

# **Méthodes stochastiques d'intégration de l'incertitude géologique**

(autour du cube de proportions)

Thèse de doctorat présentée  
par Abbas ZERKOUNE

soutenue le lundi 08 juin 2009 – Salle Dolomieu, Université Joseph Fourier

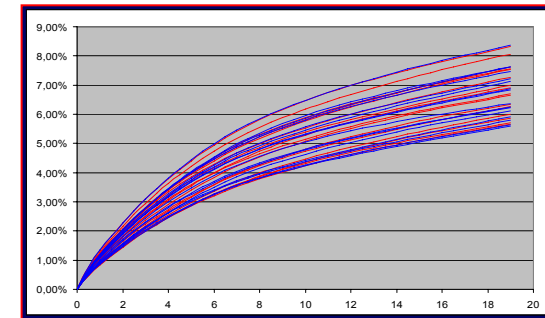
**Composition du jury :** É. JAILLARD, président  
C. ROBIN, rapporteur  
A. MAS, rapporteur  
H. WACKERNAGEL  
F. ROGGERO

**Directeurs de thèse :** É. LEWIN  
G. MASSONNAT  
A. ARNAUD

# Contexte général

- **décrire et comprendre l'organisation sédimentaire en subsurface est un enjeu majeur dans le domaine pétrolier afin de définir les modèles numériques nécessaires pour :**

- évaluer les réserves,
- prévoir la production des hydrocarbures,
- optimiser le développement du champ ...

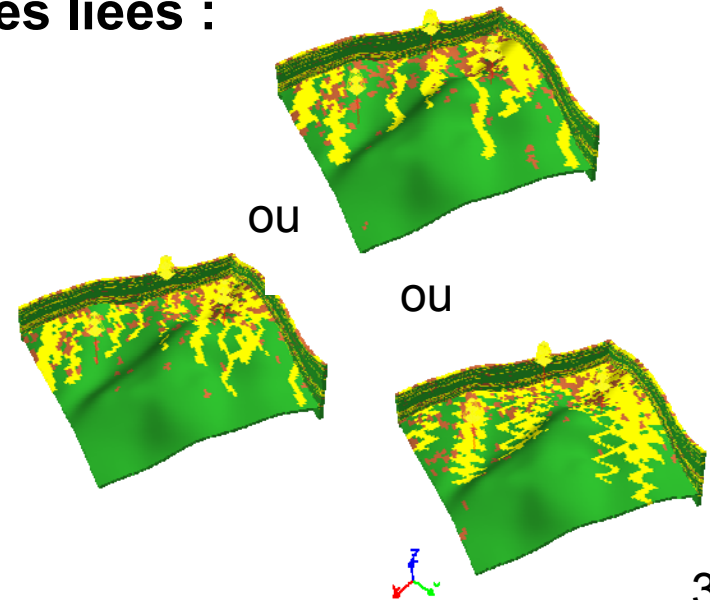


- **décrire et comprendre l'organisation sédimentaire n'est pas simple :**
  - non seulement à cause de la complexité des structures géologiques et de leur évolution au cours du temps,
  - mais aussi en raison du manque de données.

# Contexte général

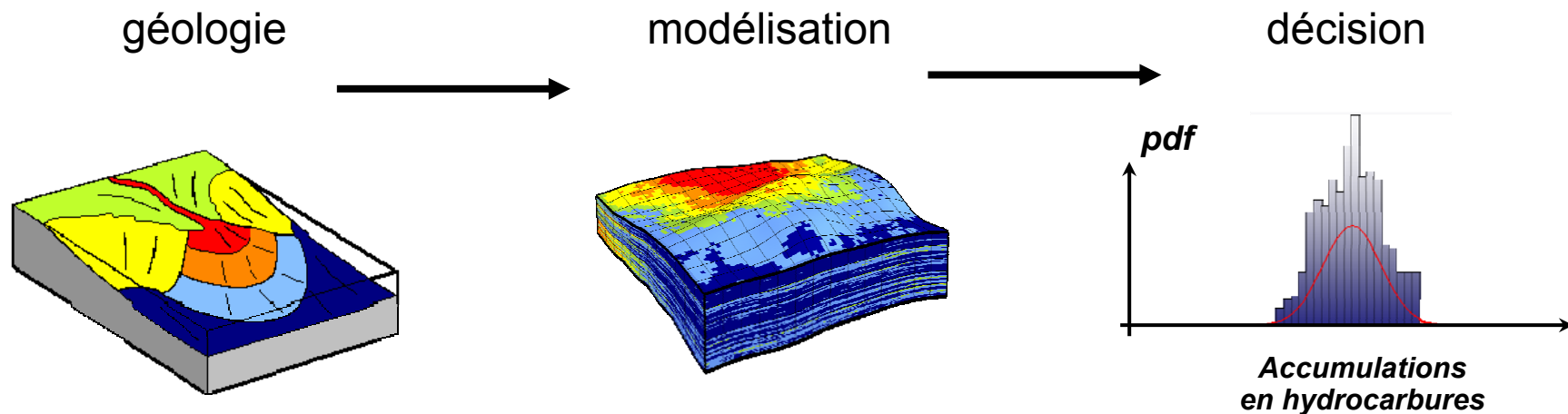
---

- **cette information limitée est la conséquence :**
  - de la difficulté d'accès aux données en subsurface,
  - du coût des données.
  
- **modéliser des structures sédimentaires enfouies reste donc un exercice entaché d'incertitudes, incertitudes liées :**
  - soit à l'acquisition des données,
  - soit à l'interprétation de ces données,
  - soit au manque de données.



# Contexte général

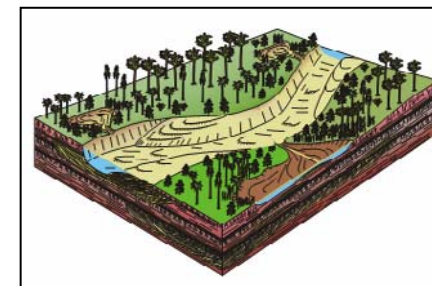
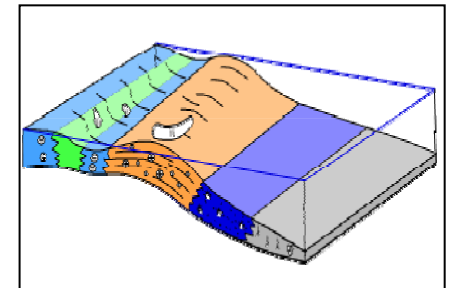
- ce travail de recherche s'intéresse à la quantification des incertitudes géologiques dans le cadre de la modélisation des réservoirs pétroliers



# Plan de la présentation

---

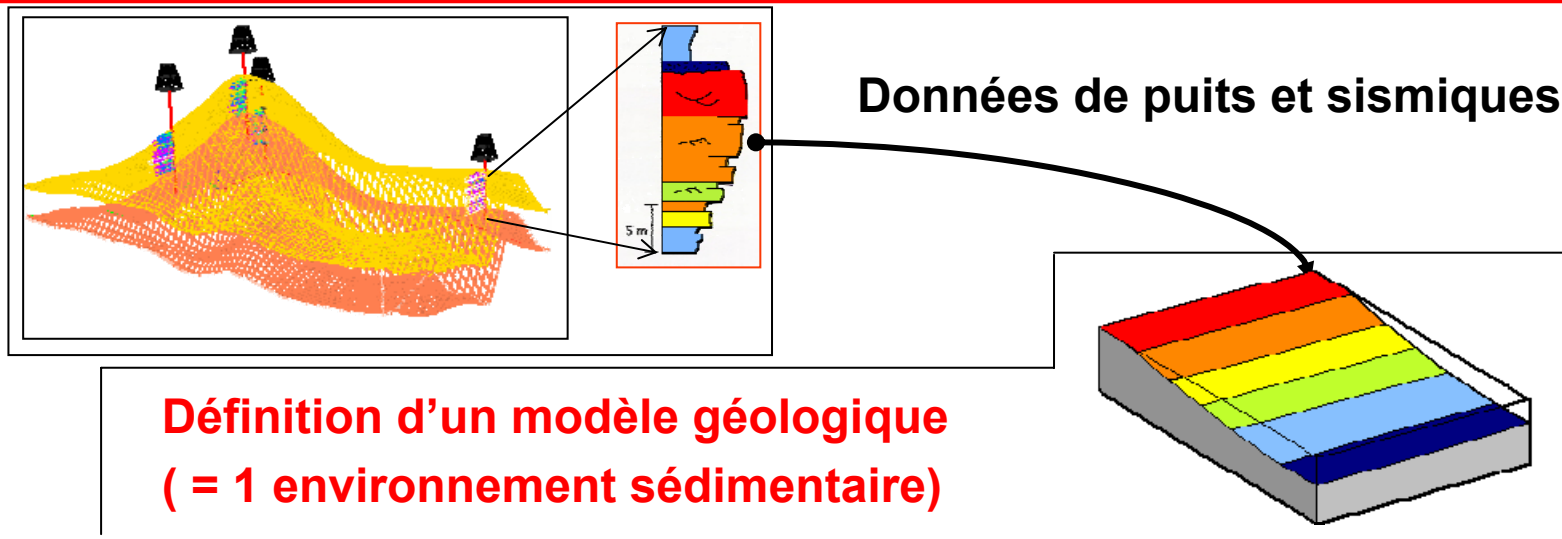
- **Inventaire et besoins concernant les incertitudes géologiques**
- **Approche n°1** de simulation des cubes de proportions :  
Multi-réalisation sur les paramètres du scénario géologique  
- exemple d'une plate-forme carbonatée
- **Approche n°2** de simulation des cubes de proportions:  
Méthode paramétrique – lois de Dirichlet  
- cas d'une plate-forme carbonatée  
- cas des environnements silico-clastiques
- **Conclusions & Perspectives**



# **Inventaire et besoins concernant les incertitudes géologiques**

- i. Problématique**
- ii. Besoins & Objectifs**

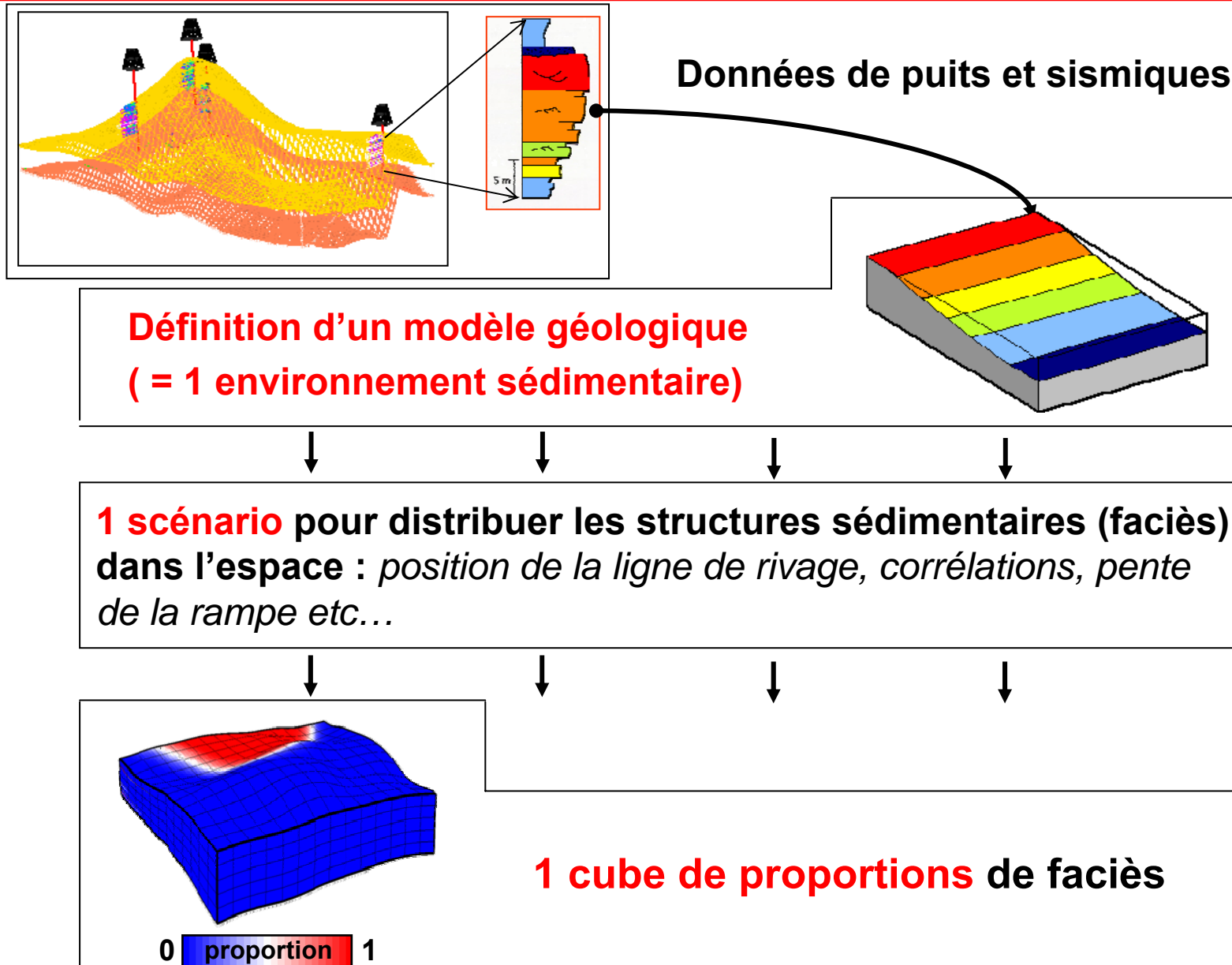
# Géologie et modèle de réservoir



**1 scénario** pour distribuer les structures sédimentaires (faciès) dans l'espace : *position de la ligne de rivage, corrélations, pente de la rampe etc...*

**faciès** : - de manière générale, une catégorie dans laquelle on peut ranger une roche, ici, 1 faciès sera un faciès sédimentaire caractérisée par un ou plusieurs caractères lithologiques (lithofaciès) ou paléontologiques (biofaciès), et par un milieu de sédimentation.

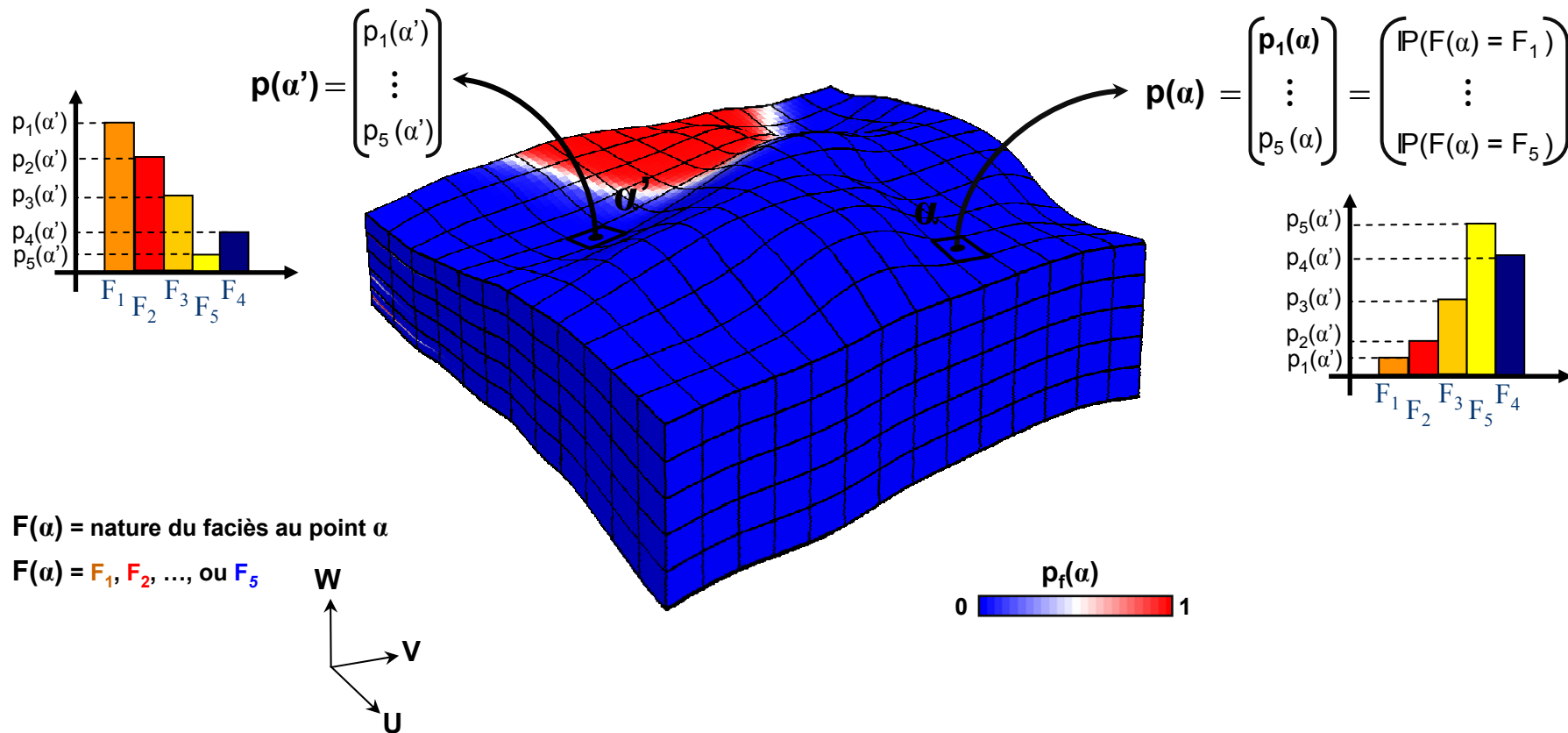
# Géologie et modèle de réservoir





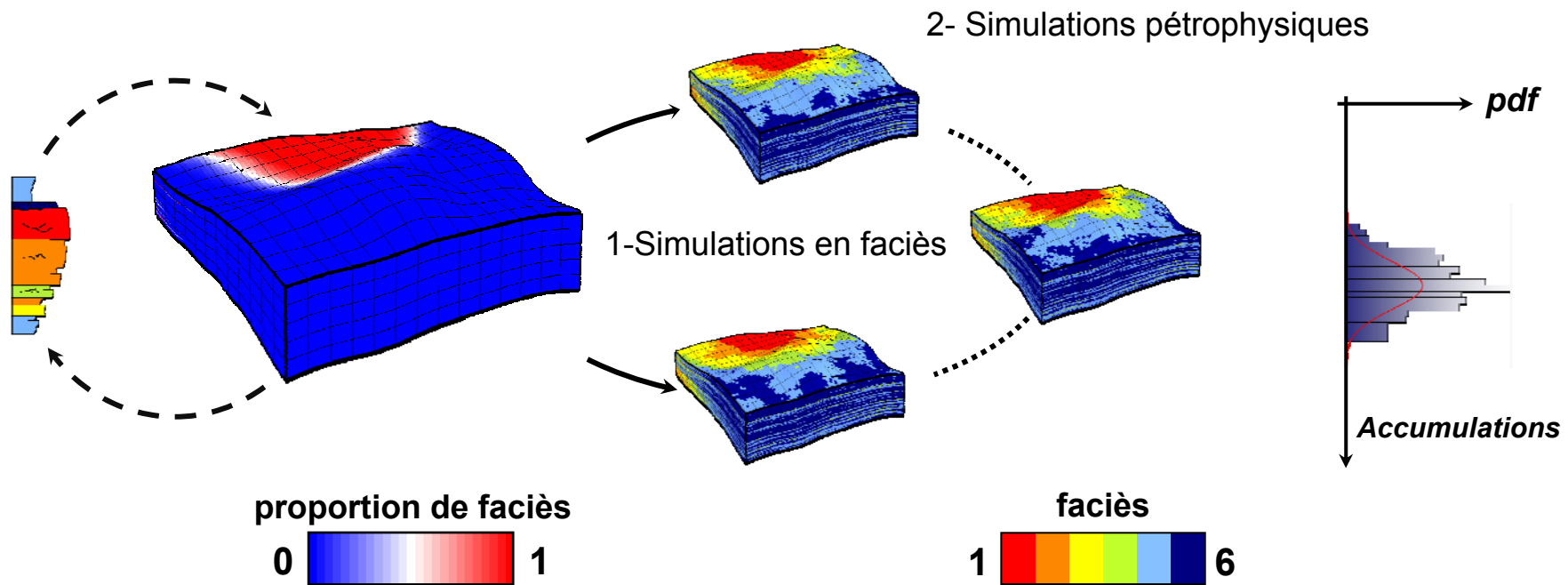
# Le cube de proportions de faciès

- en chacune de ses mailles, une valeur de probabilité pour chaque faciès, c'est la loi de probabilité spatiale des faciès,
- renvoie au scénario géologique utilisé pour les simulations stochastiques.



