

# *Mathématiques appliquées à la modélisation des bassins, des réservoirs et du stockage géologique du CO<sub>2</sub> à l'IFP*

Roland Masson

Département Mathématiques Appliquées, IFP

4 février 2010



# IFP

---

**Organisme public de R&D, de formation et d'information**

**Mission : développer les technologies du futur  
dans les domaines de l'énergie, du transport  
et de l'environnement**



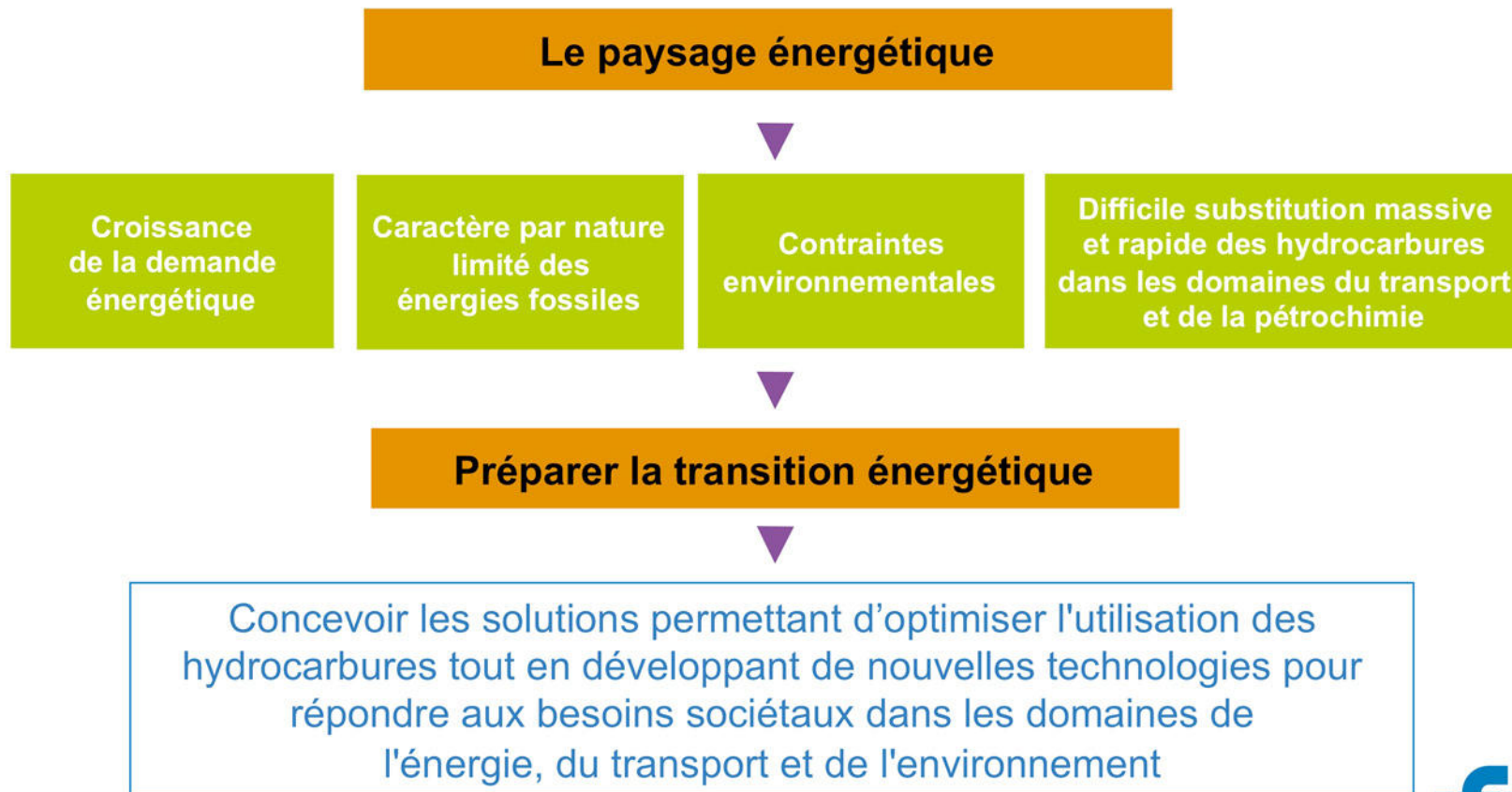
L'IFP apporte des solutions industrielles innovantes dans ses domaines d'activité :  
énergie, transport, environnement

Centre de recherche appliquée, il assure le transfert entre recherche fondamentale  
et développement industriel



# IFP

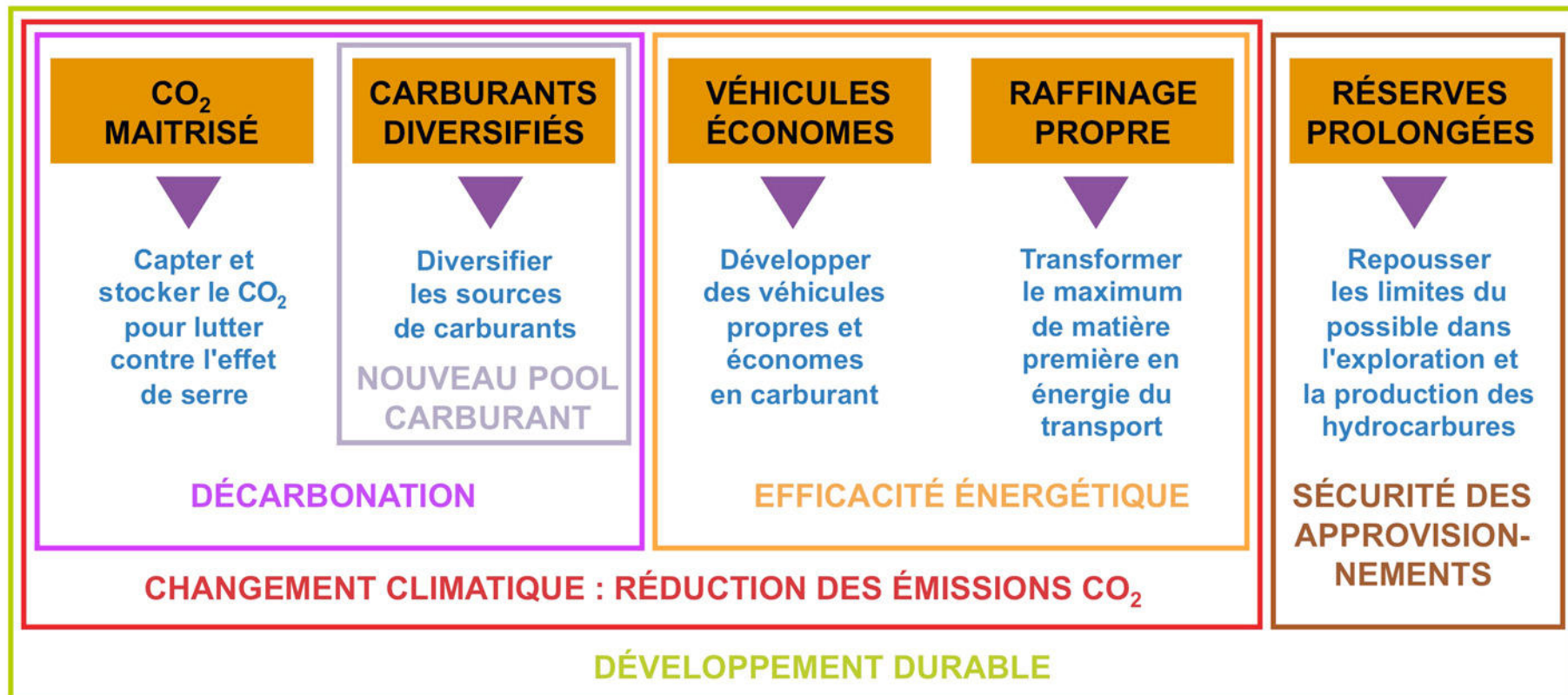
## Le positionnement stratégique de l'IFP





# IFP

## Cinq objectifs stratégiques complémentaires





# IFP

## Organisation

CONSEIL SCIENTIFIQUE

CONSEIL D'ADMINISTRATION

CONSEIL DE PERFECTIONNEMENT  
D'IFP SCHOOL

**DIRECTION GÉNÉRALE**  
Président : O. Appert  
DGA : P. Barthélemy,  
G. Picard

### Fonctions rattachées à la DG

Direction scientifique  
Déploiement stratégique  
Technologies de Développement durable  
Audit interne et Risques  
Mission Information  
Unité support ANR  
Établissements d'IFP-Lyon et de Pau

Géologie - Géochimie - Géophysique

Ingénierie de réservoir

Mécanique appliquée

Physique et Analyse

Catalyse et Séparation

Chimie et Physico-chimie appliquées

Conception Modélisation Procédés

Expérimentation Procédés

Techniques d'applications énergétiques

Technologie, Informatique et Mathématiques appliquées

Économie et Veille

### CENTRES DE RÉSULTATS

**EXPLORATION-PRODUCTION**  
Directeur : M. Boutéca

**MOTEURS-ÉNERGIE**  
Directeur : P. Pinchon

**RAFFINAGE-PÉTROCHIMIE**  
Directeur : J.-P. Burzynski

**FORMATION**  
Directeur : J.-L. Karnik

**DÉVELOPPEMENT INDUSTRIEL**  
Directeur : E. Lafargue

Ressources humaines

Communication

Qualité Sécurité Environnement

Finances

Juridique

Services informatiques  
et Télécommunications

Relations internationales

Relations PME-PMI

DIRECTIONS

R & D

DIRECTIONS FONCTIONNELLES





# IFP

## L'IFP en bref

- |  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"><li>➤ 1 710 personnes*, dont 1 166 chercheurs (ingénieurs et techniciens), basés à Rueil-Malmaison et à Lyon</li><li>➤ 200 thésards et post-doctorants</li><li>➤ Plus de 50 métiers représentés : du géologue au motoriste</li><li>➤ Un environnement technique (moyens d'essais, équipements) de très haut niveau</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>➤ Statut : établissement public à caractère industriel et commercial (EPIC)</li><li>➤ Financement : budget de l'État et ressources propres provenant de partenaires privés français et étrangers</li><li>➤ Budget 2008 : 286,2 M€ dont 238,2 M€ pour la R&amp;D</li></ul> |
|  | <ul style="list-style-type: none"><li>➤ 13 518 brevets vivants</li><li>➤ 226 articles publiés dans les revues scientifiques internationales</li></ul>   |

\* effectif moyen équivalent temps plein

# Départements Mathématiques Appliquées et Informatique Scientifique



## ■ Mathématiques Appliquées

- 22 ingénieurs docteurs
- 10 thésards ou postdoctorants

- Optimisation numérique
- Statistique
- Discretisation des EDPs
- Solveurs non linéaires et linéaires

## ■ Informatique scientifique

- 25 ingénieurs
- 6 thésards ou postdoctorants

- Calcul Haute Performance
- Géométrie maillage
- Conception logicielle
- Gestion de projets logiciels



# Plan

- **Quelques applications dans le domaine des géosciences à l'IFP**
  - **Exploration pétrolière**
    - Modèles stratigraphiques
    - Modèles de bassin
  - Modélisation des réservoirs pétroliers
  - Modélisation du stockage géologique du CO2
  
- **Exemples d'apport des mathématiques**
  
- **Compétences recherchées**

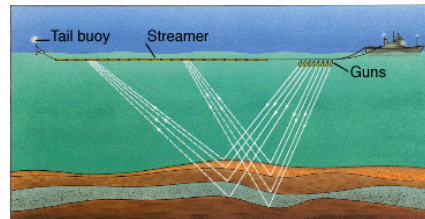
# Exploration

## • Acquisition de données

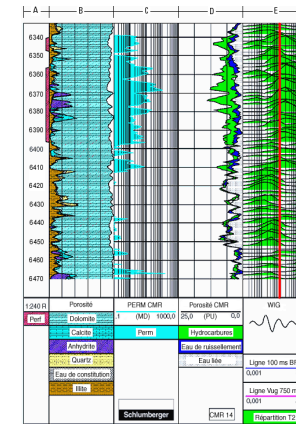
### Affleurements



### Sismique



### Forage de puits



## • Coûts de l'exploration

- sismique : 10 à 30 M\$

- 1 forage terrestre à 3000m : 2 à 10 M\$, en mer : 15 à 30 M\$, en mer profonde (>500m) : 100M\$

- en moyenne, 1 forage sur 5 trouve du pétrole dans les zones peu connues, 1 sur 3 sinon

# Exploration



## Besoin de réduire les risques par la modélisation:

- Intégrer les données dans un modèle 4D quantitatif du "système pétrolier" durant son histoire géologique

- Histoire sédimentologique du bassin
- Géométrie et nature des roches
- Identification des pièges potentiels

