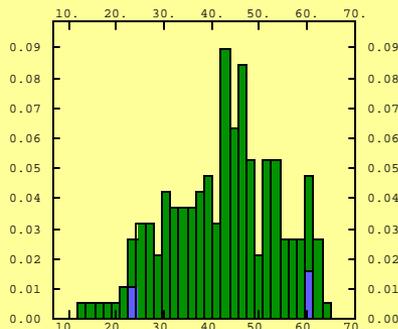
## ◆ Modèles

- FA stationnaires d'ordre 2
- éventuellement avec une dérive

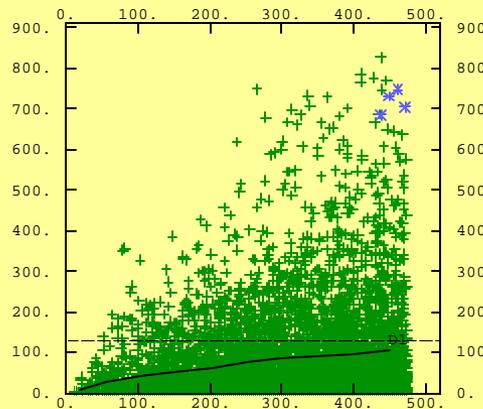
## ◆ Outils

- le variogramme et ses variantes
- le krigeage

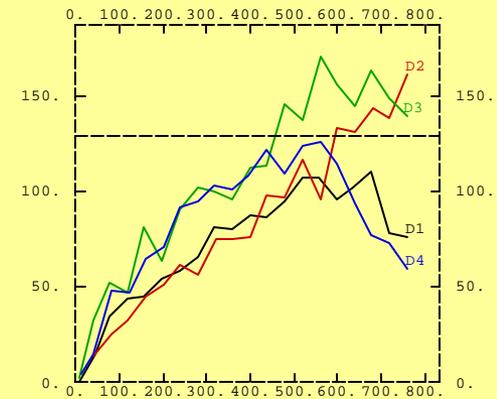
### Histogramme



### Nuage variographique



### Variogrammes directionnels



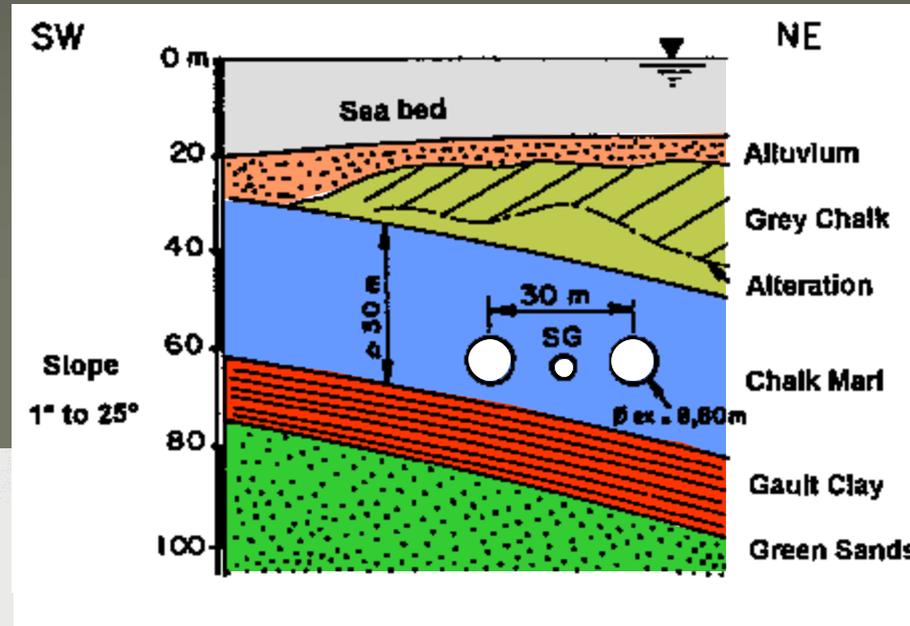
500 m

# Un cas unique de validation par la réalité : le Tunnel sous la Manche

une des 7 merveilles du monde du génie civil du 20<sup>e</sup> s. (ASCE)



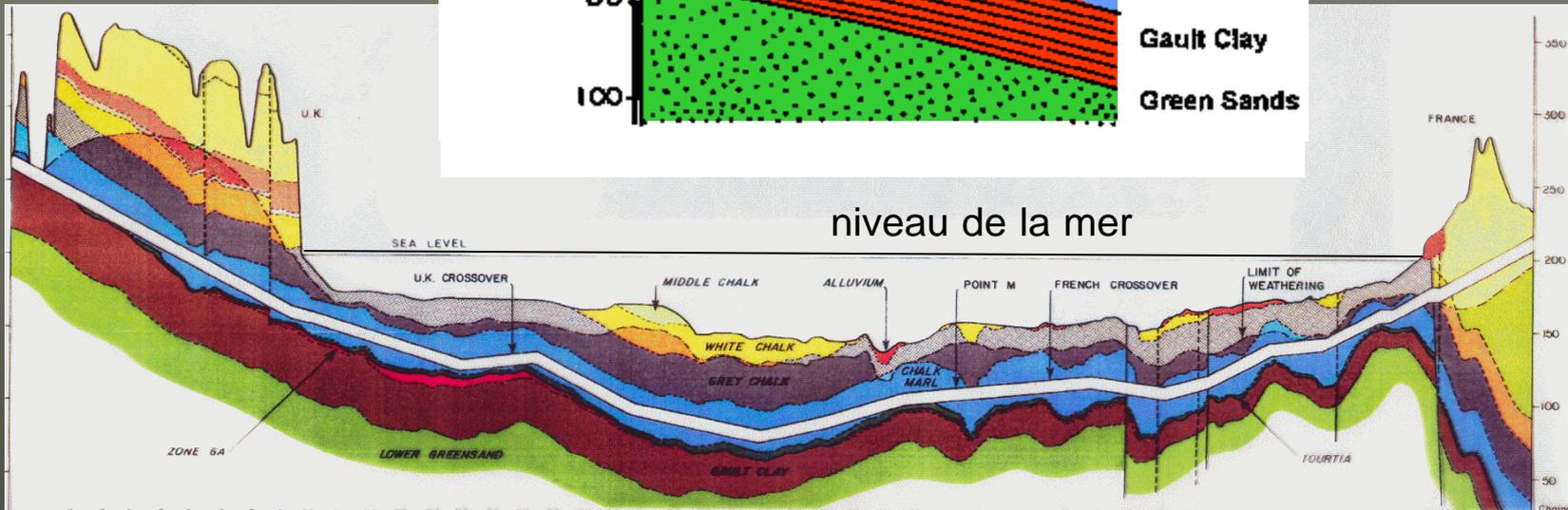
# Tunnel sous la Manche : le problème



Section transverse

Angleterre

France



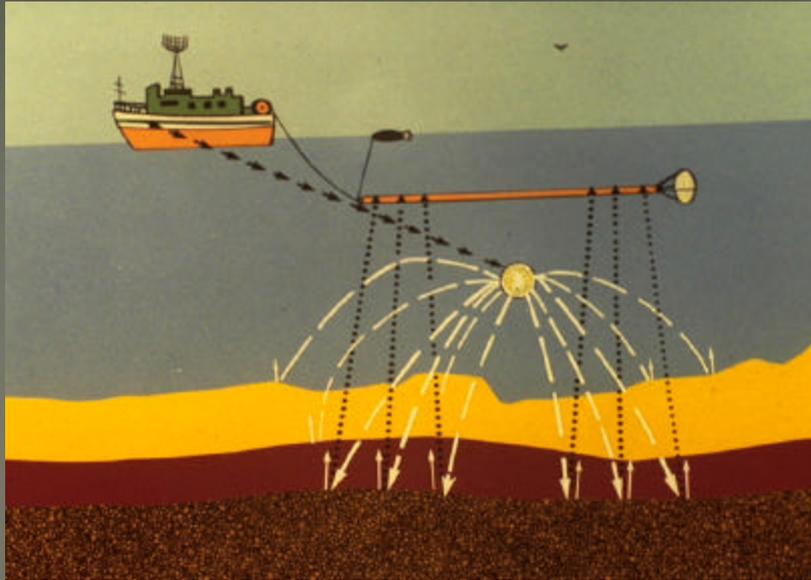
niveau de la mer

100m

50 km

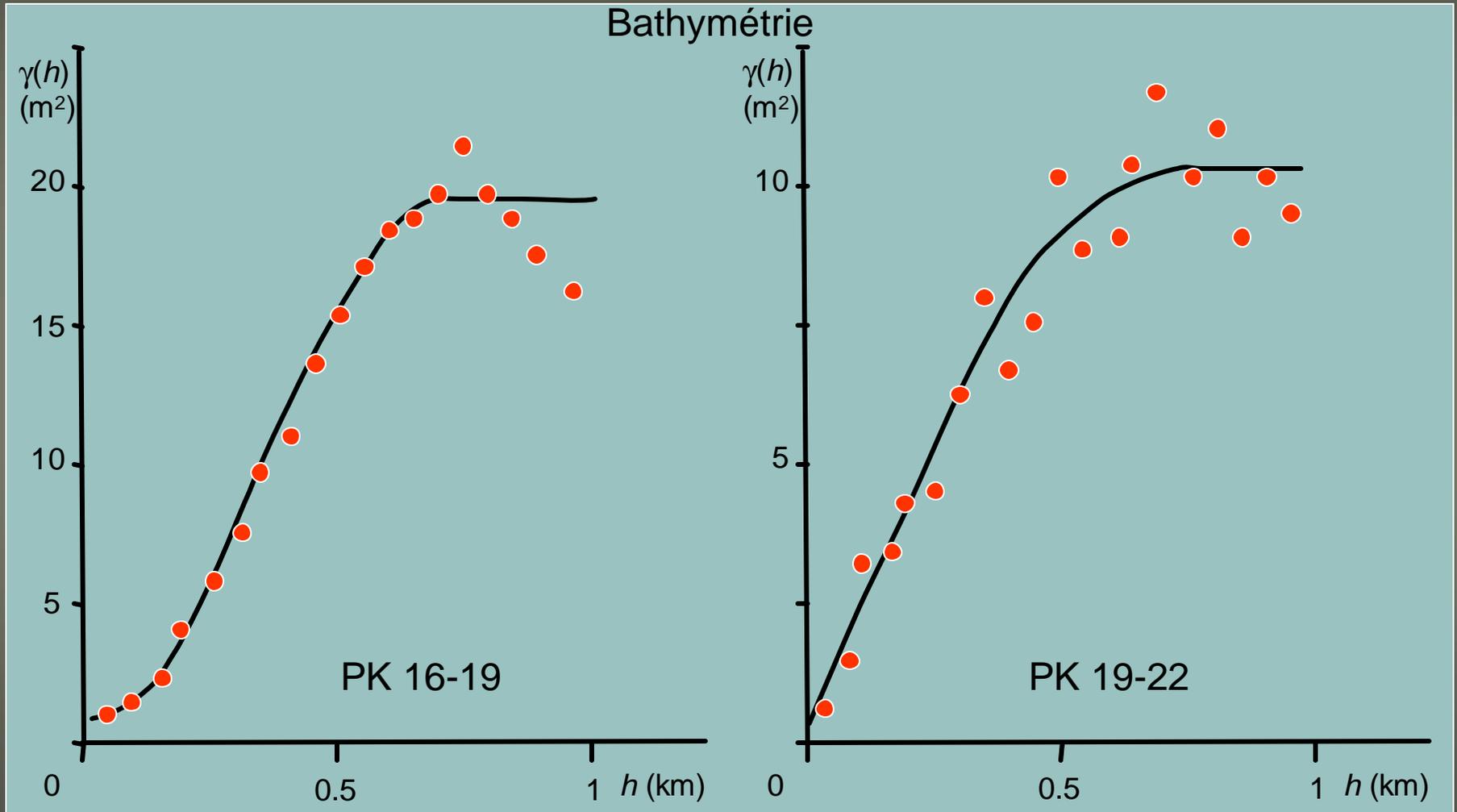
Section longitudinale

# Toit des argiles : interpolation en 4 étapes



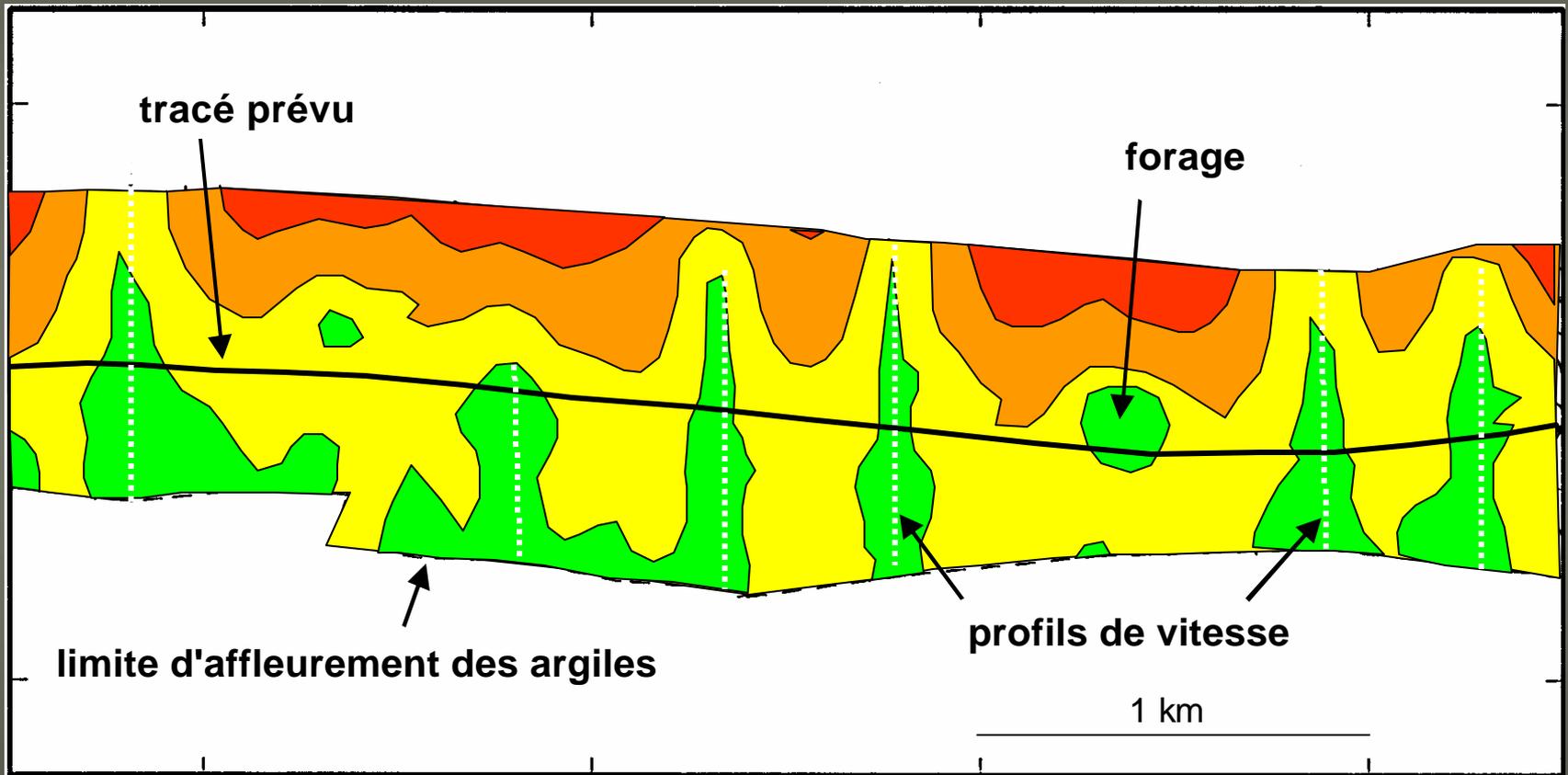
1. Interpolation de la bathymétrie :  $B(x)$
2. Interpolation du temps sismique :  $T(x)$   
(du fond de la mer au toit des argiles)
3. Interpolation de la vitesse sismique:  $V(x)$
4. Combinaison  $\rightarrow$  Interpolation du toit des argiles