# Incertitude géologique : pratiques usuelles (1/2)

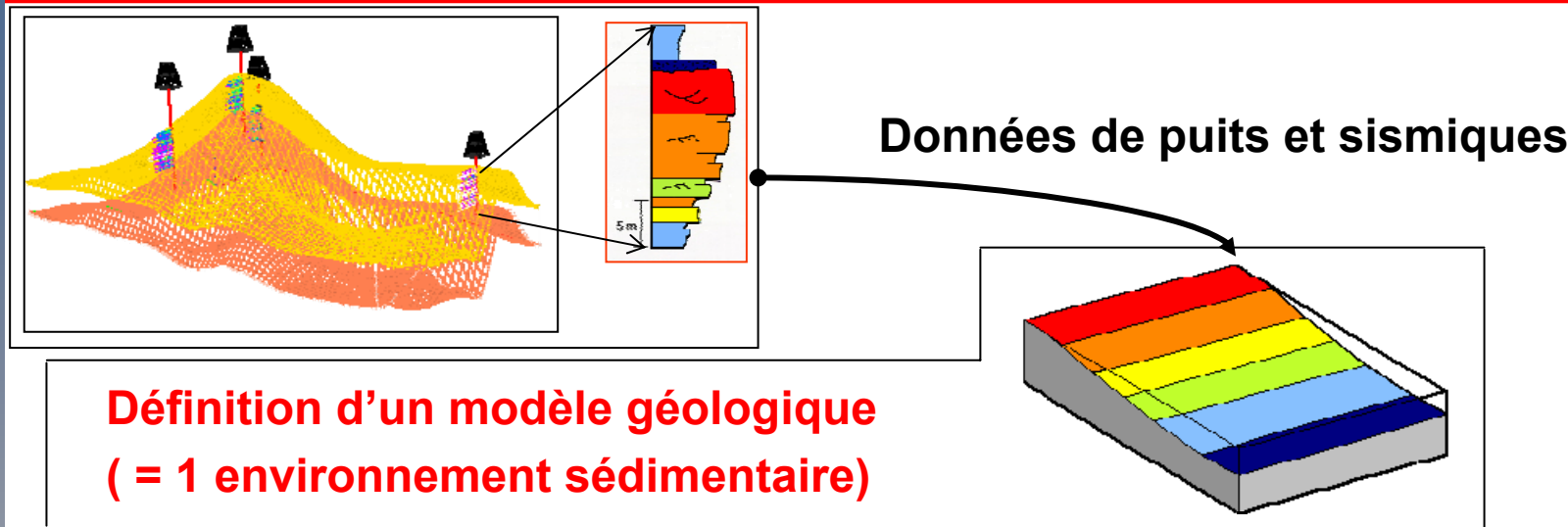
- **UN UNIQUE** modèle sédimentaire = **UN** Cube de Proportions



- Des réalisations multiples pour un scénario géologique donné amènent à considérablement sous-estimer la véritable incertitude géologique...

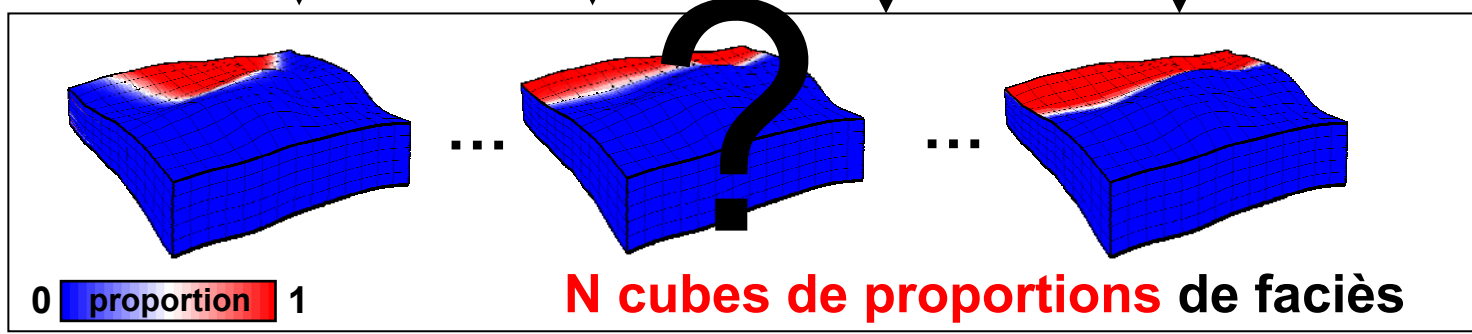
...car le scénario comme les proportions de faciès sont figés.

# Incertitude géologique et cube de proportions



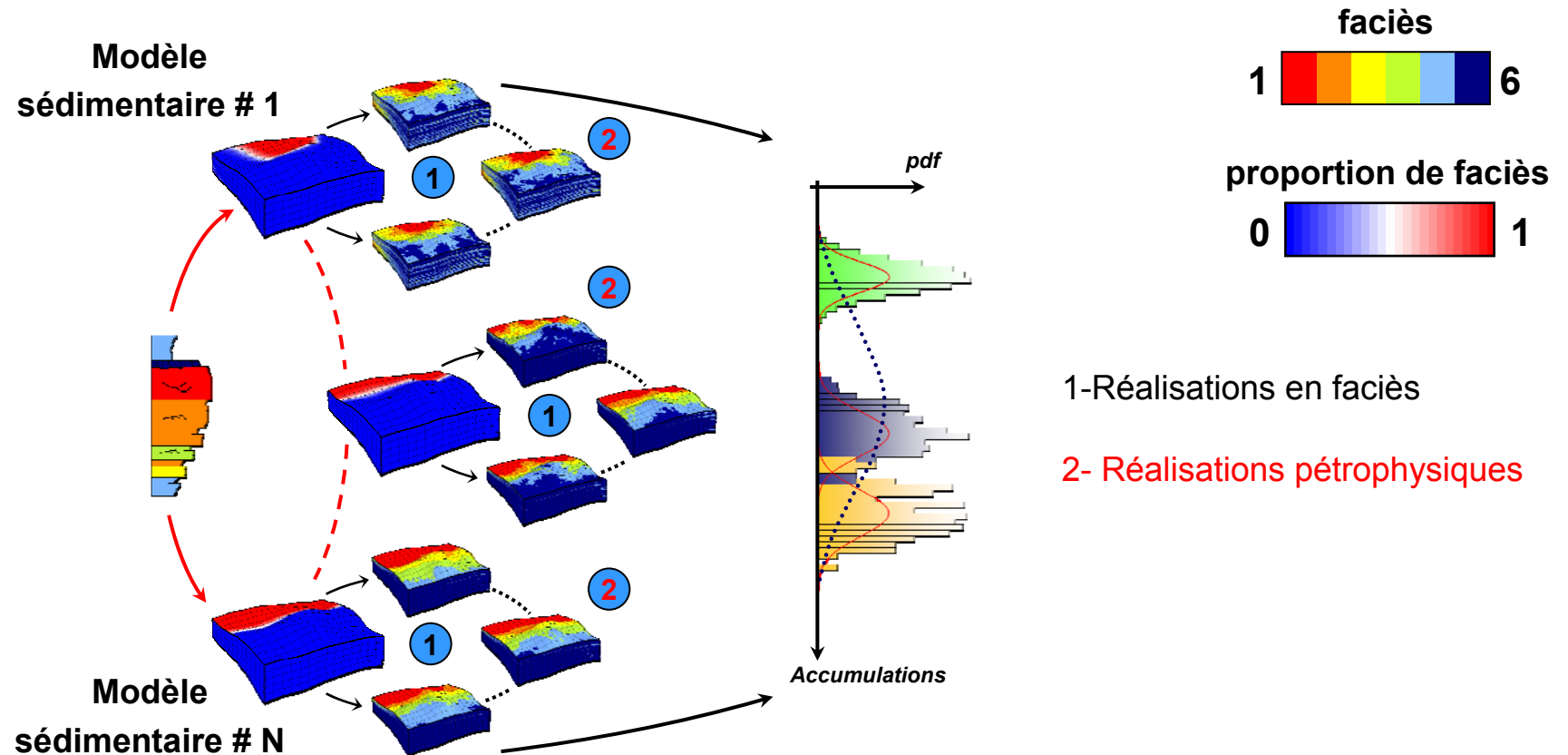
**N scénarios** pour distribuer les structures sédimentaires (faciès) dans l'espace : *position de la ligne de rivage, corrélations, pente de la rampe etc...*

**incertitude** sur le scénario géologique



**incertitude** sur le cube de Proportions

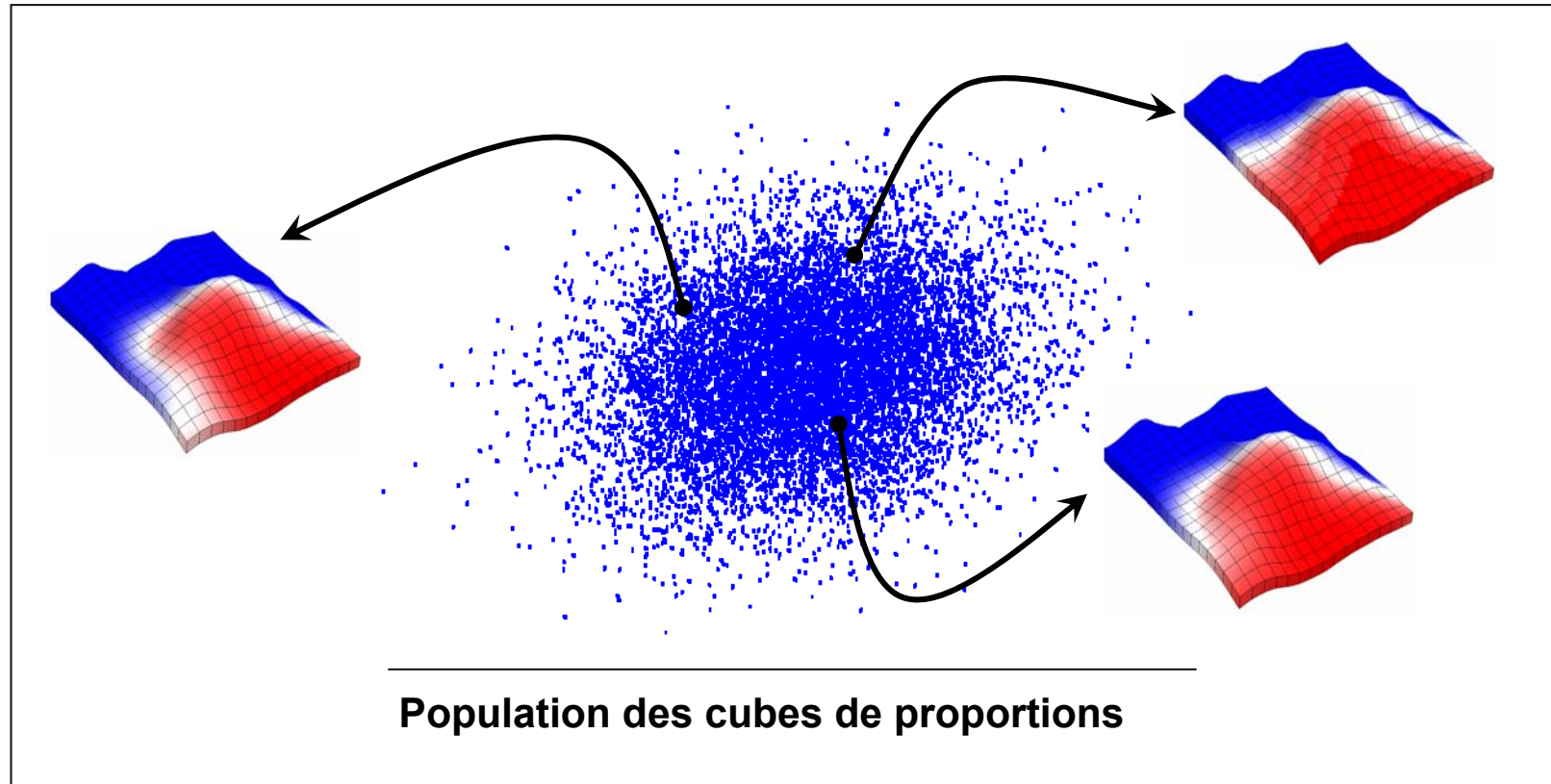
# Incertitude géologique : pratiques usuelles (2/2)



- L'étude de plusieurs scénarios complète souvent l'approche multi-réalisation, néanmoins elle reste :
  - limitée, car consommatrice de temps,
  - discrète.

# Objectifs

Nécessité de prendre en compte TOUTES LES SOURCES d'incertitudes relatives aux hypothèses géologiques influant sur les volumes et les réserves d'hydrocarbures pendant la modélisation du réservoir



# Objectifs

---

Nécessité de prendre en compte TOUTES LES SOURCES d'incertitudes relatives aux hypothèses géologiques influant sur les volumes et les réserves d'hydrocarbures pendant la modélisation du réservoir

1. Comment décrire complètement l'espace d'incertitude géologique, et évaluer une incertitude géologique cohérente avec l'interprétation du géologue ?
2. Comment combiner plusieurs scénarios géologiques issus d'un même modèle géologique (un seul environnement sédimentaire mais une variabilité en termes d'azimut des apports sédimentaires, de paléogéographie, d'amplitude sismique, d'interprétation,...) ?

- **Simulation des cubes de proportions :**

**(1) Approche n°1 :** Multi-réalisation sur les paramètres du scénario géologique

**(2) Approche n°2 :** Méthode paramétrique – lois de Dirichlet

## **Approche n°1 de simulation des cubes de proportions**

Multi-réalisation sur les paramètres du scénario géologique

- i. Principe général de la méthode**
- ii. Un exemple d'application sur les plates-formes carbonatées**



# Approche n°1 de simulation des cubes de proportions

Multi-réalisation sur les paramètres du scénario géologique

- **Objectif:** décrire la population des cubes de proportions possibles

orientation des reliefs, leur amplitude, l'extension des plages de faciès, etc.

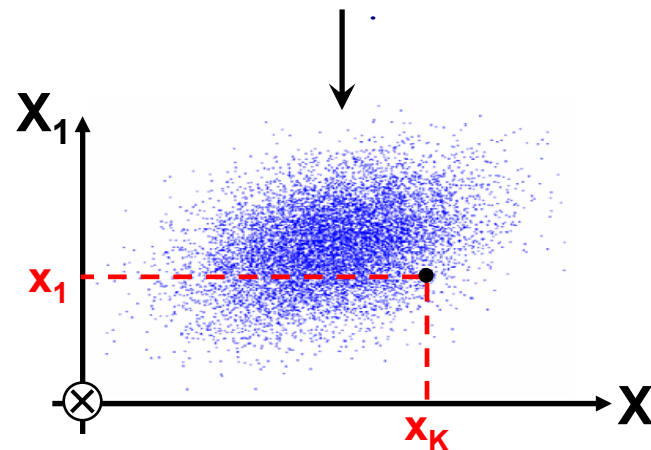
Éléments du scénario géologique  
≈ Données d'entrée

Construction des  
cube de proportions

**1 unique**  
cube de proportions

$$X_1 = x_1 \quad \dots \quad X_i = x_i \quad \dots \quad X_K = x_K$$

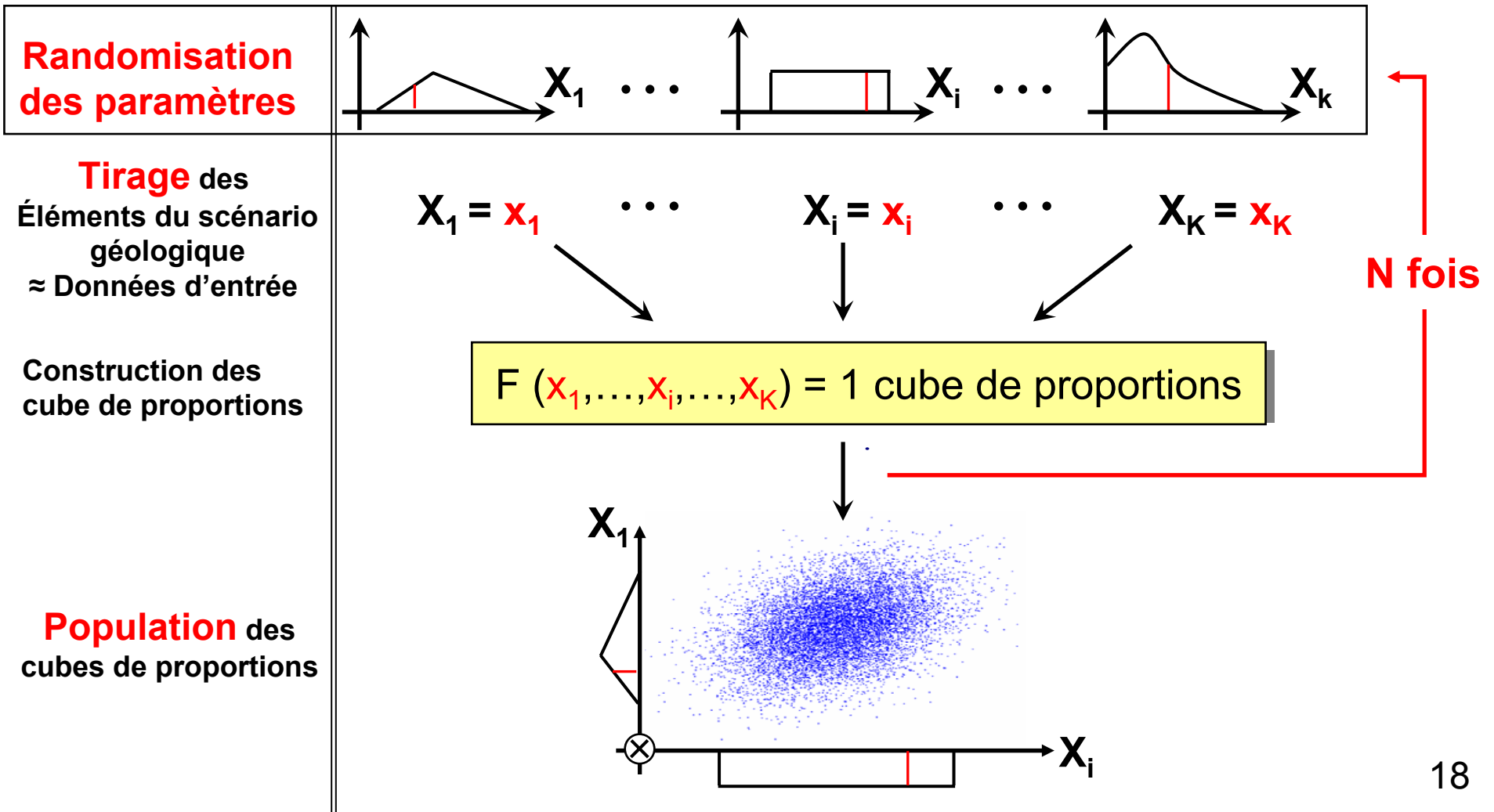
$$F(x_1, \dots, x_i, \dots, x_K) = 1 \text{ cube de proportions}$$



# Approche n°1 de simulation des cubes de proportions

Multi-réalisation sur les paramètres du scénario géologique

- **Principe:** balayer de façon stochastique les paramètres du scénario géologique

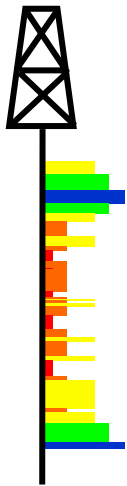


# Approche n°1 de simulation des cubes de proportions

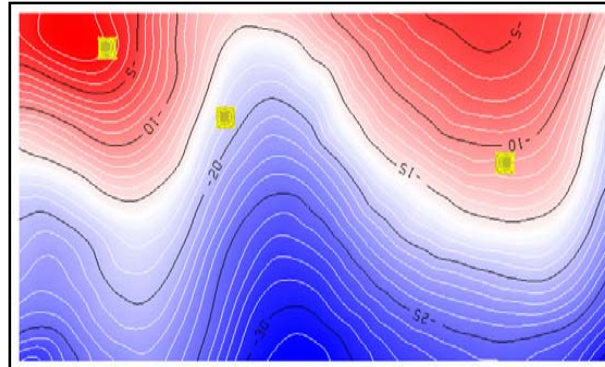
Multi-réalisation sur les paramètres du scénario géologique

- **Problématique** : définir des méthodes qui permettent de décrire les principaux paramètres du scénario géologique,