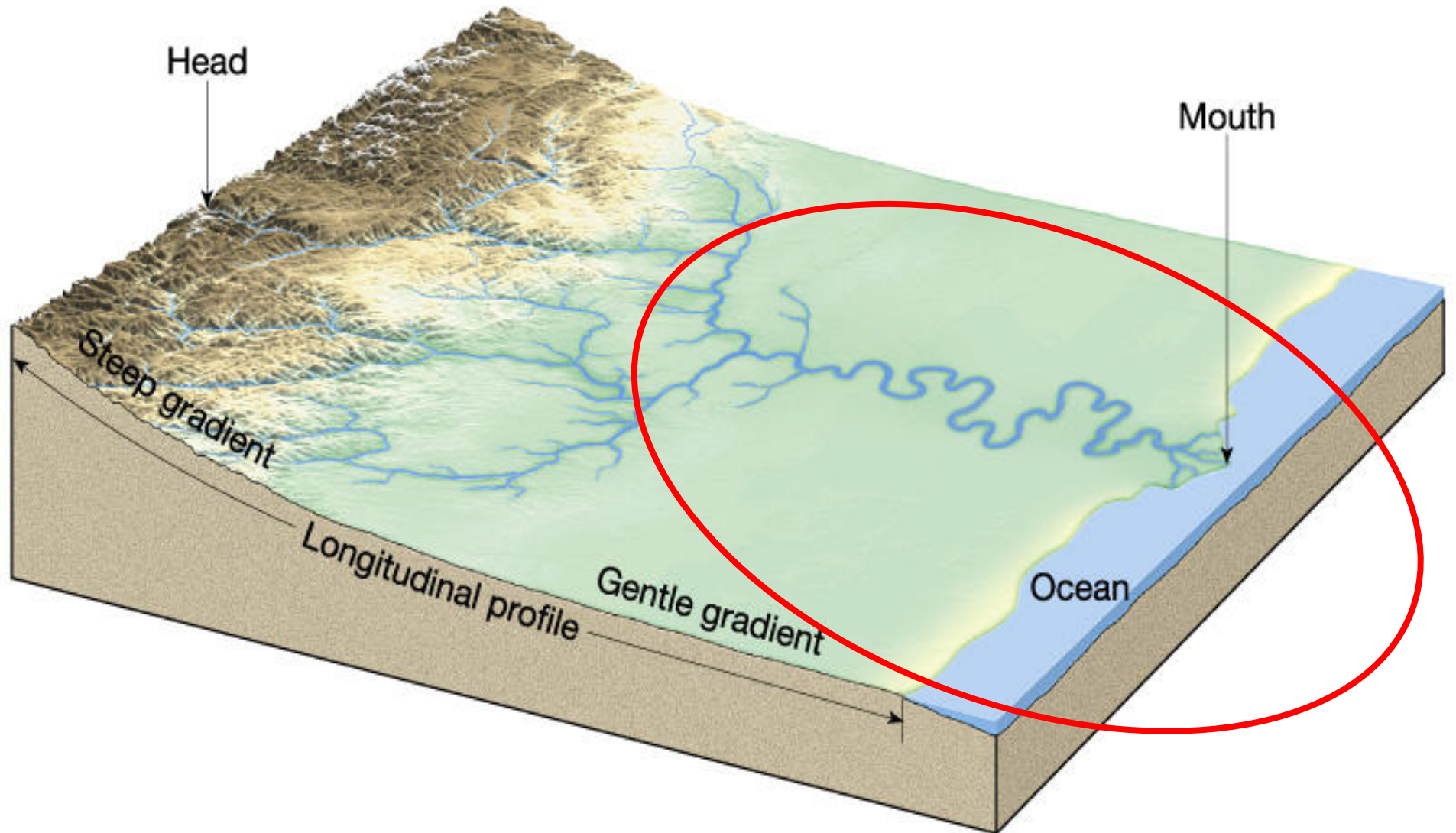
Modélisation stratigraphique:  
modélisation du remplissage du  
bassin par les sédiments

- Est ce qu 'un piège contient des hydrocarbures ?
- Si oui, sont ils en quantité et de qualité suffisante ?
- Comment forer les puits et quels sont les risques de rencontrer des excès de pression ?

Modélisation de bassin:  
migration des fluides

Rq: en amont il faut déterminer l'histoire cinématique du bassin

*Systeme étudié:  
bassin sédimentaire  
dépôts alluviaux et marins*

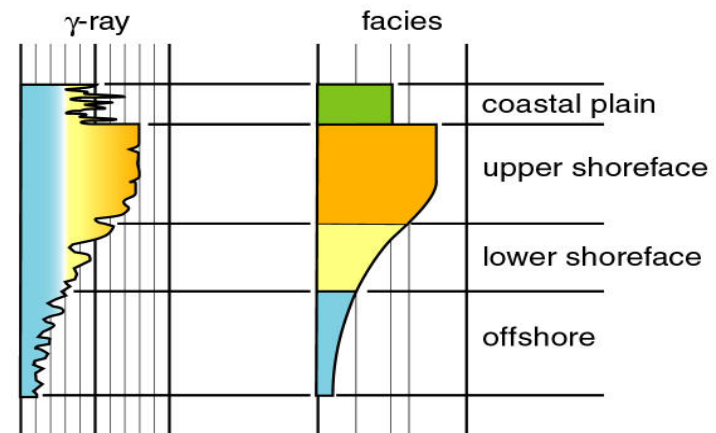
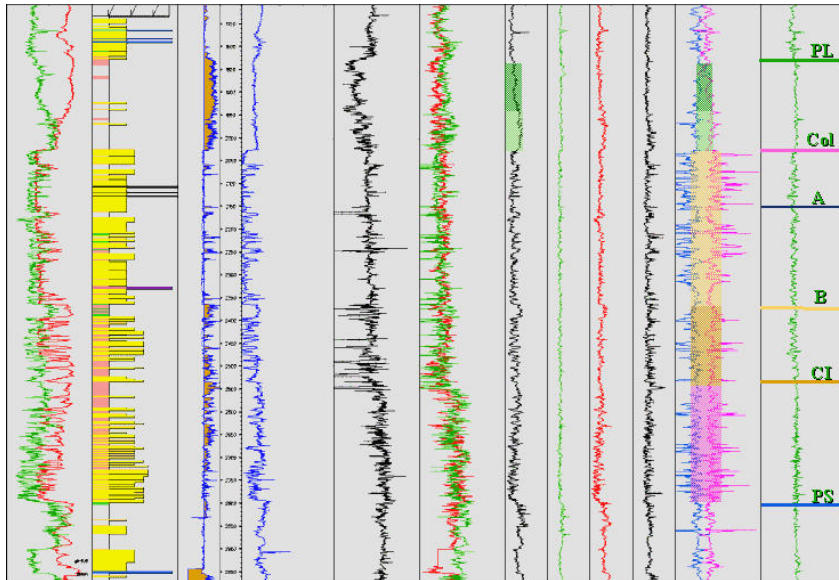


# Données de puits

## Enregistrements diagraphiques aux Puits

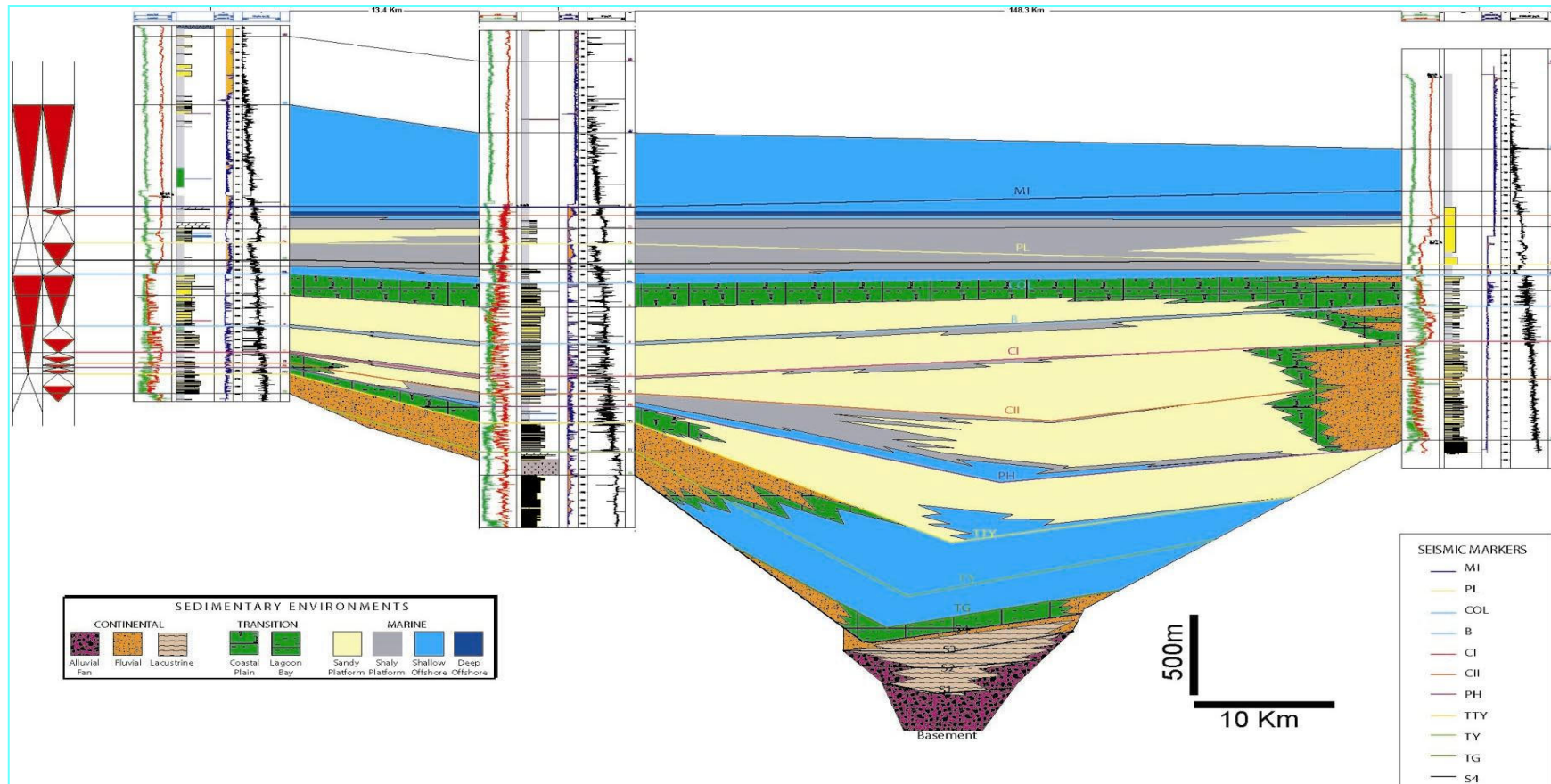
- Mesures Electriques
- Radioactivités
- Vitesse du Son, ...