# Analyse variographique par zone



De fortes différences de comportement à courte distance → modèle glissant

# Carte de l'écart-type de krigeage



< 2m



2-4 m

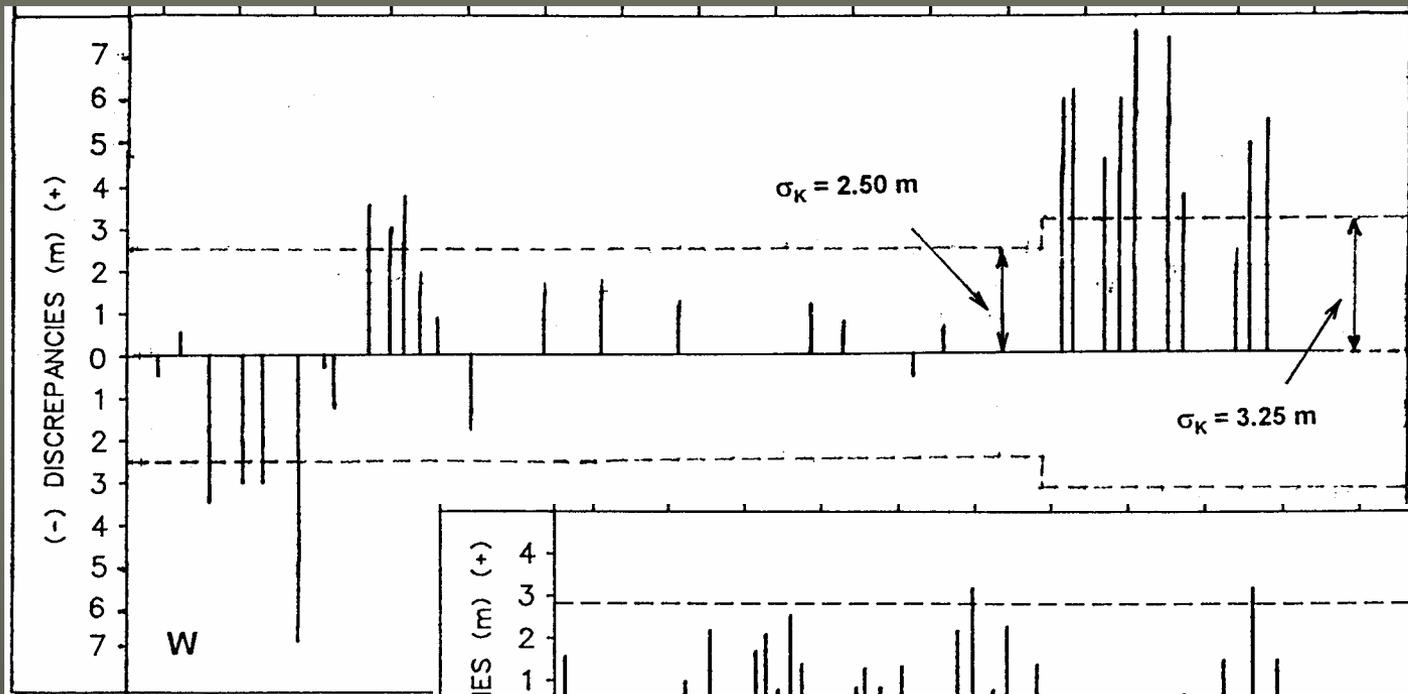


4-6 m

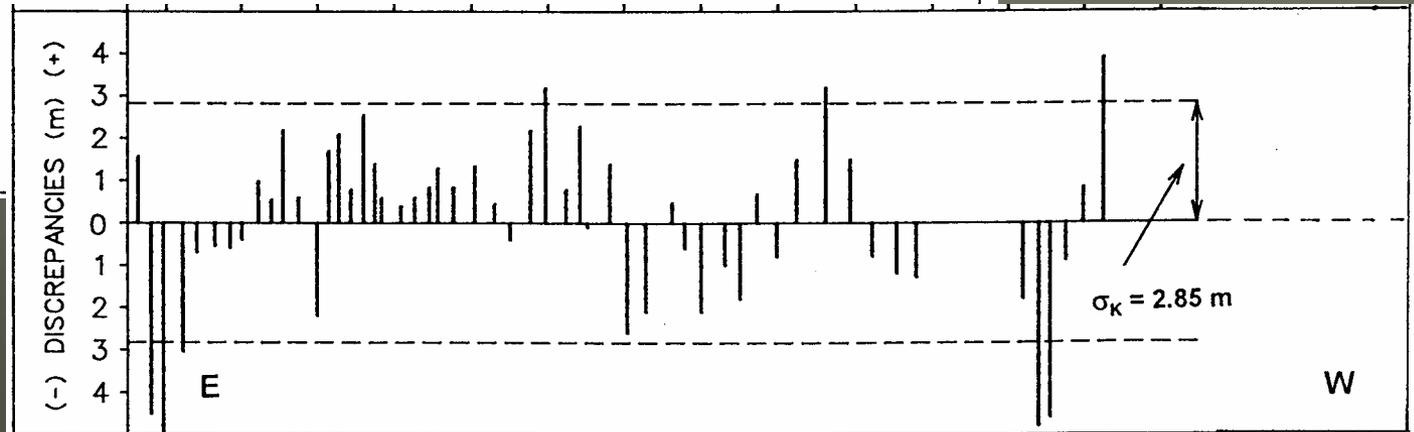


> 6m

# Validation par la réalité : Écarts observés lors du creusement de la galerie de service (Réalité – Prédiction)



Côté anglais



Côté français

# Modélisation géologique 3D : la méthode du champ de potentiel

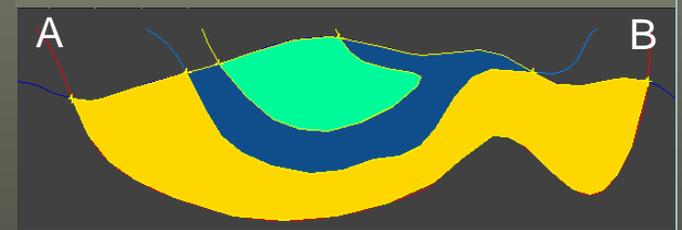
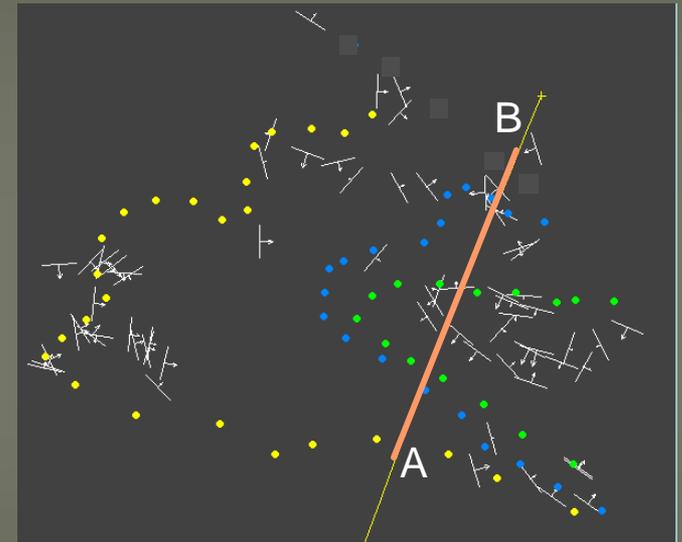
# Objectif

## Modélisation de géométries complexes à partir de

- MNT et carte géologique
- données structurales
- forages
- sections interprétées

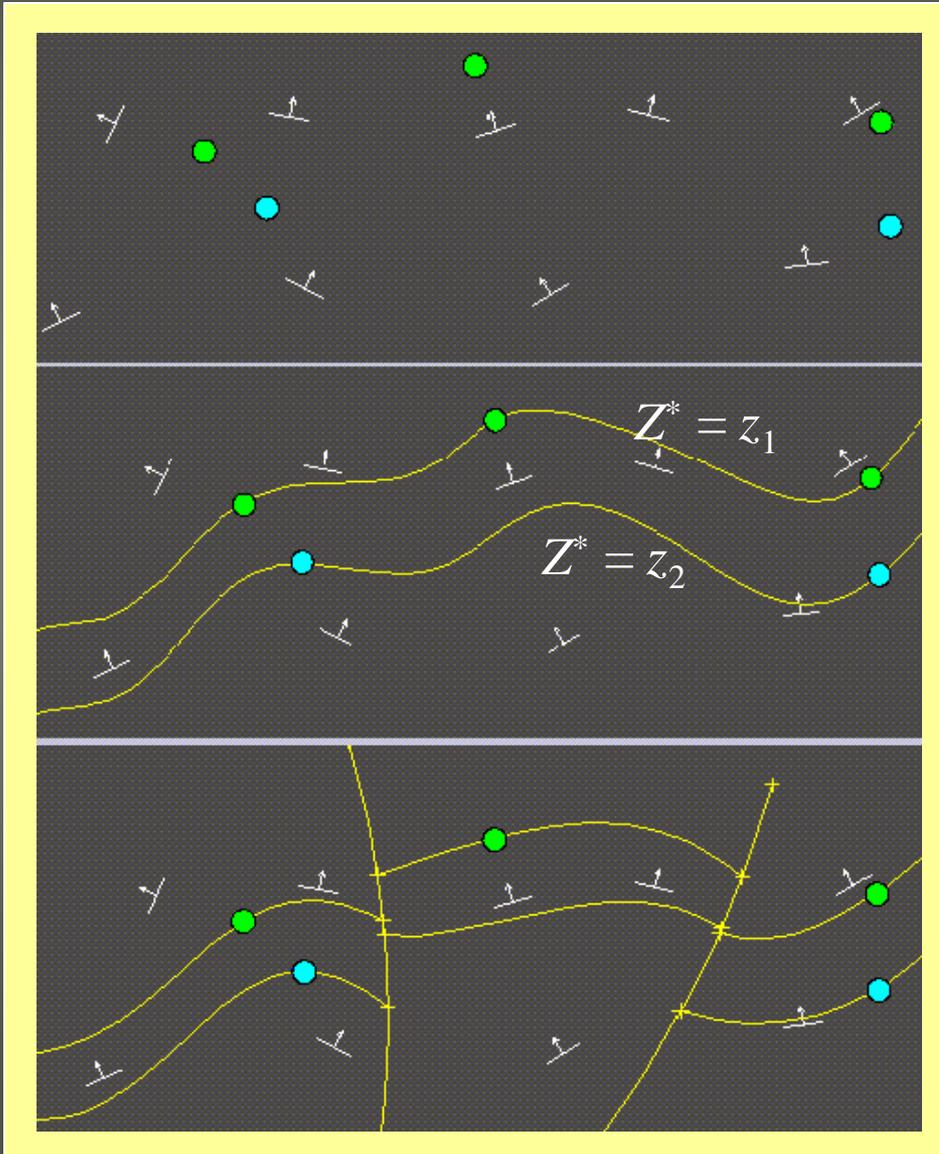
tenant compte de la séquence géologique (érosion / dépôt / intrusion)

vue des données en plan



section verticale à travers le modèle

# Principe de la méthode

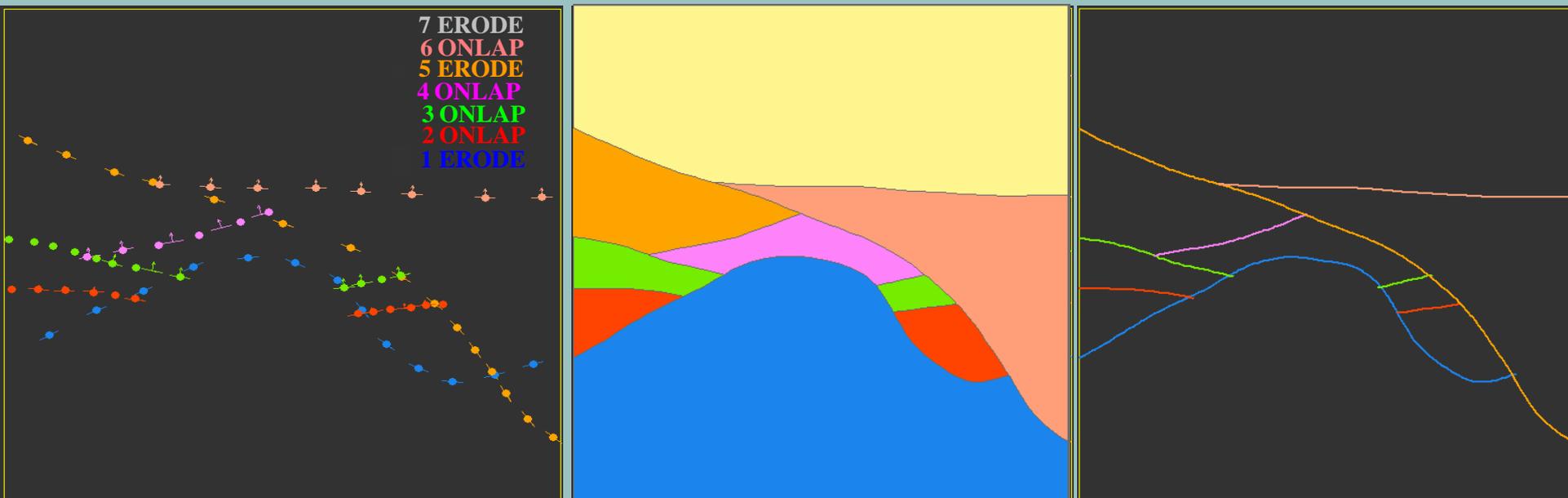


- ◆ Définir un champ de potentiel 3D  $Z$  tel que :
  - les interfaces géologiques sont des surfaces isopotentielles de  $Z$
  - les données structurales sont des gradients de  $Z$
- ◆ Méthode :
  - cokrigage à partir de points situés sur les interfaces et des données de gradient
- ◆ Possibilité de modéliser et prendre en compte les failles

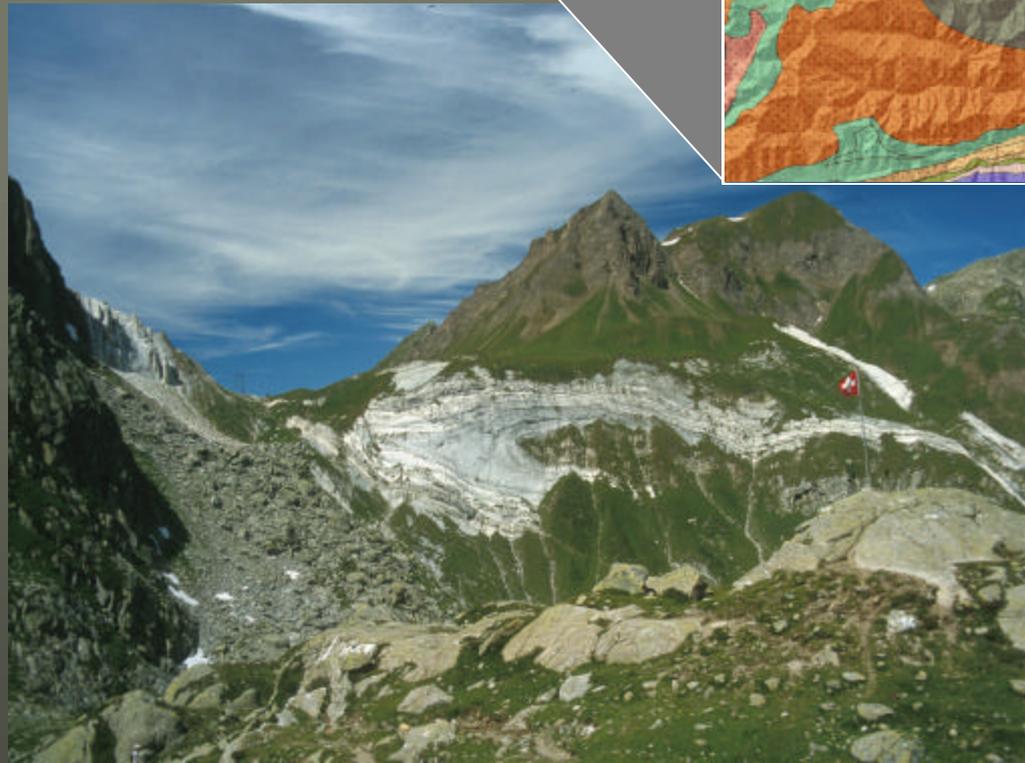
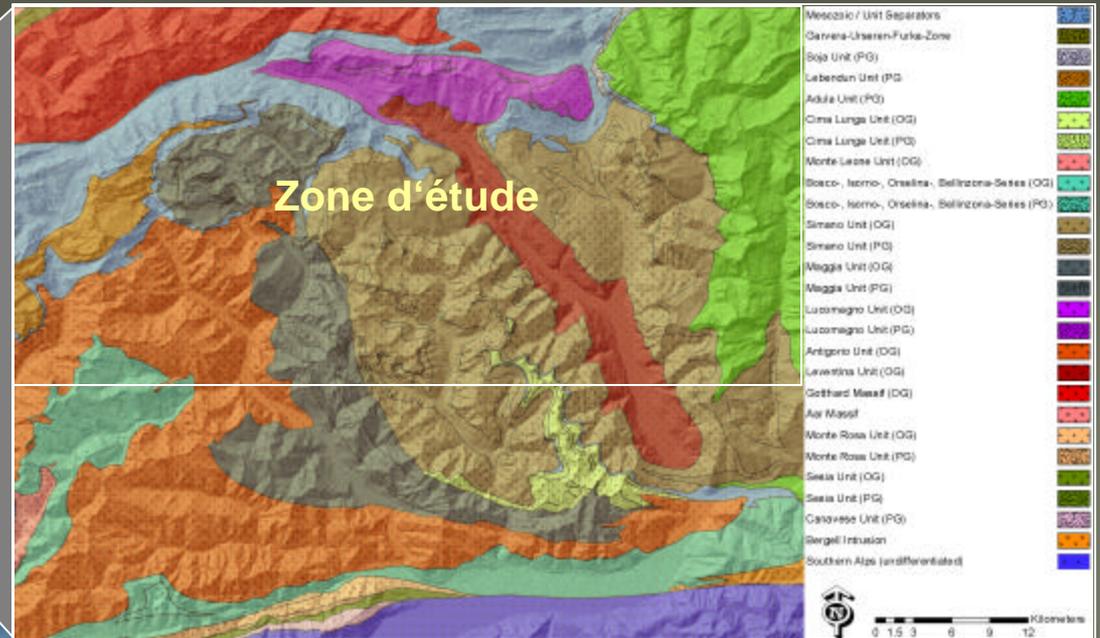
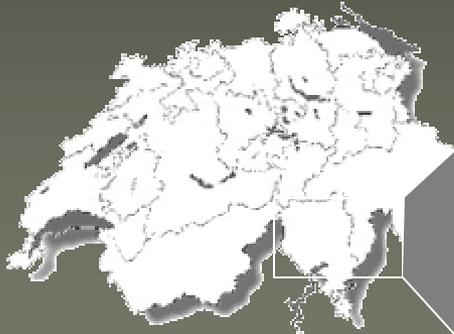
# Combinaison de plusieurs champs de potentiel