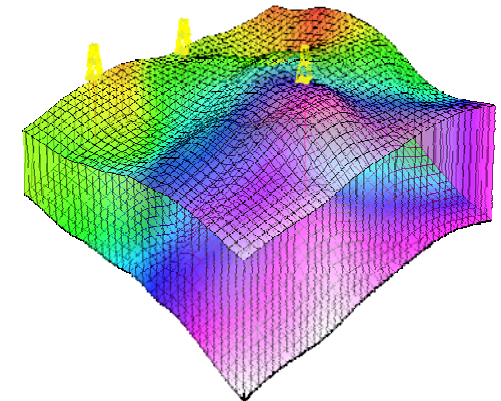
- **1D**, le long des puits



- **2D**, à travers les horizons

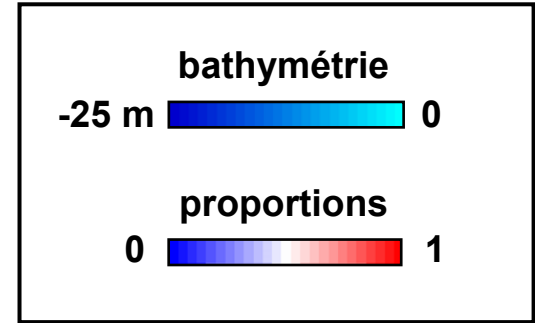
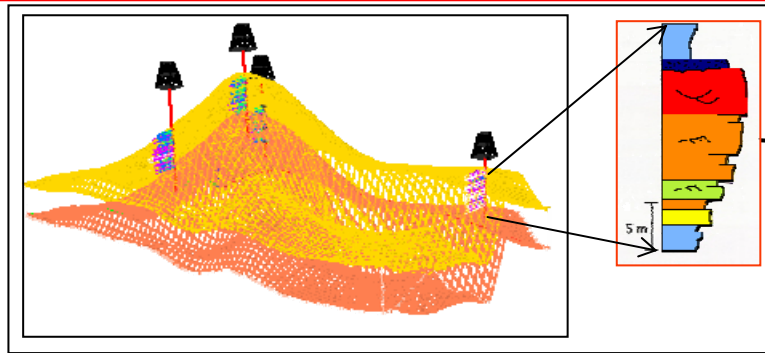


- **3D**, à l'échelle du réservoir

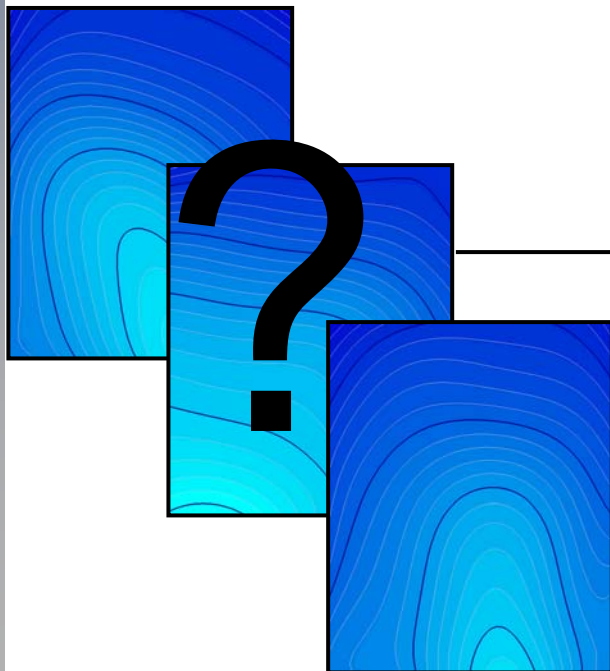


**en préservant la cohérence du cube de proportions final**

# Incertitude géologique : cas des cartes (2D)

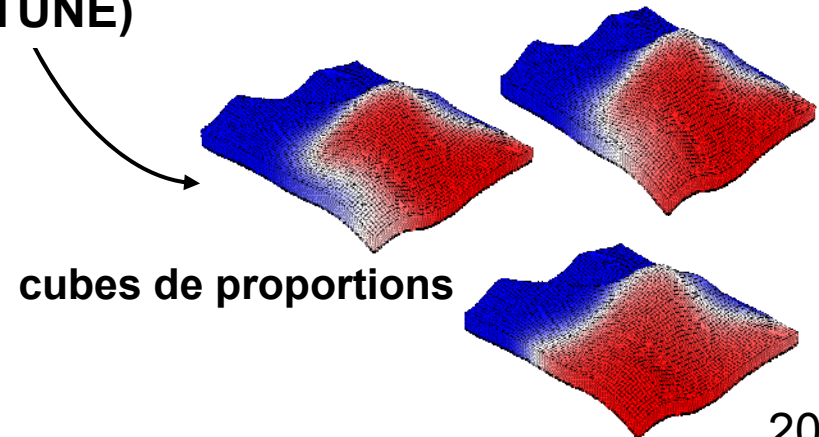


paléogéographie



**Incertitude** sur le  
modèle sédimentaire

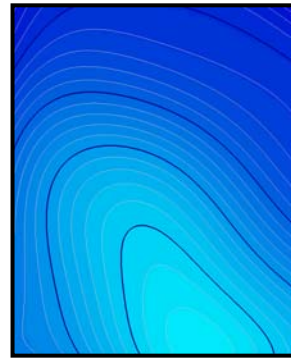
**Géomodeleur**  
(NEPTUNE)



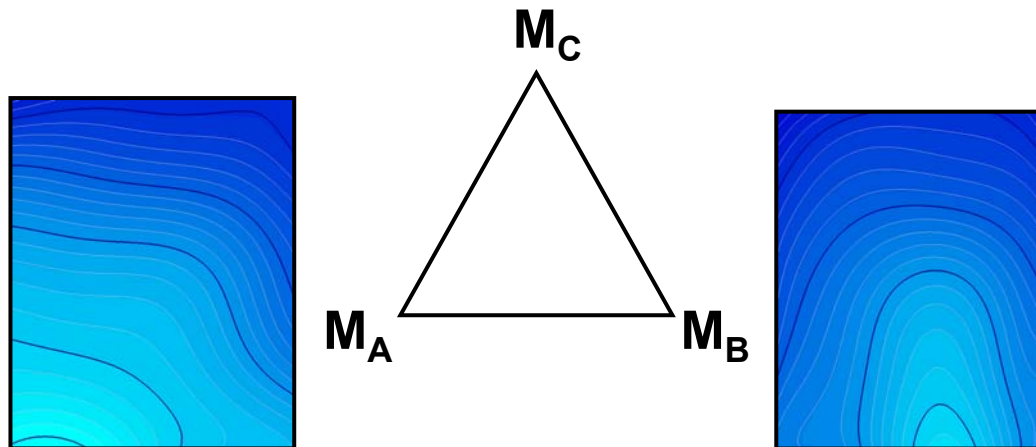
# Incertitude sur les cartes (2D)

- Avec les cartes de bathymétrie/paléogéographie

Un environnement sédimentaire **connu**, mais une cartographie précise **incertaine**.



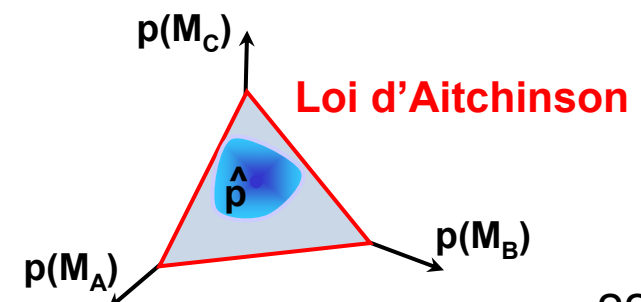
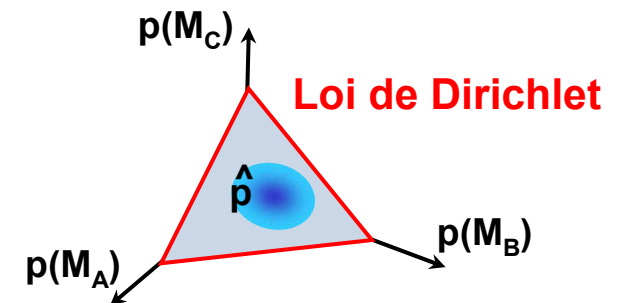
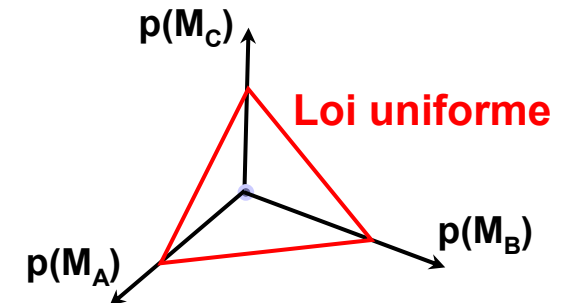
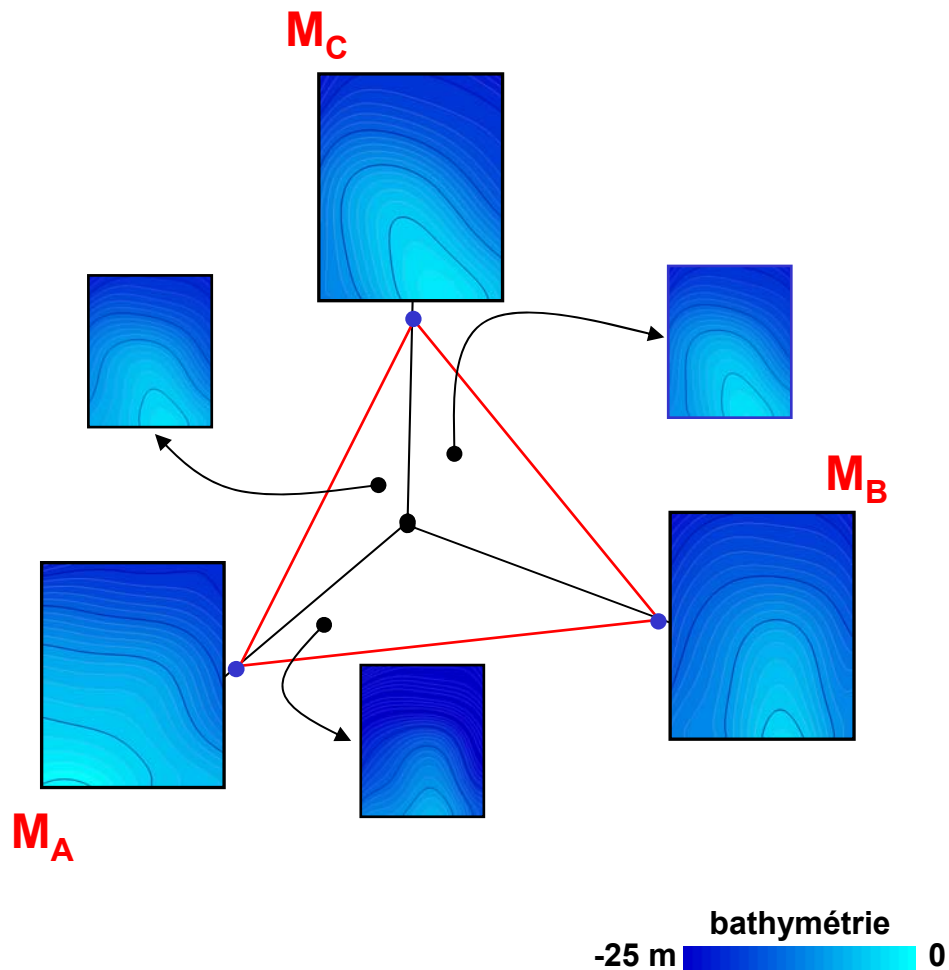
3 hypothèses géologiques, cohérentes avec les données de puits. Des **Cartes Intermédiaire (IM)** peuvent exister.



↑ échelle commune  
↓ + profond

# Incertitude sur les cartes (2D)

$$IM = p(M_A) \times M_A + p(M_B) \times M_B + p(M_C) \times M_C / \sum_{\text{modèle } k} p(M_k) = 1$$



# Bilan (1)

---

- interprétation dans un cadre probabiliste des paramètres définissant le scénario géologique (1D, 2D et 3D)
- générer de multiples cubes de proportions qui traduisent la variabilité :
  - directement au niveau des paramètres du scénario géologique,
  - des cubes de proportions
- méthode simple, directe, généralisable aux autres méthodes de modélisation
- mais **relativement lourde** car il faut conserver la cohérence des données d'entrées entre elles

## **Approche n°2 de simulation des cubes de proportions**

Méthode paramétrique – lois de Dirichlet

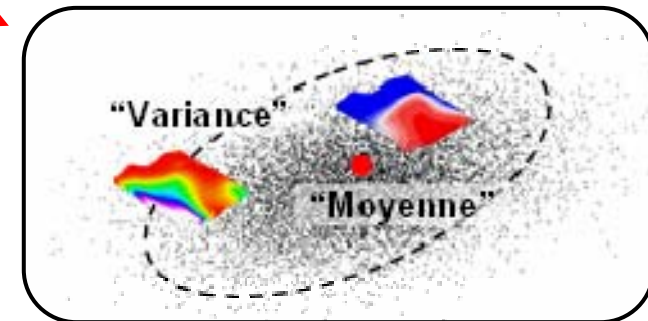
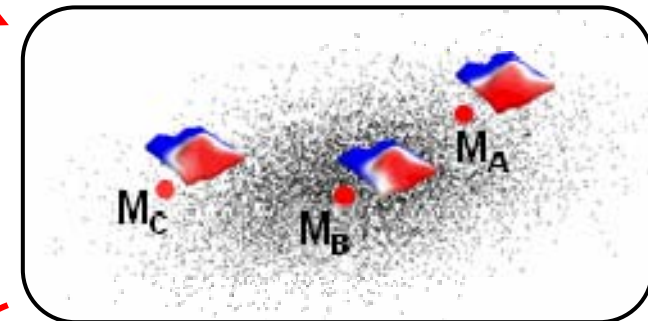
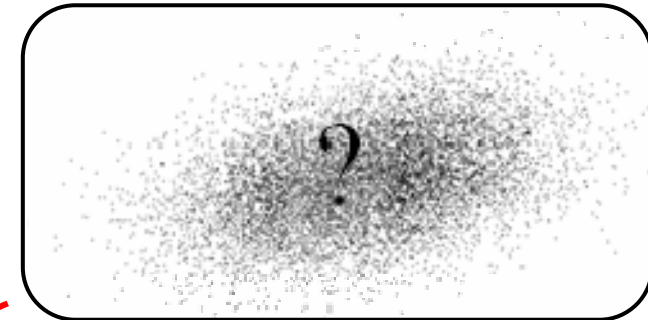
- i. Présentation de la méthode**
- ii. Explication sur des exemples**
  - Cas des plates-formes carbonatées**
  - Cas des ceintures chenalisantes et des chenaux**



# Approche n°2 de simulation des cubes de proportions :

## Méthode paramétrique – lois de Dirichlet

- **Objectif** : décrire la population des cubes de proportions possibles
- **Principe** : réconcilier les différentes hypothèses proposées par le géologue quand c'est possible
- **Processus** :
  - (a) à partir de quelques scénarios ...
  - (b) caler un modèle paramétrique de probabilité aux proportions de faciès...
  - (c) simuler à partir de cette loi la population sous-jacente des cubes de proportions.



# Processus général

---

- **Étape 1** : Définir les scénarios géologiques possibles et leur poids/probabilité associé
- **Étape 2** : Définition de la loi de probabilité utilisée pour simuler les proportions de faciès
- **Étape 3** : Simulation de la loi de probabilité régionalisée
- **Étape 4** : Simulation d'un cube de proportions dans sa globalité

# Étape 1 : Quels sont les scénarios géologiques possibles et leur poids/probabilité associé ?

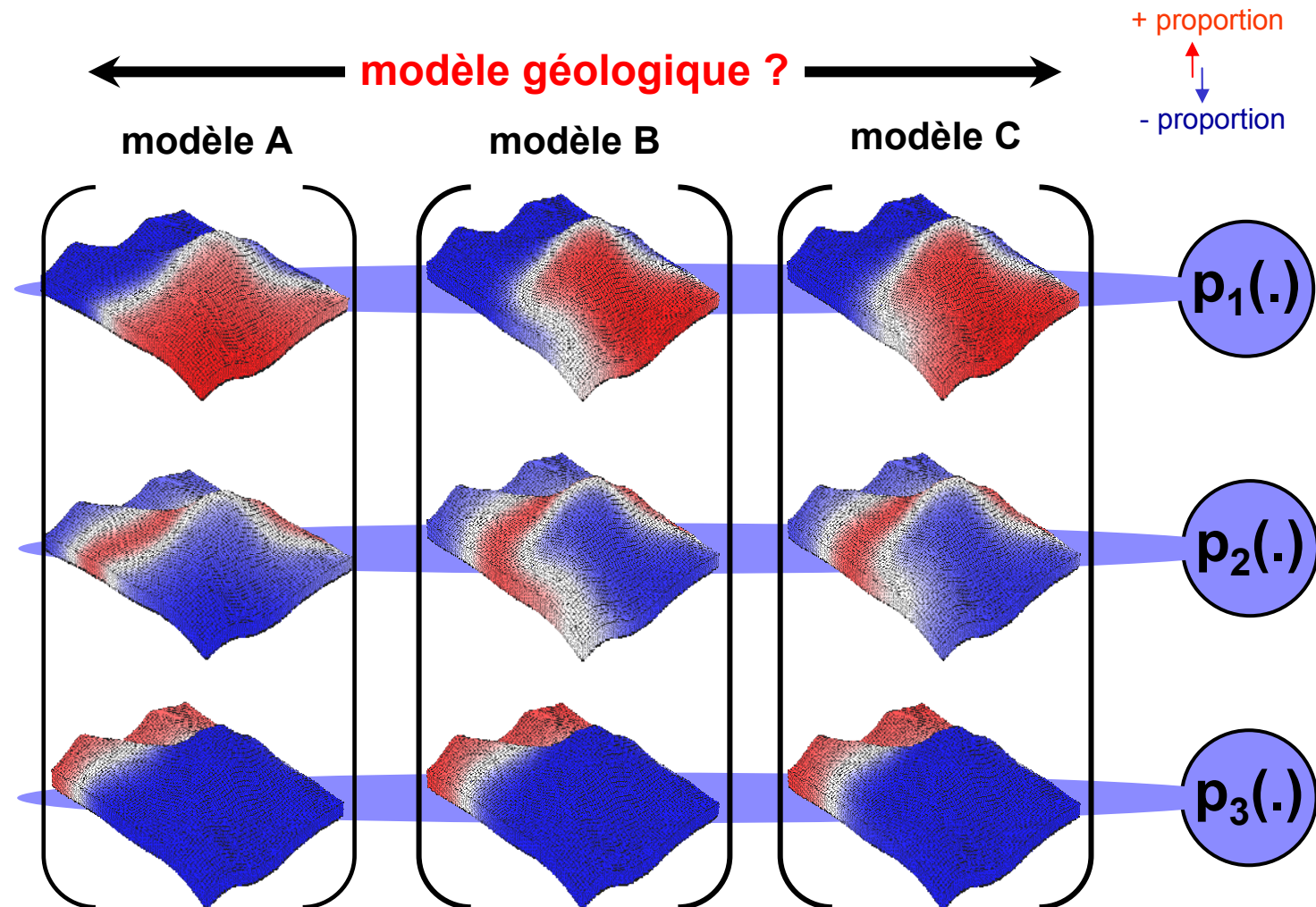
1. Construction des cubes de proportions alternatifs

2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

4. Simulation globales des cubes de proportions

- Un support géométrique commun, seule varie la valeur des vecteurs de proportions observés au sein du géomodèle



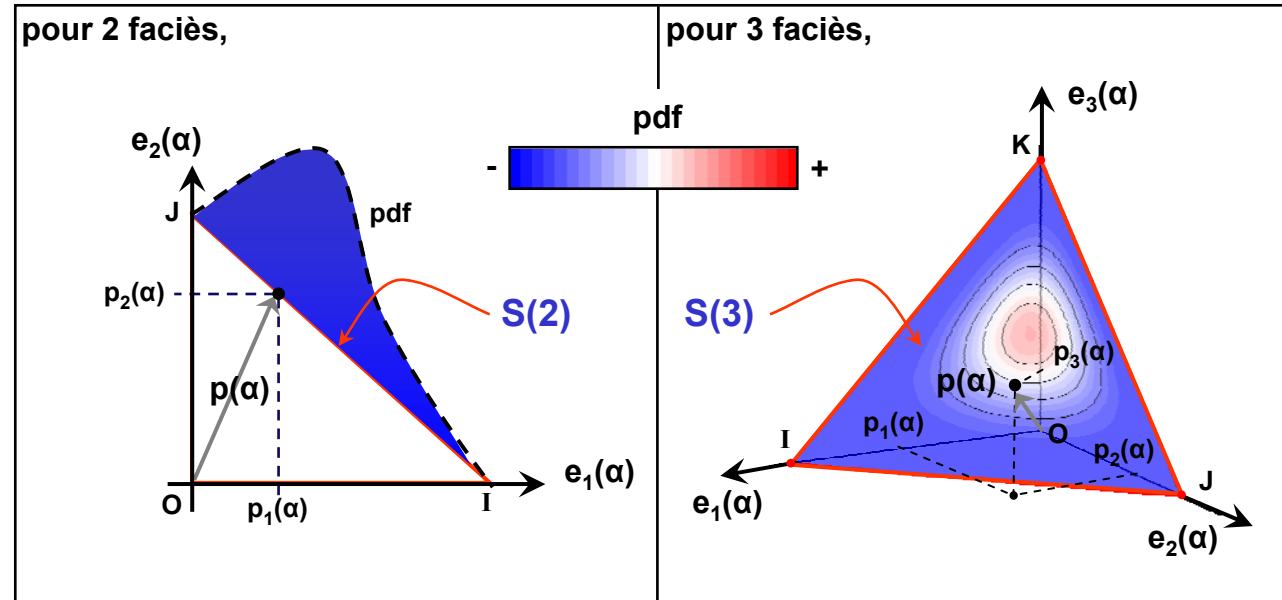
# Étape 2 : Quelle loi de probabilité régionalisée pour simuler les proportions de faciès ?