## Interprétation des diagraphies en faciès

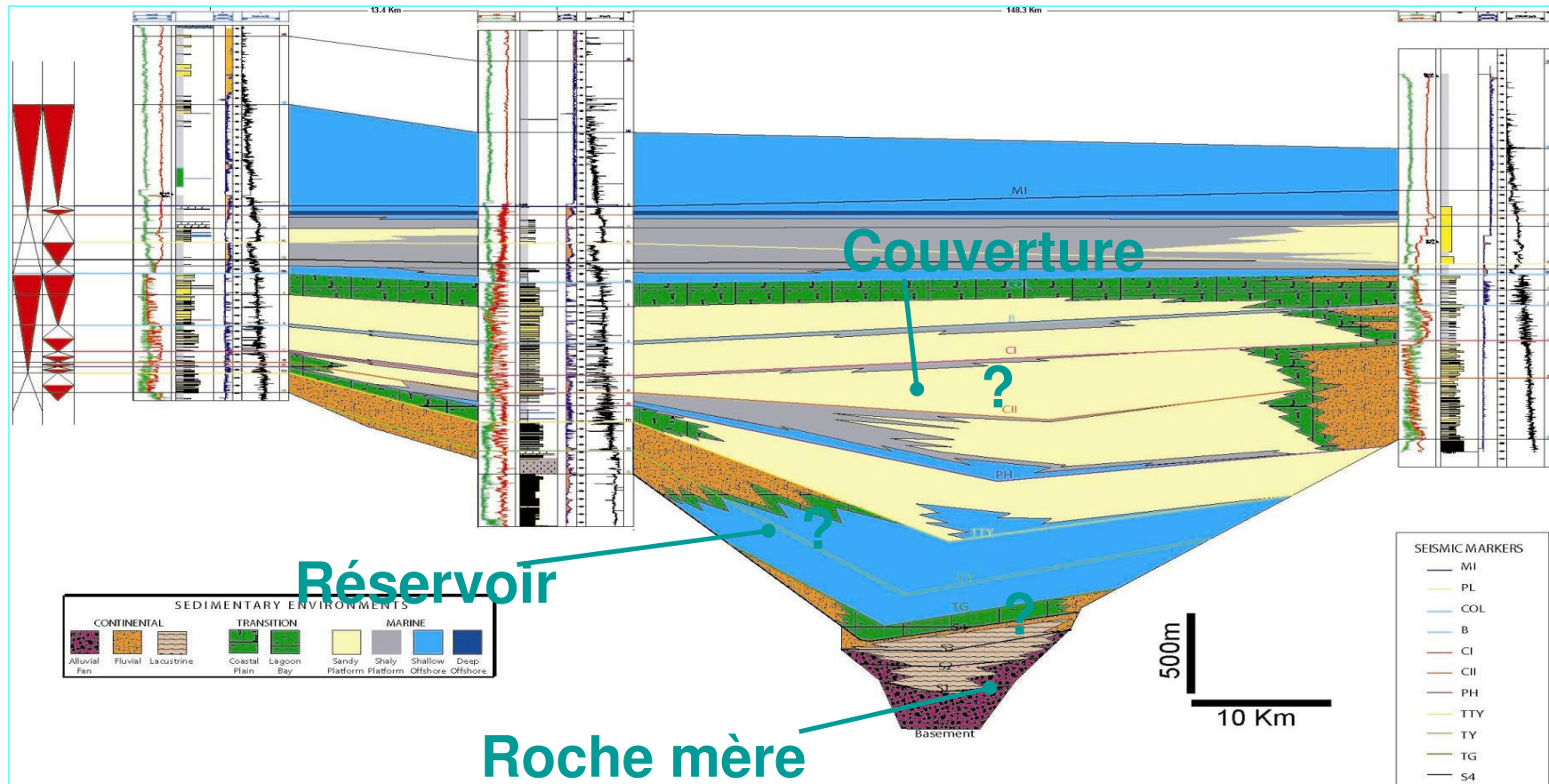


# Interprétation des données de puits

- Définition de séquences et interpolations entre les puits



# Objectifs en exploration pétrolière

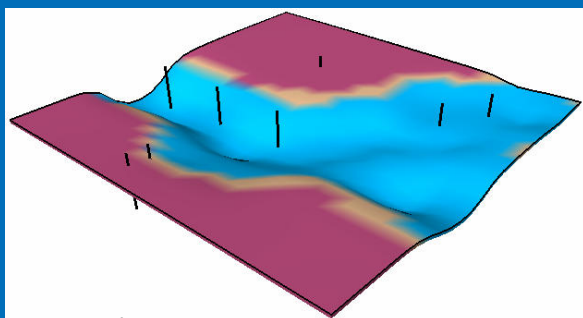


# De l'interprétation à la Modélisation stratigraphique

## ■ Objectifs

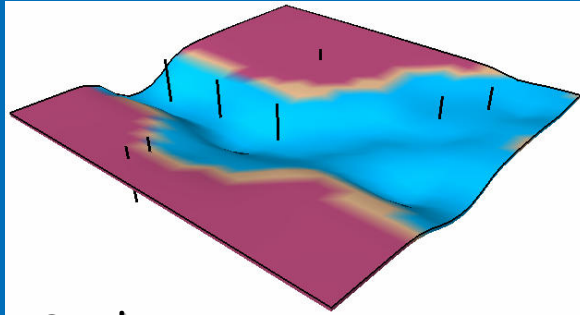
- *Modèle quantitatif, dynamique*
- *Lois physiques phénoménologiques*
  - *Interpolation physique des données*
- *Mais ...*
  - *Nécessite une boucle d'inversion pour intégrer les données*

# Principes de la modélisation stratigraphique



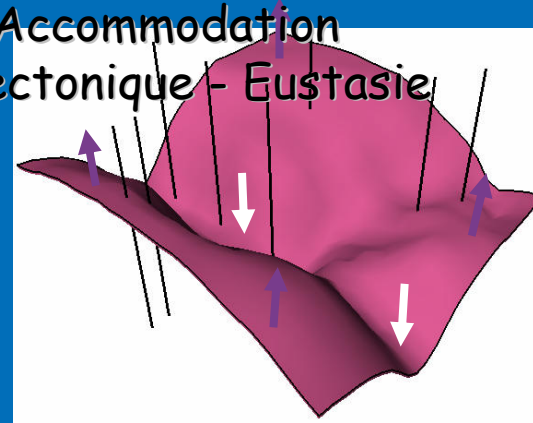
Socle

# Principes de la modélisation stratigraphique

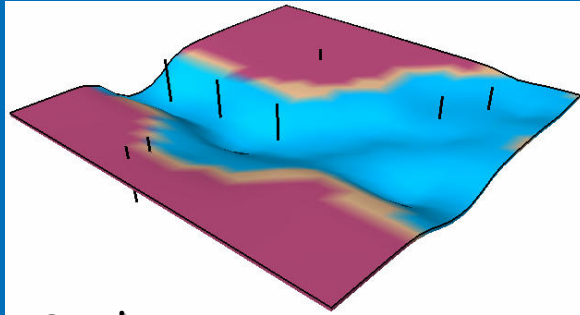


Socle

(1) Accommodation  
= Tectonique - Eustasie

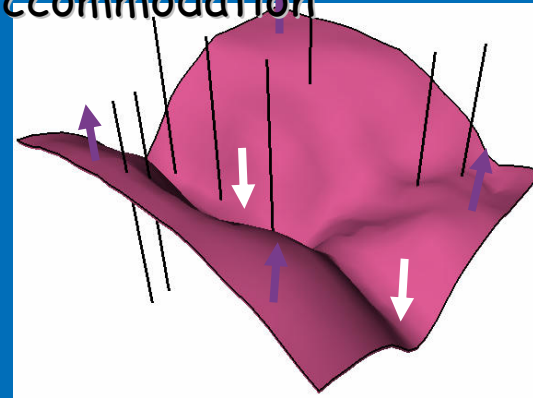


# Principes de la modélisation stratigraphique

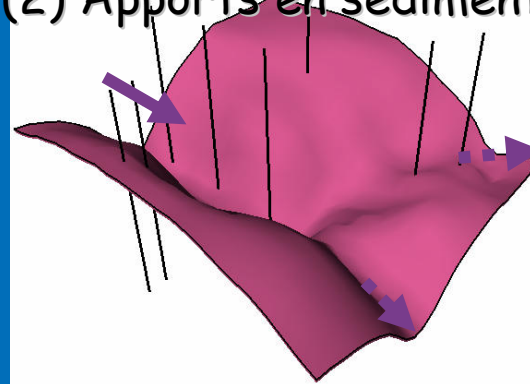


Socle

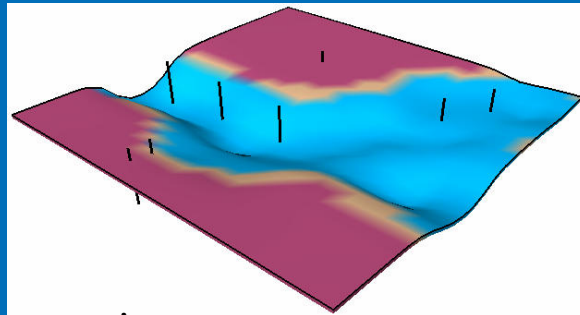
## (1) Accommodation



## (2) Apports en sédiments

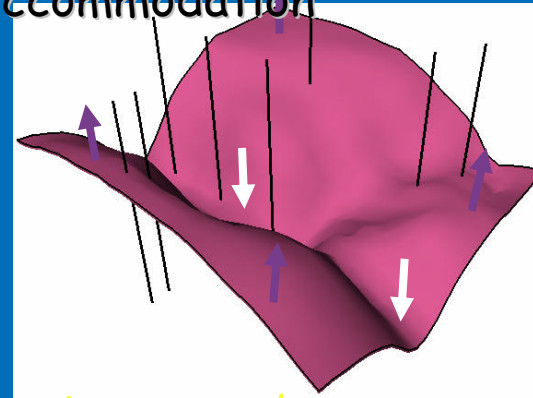


# Principes de la modélisation stratigraphique

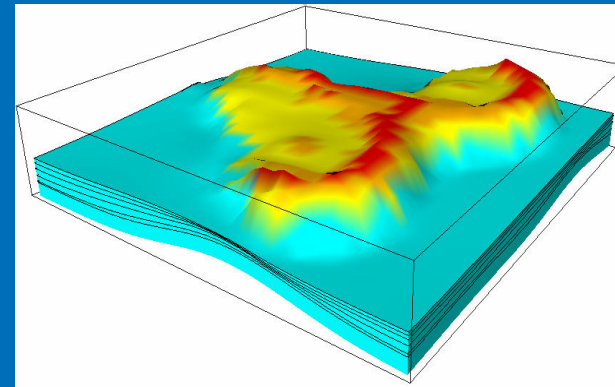


Socle

## (1) Accommodation

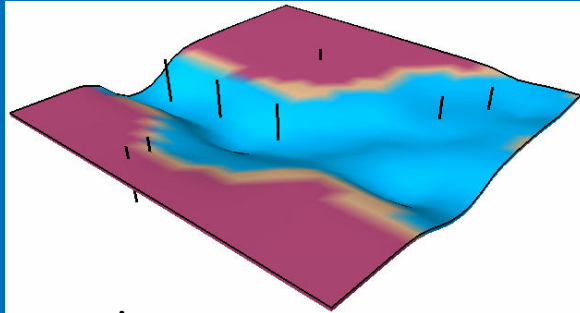


Ex: croissance de coraux



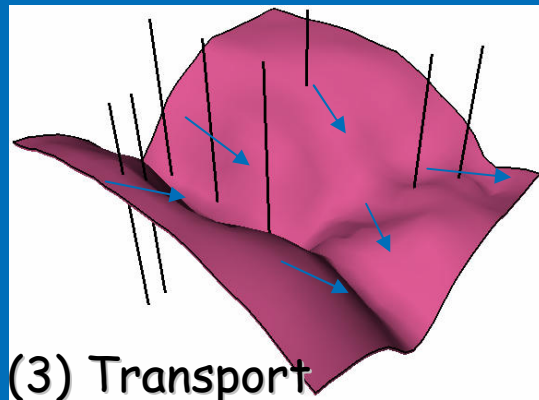
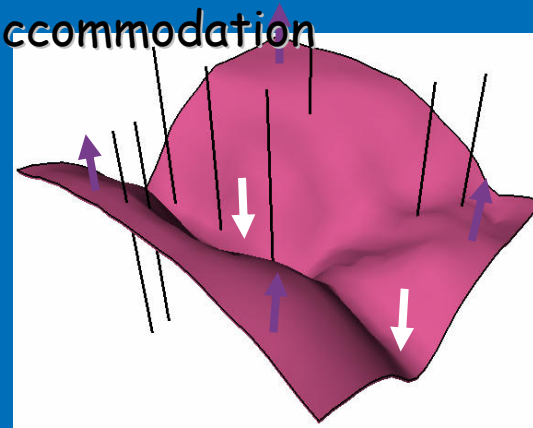
-> Bathymétrie, vagues, écosystème, ...

# Principes de la modélisation stratigraphique



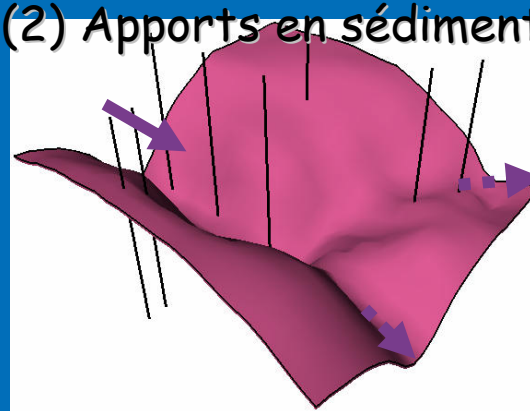
Socle

(1) Accommodation

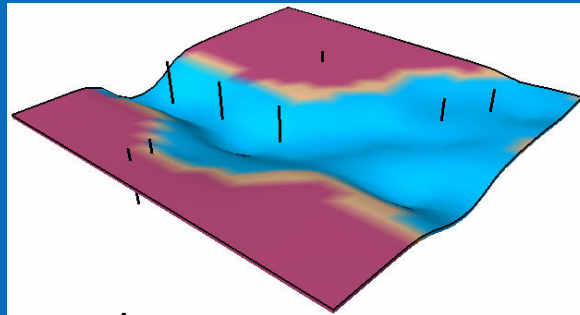


(3) Transport

(2) Apports en sédiments

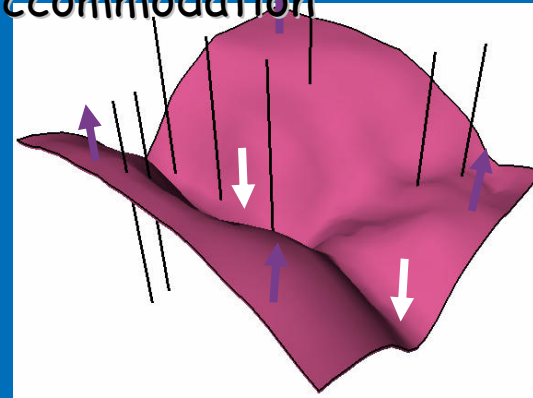


# Principes de la modélisation stratigraphique

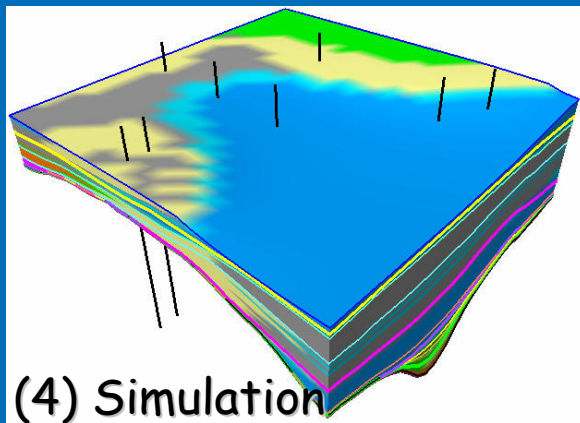
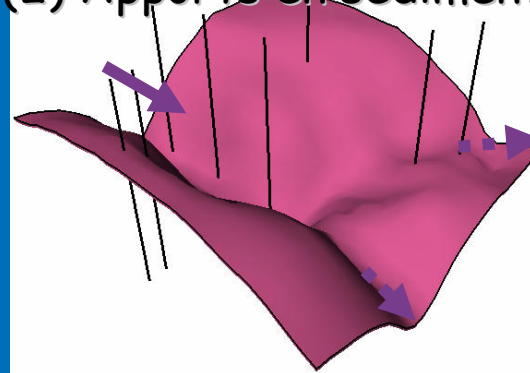