Lorsque les interfaces ne sont pas subparallèles :

- ◆ Un champ par interface + séquence géologique
- ◆ Interpolation séparée de chaque champ de potentiel
- ◆ Combinaison en fonction de la séquence géologique



# Géométrie 3D des Alpes Suisses



## Paléogéographie

(Presque) toutes les unités:  
*Marge continentale passive de l'Europe*

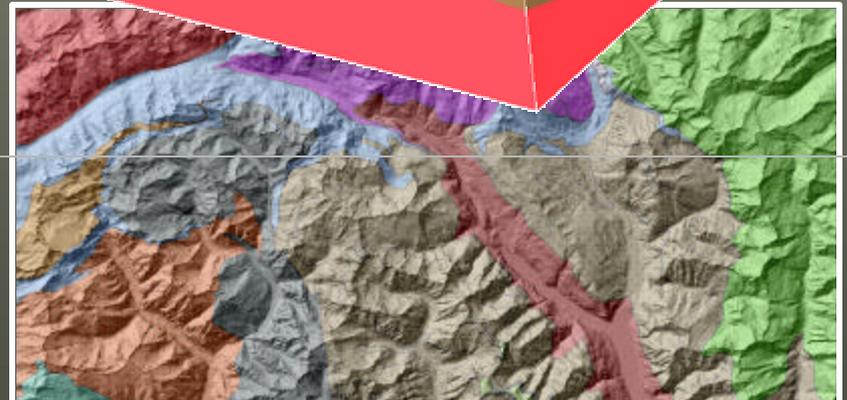
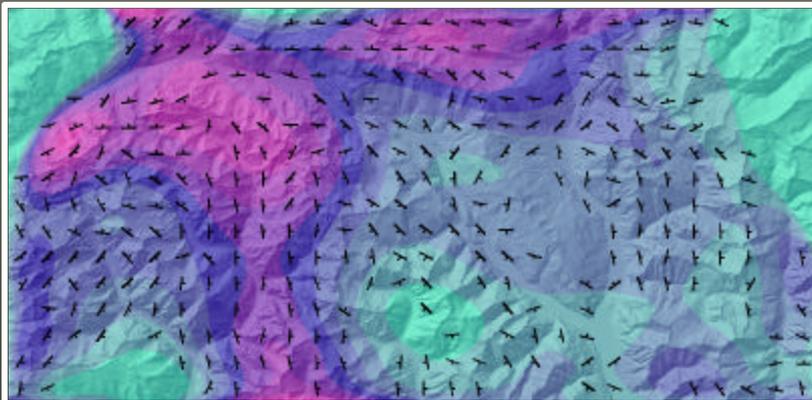
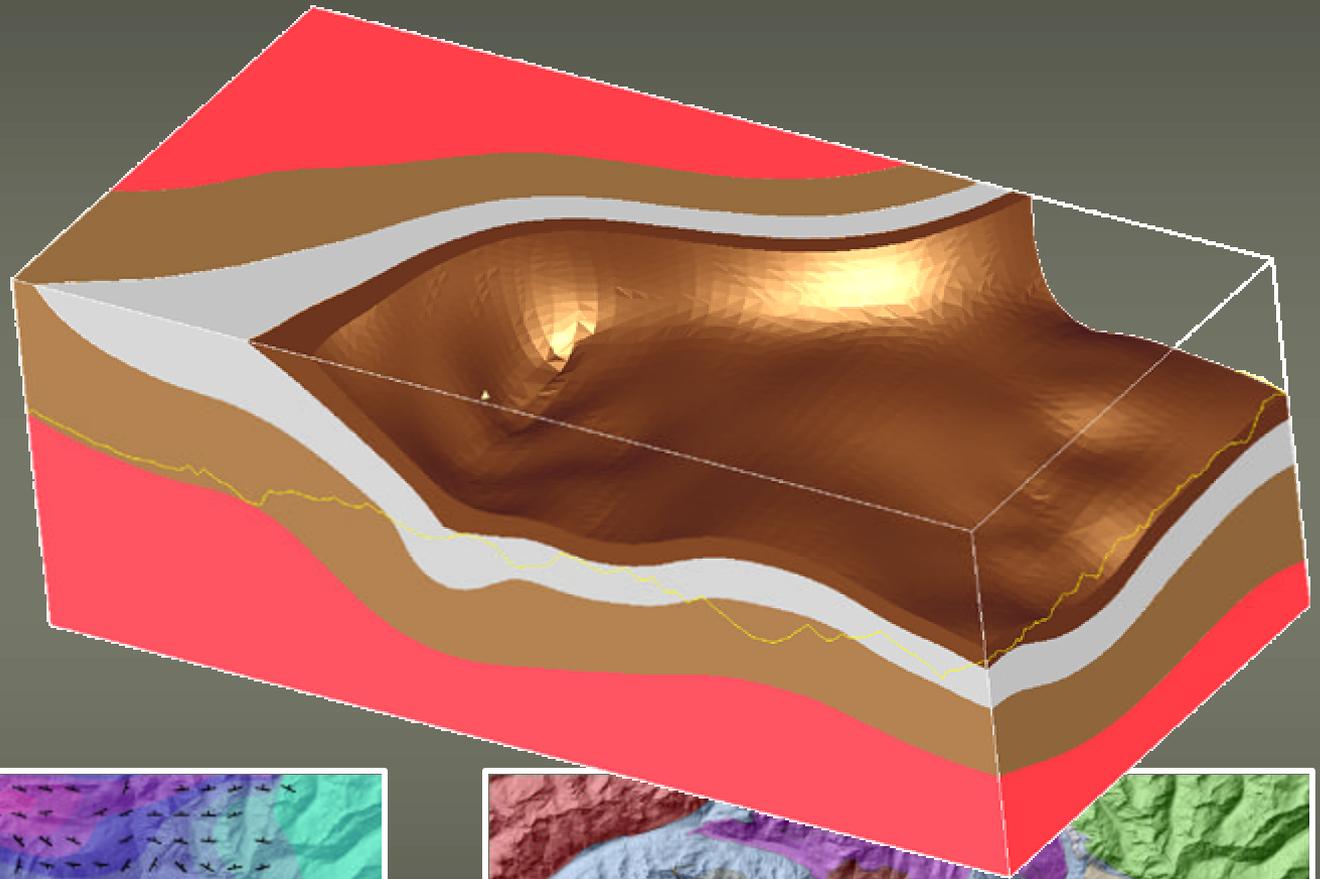
Maggia :  
*Briançonnais ?*

# Modèle 3D du champ de foliation S2

4605 mesures de foliation

La foliation S2 donne l'orientation générale des plans axiaux des plis de la phase D2

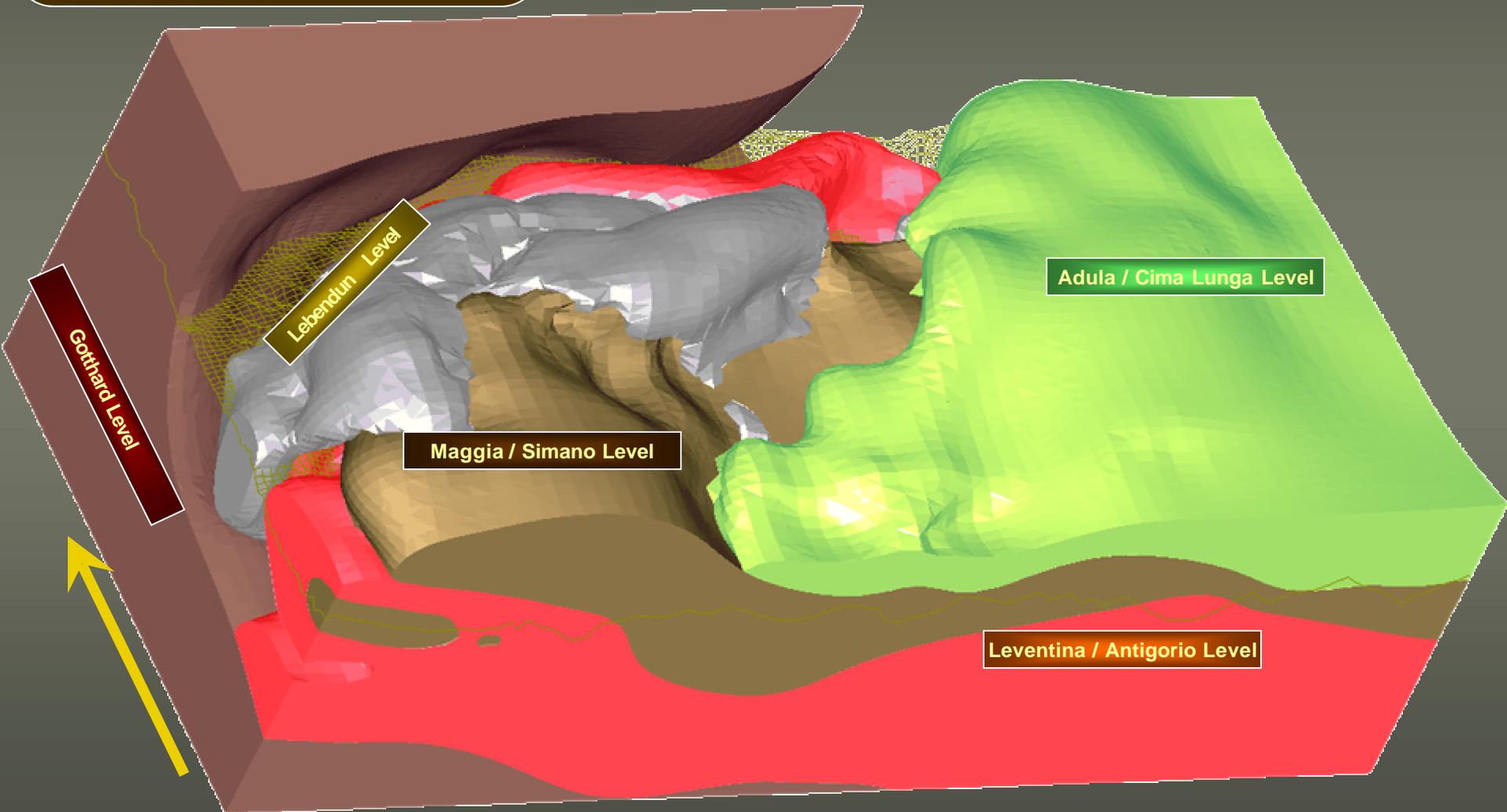
La foliation S2 subit l'impact des phases de déformation D3 et D4



Données :

- Carte géologique
- Sections interprétées  
(direction générale de foliation  
+ données pétrologiques)

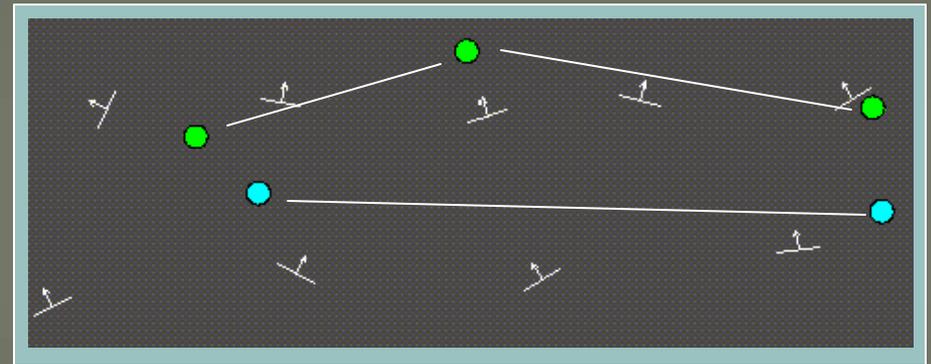
# Modélisation 3D des nappes



# Caractérisation de la variabilité spatiale du champ de potentiel

## ◆ Données de potentiel :

- accroissements nuls
- ⇒ pas d'accès direct à la covariance de  $Z$



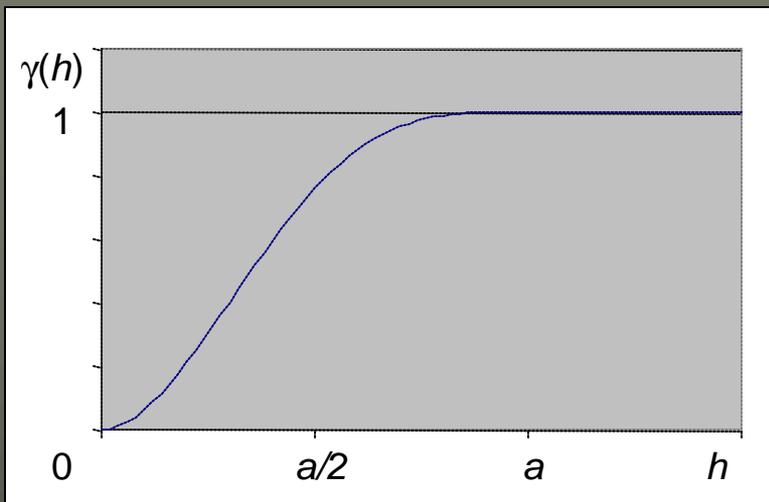
## ◆ Deux solutions :

- choix heuristique  
⇒ une méthode conventionnelle parmi d'autres
- caractérisation de la covariance à partir des données d'orientation (thèse C. Aug)

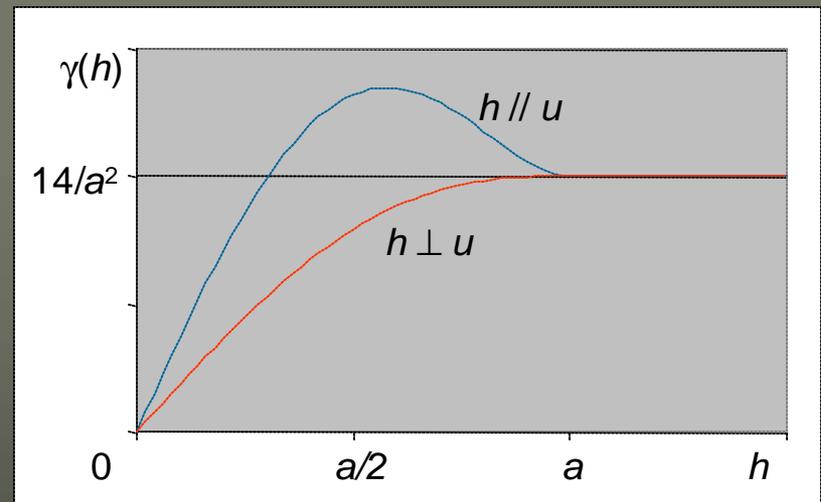
# Variogramme des données d'orientation

- ◆ La covariance du gradient est liée algébriquement à la covariance du potentiel
- ◆ Exemple : modèle cubique de portée  $a$  (pour  $Z$ )