1. Construction des cubes de proportions alternatifs

2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

4. Simulation globales des cubes de proportions



- Contrainte : simuler sur le simplexe  $S(n_f)$ 
  - $p_1(\alpha) + \dots + p_{n_f}(\alpha) = 1$
  - $0 \leq p_f(\alpha) \leq 1$  avec 'f' indice du faciès
- Recours à plusieurs lois de probabilités (vecteurs gaussiens, transformation Logit, Aitchinson)
- Loi naturelle pour les proportions = **Loi de Dirichlet**

# Loi de Dirichlet et proportions

1. Construction des cubes de proportions alternatifs

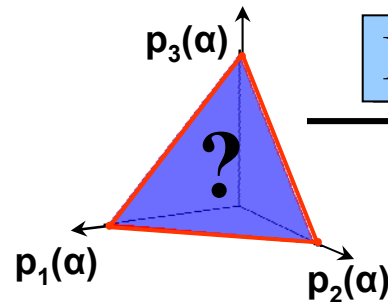
2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

4. Simulation globales des cubes de proportions

- Loi issue de la combinaison dans un cadre bayésien d'une loi uniforme et des occurrences de faciès aux puits

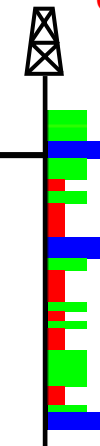
Loi a priori uniforme



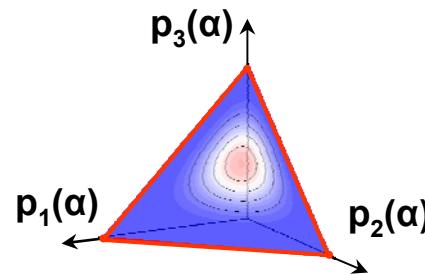
$IP(p)$

$IP(N_b | p)$

Données observées



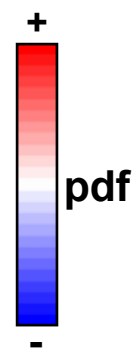
$$N_b = \begin{bmatrix} N_b(1) \\ \vdots \\ N_b(n_f) \end{bmatrix}$$



$IP(p | N_b)$

$\propto IP(p)$

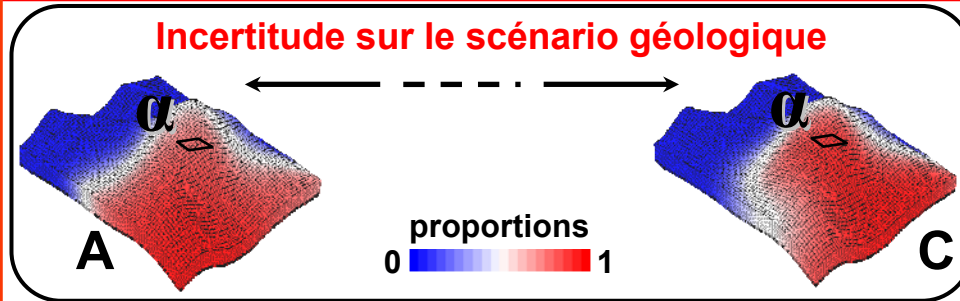
$\times IP(N_b | p)$



Loi a posteriori = loi de Dirichlet  $\sim c(\alpha) = [c_1(\alpha), \dots, c_{n_f}(\alpha)]$

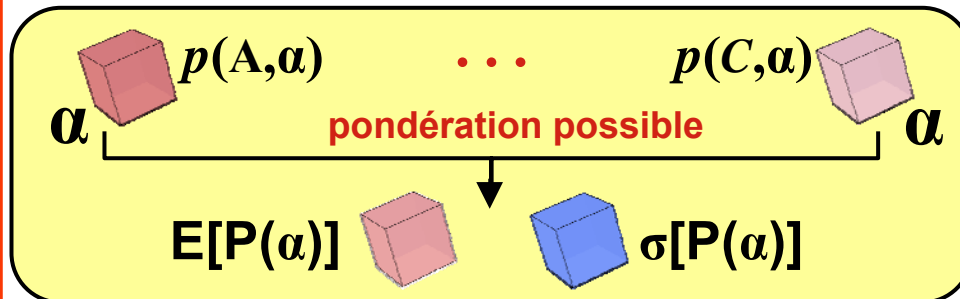
# Évaluation des lois de Dirichlet

1. Construction des cubes de proportions alternatifs



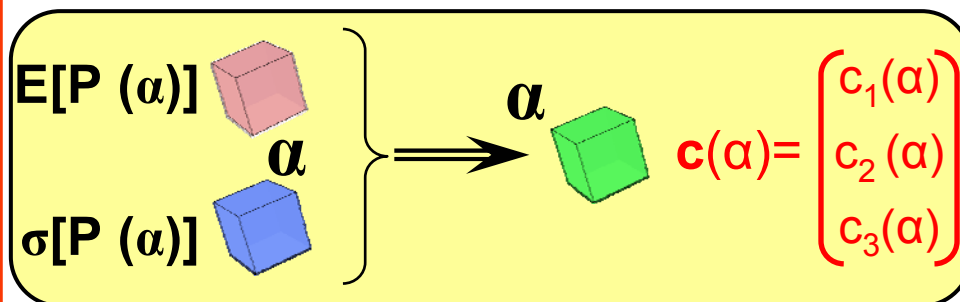
0/ À partir des différents modèles, **en tout point  $\alpha$**

2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles



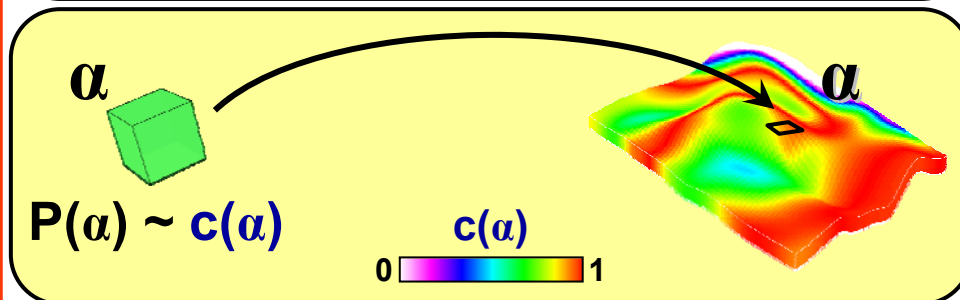
1/ **Estimation** des moments statistiques

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles



2/ **Calcul** des paramètres des lois de Dirichlet

4. Simulation globales des cubes de proportions



3/ **Modèle 3D** des lois de Dirichlet régionalisées

# Étape 3 : Comment simuler cette loi de probabilité régionalisée en un point ?

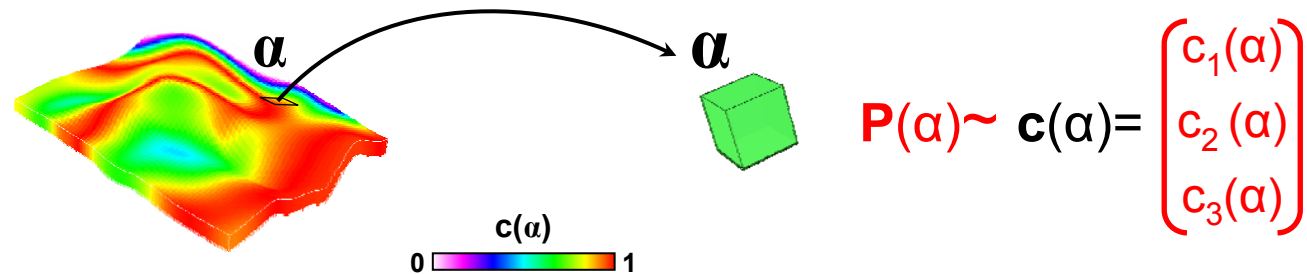
1. Construction des cubes de proportions alternatifs

2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

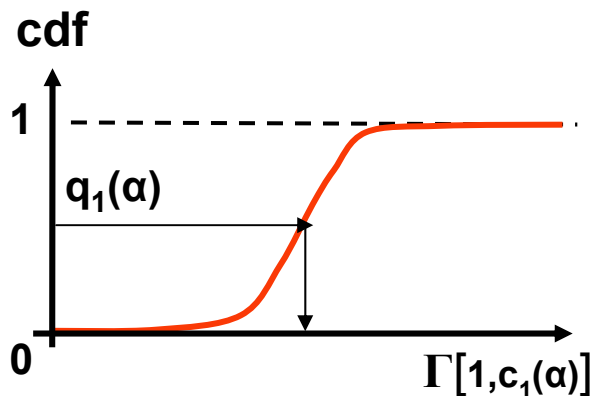
4. Simulation globales des cubes de proportions

## 0/ Distributions régionalisées des vecteurs de proportions



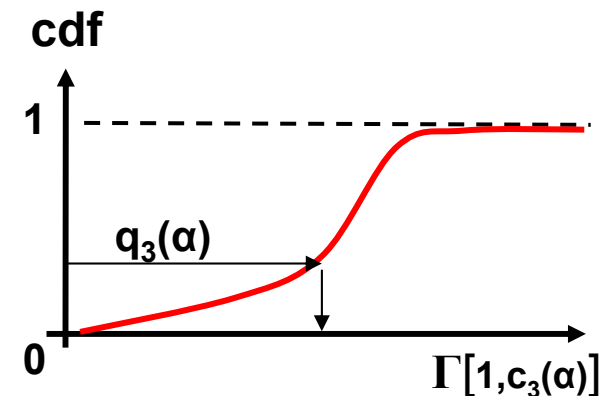
## 1/ Lois Gamma intermédiaires

$$\Gamma[1, c_1(\alpha)]$$



...

$$\Gamma[1, c_3(\alpha)]$$



# Étape 4 : Comment simuler un cube de proportions dans sa globalité ?

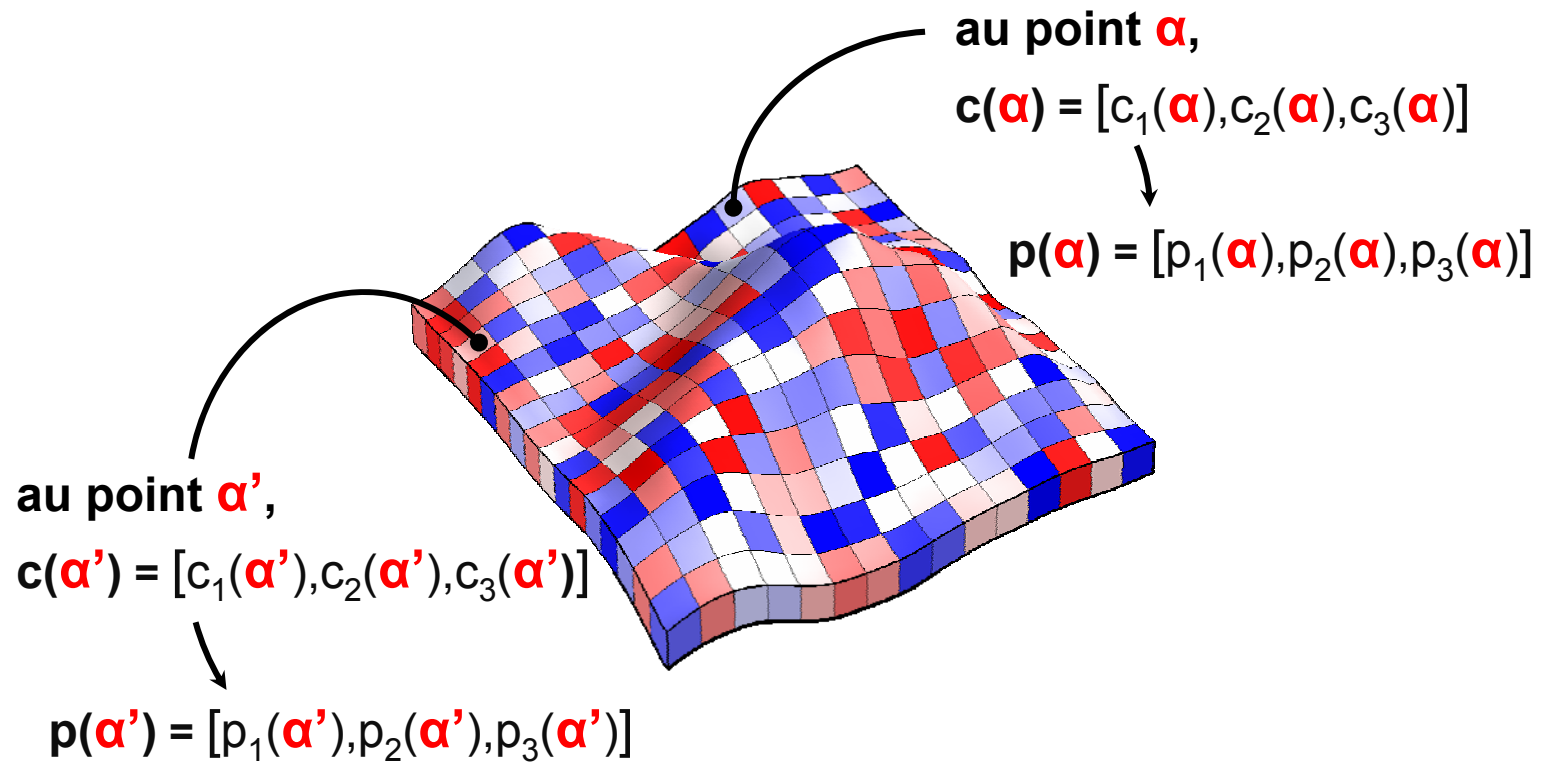
1. Construction des cubes de proportions alternatifs

2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

4. Simulation globales des cubes de proportions

- **Problématique** : une simulation sans corrélation spatiale conduit à des cubes de proportions incohérents et bruités





# Cas des plates-formes carbonatées :

## Réalisations en Probabilité de Faciès 1

1. Construction des cubes de proportions alternatifs

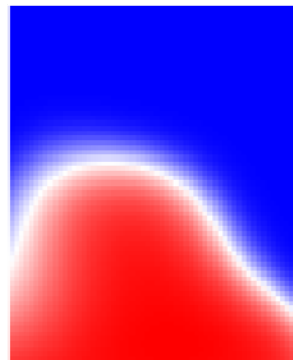
2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

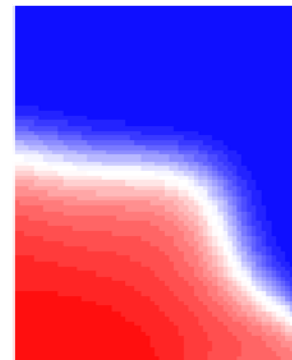
4. Simulation globales des cubes de proportions

- Pour chaque réalisation, le vecteur de quantiles :  $(q_1, q_2, q_3)^T$  est simulé **une fois, et utilisé pour toutes les cellules.**

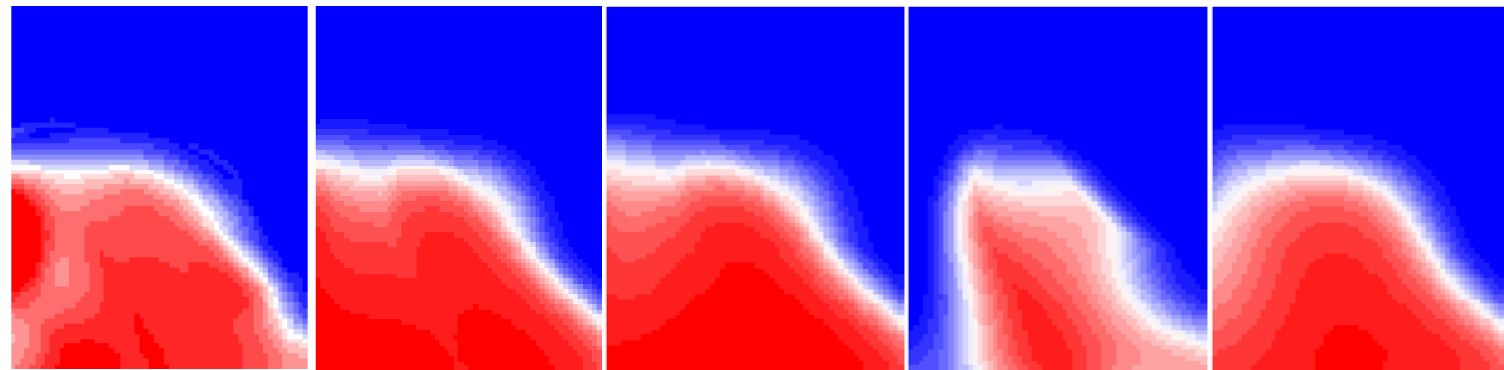
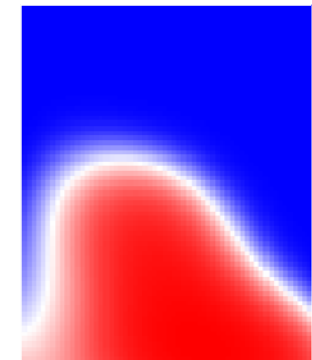
modèle A



modèle B



modèle C



# Cas des plates-formes carbonatées :

## Réalisations en Probabilité de Faciès 2

1. Construction des cubes de proportions alternatifs

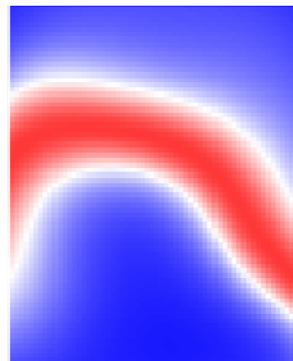
2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

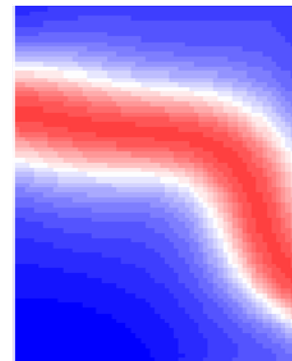
4. Simulation globales des cubes de proportions

- Pour chaque réalisation, le vecteur de quantiles :  $(q_1, q_2, q_3)^T$  est simulé **une fois, et utilisé pour toutes les cellules.**

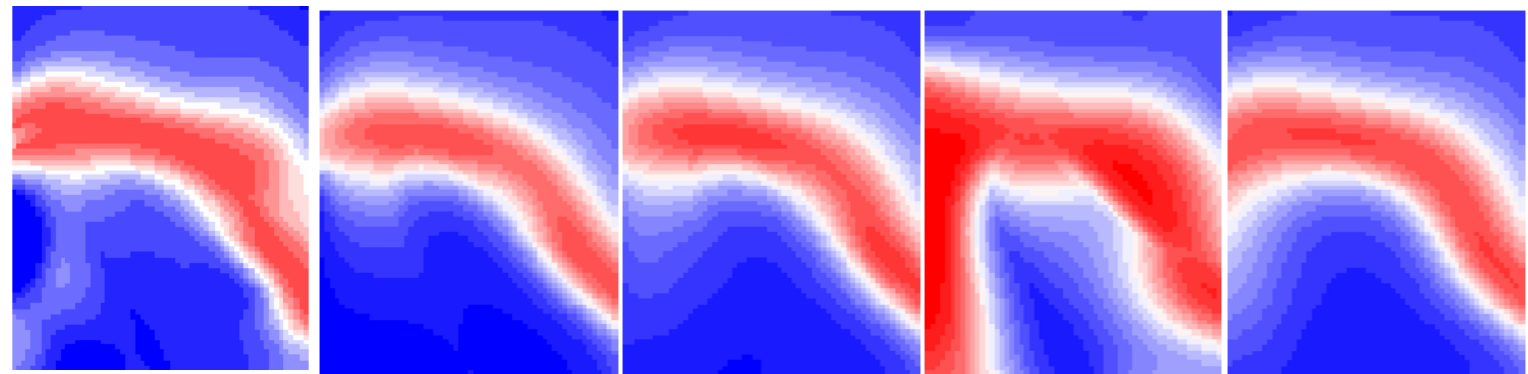
modèle A



modèle B



modèle C



# Préservation de la cohérence des simulations

1. Construction des cubes de proportions alternatifs

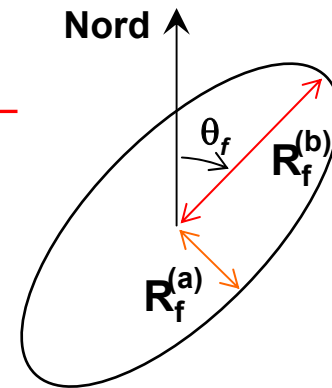
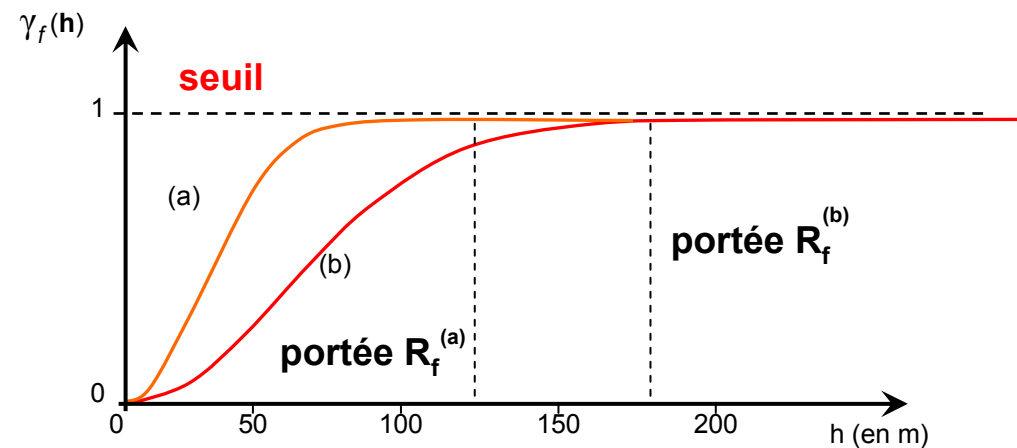
2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