Socle

(1) Accommodation

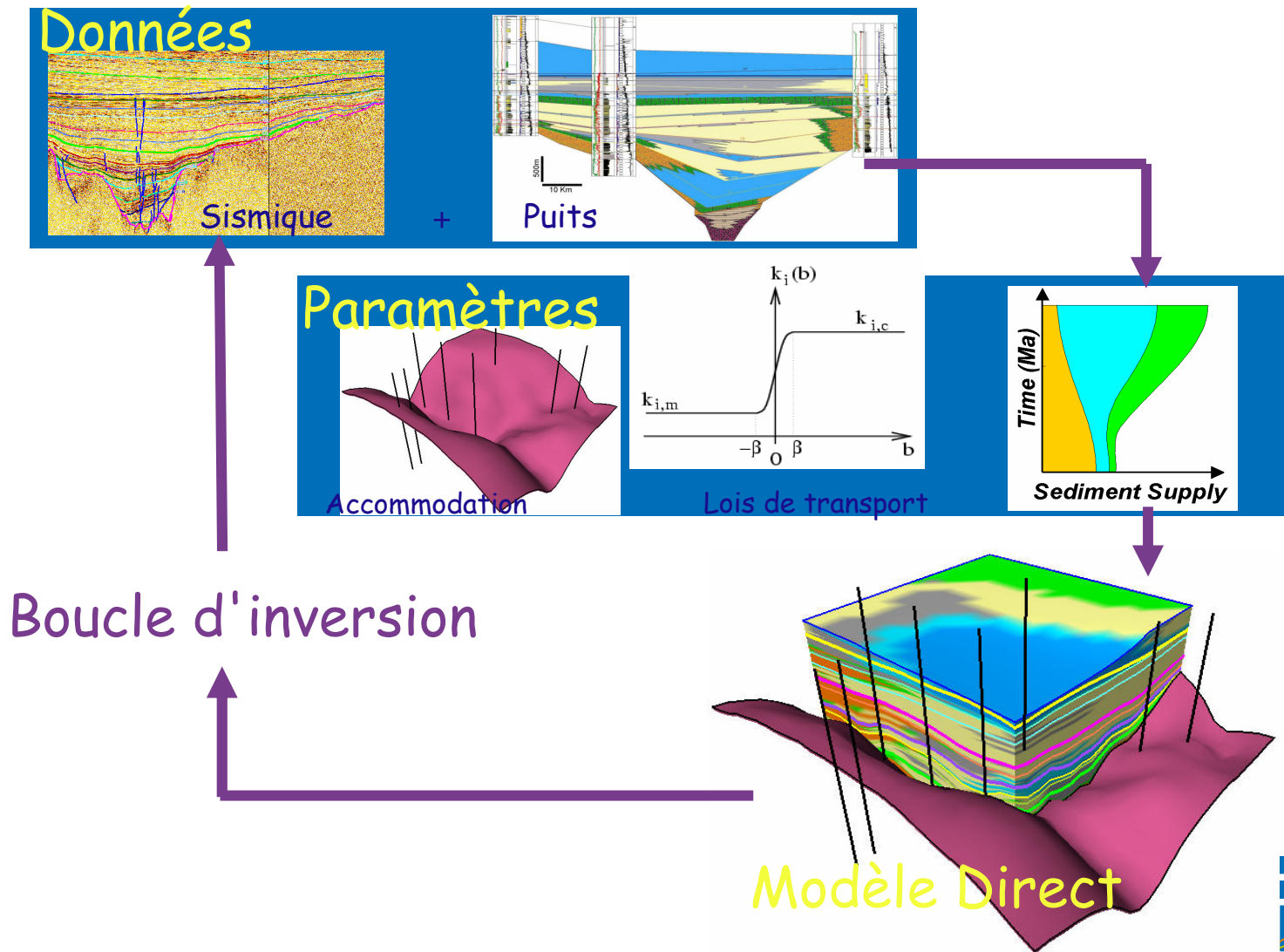


(2) Apports en sédiments

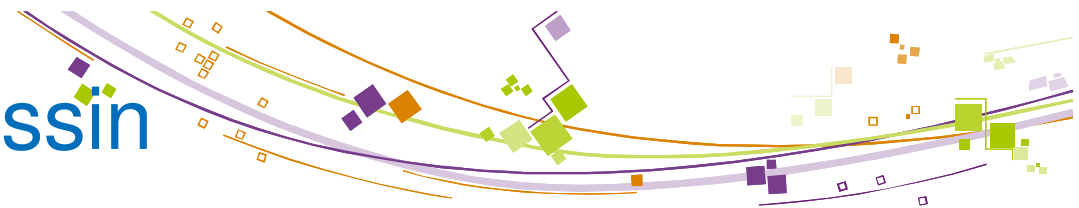


(4) Simulation

# Intégration des données



# Modélisation de bassin



## Données :

- Evolution géométrique des couches (cinématique)
- Propriétés des roches et des fluides
  - Porosité, Perméabilité
  - Viscosités,  $K_r$ ,  $P_c$
  - Chimie, Thermodynamique, Thermique, Mécanique, ...

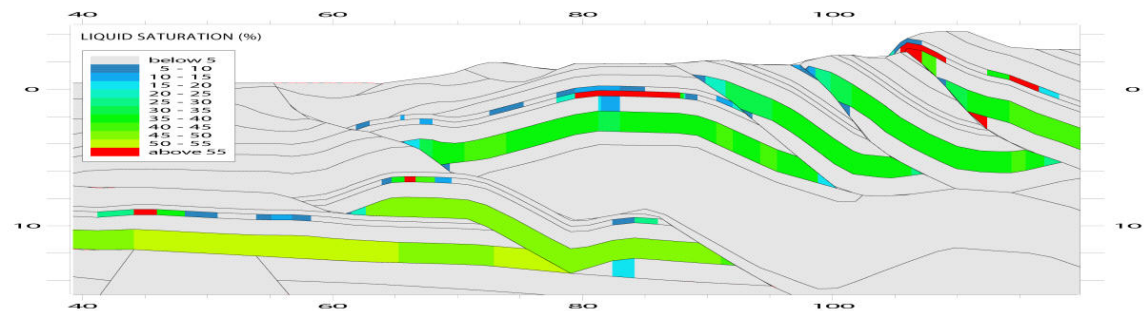
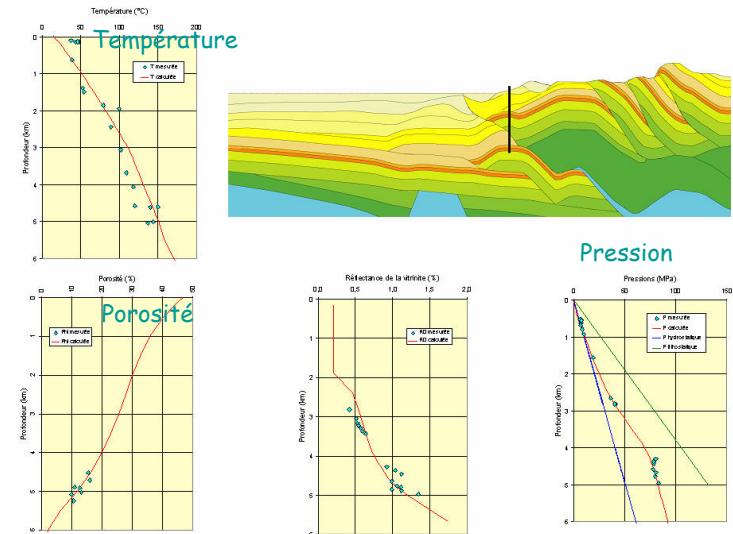
## Résultats :

- L'existence, les quantités et la qualité des HC
- Les excès de pression,...

## Méthode :

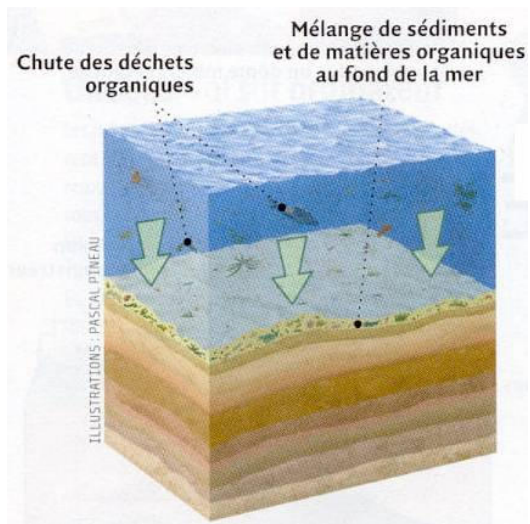
- Retracer la formation des hydrocarbures, leur migration et leur accumulation dans les pièges
- Phénomènes principaux

- Transferts thermiques
- Réactions chimiques
- Écoulements polyphasiques
- Compaction du milieu poreux

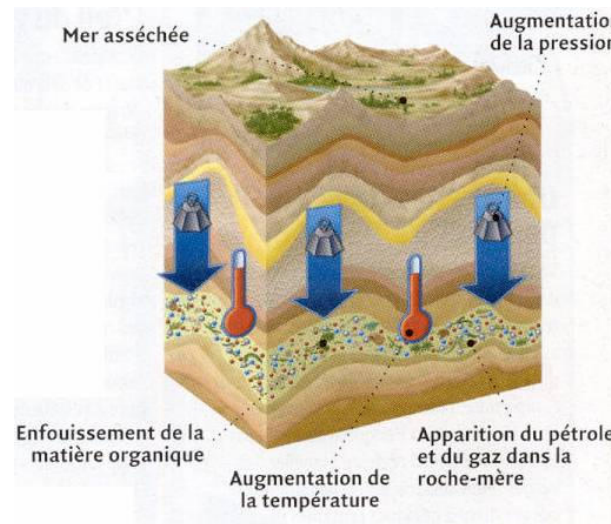


# La modélisation de bassin

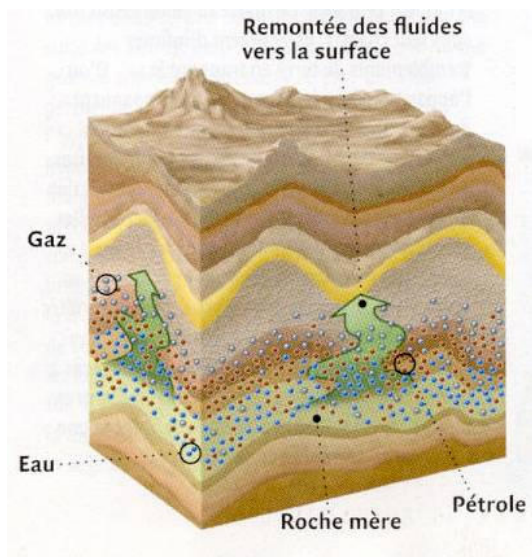
## Dépôt des sédiments



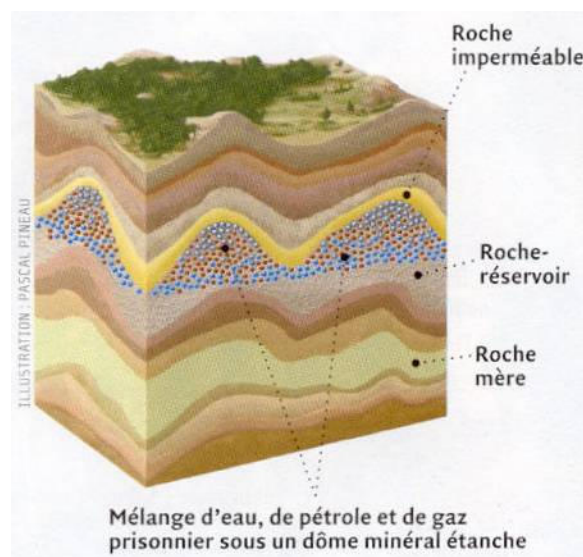
## Enfouissement - Compaction - élévation de température



## Craquage - expulsion - migration



## Piégeage dans des réservoirs



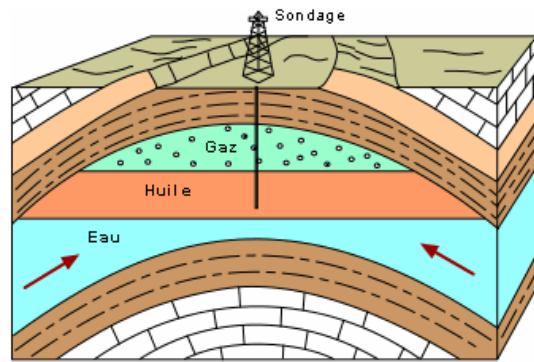
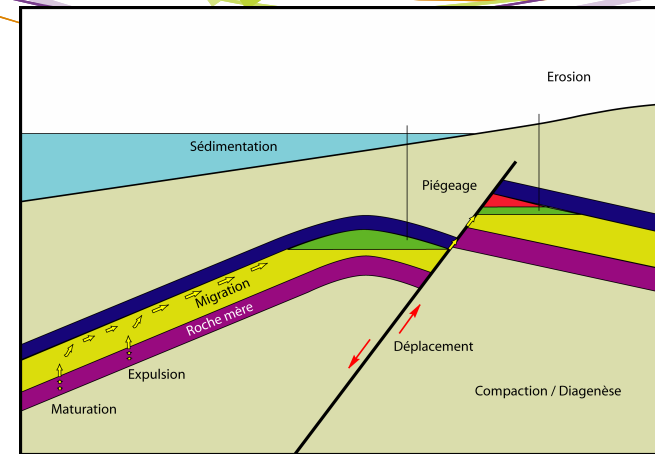
# Formation d'un gisement