Variogramme du potentiel  $Z$



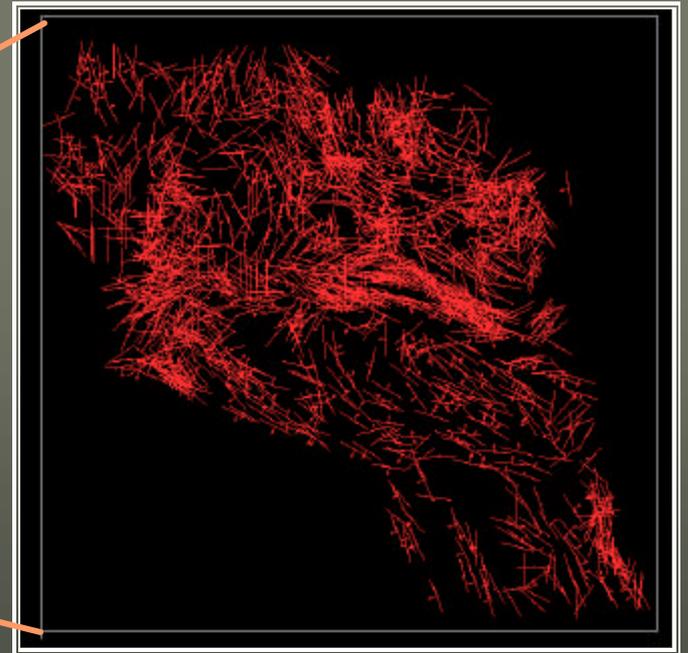
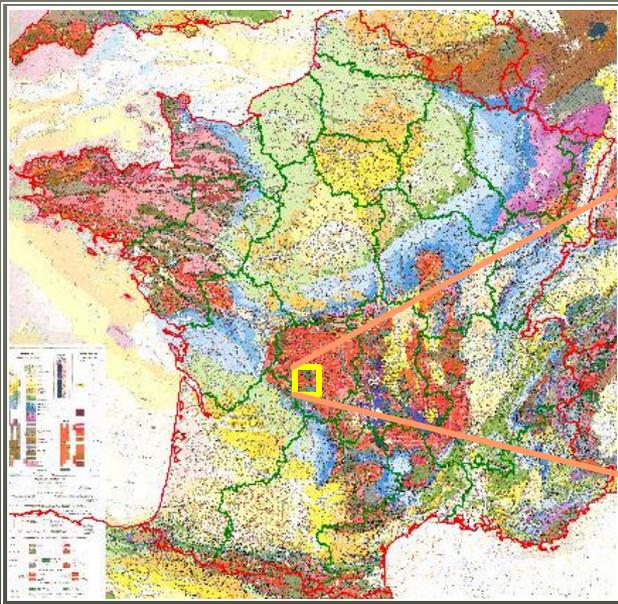
Variogramme de la dérivée  $\partial Z / \partial u$



- ◆ En pratique : somme de modèles cubiques anisotropes

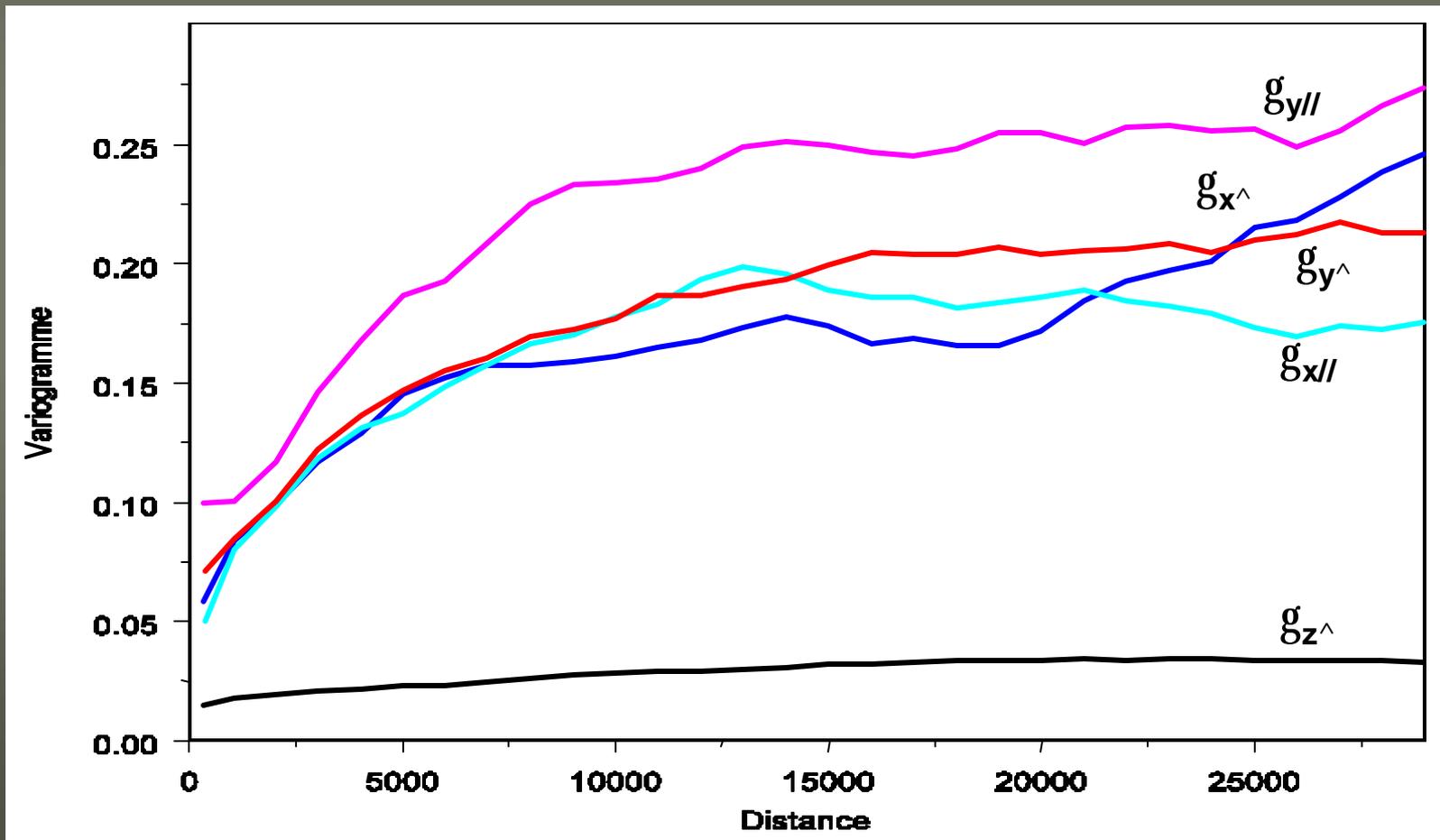
# Exemple du Limousin

- ◆ 70 x 70 km
- ◆ toit d'un ensemble de roches métamorphiques
- ◆ 1485 données de foliation
- ◆ gradient vertical toujours positif



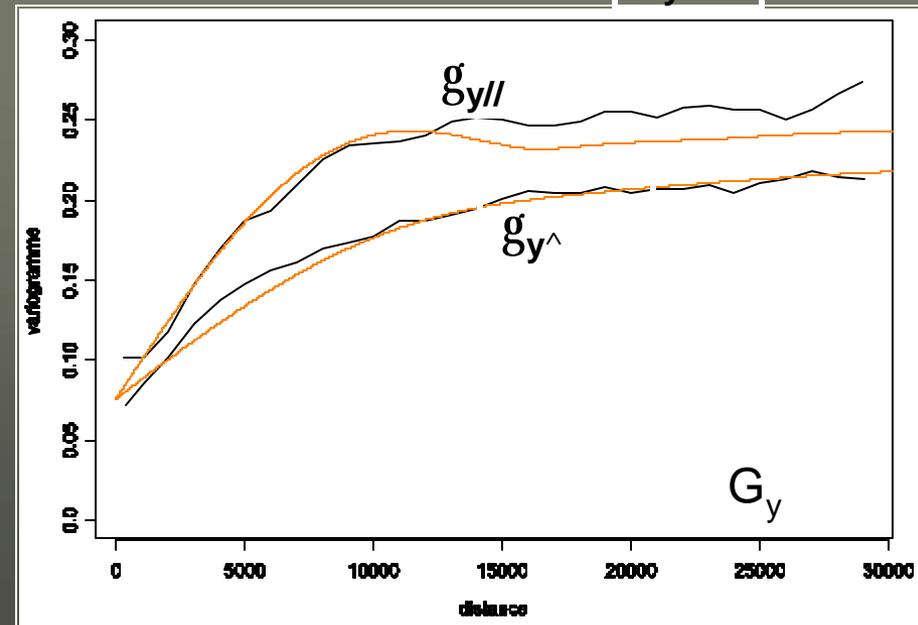
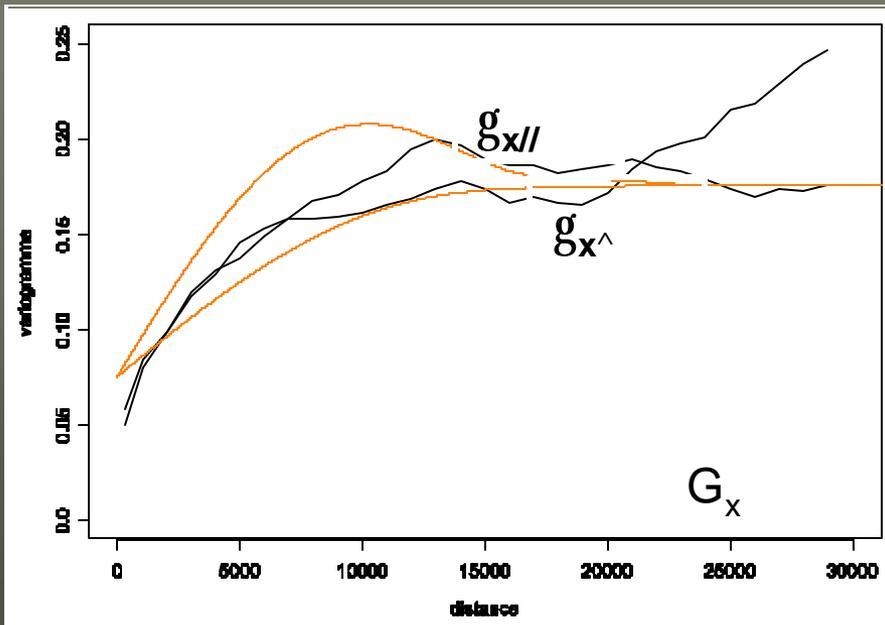
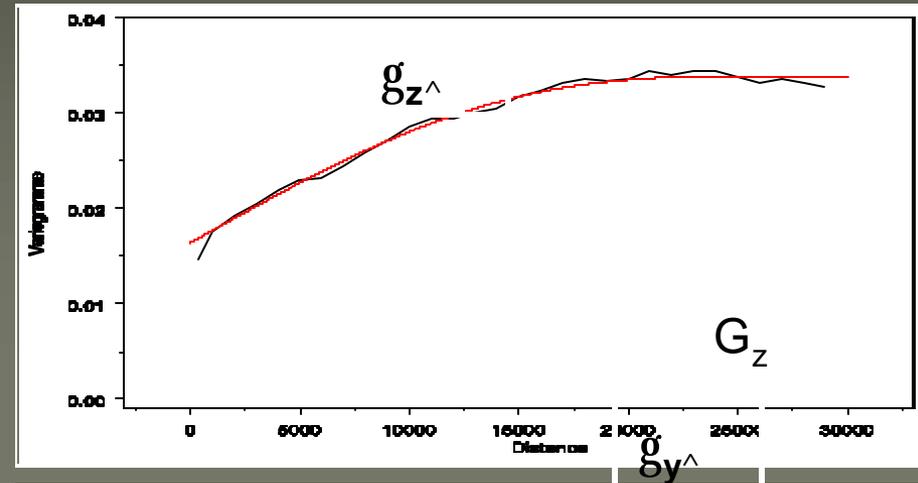
# Variogrammes expérimentaux des composantes du gradient

## Variogrammes horizontaux



# Ajustement des variogrammes

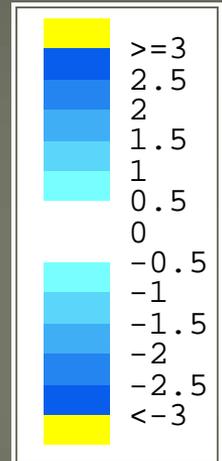
Struct.	Effet de pépite	Palier	Portée (m)
x, y, z	0.017	0.017	25 000
x, y	0.058	0.083	17 000
y		0.050	55 000



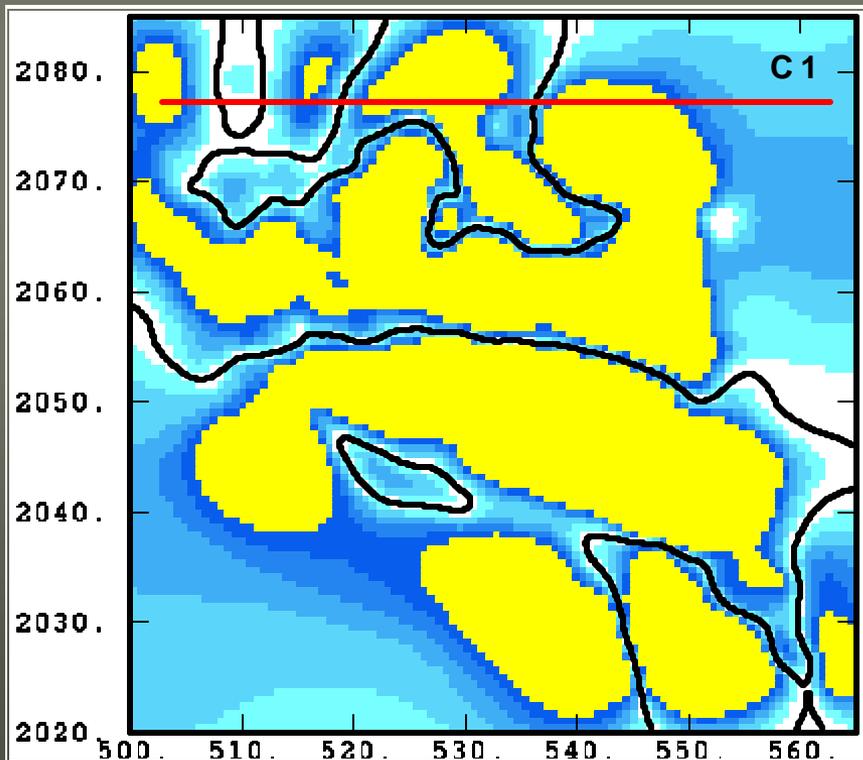
# Incertitude sur la position de l'interface de potentiel $Z_0$

Mesurée par l'écart réduit

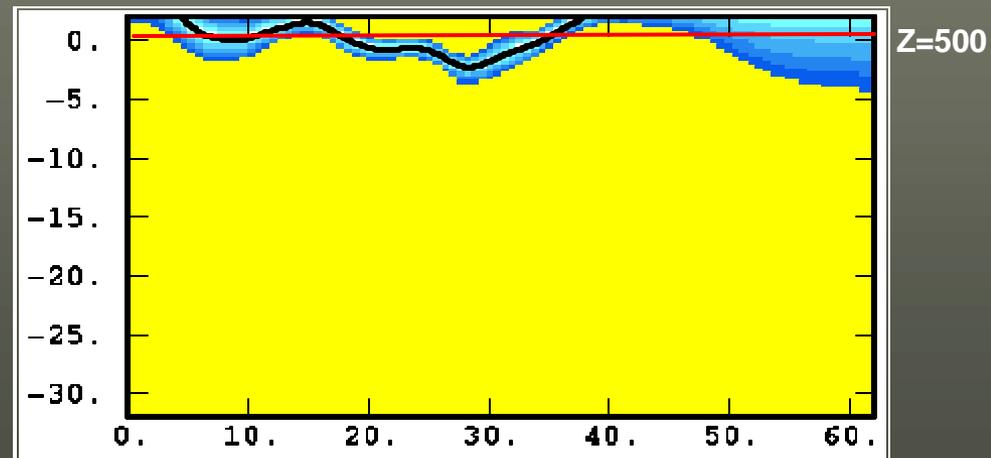
$$\Phi(x) = \frac{Z^*(x) - Z_0}{\sigma_K(x)}$$



Plan z = 500 m



Coupe verticale C1



# Quelques points à approfondir

## Modélisation géologique 3D

- ◆ Améliorations de la méthode des potentiels
- ◆ Prise en compte des données de gravimétrie et magnétisme