4. Simulation globales des cubes de proportions

- La **Géostatistique** fournit les outils permettant d'introduire les concepts géologiques dans le cadre de l'étude des incertitudes

- le variogramme



# Préservation de la cohérence des simulations

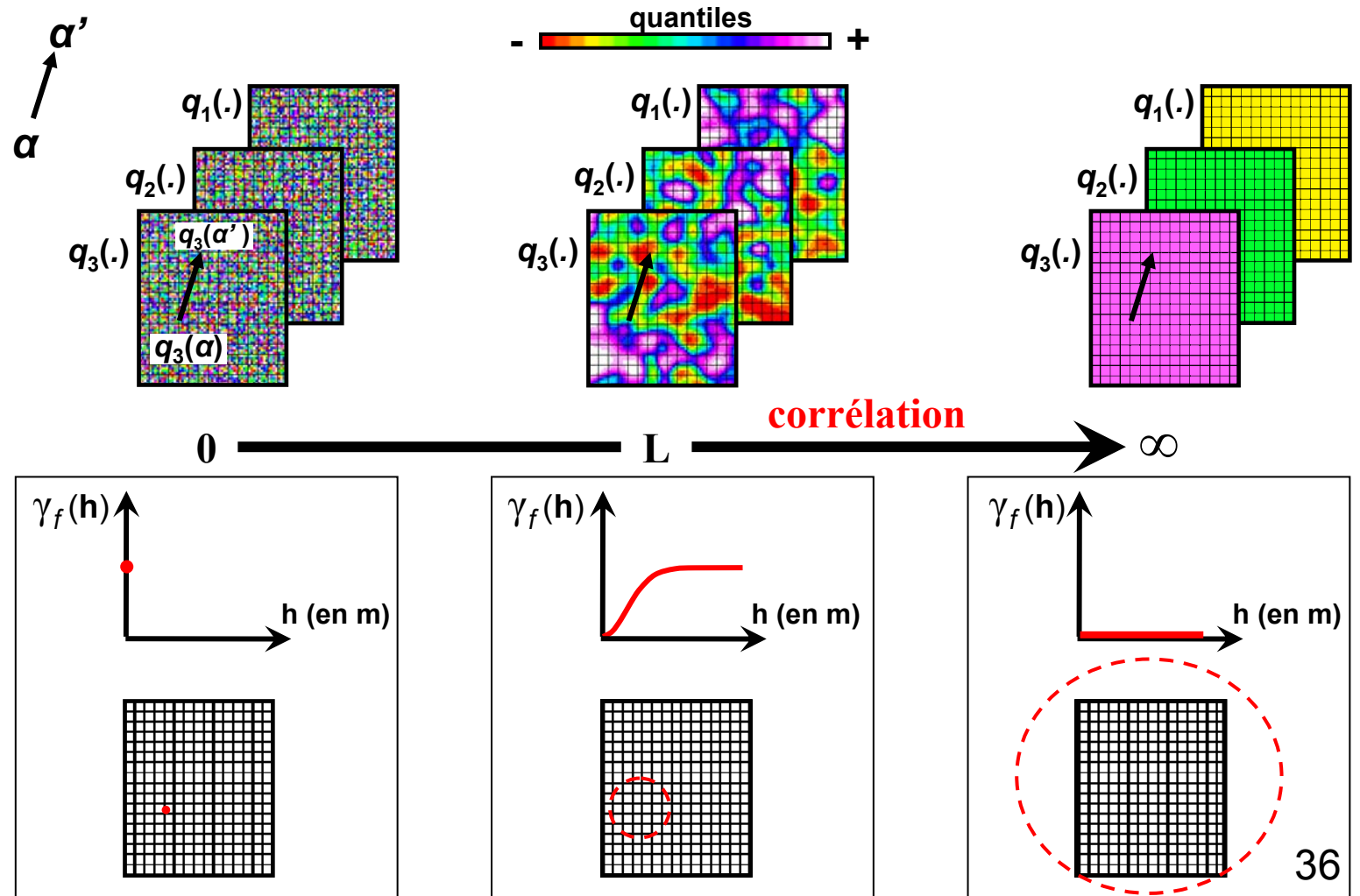
1. Construction des cubes de proportions alternatifs

2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

4. Simulation globales des cubes de proportions

- **Les relations spatiales** entre points peuvent être conservées en simulant dans l'espace les composantes des vecteurs de quantiles :  $(q_1, q_2, q_3)^T$  au moyen de **SGS** indépendantes entre elles



# Préservation de la cohérence des simulations

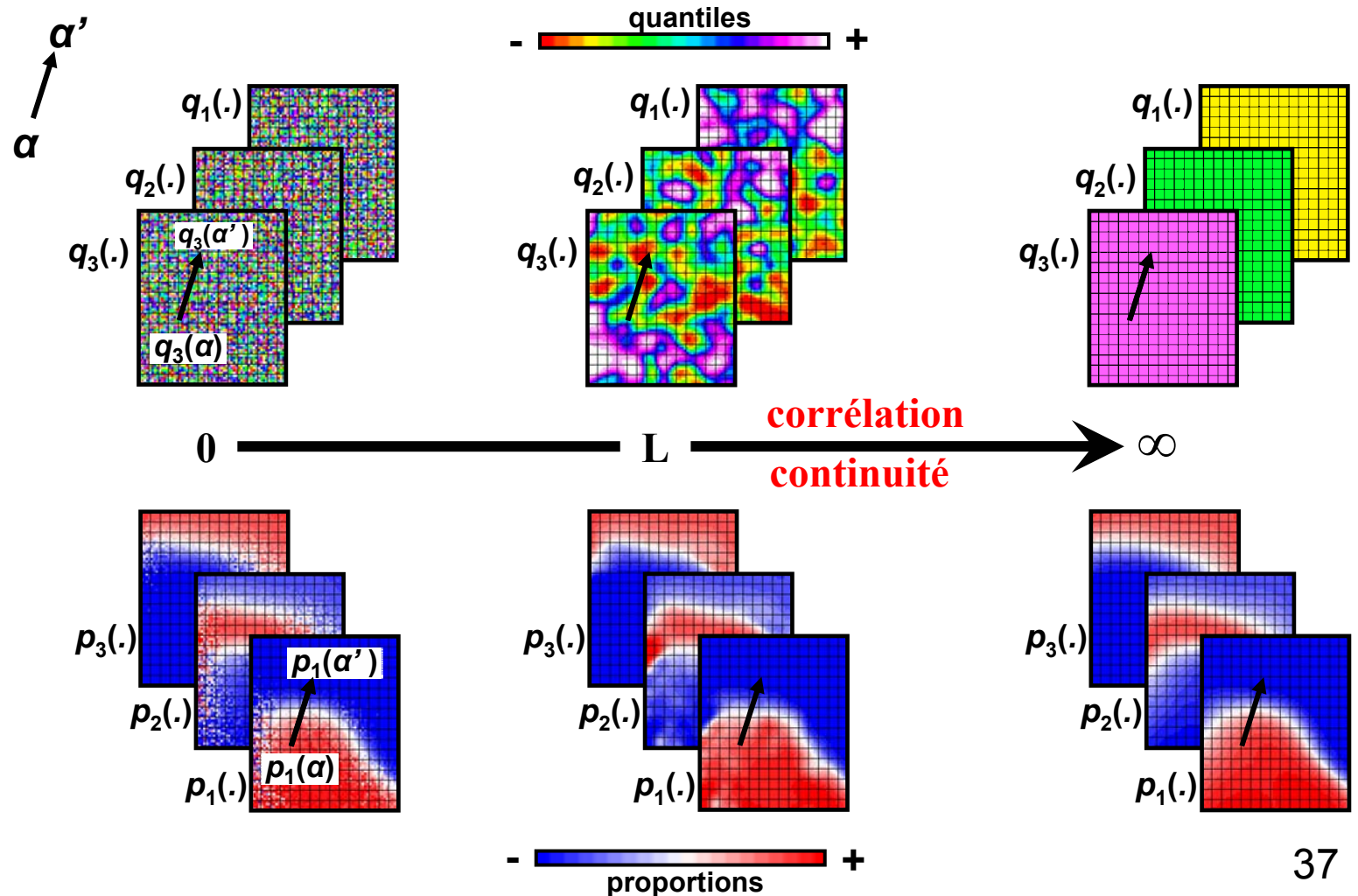
1. Construction des cubes de proportions alternatifs

2. Évaluation des lois de probabilités ponctuelles

3. Simulation des lois de probabilités ponctuelles

4. Simulation globales des cubes de proportions

- **Les relations spatiales** entre points peuvent être conservées en simulant dans l'espace les composantes des vecteurs de quantiles :  $(q_1, q_2, q_3)^T$  au moyen de **SGS** indépendantes entre elles

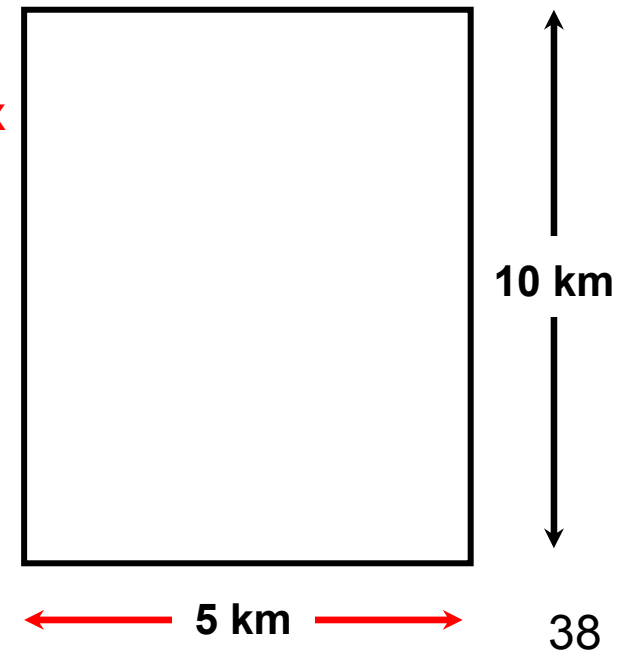


# Cas des ceintures chenalisantes et des chenaux :



- 3 faciès principaux : - **sables grossiers de chenaux**  
- **sables laminés**  
- **encaissant argileux**

- Apports sableux selon des ceintures chenalisantes



## **Cas des ceintures chenalisantes et des chenaux :**

### **Hypothèses de base**

---

- **3 cas pratiques qui distinguent la nature comme le degré d'information disponible pour simuler les cubes de proportions**
  - 1) Cas n°1 : Simulation des zones préférentielles pour les chenaux**
    - Application au champ Alwyn
  - 2) Cas n°2 : Simulation de cartes de proportions via la sismique**
  - 3) Cas n°3 : Intégration de plusieurs cartes de dérive**
    - Application au champ RKF

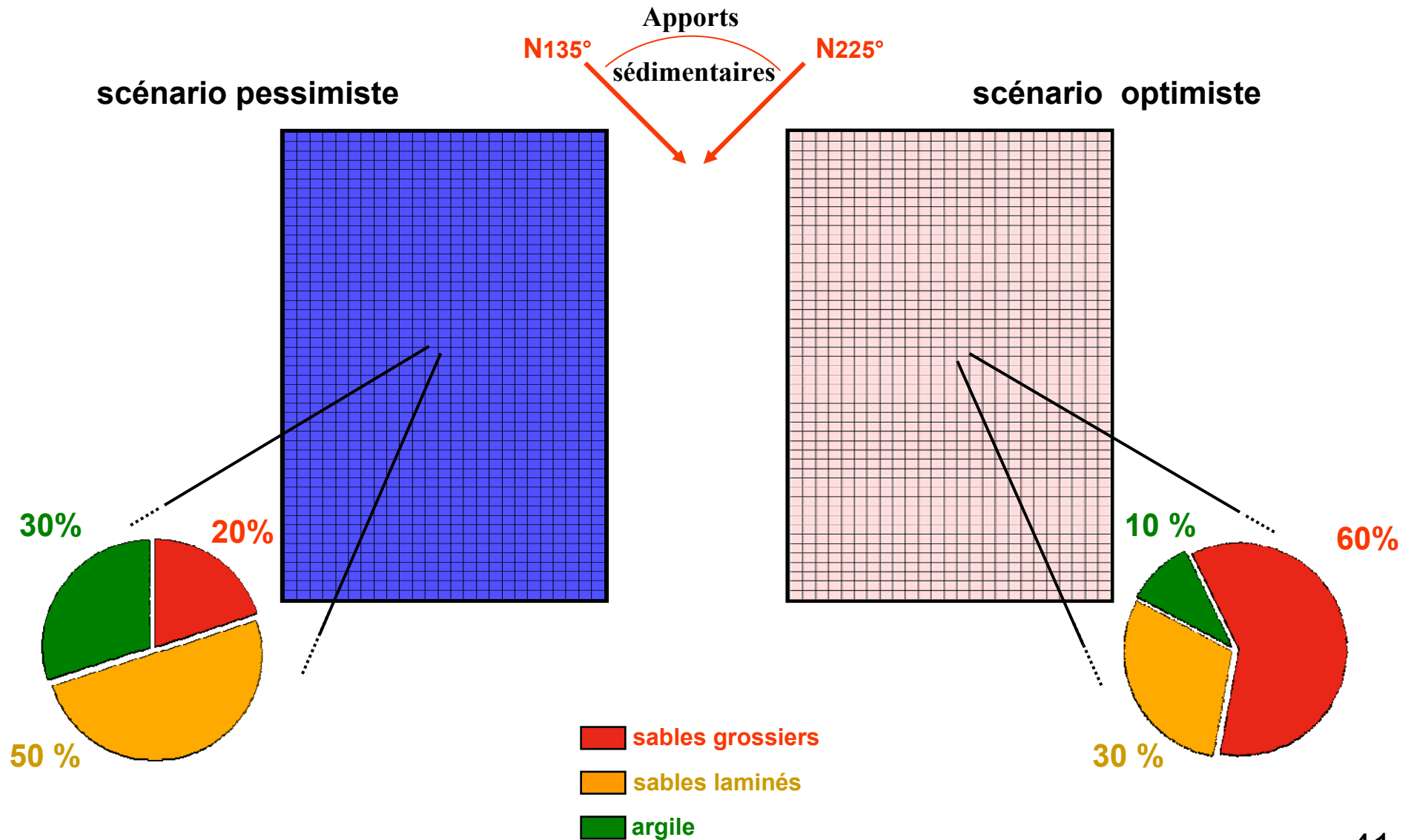
# Cas n°1 : Présentation

---

- Information :**
- direction des apports sableux **inconnue**  
(variant de N45° à N135°)
  - position des ceintures chenalisantes et largeur **inconnues**  
(variant de 800 m à 2 km)
  - proportions de faciès **inconnues**:
    - scénario pessimiste : sables grossiers 20 %  
sables laminés 50 %  
argile 30 %
    - scénario optimiste : sables grossiers 60 %  
sables laminés 30 %  
argile 10 %