- **Migration des hydrocarbures**

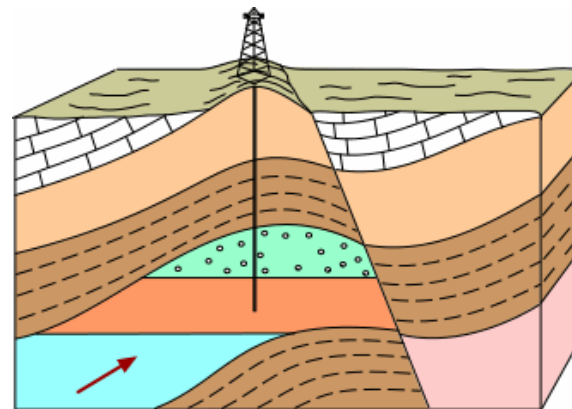
- compaction, gravité, forces capillaires
- expulsion des roches mères, migration dans les drains

- **Rencontre d'une barrière imperméable : Piège**

ex: « voûte » (anticlinal) + couverture imperméable



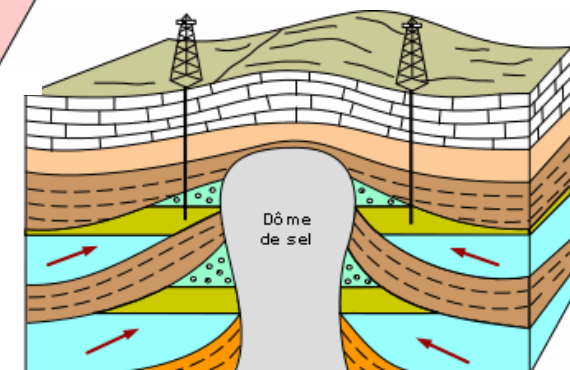
Piège structural: anticlinal



Piège structural: faille

- **Accumulation dans un réservoir**

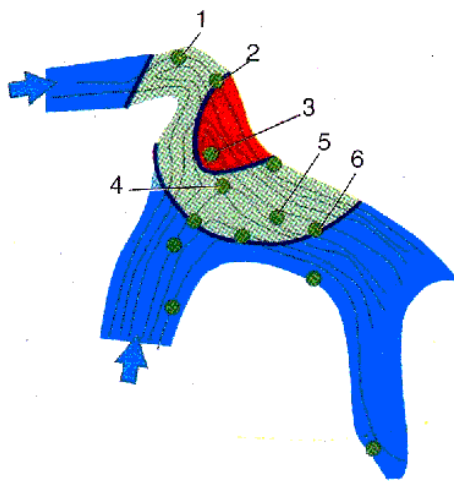
- ségrégation gaz, huile, eau
- Sinon : fuite jusqu'à la surface



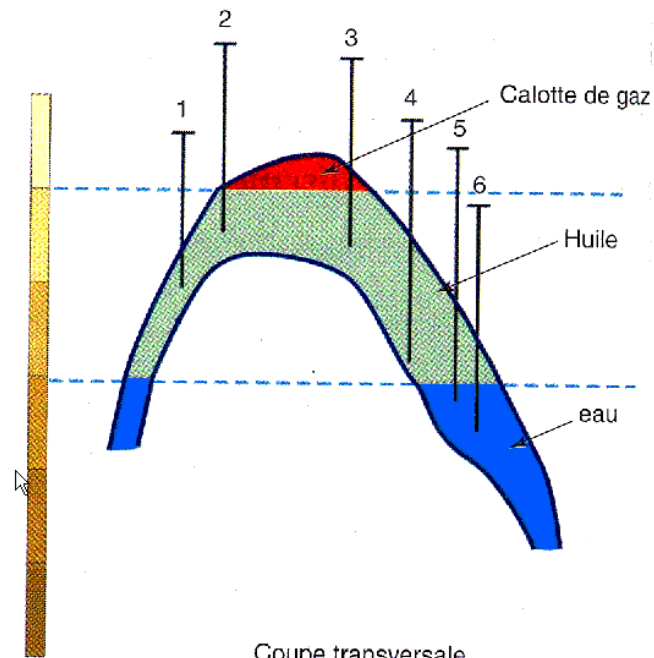
Pièges mixtes associés à un diapir

# Gisement d'hydrocarbures

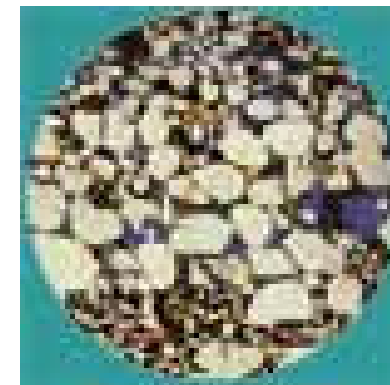
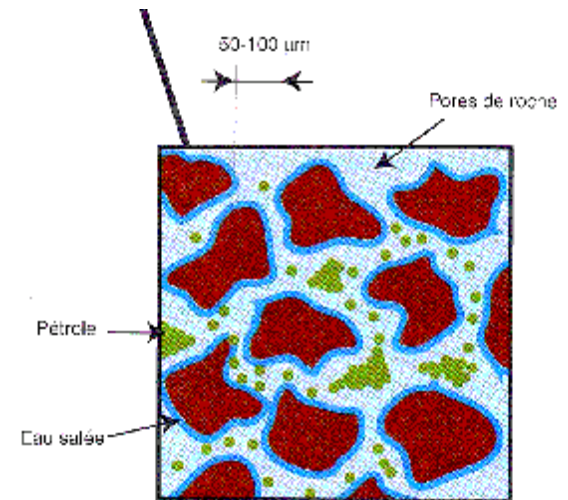
- Superficie : qqes km<sup>2</sup> /dizaines (voir centaines) de km<sup>2</sup>
- Epaisseur : qqes mètres à qqes centaines de mètres d'épaisseur
- Profondeur : de qqes mètres à plus de 6000 mètres



Gisement vu du dessus  
et implantation des puits



Coupe transversale





# Production d'un réservoir pétrolier

- **Prédire pour optimiser le schéma de production**
  - Où placer les puits
  - Quels procédés de récupération
- **Chaîne de modélisation**
  - **Modèles statique**
    - structural = surfacique
    - géologique = remplissage en propriétés des roches
  - **Modèle dynamique: simulateur de réservoirs**
    - calcul des écoulements polyphasiques en milieux poreux
  - Assimilation de données
  - Incertitudes

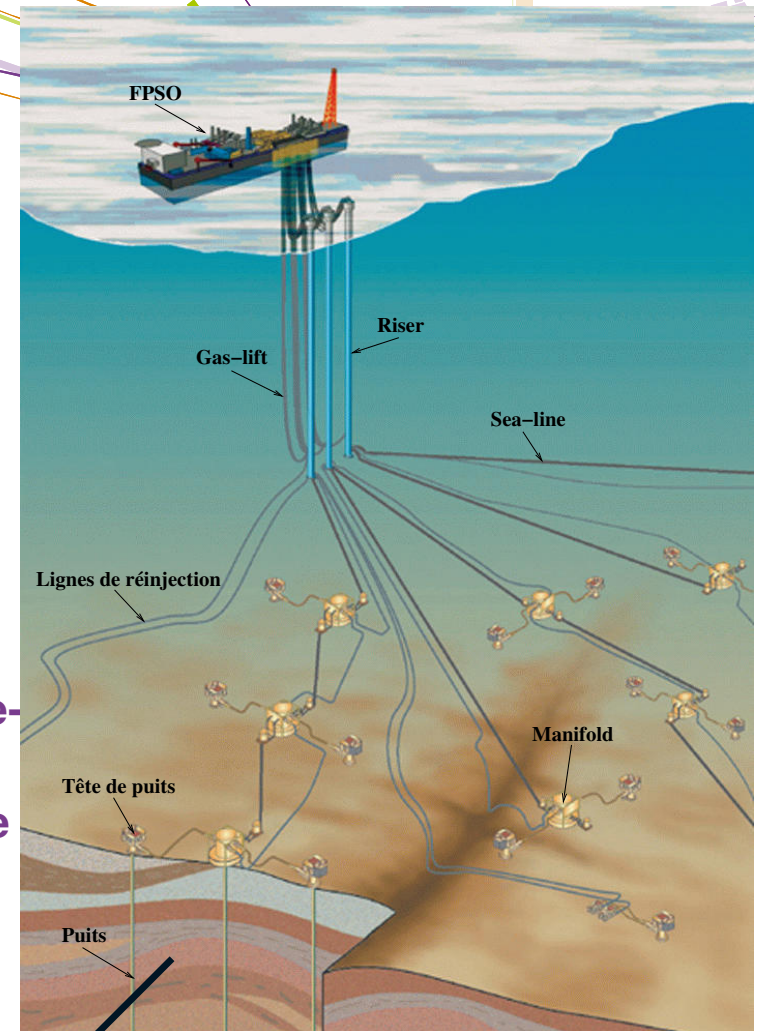
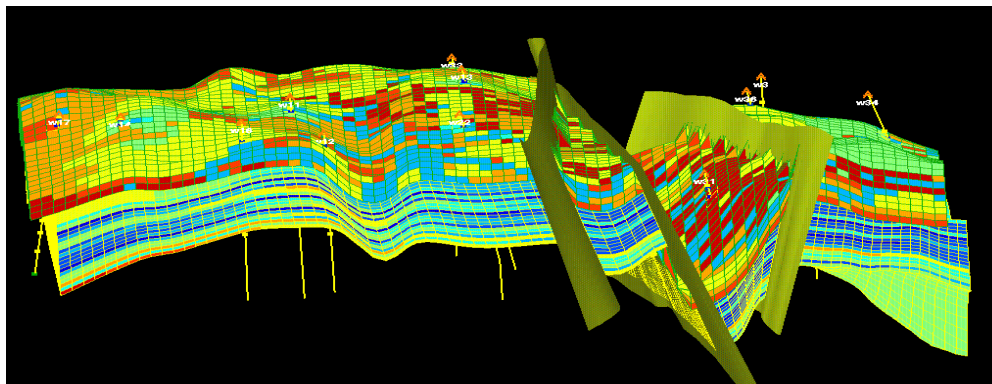
# Simulation de réservoir

## Objectifs

- Assimilation des données dynamiques de production
- Prédiction de la production
- Optimisation des procédés d'exploitation
  - Emplacement des puits
  - Injection d'eau, de CO<sub>2</sub>, ...
  - Procédés thermiques, chimiques, ...

## Méthodologie

- Simuler les écoulements triphasiques (eau-huile-gaz) compositionnels
- Couplages avec les puits et le réseau de surface