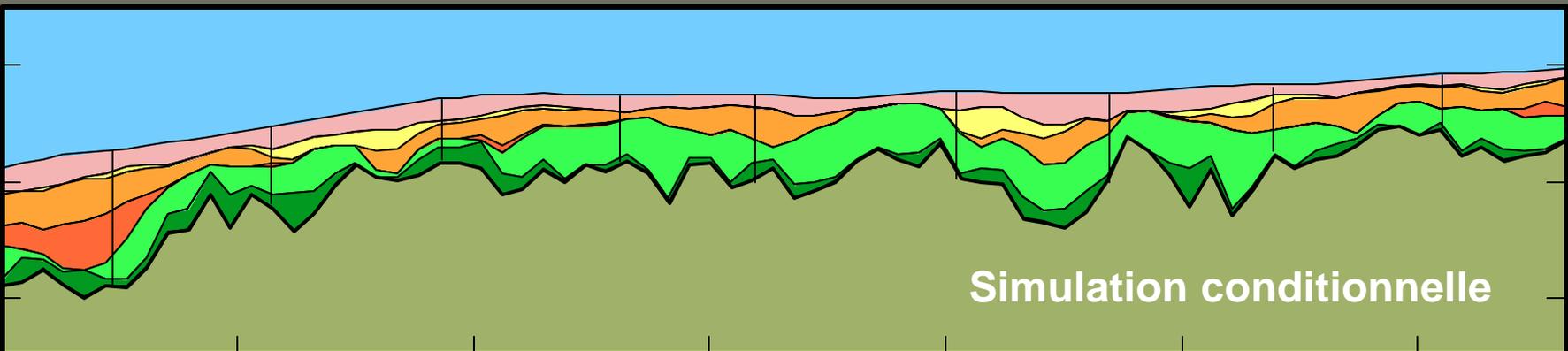
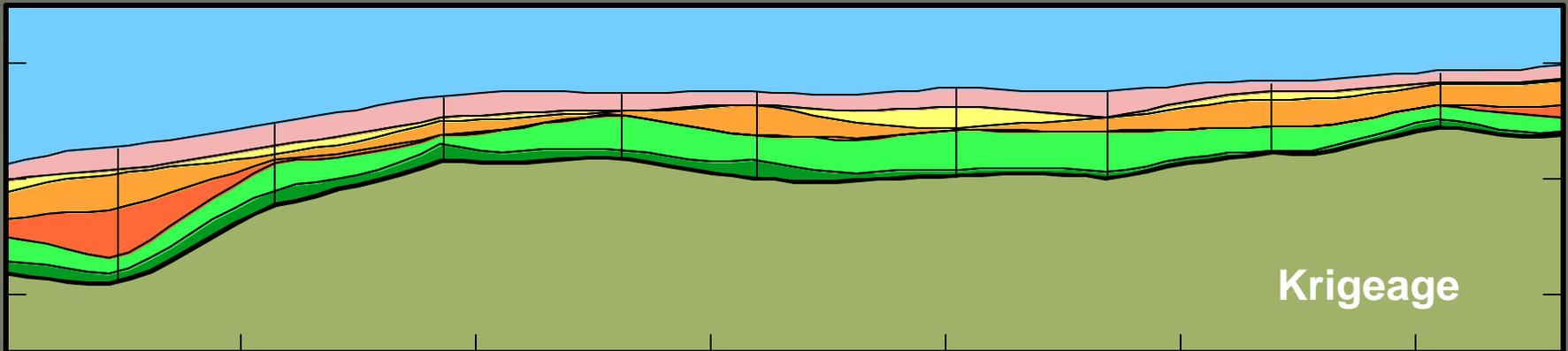
## Autres applications

- ◆ modèles spatio-temporels  
(profils de plage, qualité de l'air)
- ◆ données territoriales ou sur graphes  
(INSEE, cours d'eau)

# Simulation conditionnelle de faciès et de propriétés pétrophysiques

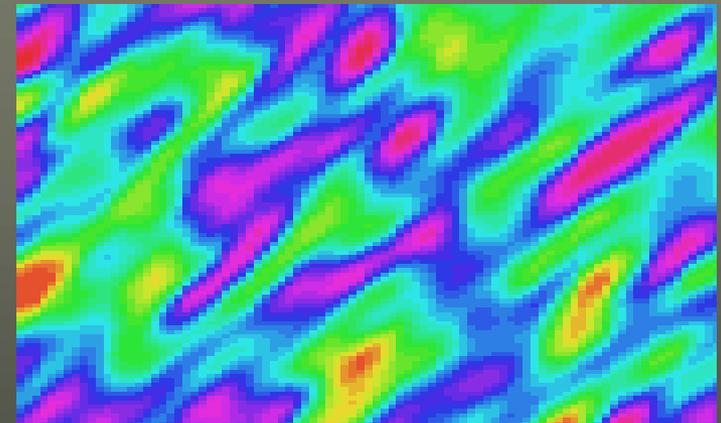
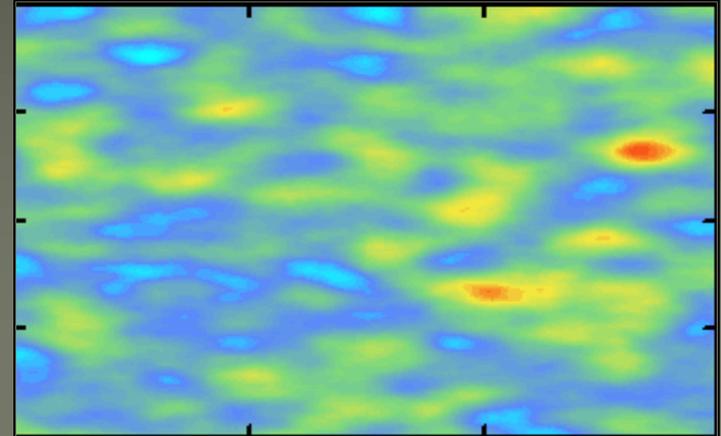
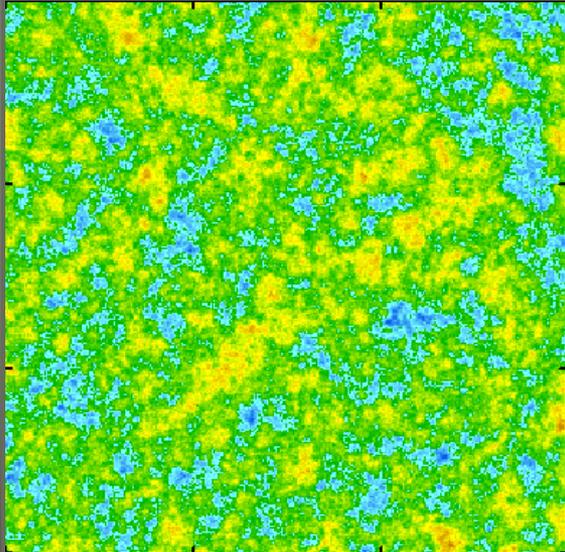
# Krigeage / Simulation conditionnelle

*Coupe verticale à travers le gisement de nickel de Tiébaghi*

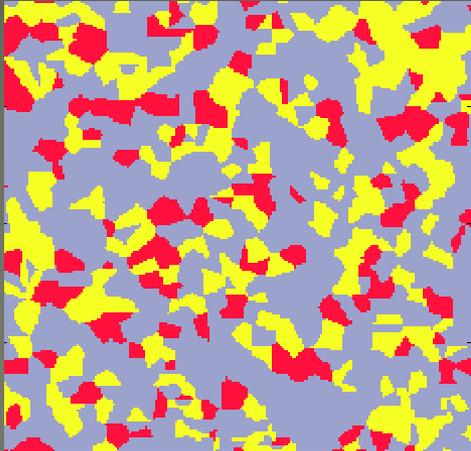


# Simulation de propriétés

simulation de FA gaussienne  
+ conditionnalisation par krigeage  
+ anamorphose

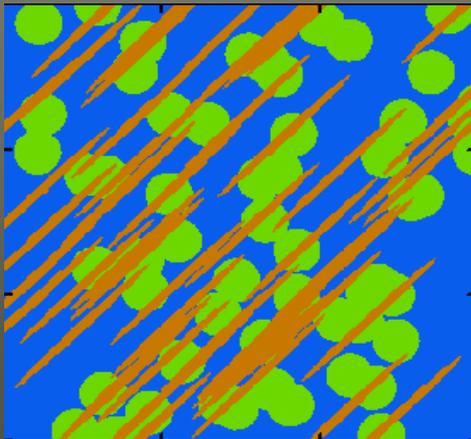
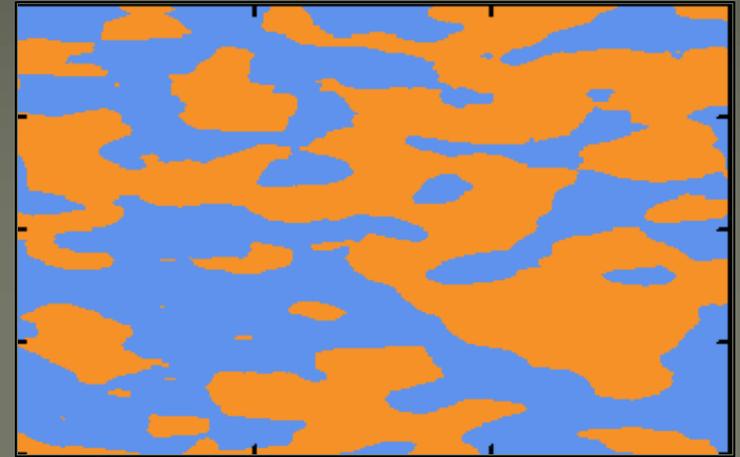


# Simulation de faciès



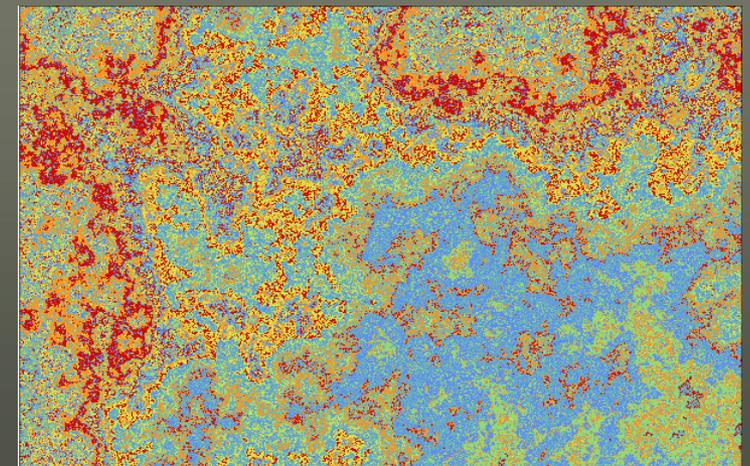
Tessellation

Gaussienne  
seuillée

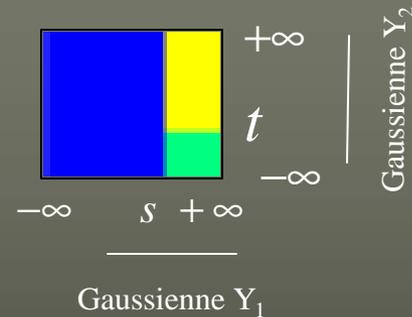
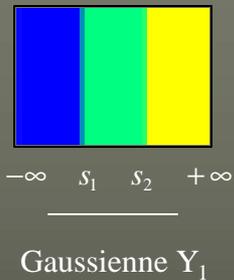
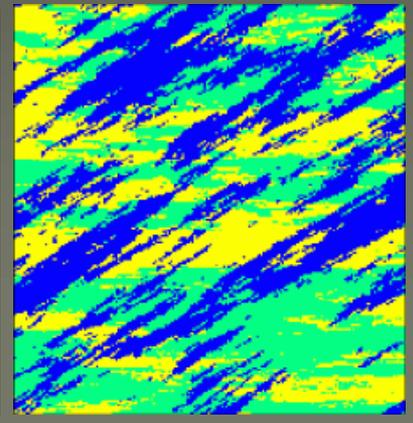
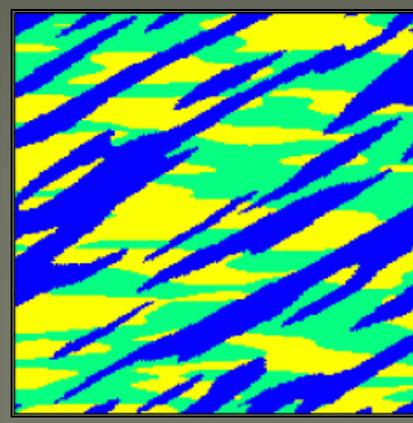
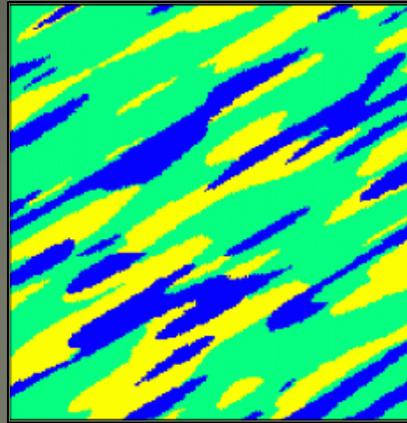
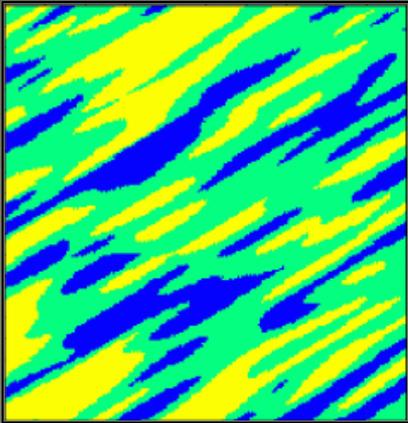


Modèle  
Booléen

FA de  
substitution



# De gaussienne à plurigaussienne

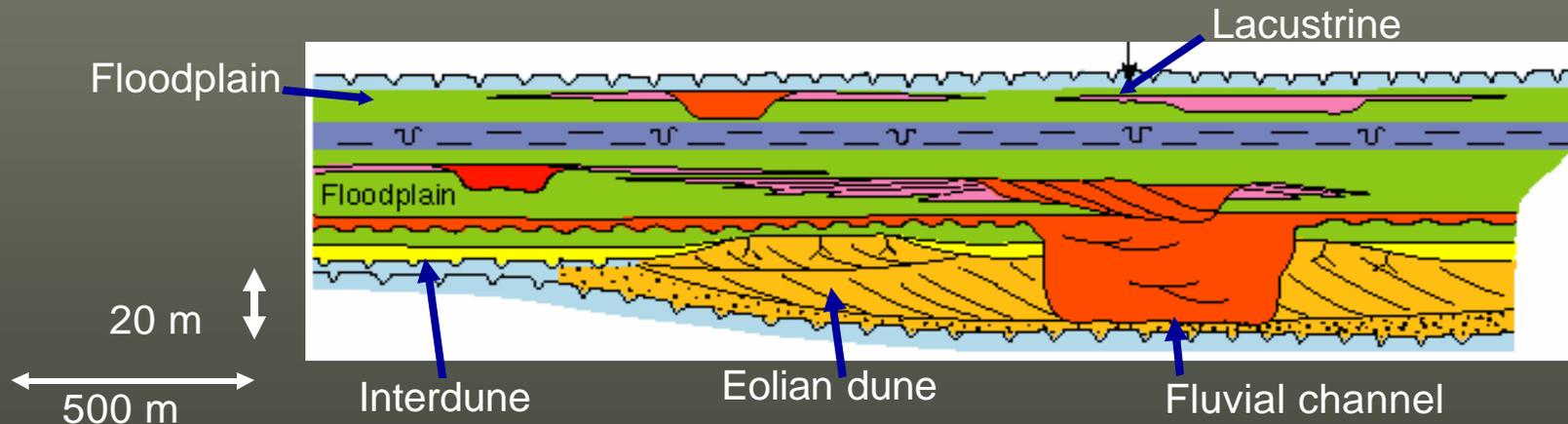
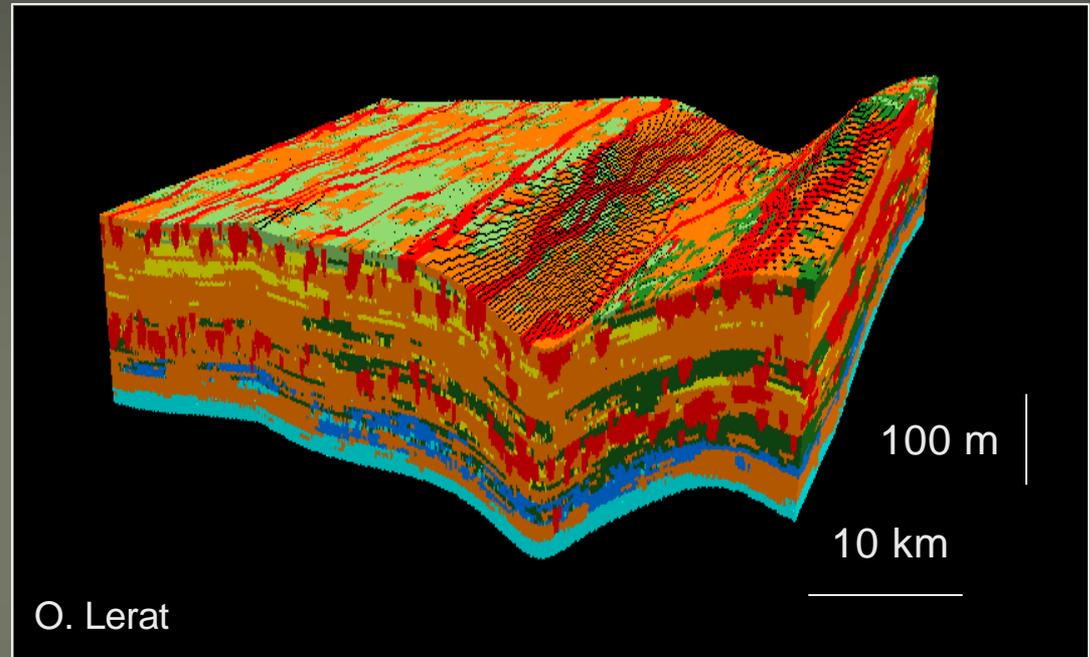
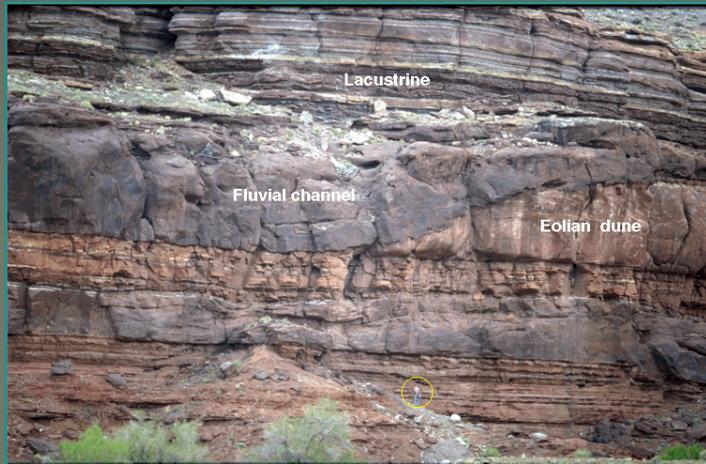