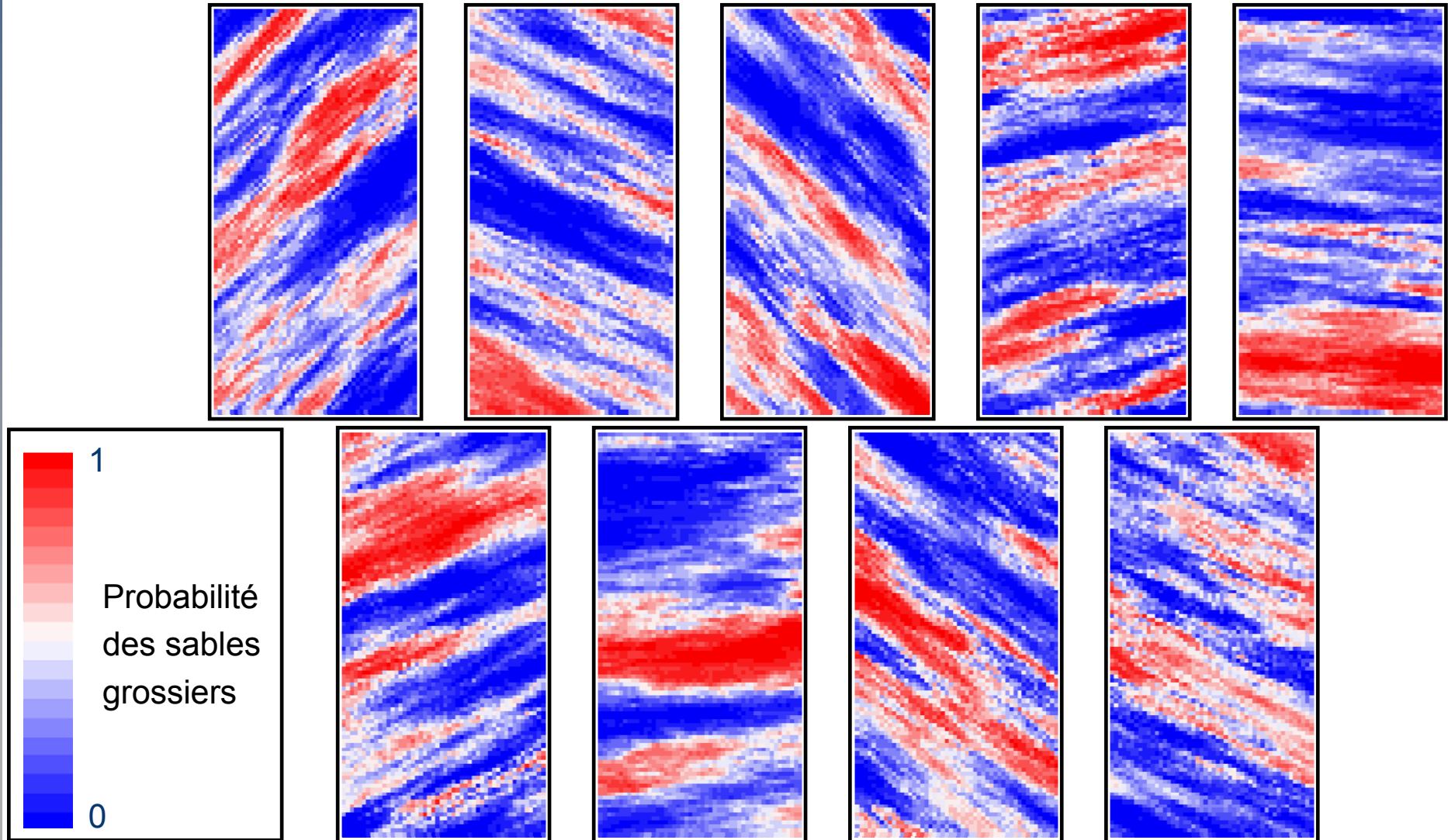


# Cas n°1 : Scénarios de départ



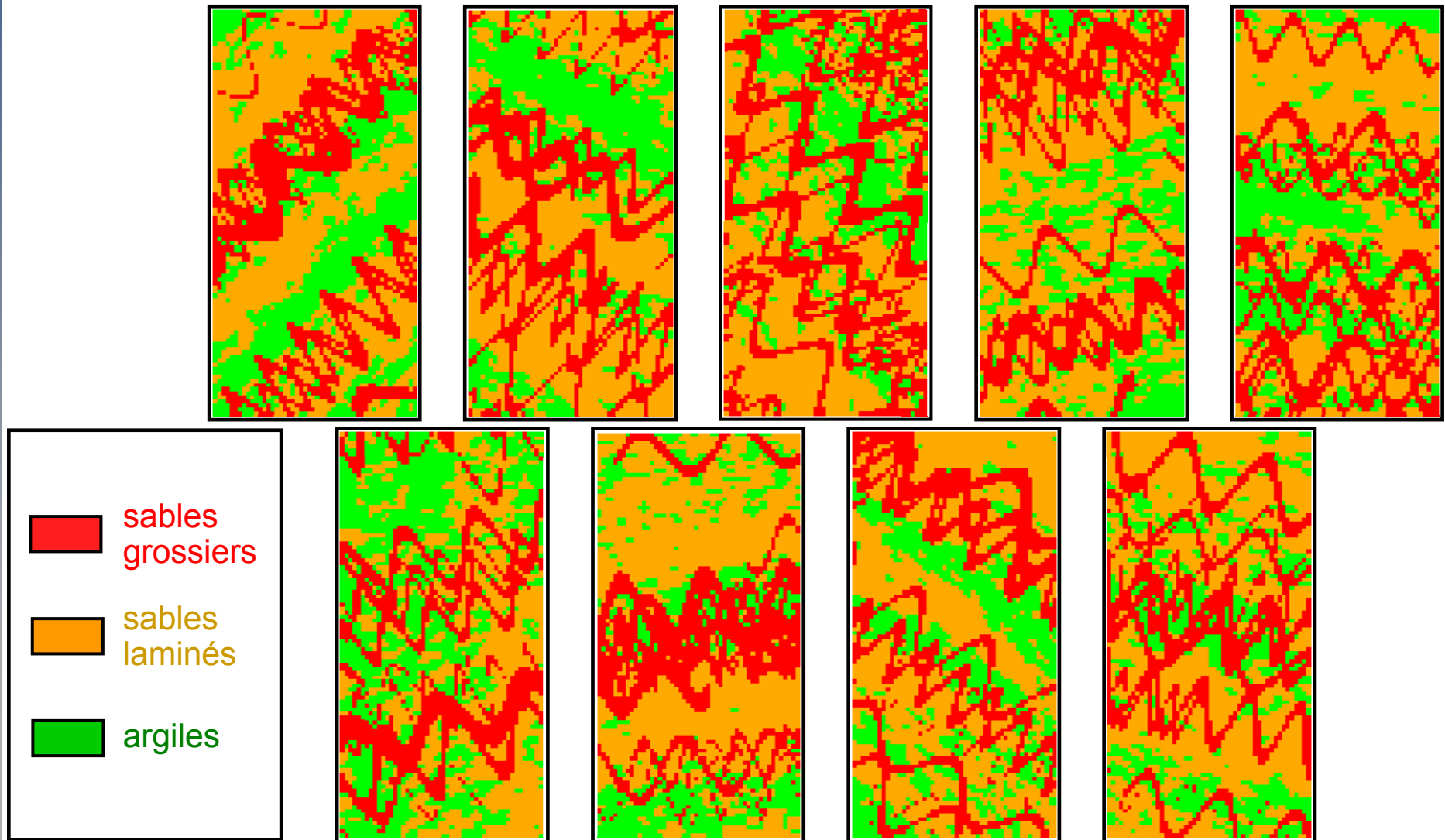
# Cas n°1 : Probabilité des sables grossiers

## Quelques réalisations des scénarios générés

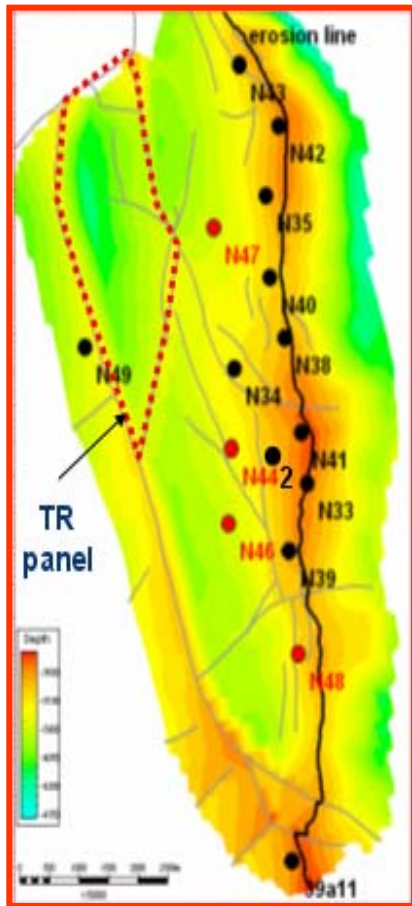


# Cas n°1 : Simulations en faciès (Objets + SIS)

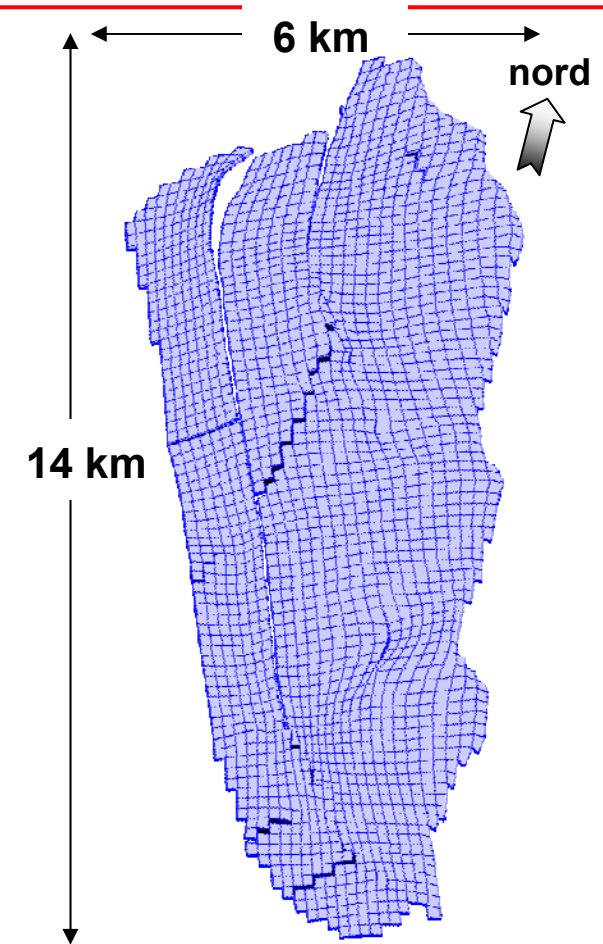
## Quelques réalisations dérivées des scénarios générés



# Cas n°1 : Application au champ Alwyn

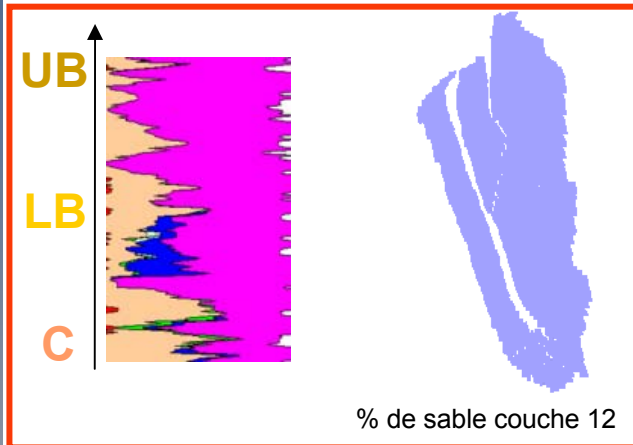


- **Nombre de puits** : 16
- **Grille stratigraphique** : 89 x 38 x 512  
(1 731 584 cellules)
- **Taille des cellules** : environ 150 m par 150 m
- **Zones Réservoirs** : 3
- **Nombre de couches** : 499
- **Groupe de faciès** : jusqu'à 8



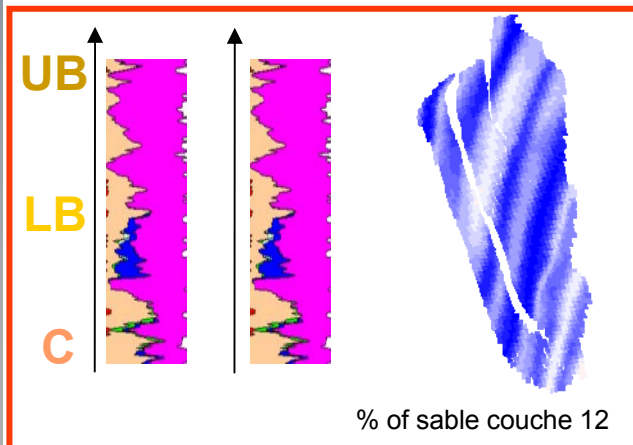
- incertitude la provenance des apports sableux,
- incertitude sur la distribution spatiale des proportions de faciès

# Comparaison des méthodes utilisées



(1) Classiquement : un unique modèle de courbe verticale de proportions

**STATIONNARITÉ** des proportions de faciès sur chaque couche



(2) Dirichlet : **Plusieurs** modèles de courbes verticales de proportions

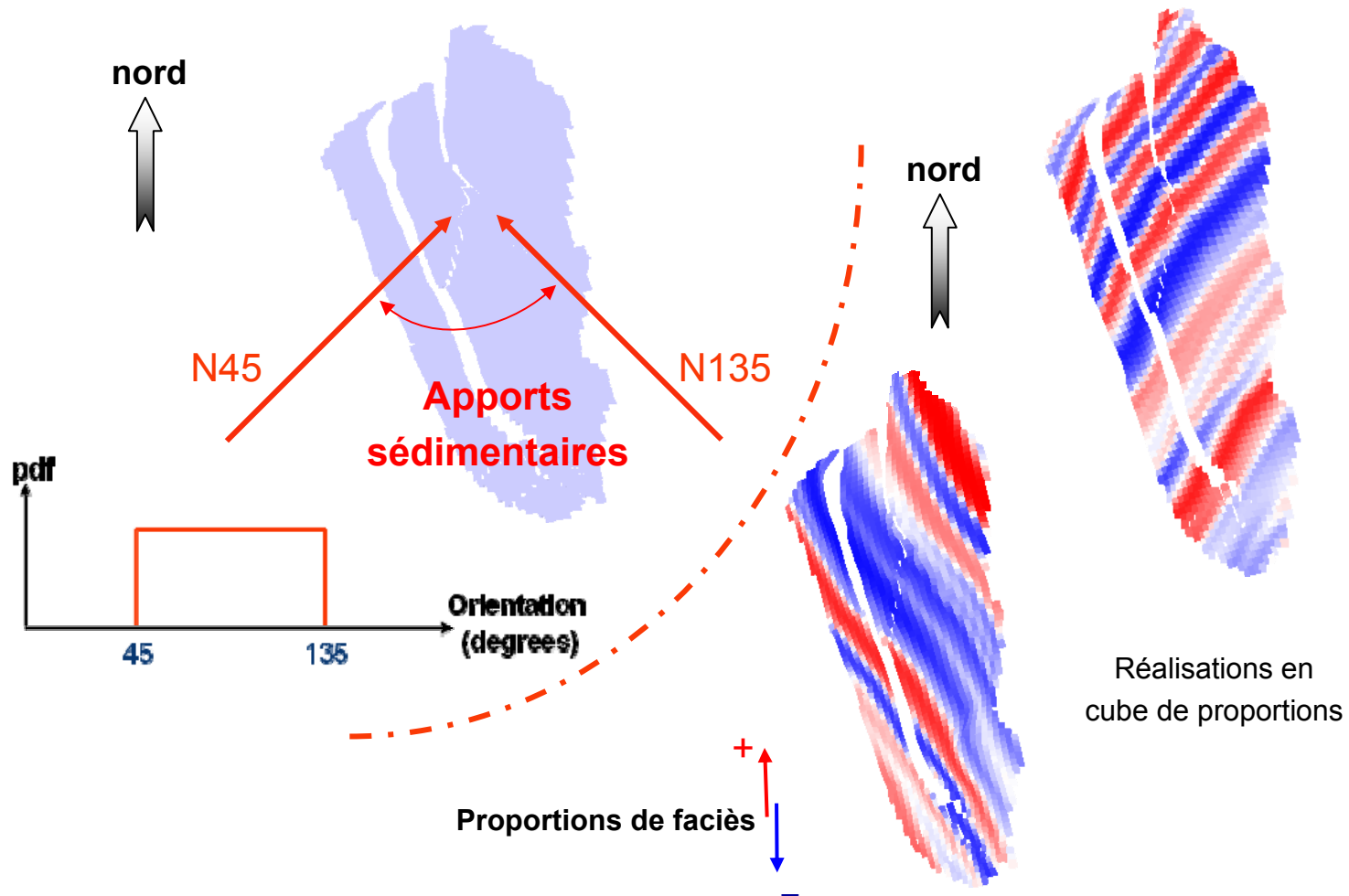
**NON -STATIONNARITÉ** des proportions de faciès sur chaque couche

Proportions de faciès

+  
↓  
-

# Multi-réalisation des proportions de faciès

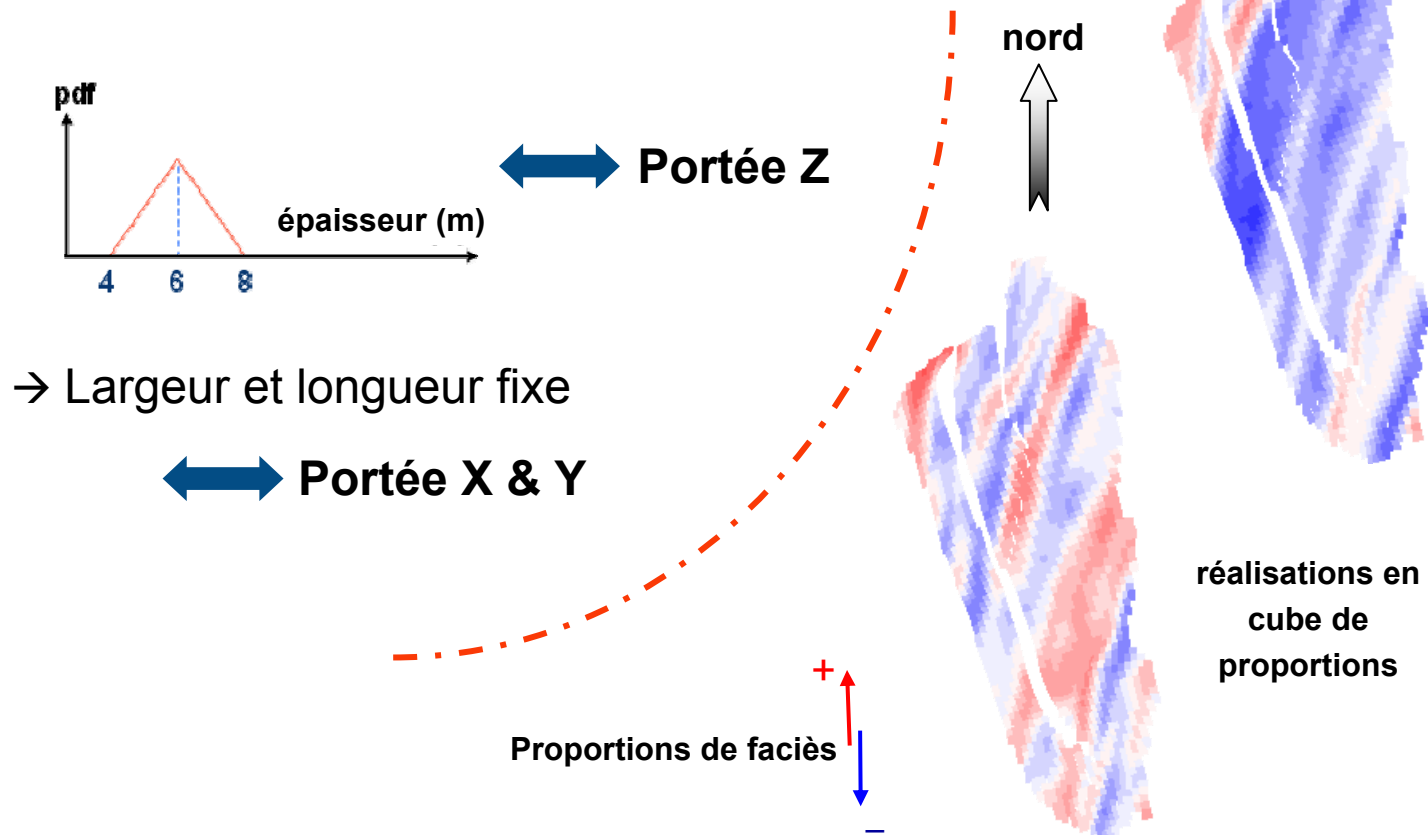
- Direction des apports sableux **inconnues**
  - comprise entre  $N45^\circ$  to  $N135^\circ$
- Simulation de l'orientation des variogrammes utilisés



# Multi-réalisation des proportions de faciès

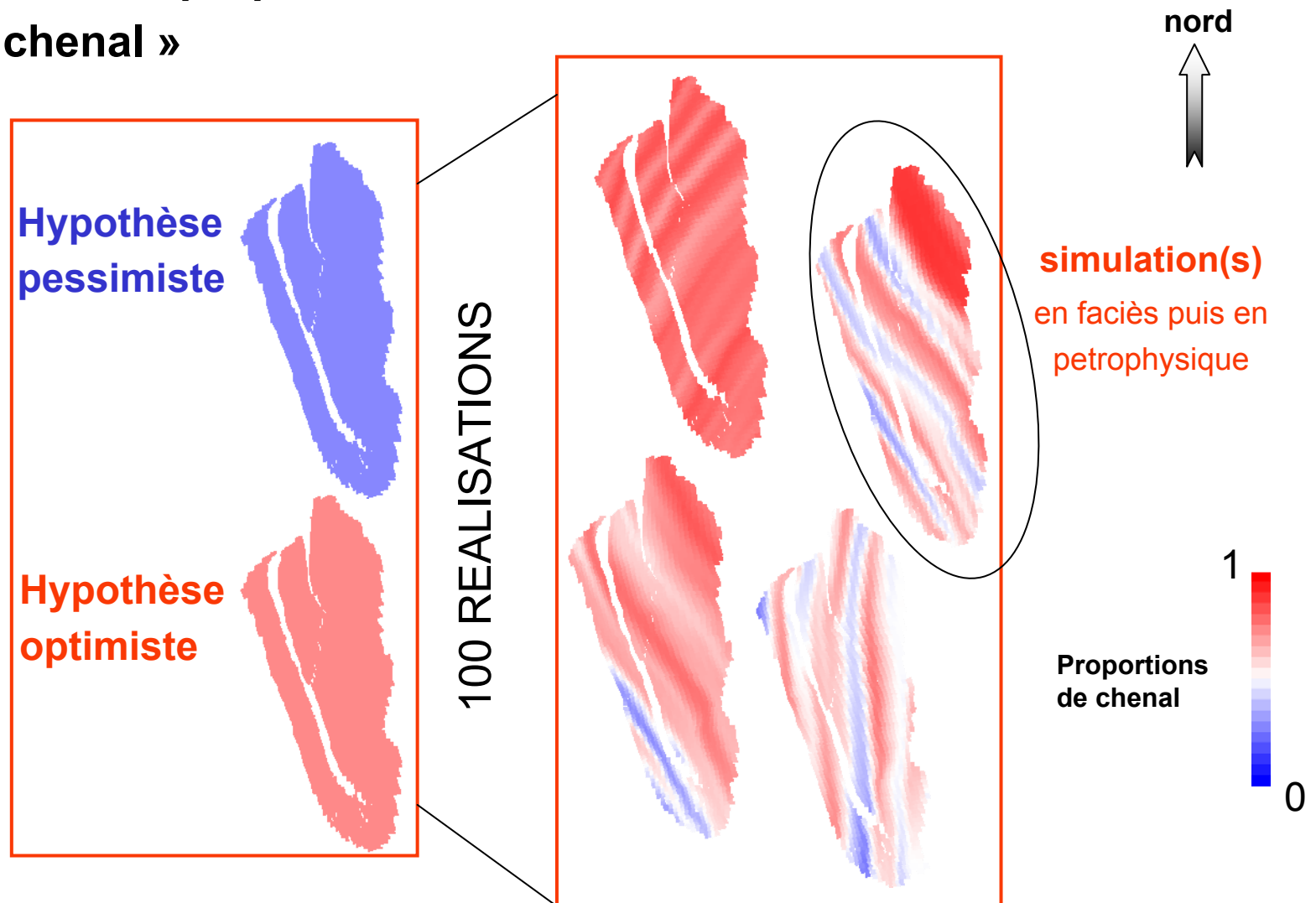
- localisation et caractéristiques (épaisseur) des ceintures chenalantes **inconnues**
- Simulation de la portée en Z des variogrammes utilisés