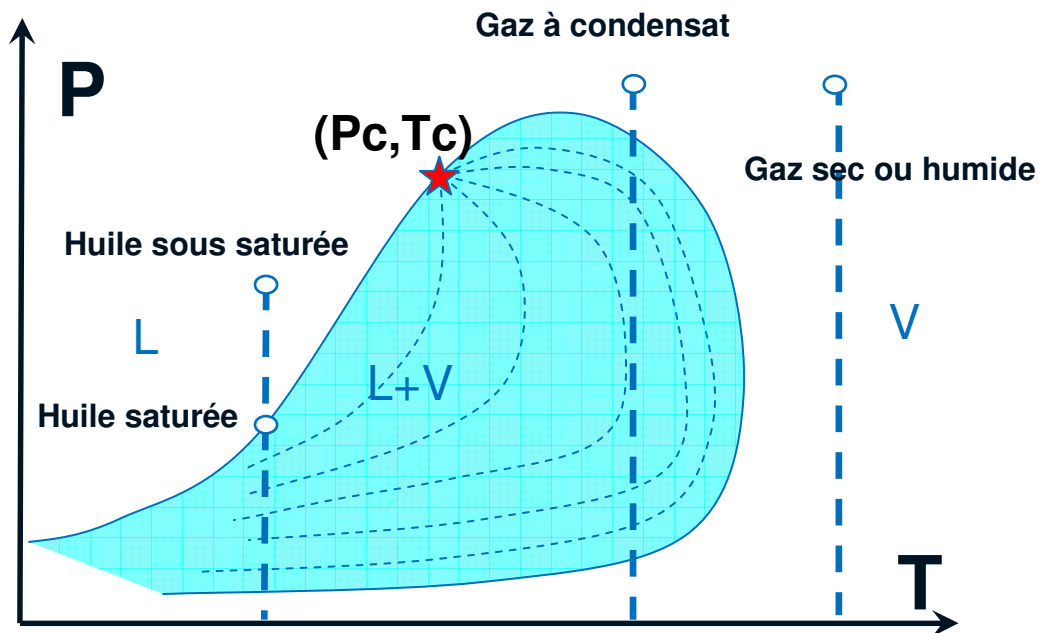


Réservoir

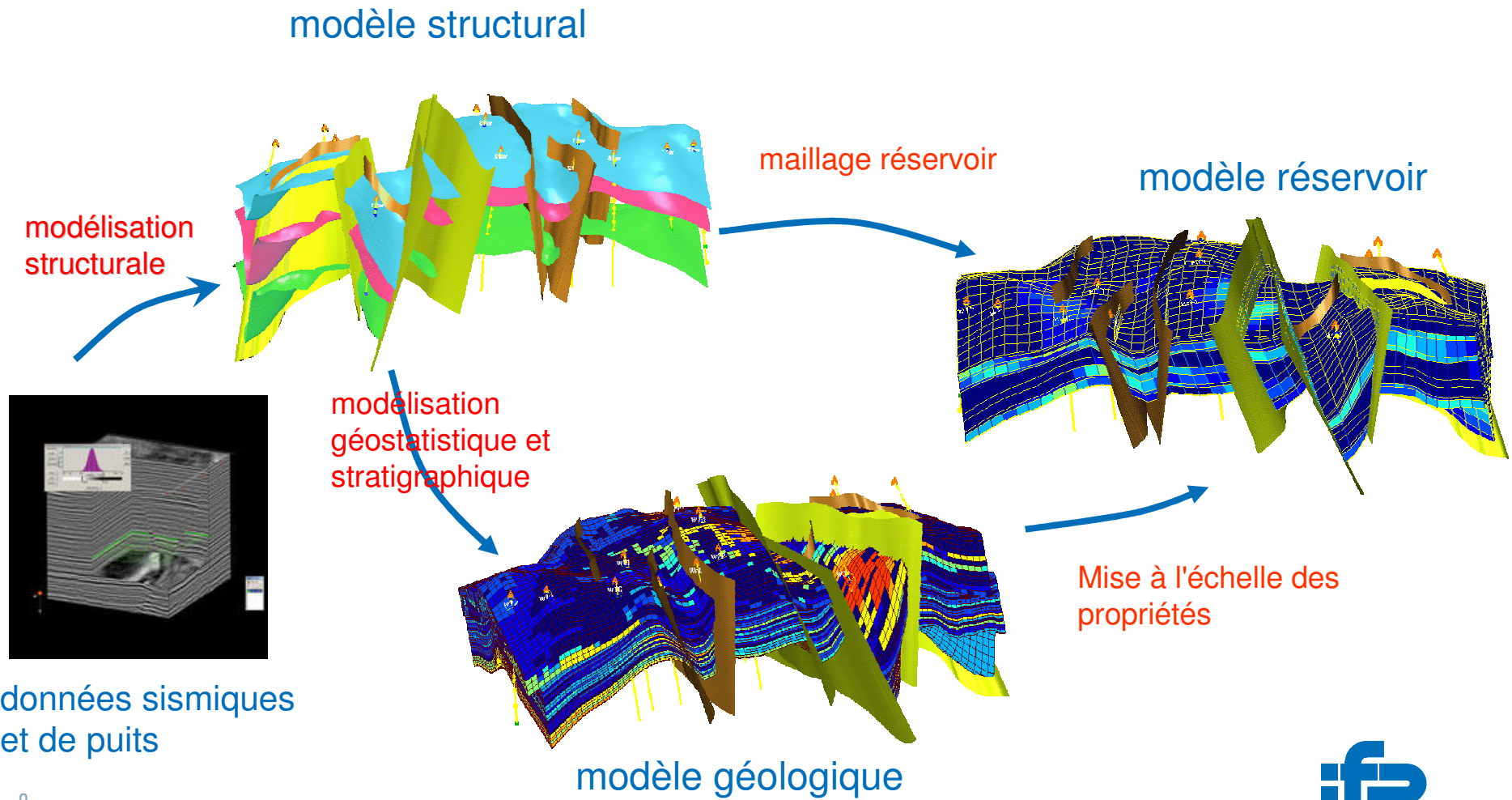
# Modèles compositionnels

- Description plus ou moins fine des fluides en composants selon les objectifs de la simulation
  - H<sub>2</sub>O, composants HC, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, sels
- Équations d'état

## Enveloppe de phase en diphasique huile-gaz



# Construction du modèle géologique réservoir



données sismiques  
et de puits

# Simulation du stockage géologique du CO<sub>2</sub>

## ■ Objectifs

- Optimisation de l'injection du CO<sub>2</sub>
- Prédiction et réduction des risques de fuite du CO<sub>2</sub>

## ■ Méthodologie

- Simuler les écoulements compositionnels
- Interactions eau – roche
- Géomécanique
- Fuites: puits, failles, couvertures

## Stockage du CO<sub>2</sub> dans les aquifères salins

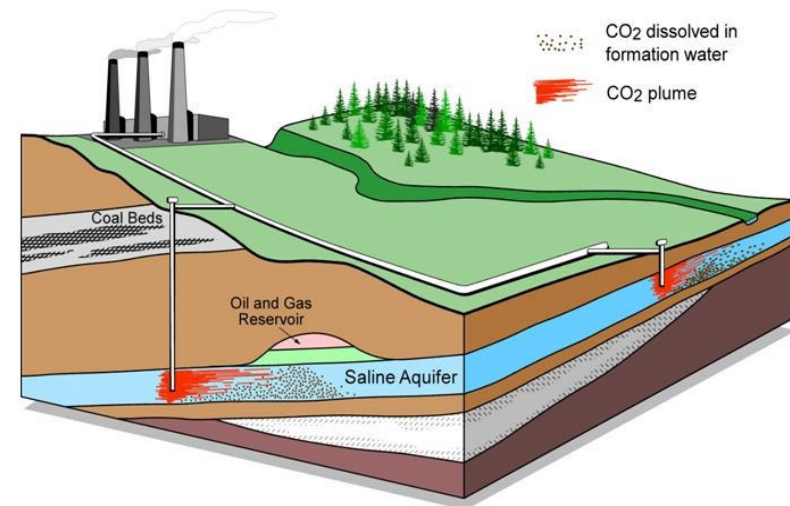
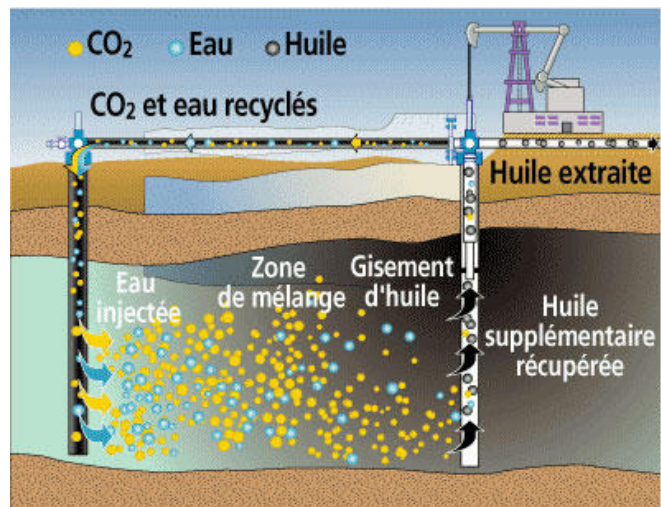
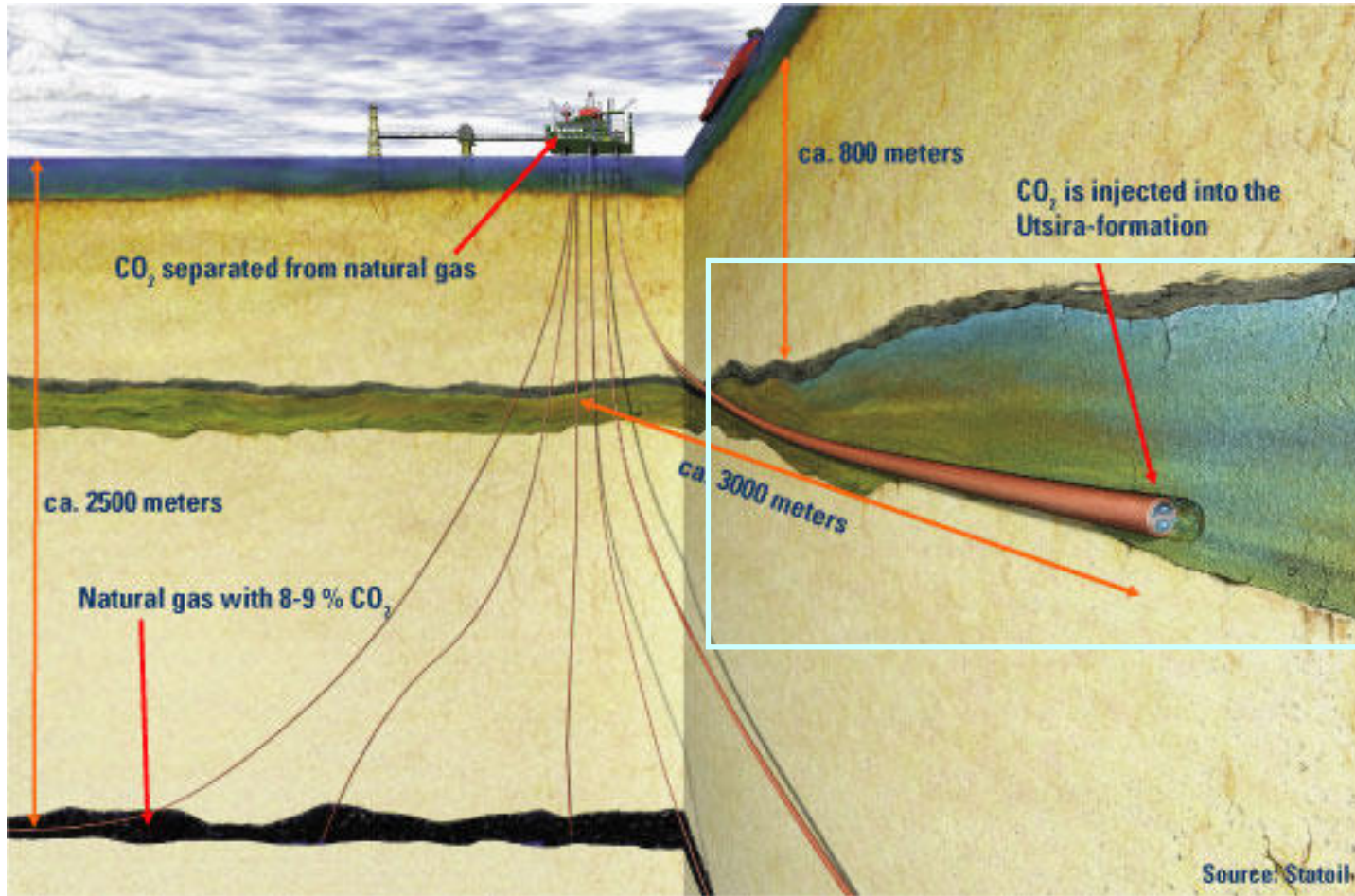


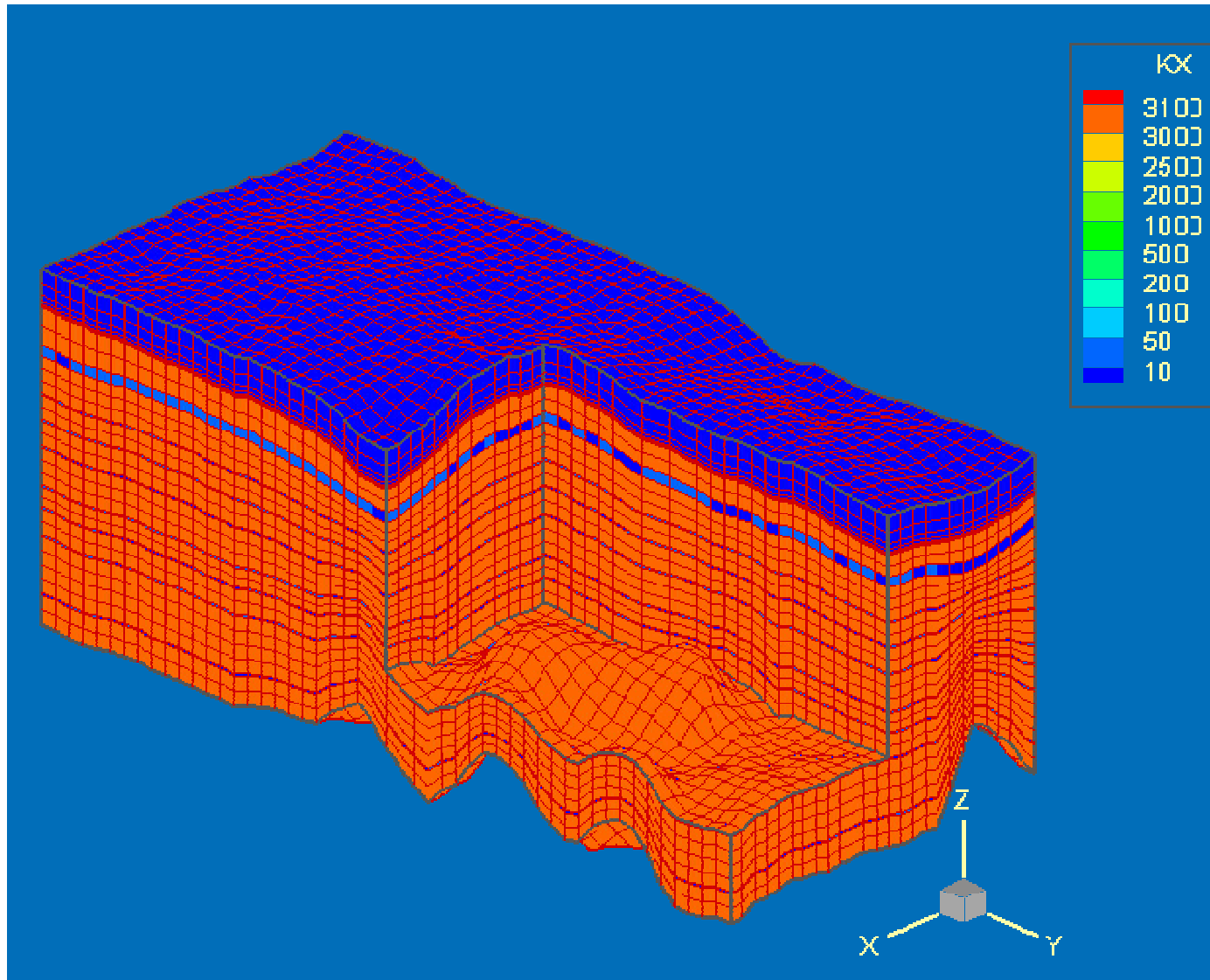
Figure 1.