*Une seule gaussienne :  
les faciès sont ordonnés*

*Deux gaussiennes : tous les contacts sont possibles  
(les formes varient selon la structure et l'anisotropie  
des gaussiennes)*

# Dépôts éoliens et fluviaux

Permien, Utah



Collaboration avec l'IFP

# Approche génétique et stochastique

## *Modélisation de réservoirs chenalisés méandriformes*

Thèse S. Lopez – Consortium Chenaux – Collab. Laboratoire de Sédimentologie



Combinaison d'une **approche déterministe**  
– équations d'hydrodynamique fluviale –  
et d'une **approche stochastique**  
– aspect multi-réalisations –



# Évolution spatiale

Migration latérale, dépôt, érosion (selon structure de l'écoulement et érodabilité)

+ aggradation verticale

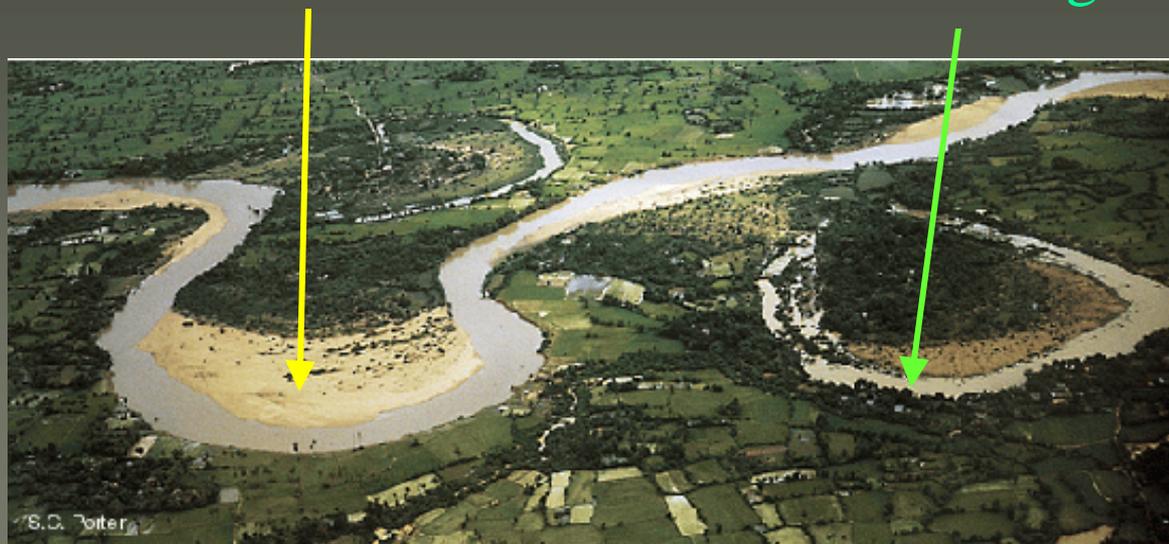
Évolution plane



# Modèles de dépôts

barres de méandres

bouchons d'argile



dépôts de débordement



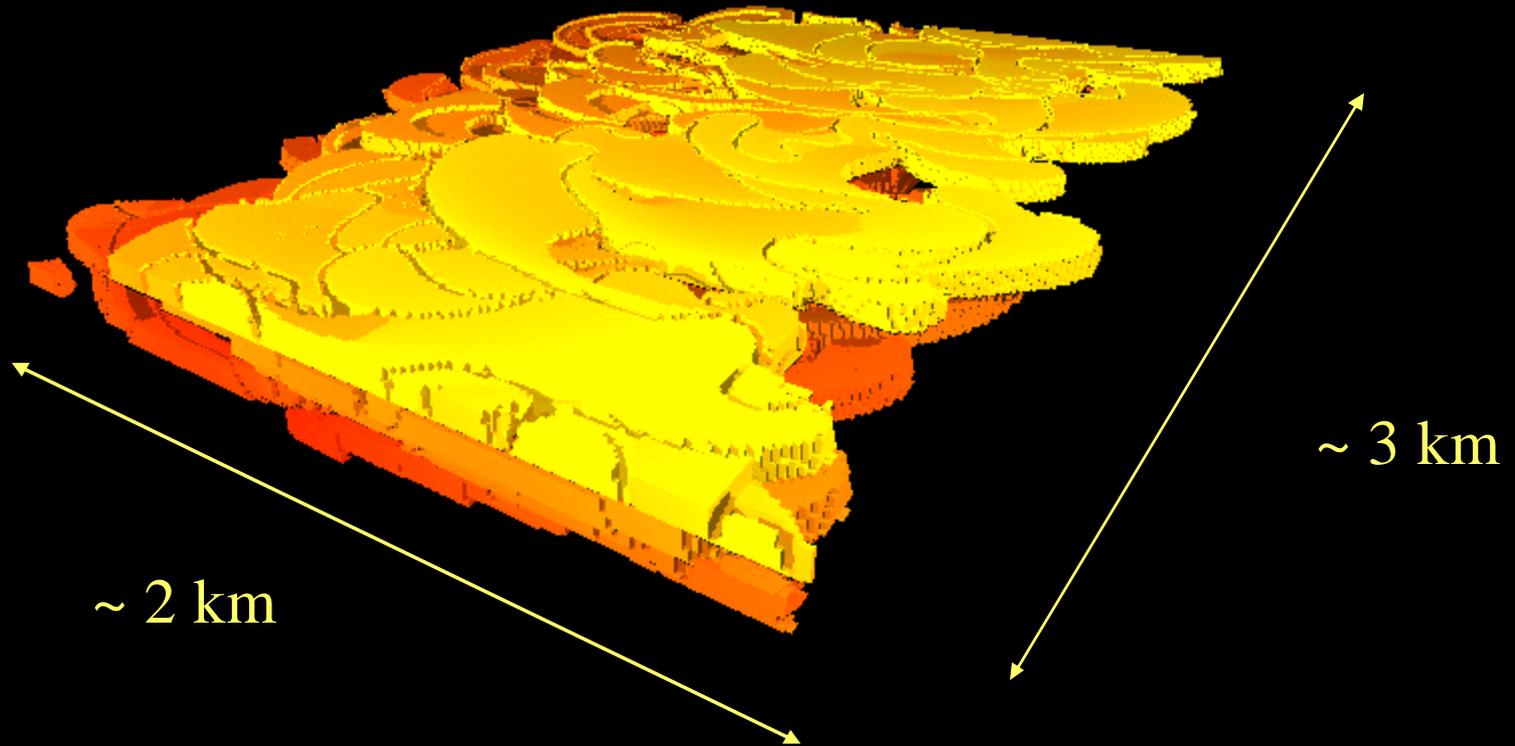
lobes de crevasse

# Modèles de dépôts



# Modèles de dépôts

Dépôts de barres de méandres sur 20 ka



# Quelques points à approfondir

## Approche génétique et stochastique :

- ◆ conditionnalisation
- ◆ autres environnements : turbidites, réservoirs carbonatés

## Le problème de la moyenne :

- ◆ modélisation de la loi marginale
- ◆ modélisation des courbes de proportion

## Une interrogation de fond :

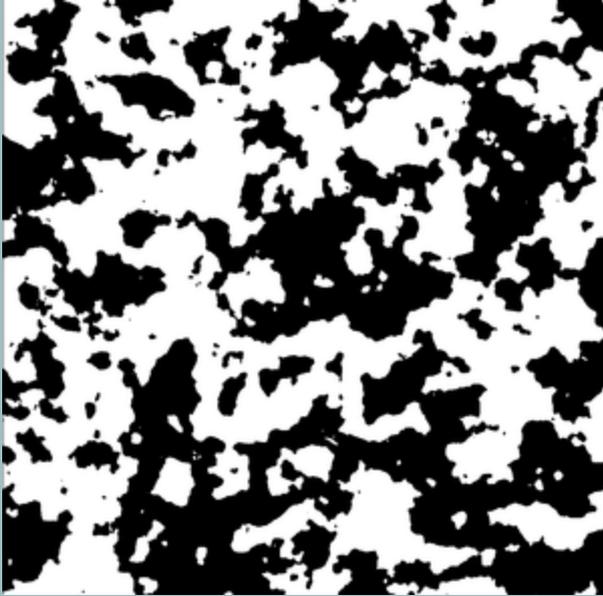
- ◆ Prédire à l'aide de simulations conditionnelles a-t-il un sens ?

# Simulation et prédiction selon Matheron

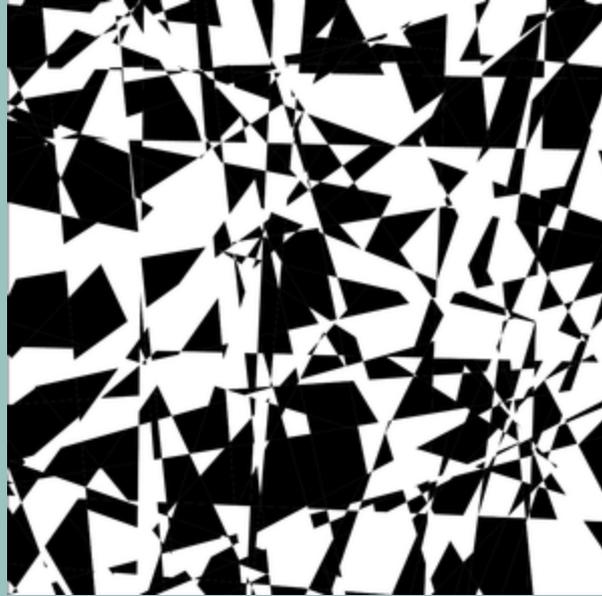
- ◆ Dans les applications il est illusoire de faire appel aux lois multivariées expérimentales au-delà des lois bivariées
  - ⇒ Recourir à des modèles aussi peu spécifiés que possible :
    - modèles stationnaires d'ordre 2 et leurs variantes
    - modèles isofactoriels
  - ⇒ Se limiter aux prédicteurs s'appuyant sur ces modèles :
    - krigeage simple, ordinaire, KU
    - krigeage disjonctif
  - ⇒ Utiliser des simulations de FA pour évaluer ces prédicteurs par rapport à l'espérance conditionnelle

# Illustration

gaussienne seuillée



mosaïque



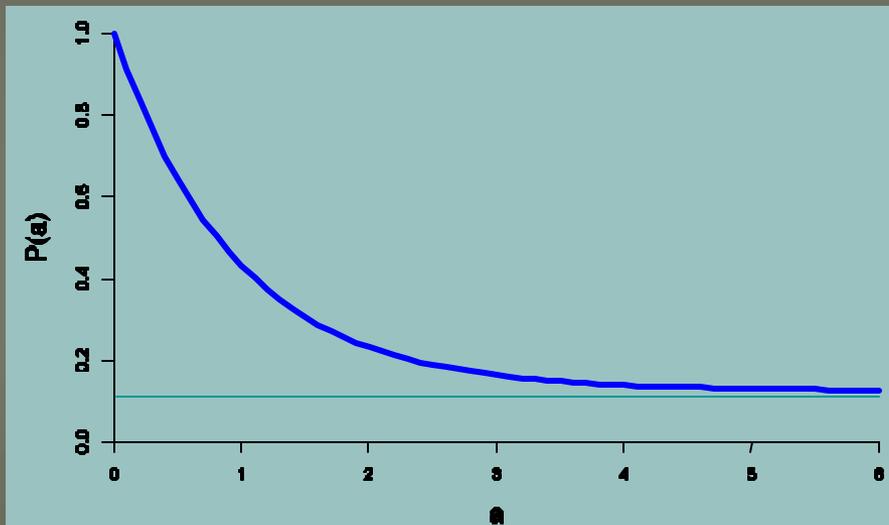
feuilles mortes



- ◆ même moyenne ( $1/2$ )
- ◆ même covariance exponentielle (param. d'éch. =  $L / 25$ )
- ◆ mêmes lois bivariables
- ◆ mêmes lois trivariables (ensembles autoduaux)

# Tentative de différenciation par des lois quadrivariables

- ◆ Probabilité  $P(a)$  que les quatre sommets d'un tétraèdre de côté  $a$  soient tous dans la même phase



3 courbes  
superposées

- ◆ Probabilité  $P(a)$  que quatre points alignés espacés de  $a$  soient tous dans la même phase : *idem*

Les lois multivariables ne se différencient pas (à l'ordre 4)

Q : N'y a-t-il pas invariance de propriétés plus globales ?