**Exemple:** Chenaux



# Multi-réalisation des proportions de faciès « chenal »

- Cubes de proportions du faciès « chenal »





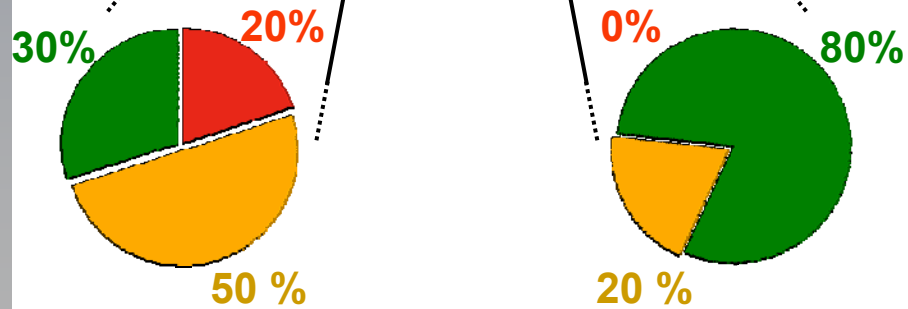
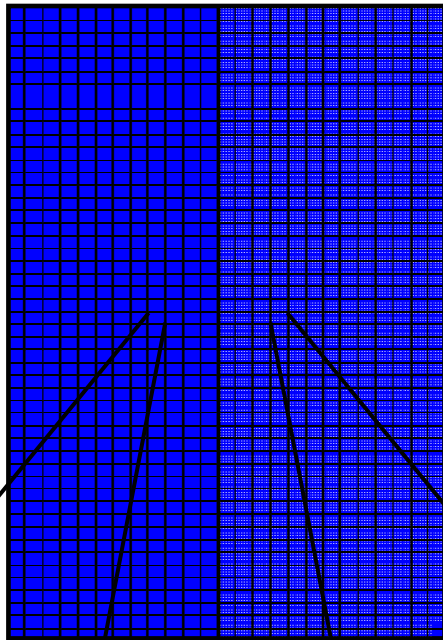
# Cas n°2 : Présentation

---

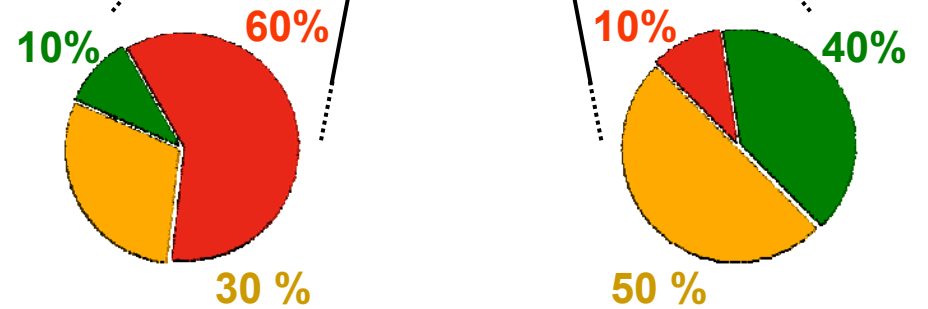
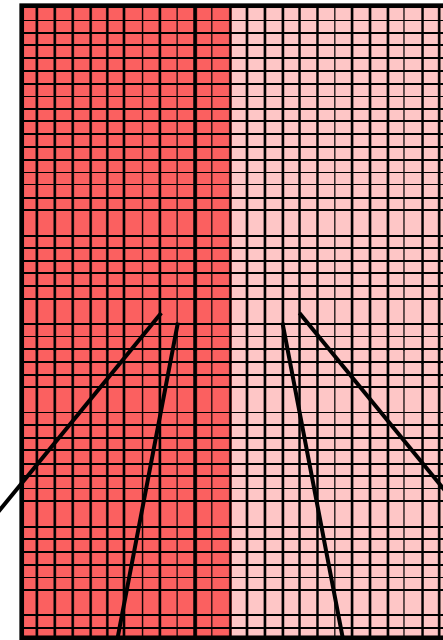
- Information :**
- direction des apports sableux **connue** (du Nord)
  - de la sismique : 1 zone de ceinture chenalisante + 1 zone de débordement
  - proportions de faciès **peu connue** dans les 2 zones :
    - scénario pessimiste : sables grossiers : 20 % (Fw) 0 % (Ovb)  
sables laminés : 50 % (Fw) 20 % (Ovb)  
argile : 30 % (Fw) 80 % (Ovb)
    - scénario optimiste : sables grossiers : 60 % (Fw) 10 % (Ovb)  
sables laminés : 30 % (Fw) 50 % (Ovb)  
argile : 10 % (Fw) 40 % (Ovb)

# Cas n°2 : Scénarios de départ

scénario pessimiste



scénario optimiste



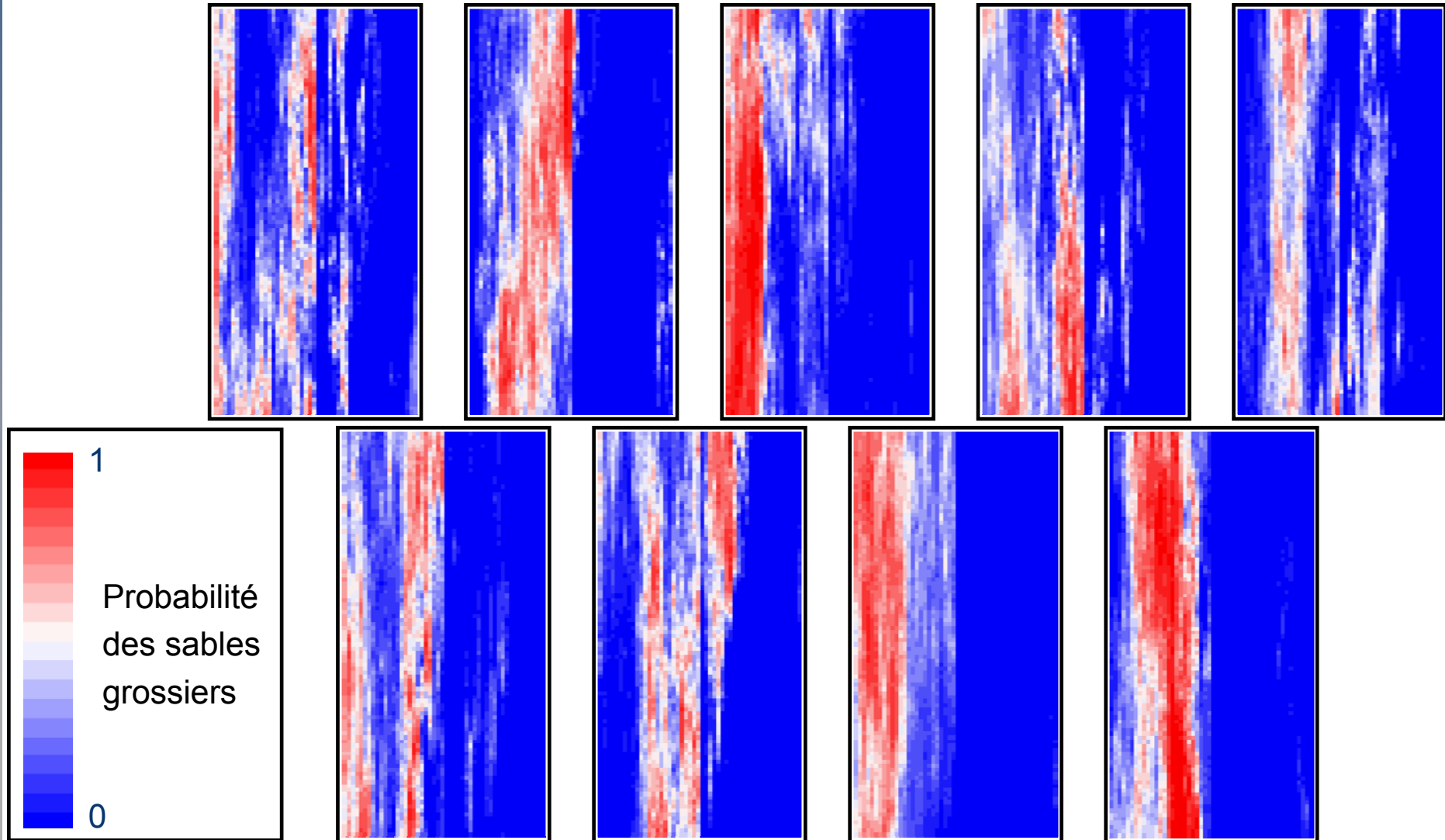
Apports  
sédimentaires  
↓  
N180°

- sables grossiers
- sables laminés
- argile

# Cas n°2 : Probabilité des sables grossiers

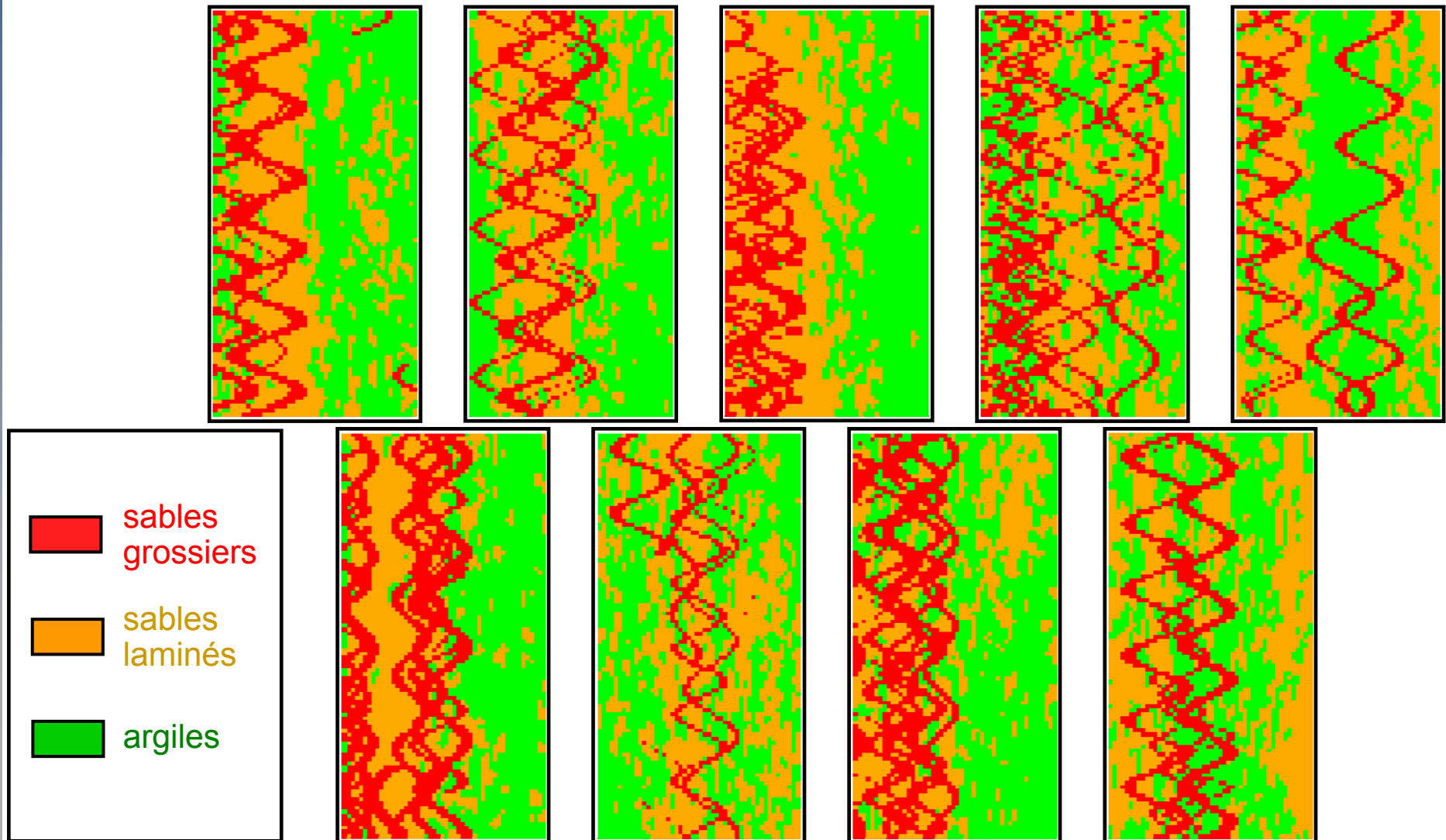
## Quelques réalisations des scénarios générés

---



## Cas n°2 : Simulations en faciès (Objets + SIS)

### Quelques réalisations dérivées des scénarios générés



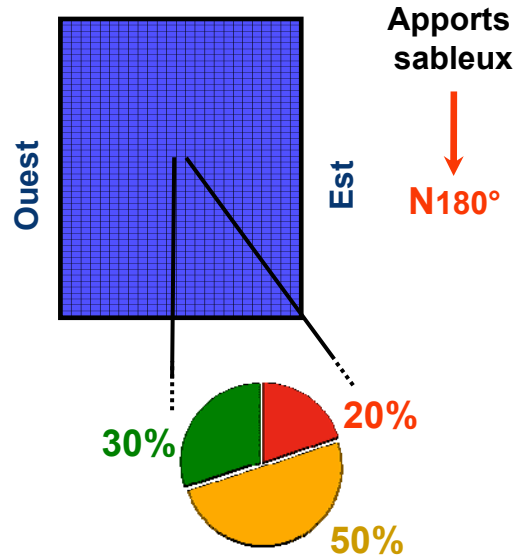
# Cas n°3 : Présentation

---

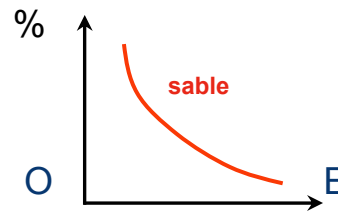
- Information :**
- direction des apports sableux **connue** (du nord)
  - de la géologie :1 dérive d'est en ouest
  - proportions de faciès **peu connues**, comme leur évolution de l'est vers l'ouest :
    - cas pessimiste et optimiste pour les proportions de faciès,
    - hypothèses pessimistes (décroissance rapide des sables grossiers) et optimistes (décroissance tardive) pour la dérive
    - combinaison des scénarios.

# Cas n°3 : Scénarios de départ

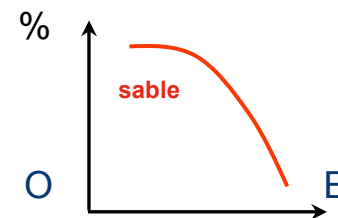
( a ) scénario pessimiste (proportions)



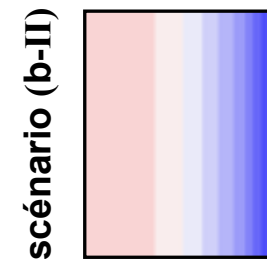
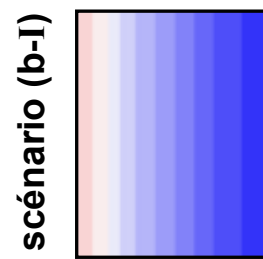
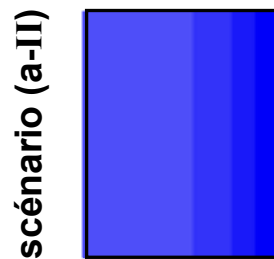
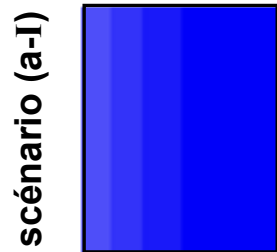
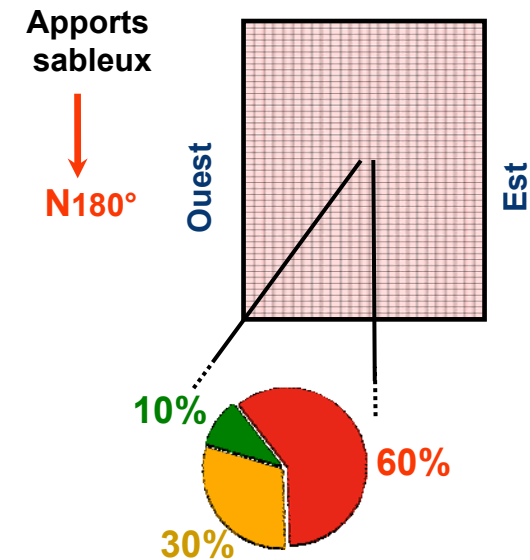
( I ) scénario pessimiste (tendance)



( II ) scénario optimiste (dérive)



( b ) scénario optimiste (proportions)