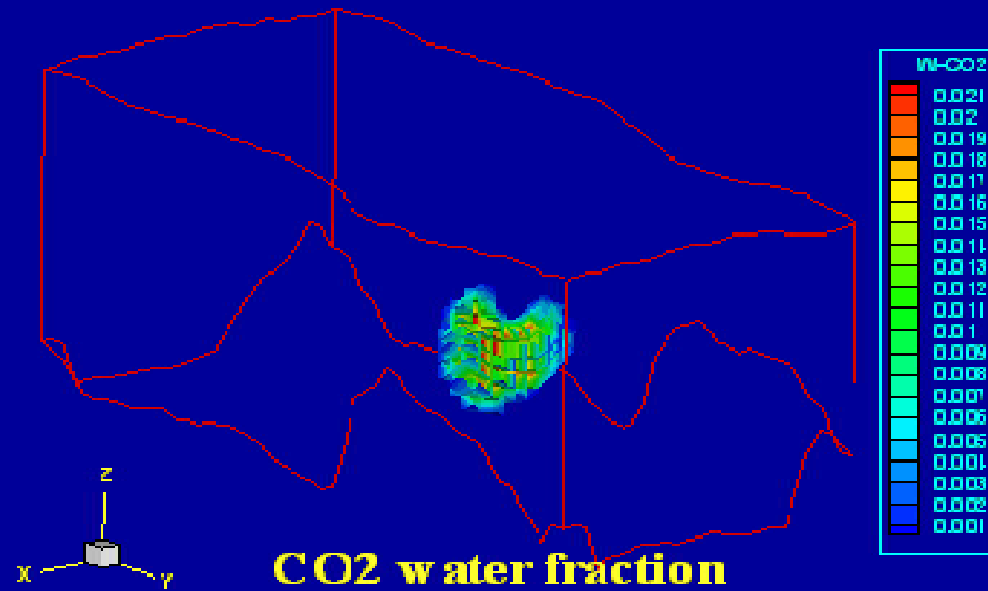


## Production d'huile par injection de CO<sub>2</sub>

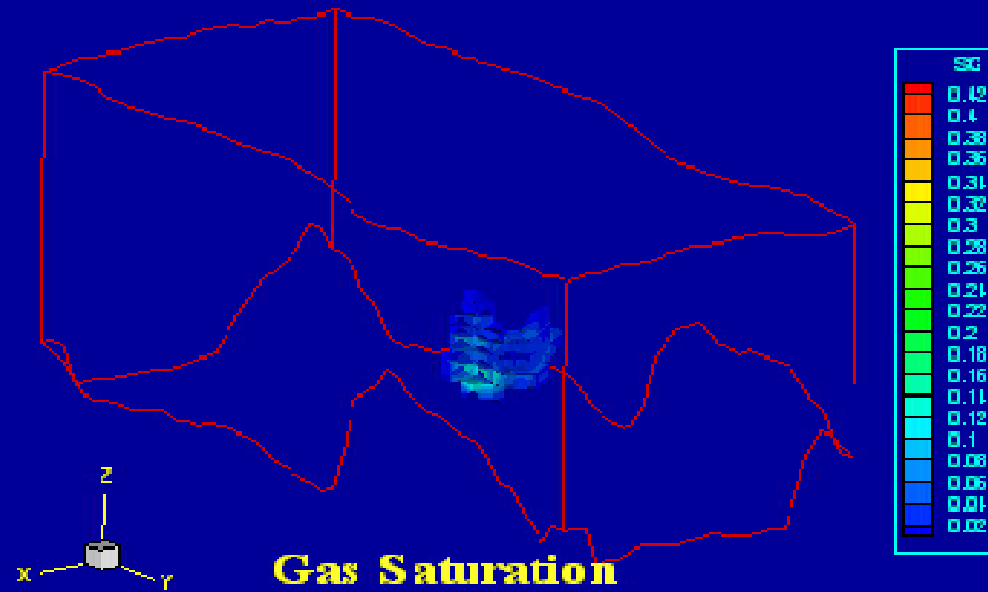


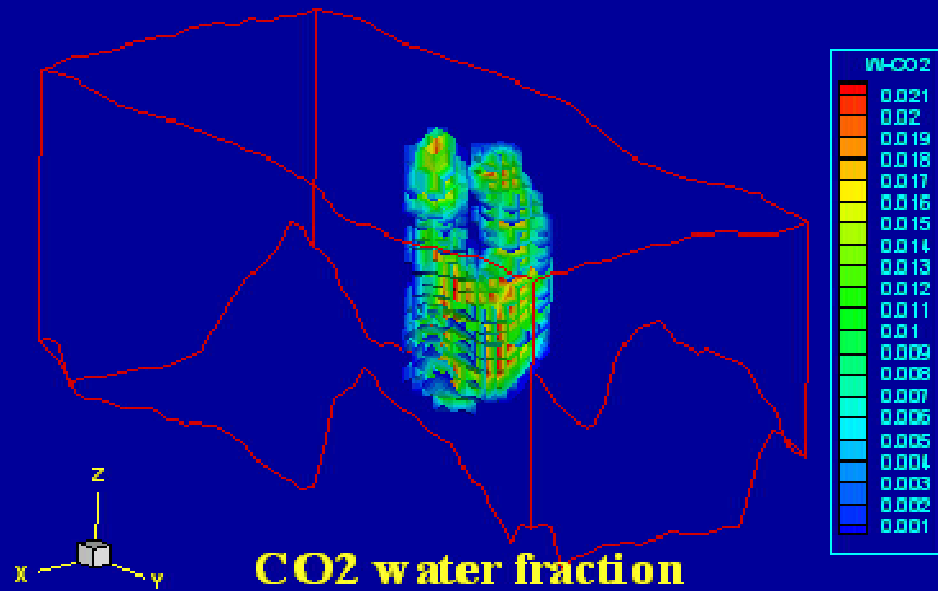




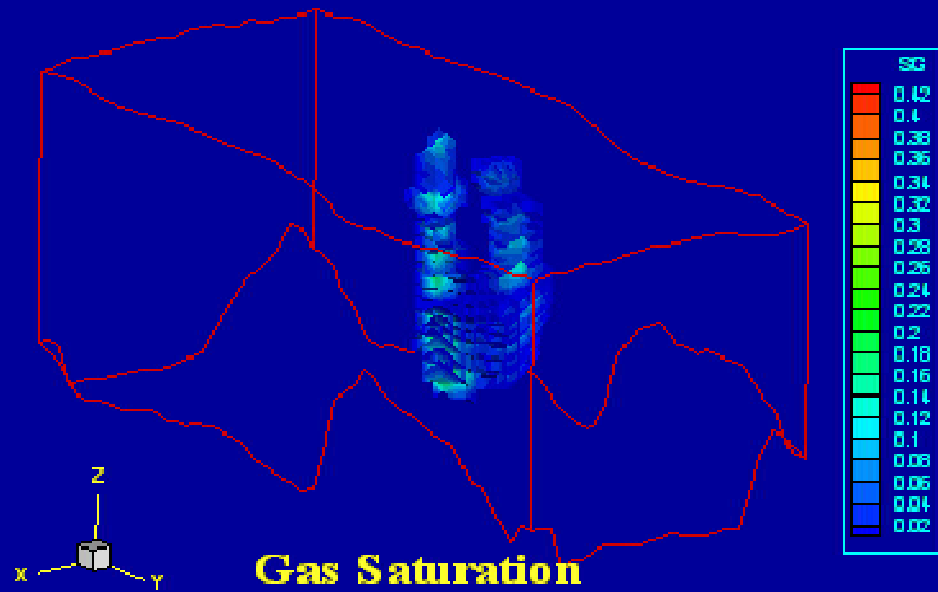


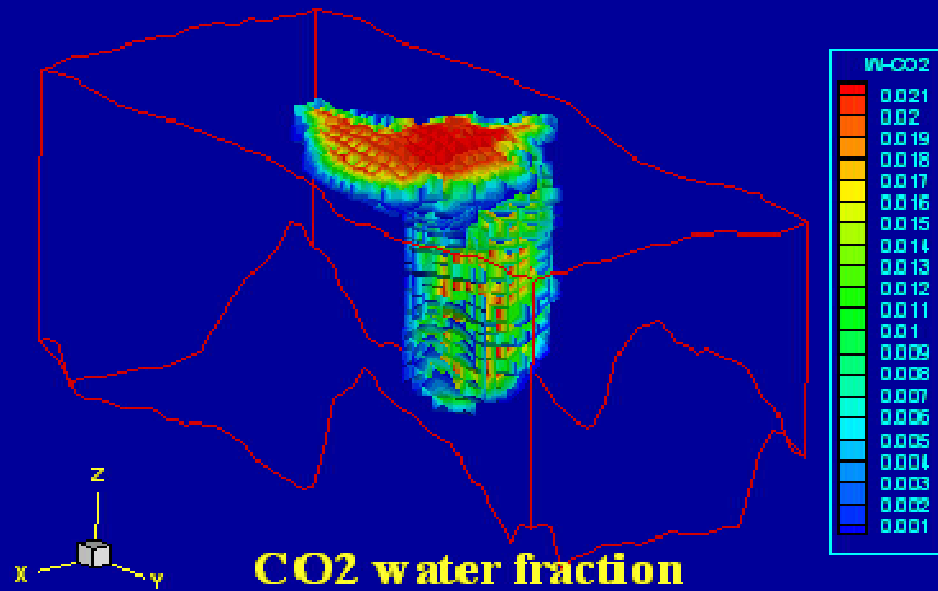
**1 year**



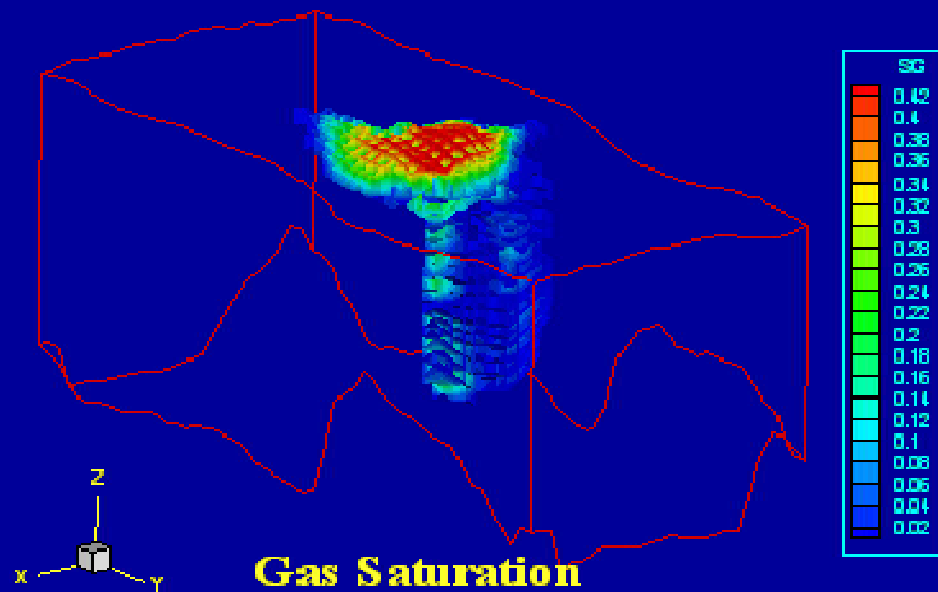


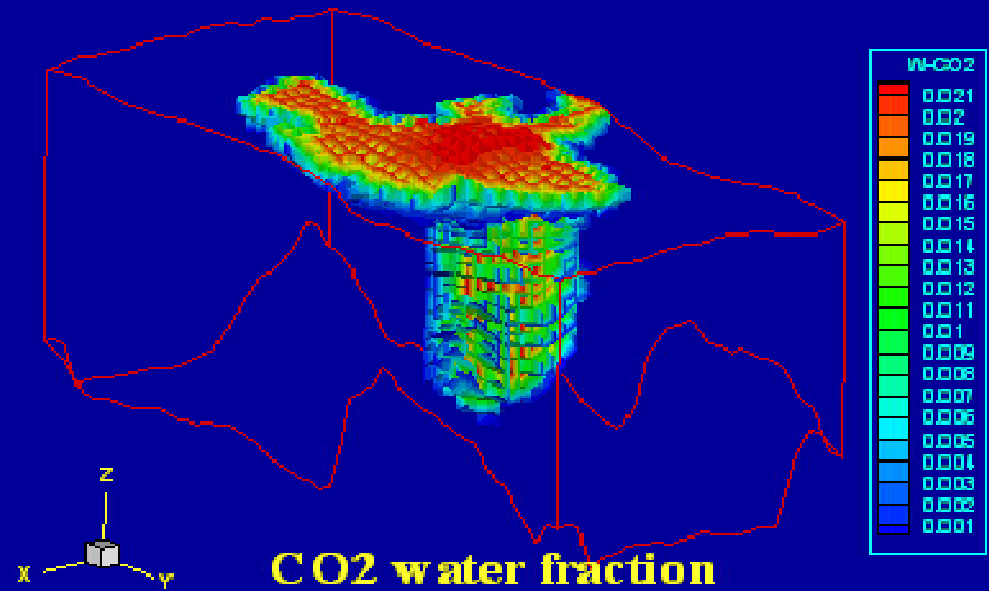
**3 years**



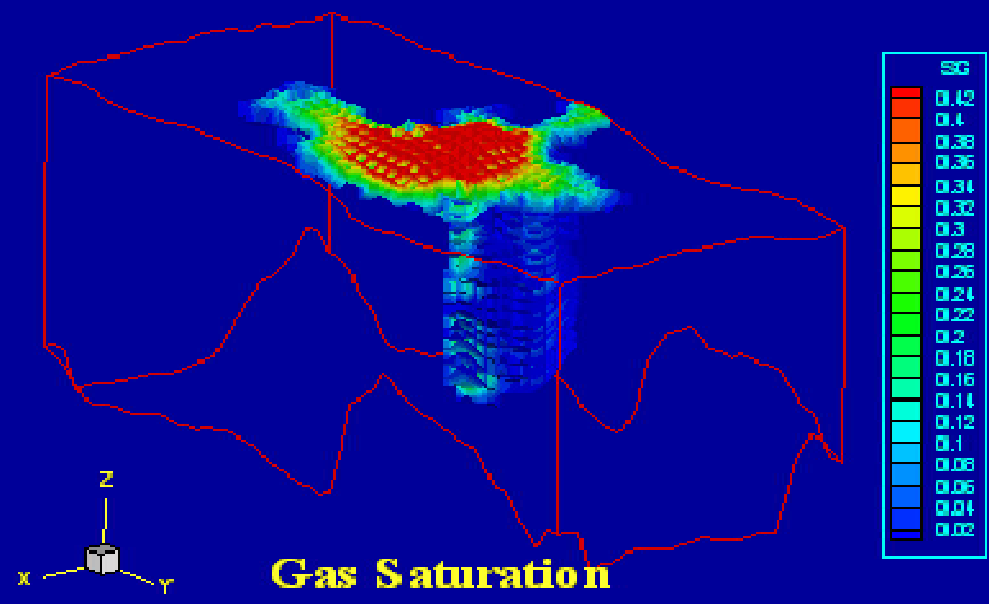