# Statistique de propriétés globales

- ◆ écoulement : temps de transfert d'une source à un domaine donné
- ◆ tailles des plus grandes composantes connexes de chaque phase (à l'intérieur du champ simulé)

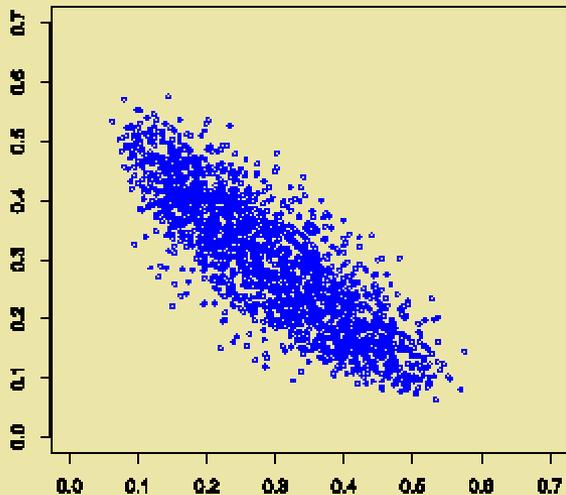


- ◆ une réalisation  $\rightarrow$  un couple de valeurs
- ◆  $\Rightarrow$  statistique sur 1000 simulations

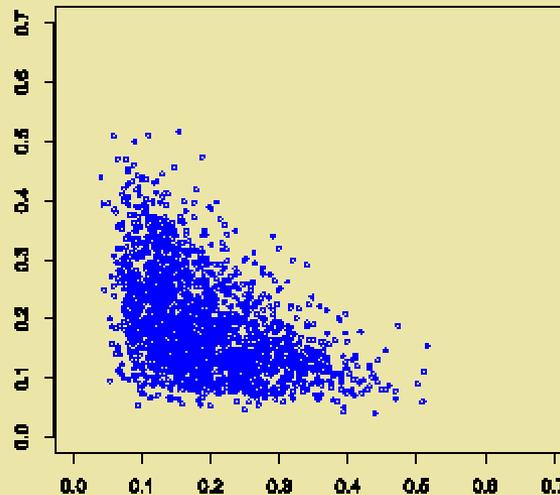
# Statistique de propriétés globales

Taille de la plus grande composante connexe d'une couleur  
v. Taille de la plus grande composante connexe de l'autre couleur  
(1000 simulations 1000 x 1000)

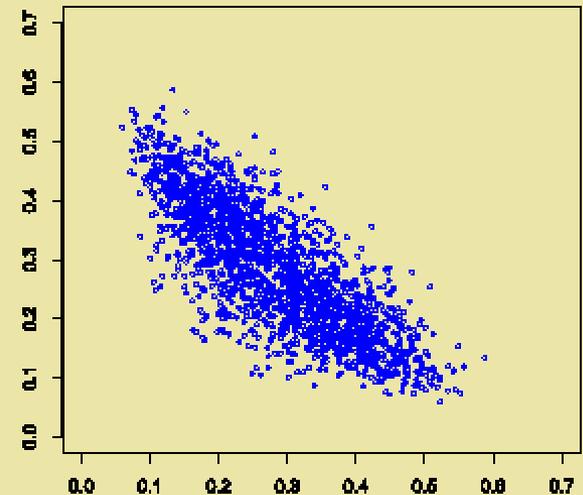
**gaussienne seuillée**



**mosaïque**



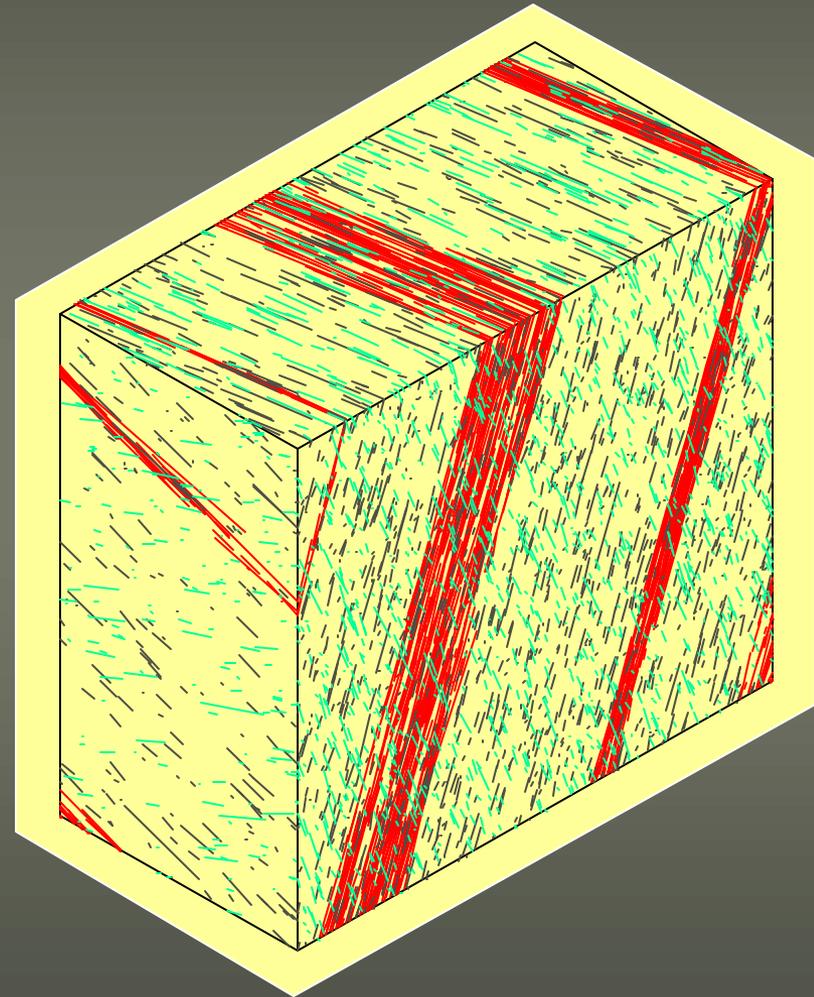
**feuilles mortes**



⇒ Importance du modèle

⇒ Nécessité d'outils de choix

# Modélisation stochastique de réseaux de fractures



# Pourquoi modéliser ?



Réseau de diaclases dans du calcaire



Failles identifiées par photogéologie

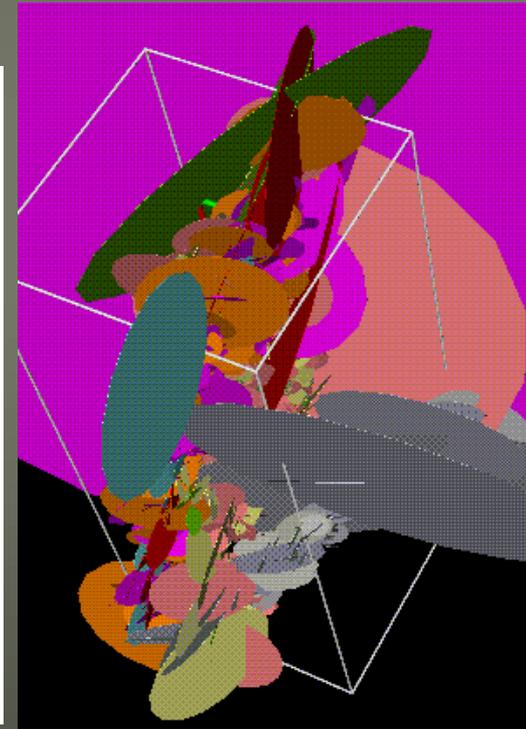
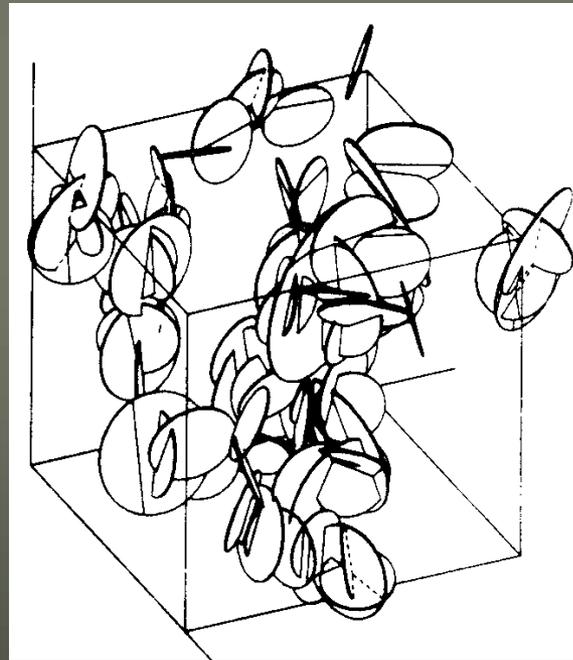
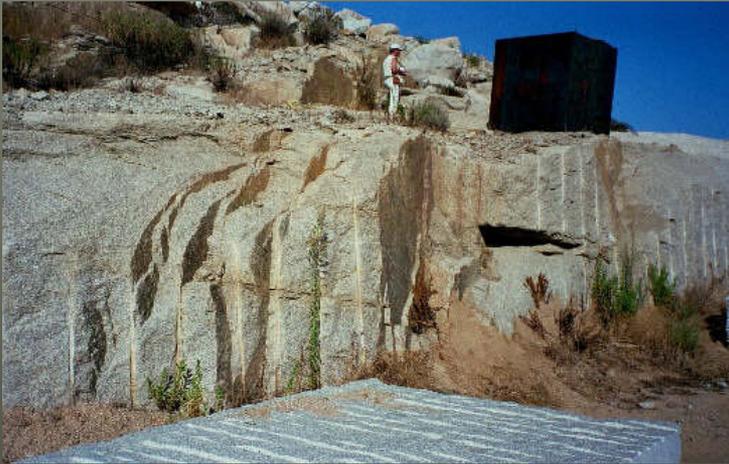
- ◆ Pour reconstruire la réalité, qui est 3D, à partir d'observations 1D ou 2D  
→ simulation stochastique
- ◆ Pour prévoir l'évolution du système

# Difficultés

- ◆ prendre en compte sources de biais et relations stéréologiques
- ◆ concevoir un modèle
- ◆ estimer ses paramètres
- ◆ construire des simulations conditionnelles

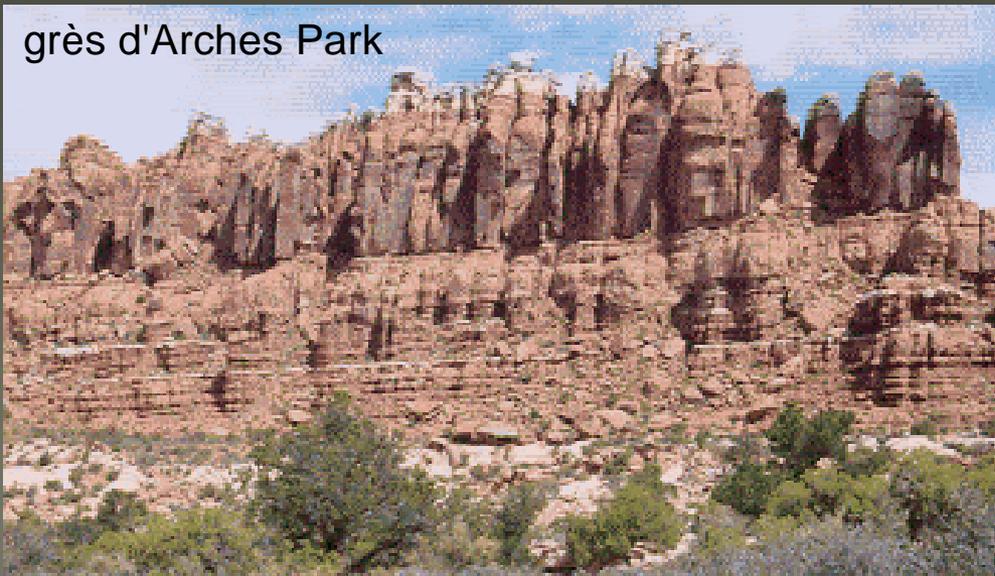
# Modèle des disques aléatoires

- ◆ Modèle booléen
- ◆ Fractures circulaires
- ◆ Éventuellement en salves



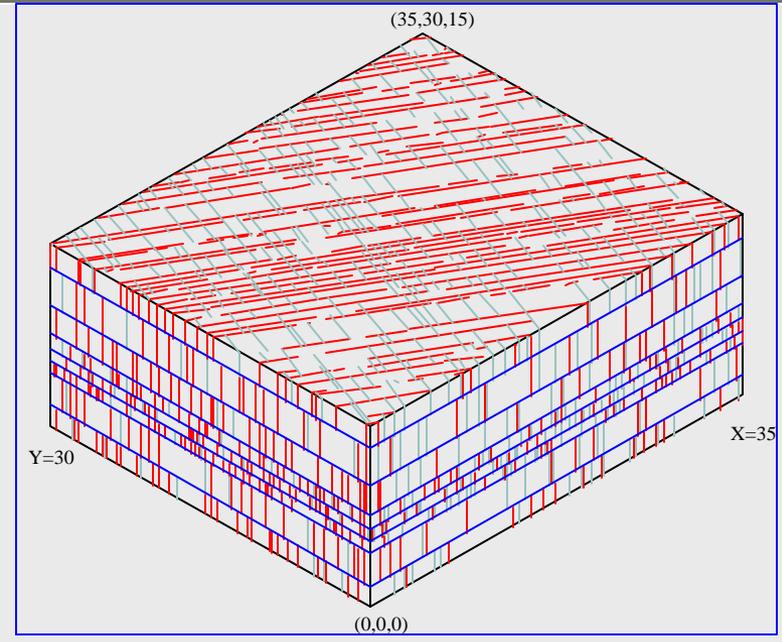
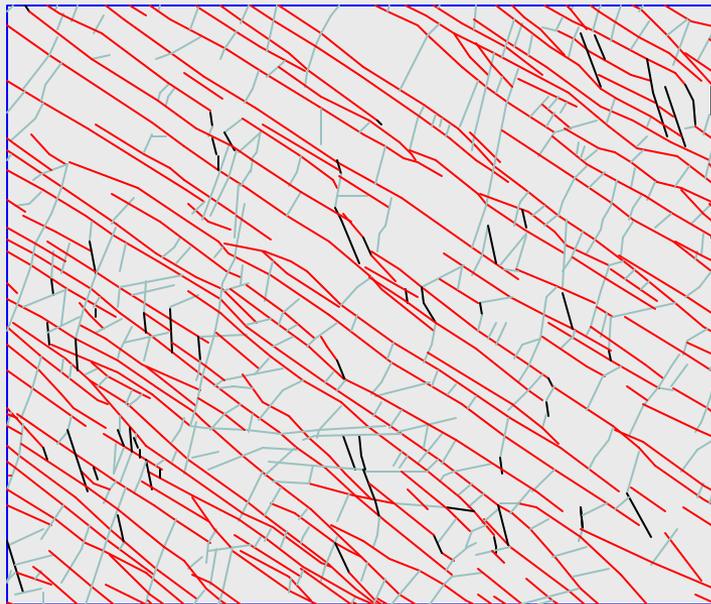
Faisceau de fractures parallèles visibles en 3D dans une carrière de granite

grès d'Arches Park



# Modèle hiérarchique

à base de processus de renouvellement à 2 états, à lois gamma



Réalité

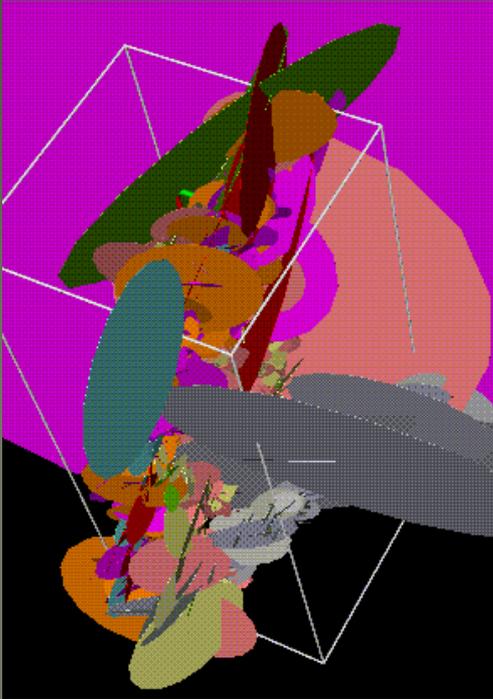
grès du Saq

35m × 30m × 15m

Modèle

# Identification des paramètres

## Modèle de salves de disques à intensité régionalisée



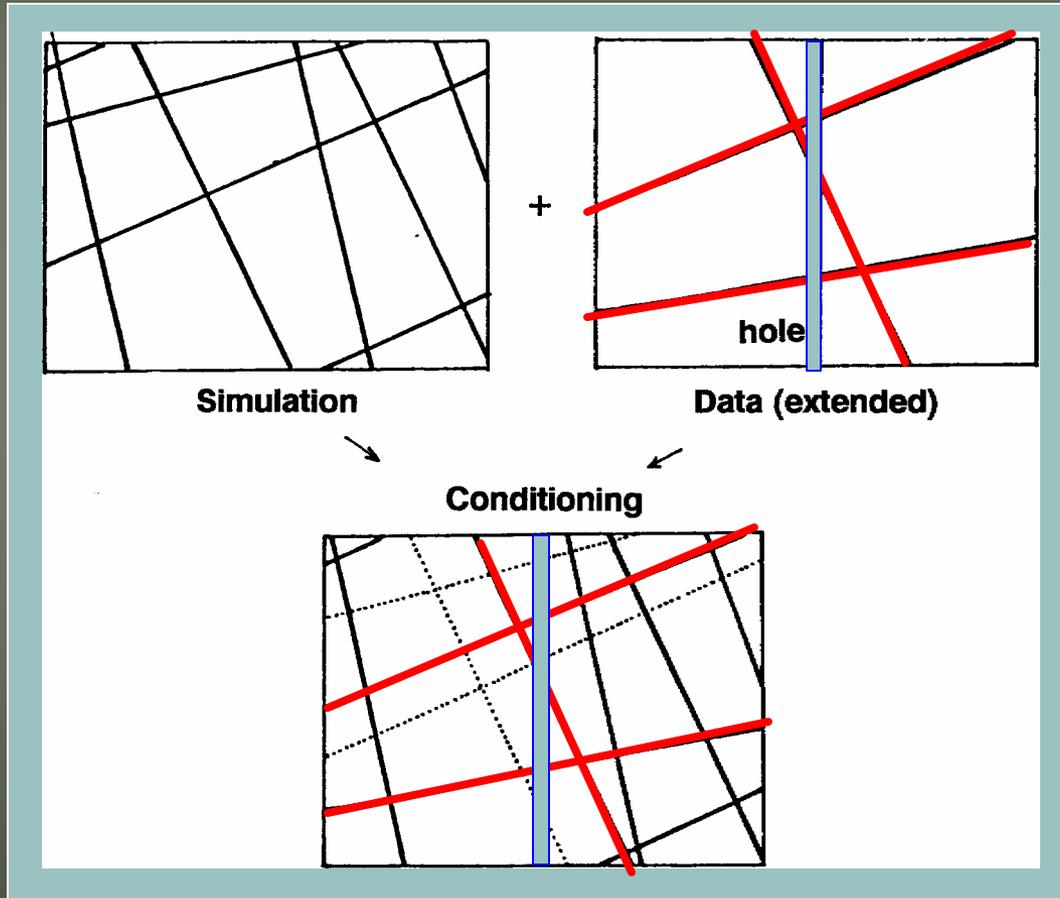
### ◆ Paramètres

- loi des diamètres des disques
- nombre moyen de disques par salve
- variogramme et valeur moyenne de l'intensité du processus poissonien des centres de salves