proportion de sable grossier

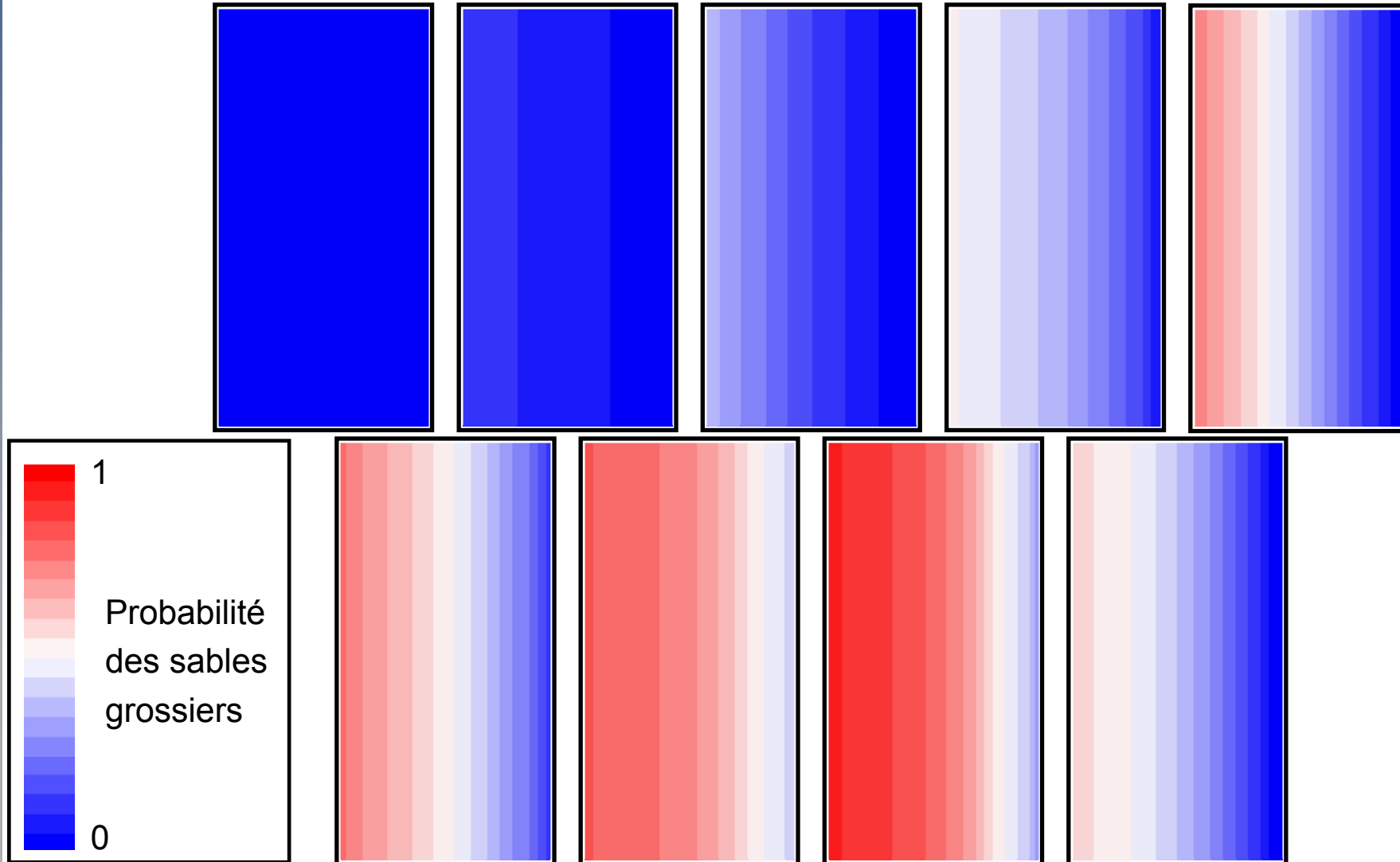


sables grossiers sables laminés argile

# Cas n°3 : Probabilité des sables grossiers

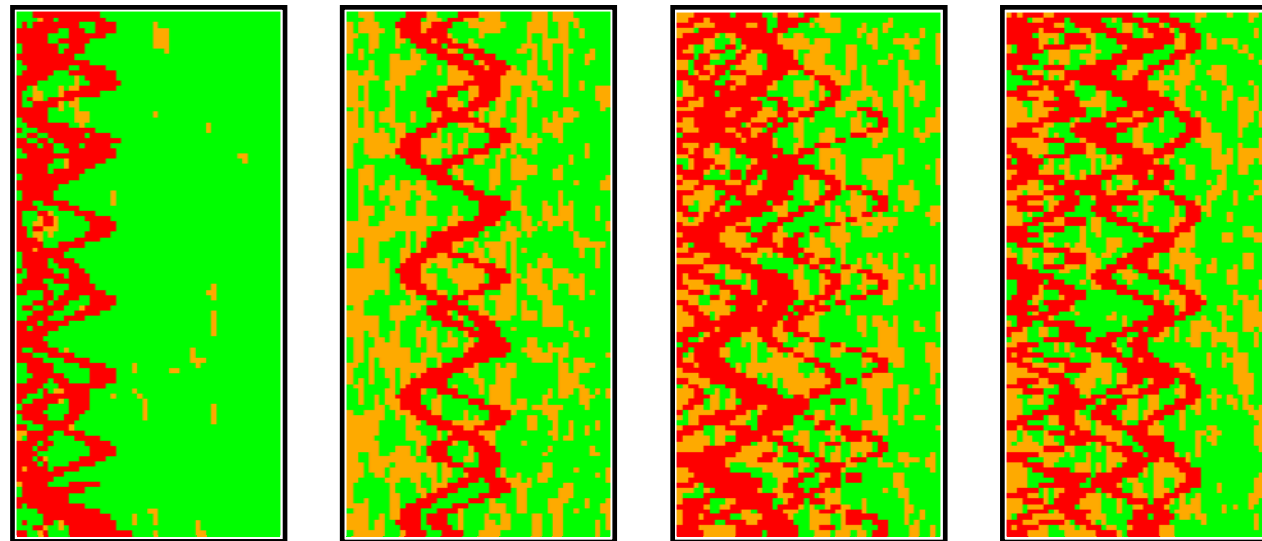
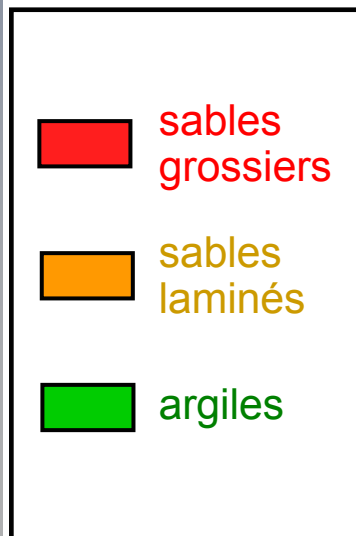
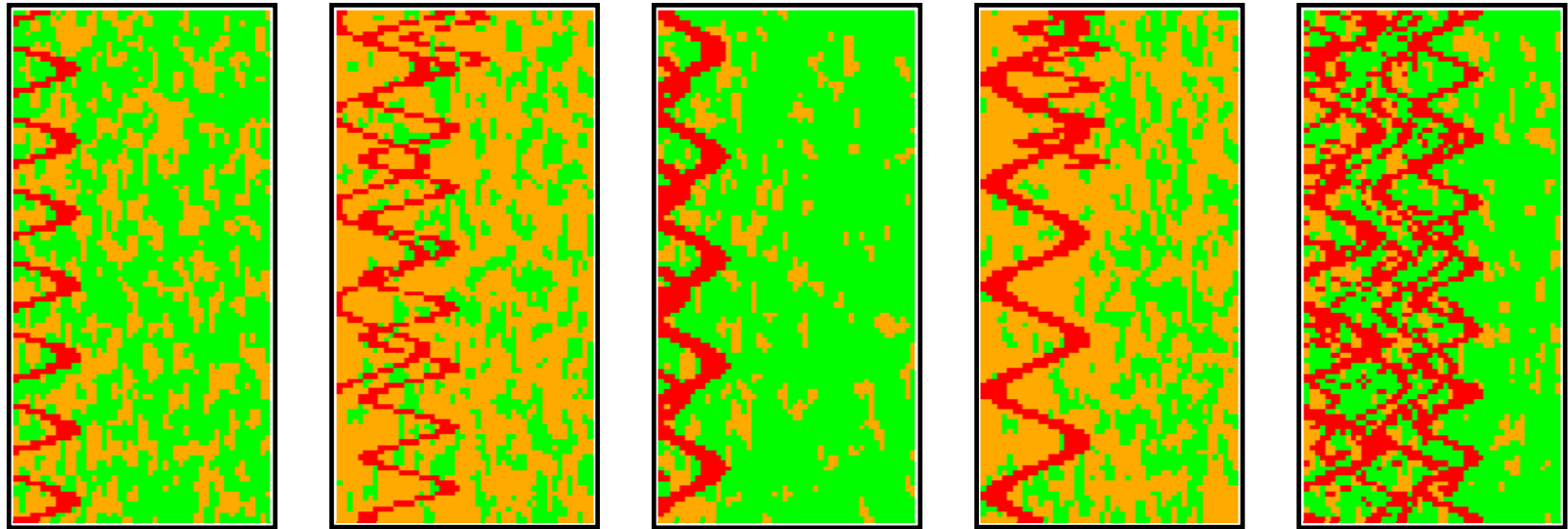
## Quelques réalisations des scénarios générés

---



## Cas n°3 : Simulations en faciès (Objets + SIS)

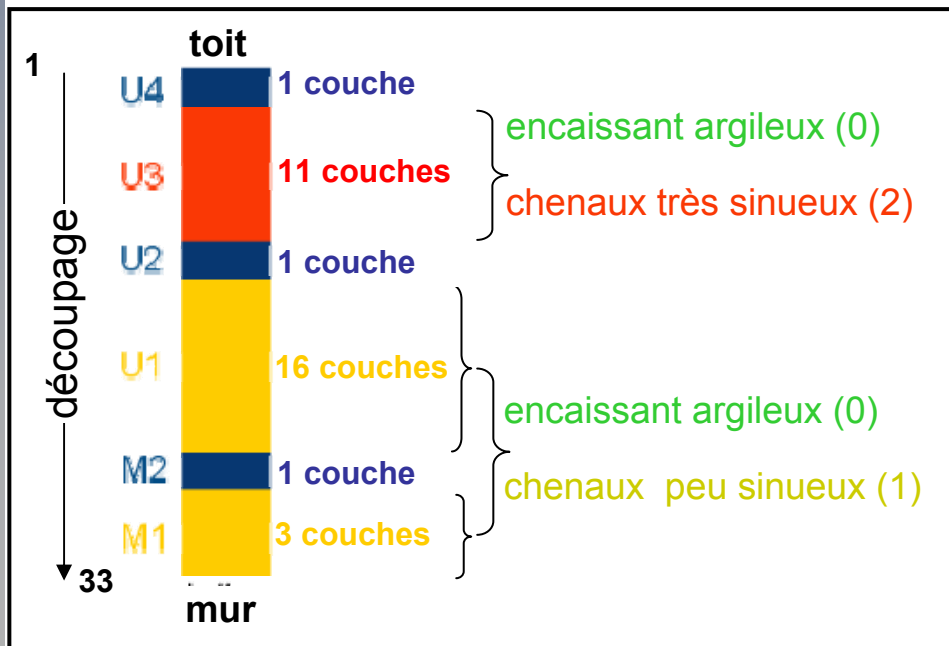
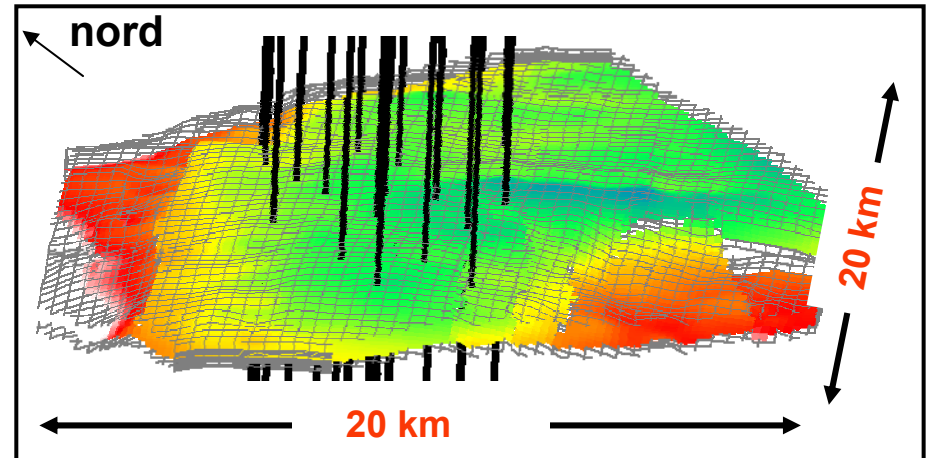
Quelques réalisations dérivées des scénarios générés





# Cas n°3 : Application au champ RKF (Données)

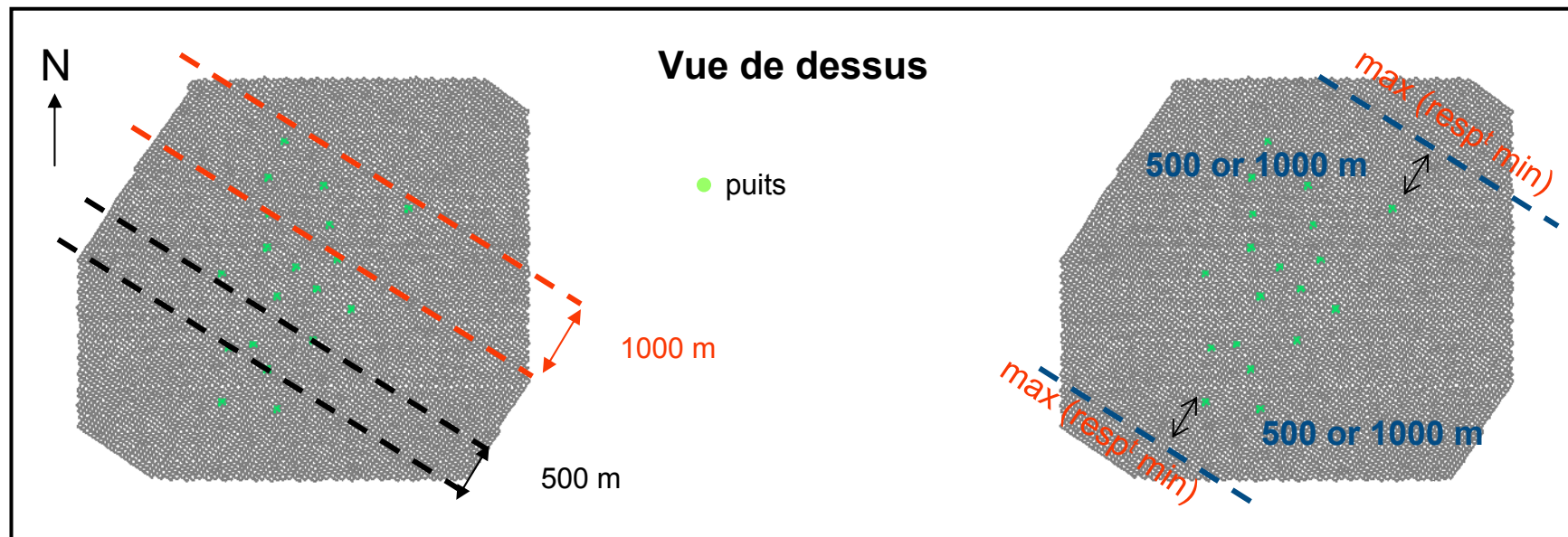
- **Nombre de puits : 19**
- **Grille stratigraphique : 415 000 maille**  
(105 x 120 x 33)



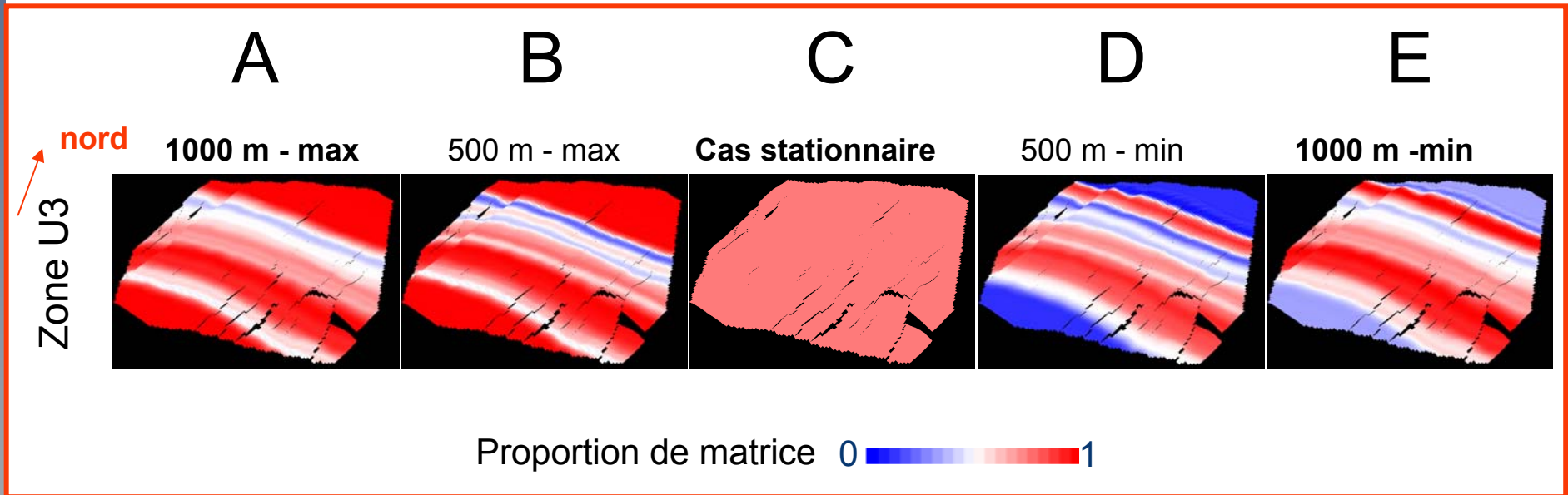
- **Nombre de couches : 33**
- **Zones réservoirs : U3, U1 & M1**
- **Groupe de faciès : 3**
- **La Non stationnarité est l'incertitude clé dans de tels système géologique**

# Construction de 5 scénarios de dérive horizontale

- Pour chaque réservoir U3, U1 et M1:
  - 1 scénario qui reprend l'hypothèse de **stationnarité** des proportions de faciès,
  - 4 scénarios construits en moyennant les données de puits:
    - Fenêtre glissante : 2 hypothèses : 500 m ou 1000 m de large,
    - Zones non investigués : 2 hypothèses pour remplir ces zones, avec la proportion de matrice soit maximale soit minimale.

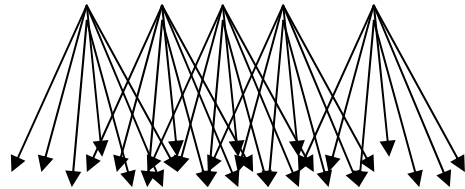


# Scénarios de base

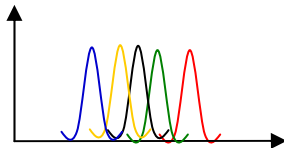


# Comparison des methodologies

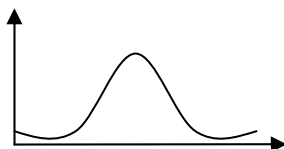
Scénarios  
A, B, C, D, E



**100 réalisations en faciès pour chaque scénario A, B, C, D, E**  
**= 500 réalisations en faciès**  
**→ 5 distributions discrètes**



Combinaison de Monte Carlo  
→ 1 distribution



Scénario A

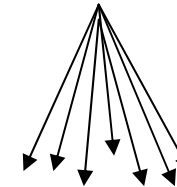
Scénario B

Scénario C

Scénario D

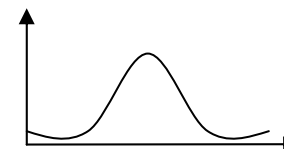
Scénario E

Cube de Dirichlet

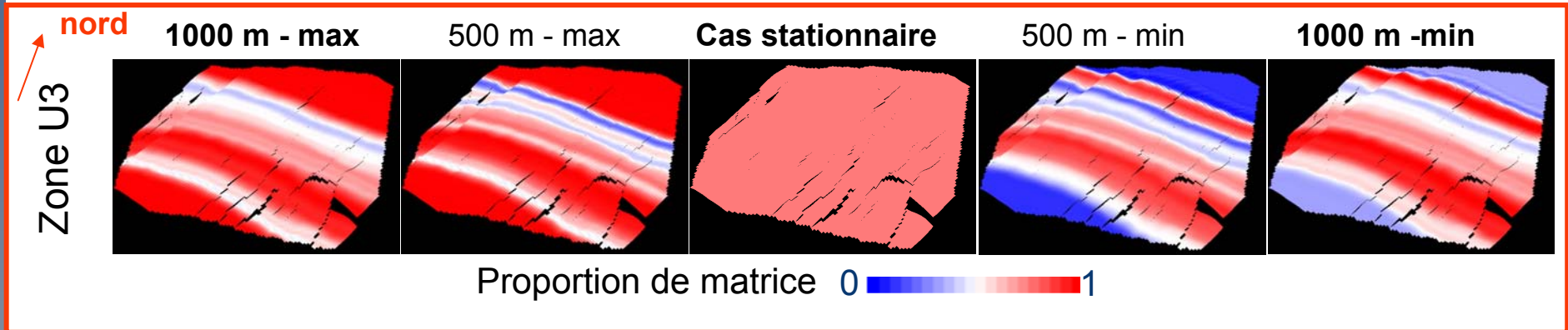


**100 réalisations en cubes de proportions**

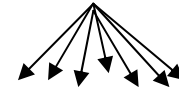
**1 réalisations en faciès pour chaque cube de proportions = 100 faciès réalisations**  
**→ 1 distribution**



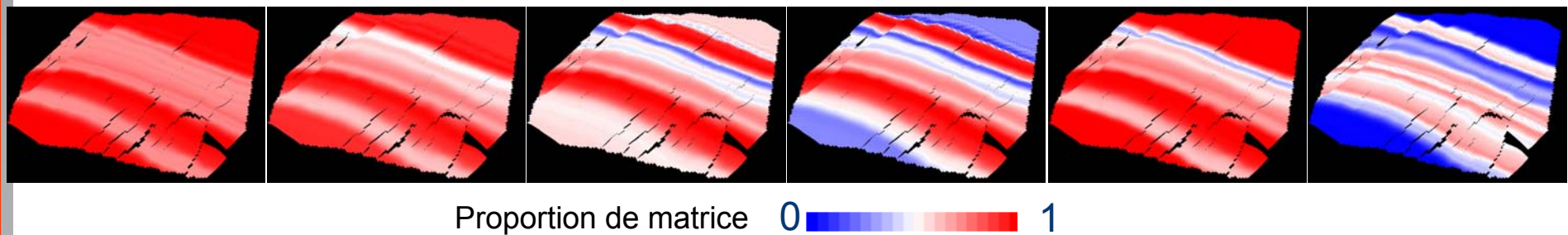
# Des scénarios aux simulations en cubes de proportions



Cube de Dirichlet



100 réalisations en cubes de proportions





## **Conclusions et perspectives**

# Bilan

---

- **Approche n°1 : multi-réalisation**

- interprétation dans un cadre probabiliste des paramètres définissant le scénario géologique (1D, 2D et 3D)
- générer de multiples cubes de proportions qui traduisent la variabilité directement au niveau des paramètres du scénario géologique,
- méthode simple, directe, généralisable à d'autres méthodes de modélisation
- méthode opérationnelle

# Bilan

---

- **Approche n°2 : formalisme de Dirichlet**

- passage d'une quantification discrète des incertitudes à une quantification continue
- le recours à des cubes de proportions multiples permet de reproduire l'incertitude liées à la distribution des faciès dans le réservoir,
- méthode opérationnelle
- demande de brevet pour la France en janvier 2008 (n°08 00 162) puis son extension à l'international en janvier 2009



# Perspectives industrielles

---

- **Approche n°1 : multi-réalisation**

- intégrer les méthodes proposées dans le futur workflow industriel de Neptune

- **Approche n°2 : formalisme de Dirichlet**

- utilisation des algorithmes développés dans la chaîne de quantification des incertitudes sédimentaires de Total
- développement d'un workflow indépendant sur gOcad

# Voies de recherche et développement (1/2)

---

- **Approche n°1 : multi-réalisation**

- appliquer l'approche multi-réalisation à des processus de modélisation autres que Neptune: géostatistique...
- limiter l'incertitude sur les paramètres d'entrée par recuit simulé
- développer des outils pratiques qui simplifient la création des données d'entrées

# Voies de recherche et développement (2/2)

---

- **Approche n°2 : formalisme de Dirichlet**

- appliquer le formalisme de Dirichlet à des cubes de proportions à l'architecture interne différente
- utiliser les lois de Dirichlet pour le changement d'échelle (downscaling) à partir d'une carte sismique