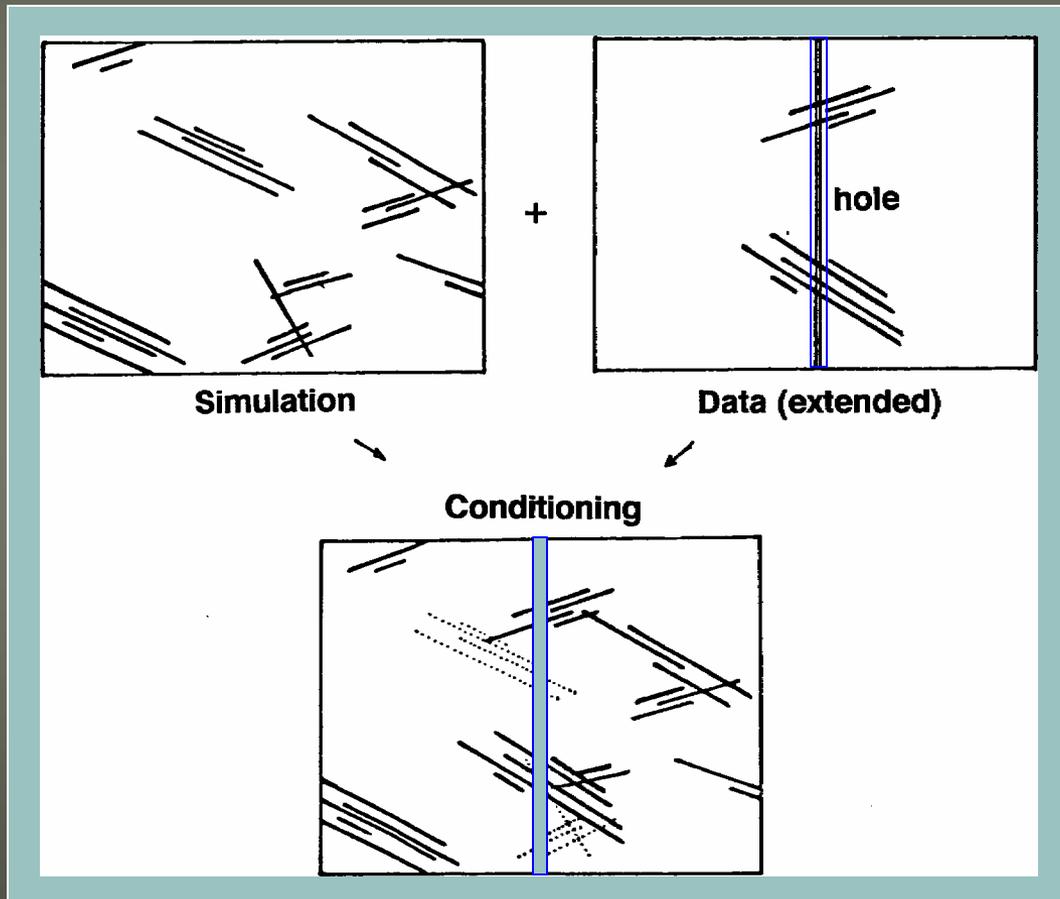
### ◆ Données

- Histogramme des longueurs des traces
- Histogramme et variogramme de la séquence des distances interfracturales
- Variogramme du nombre de fractures par unité de surface

# Simulation conditionnelle d'un modèle de plans aléatoires



# Simulation conditionnelle d'un modèle de salves aléatoires

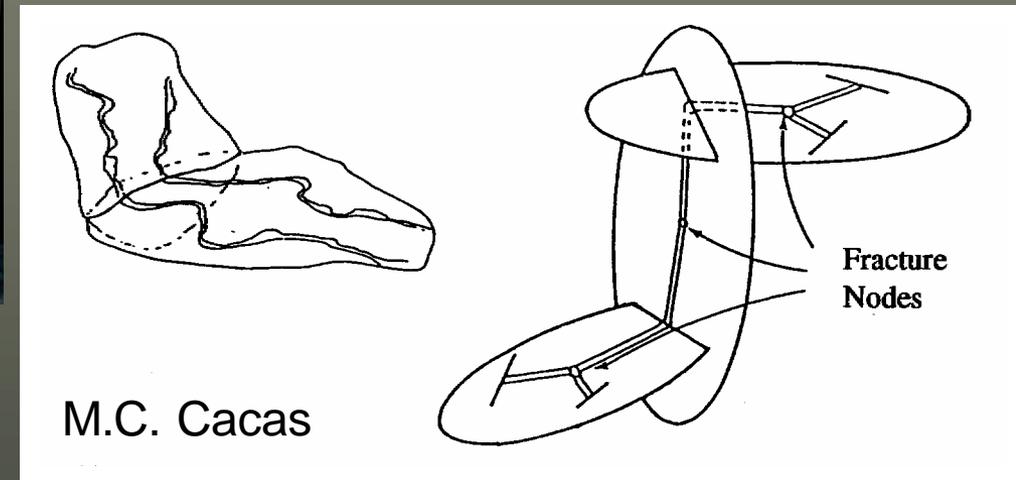
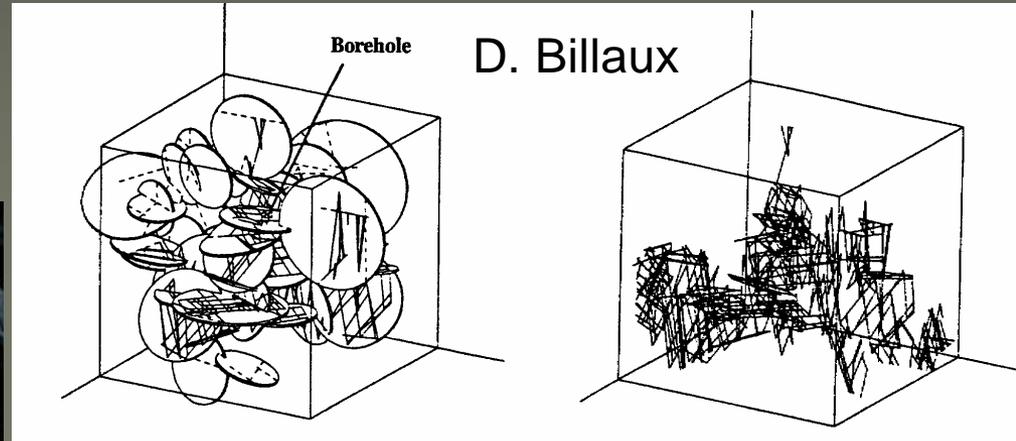


# Calcul des écoulements

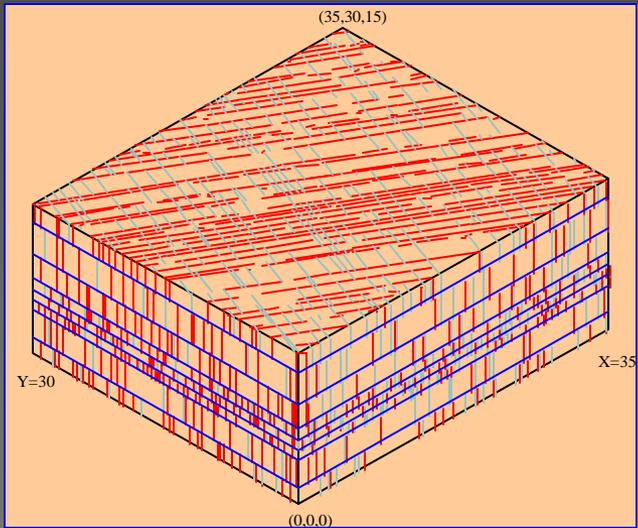
## ◆ Chenalisation



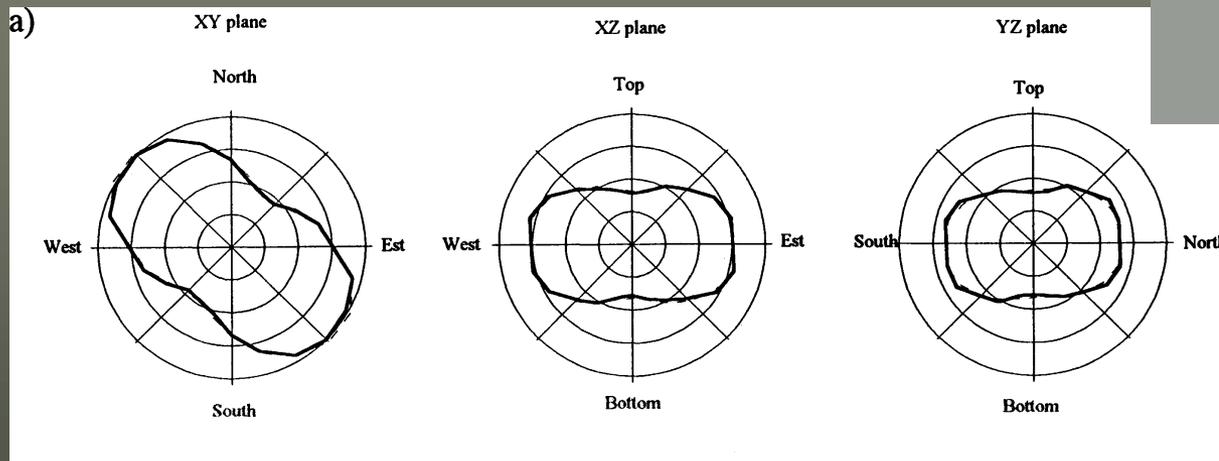
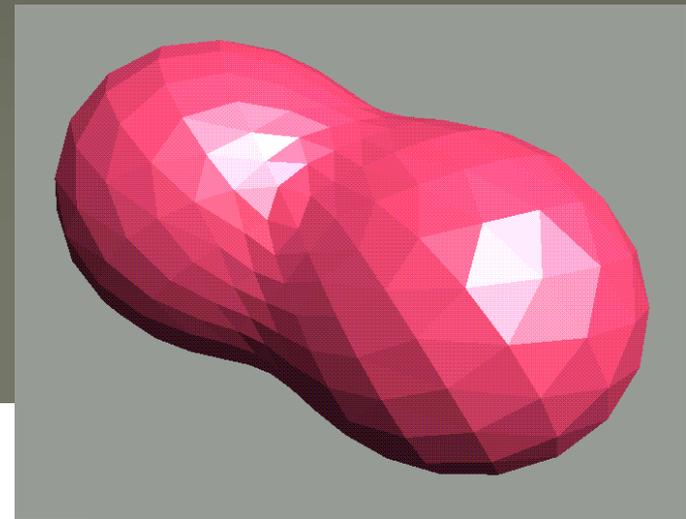
Surface de fracture affleurant sur 200 m<sup>2</sup>



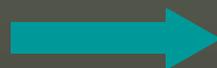
# Passage à l'échelle supérieure



**Hypothèse a :** Les joints horizontaux et verticaux ont même conductivité hydraulique



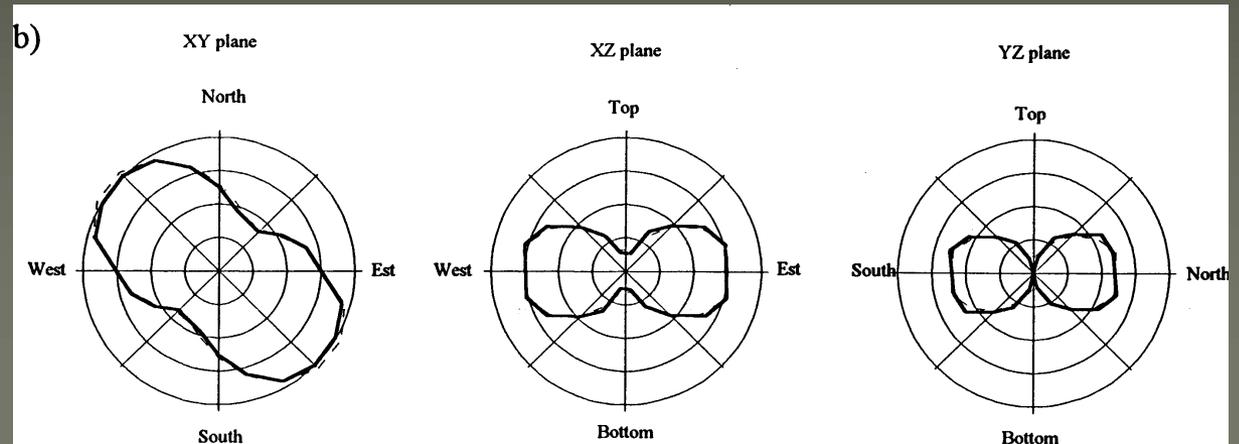
La conductivité directionnelle peut être décrite par un tenseur



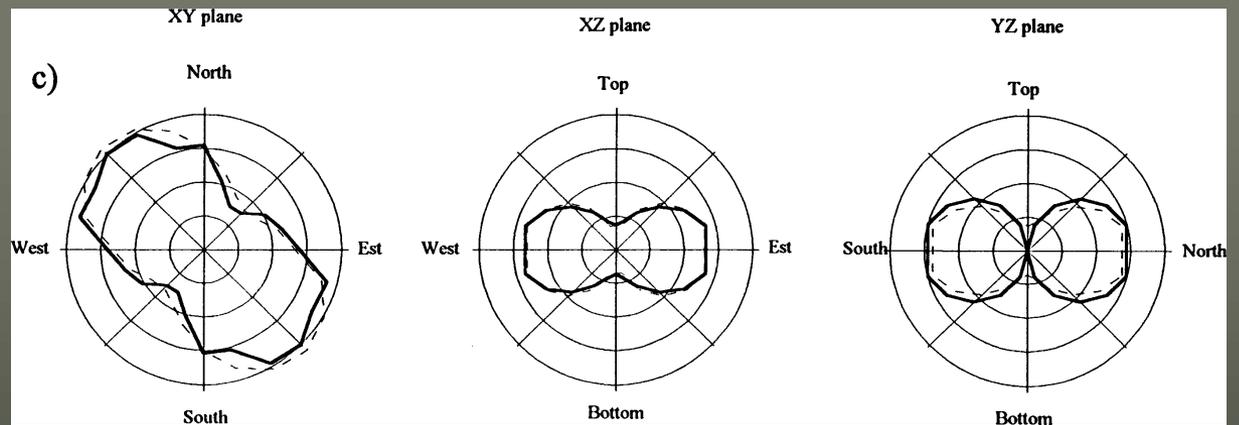
milieu continu équivalent

# Passage à l'échelle supérieure

**Hypothèse b :** Les diaclases verticales ont une conductivité bien plus forte que les joints horizontaux



**Hypothèse c :** Les joints horizontaux ont une conductivité bien plus forte que les diaclases verticales



Dans les deux cas, écoulement principalement horizontal : **la conductivité directionnelle ne peut pas être représentée par un tenseur**

# Quelques points à approfondir

- ◆ Apport des essais hydrodynamiques en forage
  - fractures non conductrices
  - fractures connectées
- ◆ Prise en compte des connaissances auxiliaires
  - intensité et direction de fracturation vues en sismique
  - champ de contrainte dû aux grandes structures (failles, anticlinaux, ...)
  - approche génétique stochastique
- ◆ Modèles multiéchelles (non fractals)
- ◆ Modélisation de la chenalisation
- ◆ Autres contextes : porphyres cuprifères, carbonates

# Remerciements

- ◆ Georges Matheron
- ◆ Pierre Delfiner
- ◆ les membres du jury, en particulier G. de Marsily
- ◆ mes collègues du Centre de géostatistique
  - à commencer par Pierre Chauvet et Christian Lantuéjoul
  - et tous ceux que j'y ai (re)trouvés
- ◆ mes collègues du BRGM
  - géostatisticiens : R. Blanchin, B. Bourgine, E. Lefeuvre, ...
  - milieux fracturés : S. Gentier, D. Billaux, C. Castaing, A. Genter, ...
  - et bien d'autres, dont Lajoinie et P. Margron
- ◆ les thésards, de H. Massoud à C. Aug
- ◆ ceux qui ont assuré ma formation, à commencer par Jean Chilès
- ◆ et tant d'autres