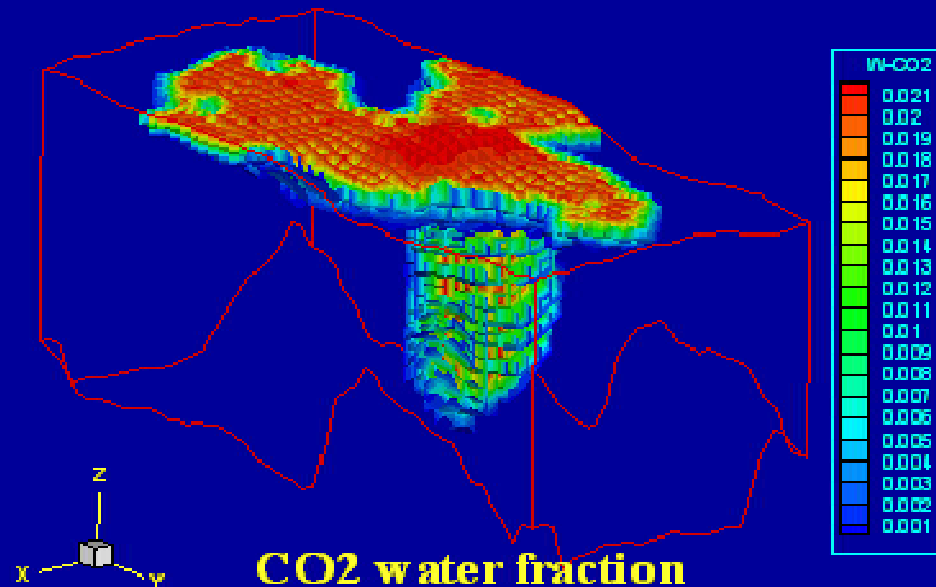
**7 years**





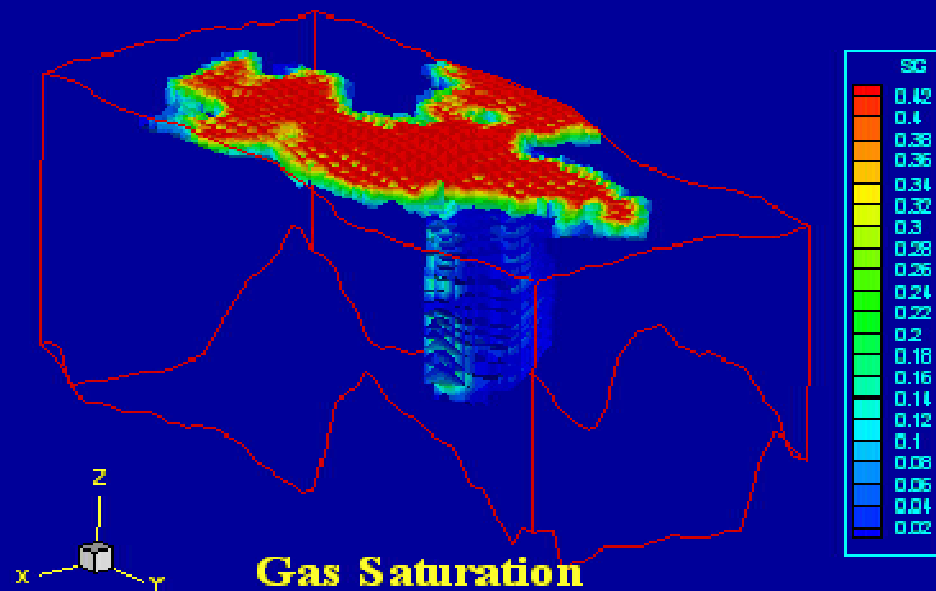
**10 years**



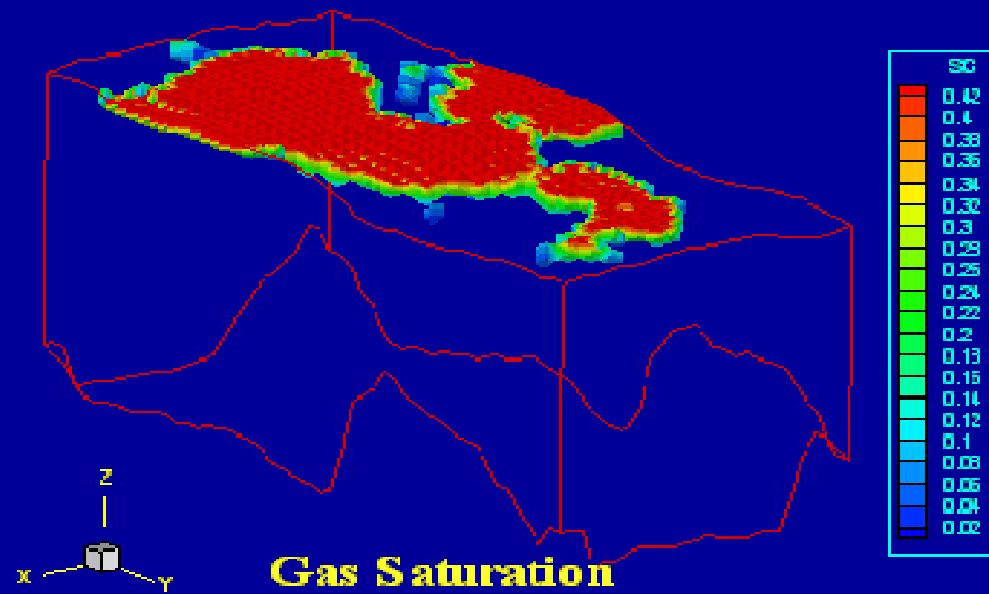
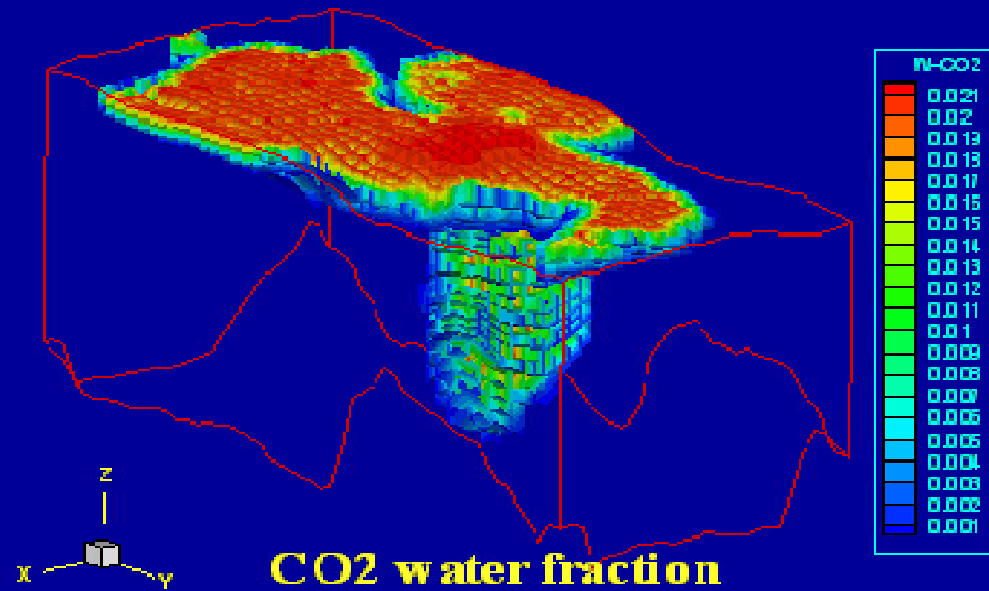


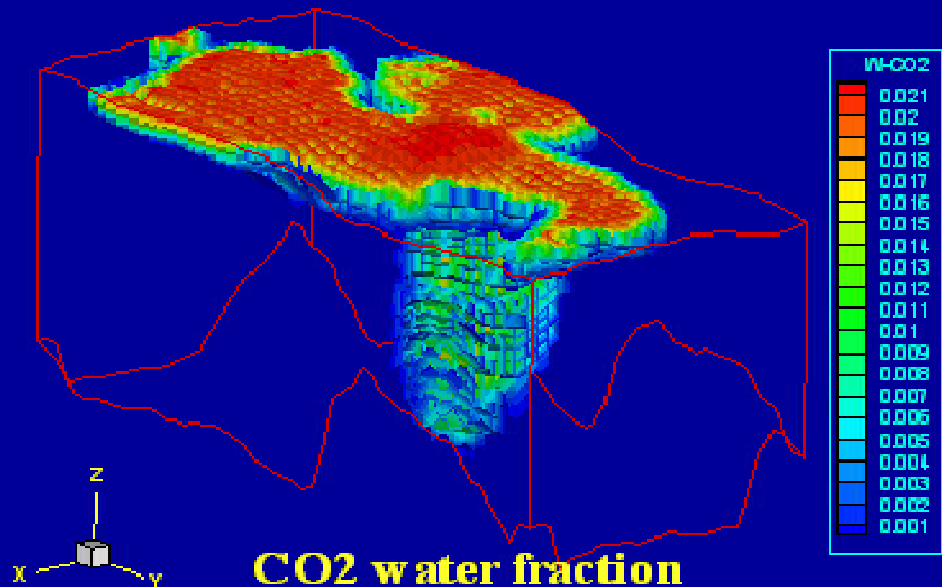
**CO2 water fraction**

**20 years**



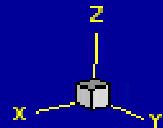
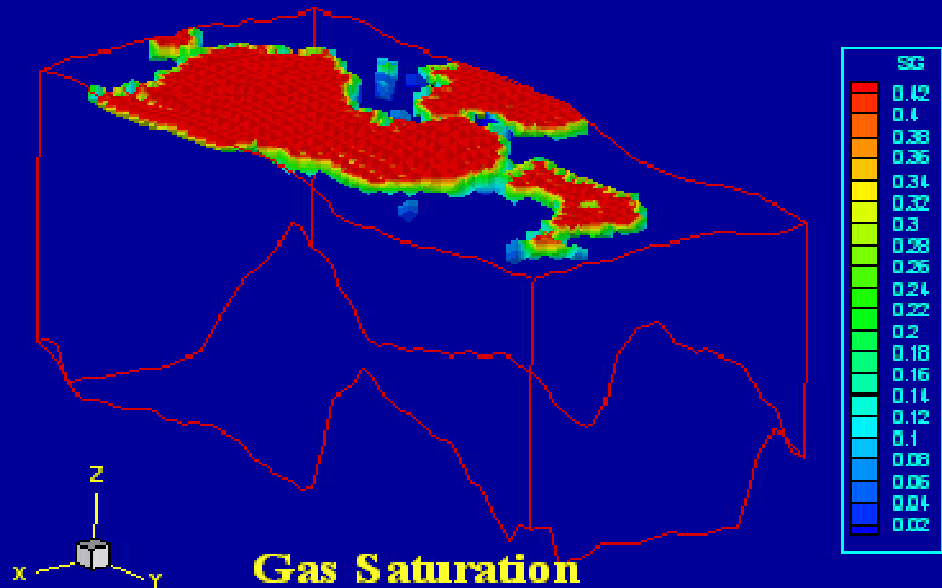
**Gas Saturation**



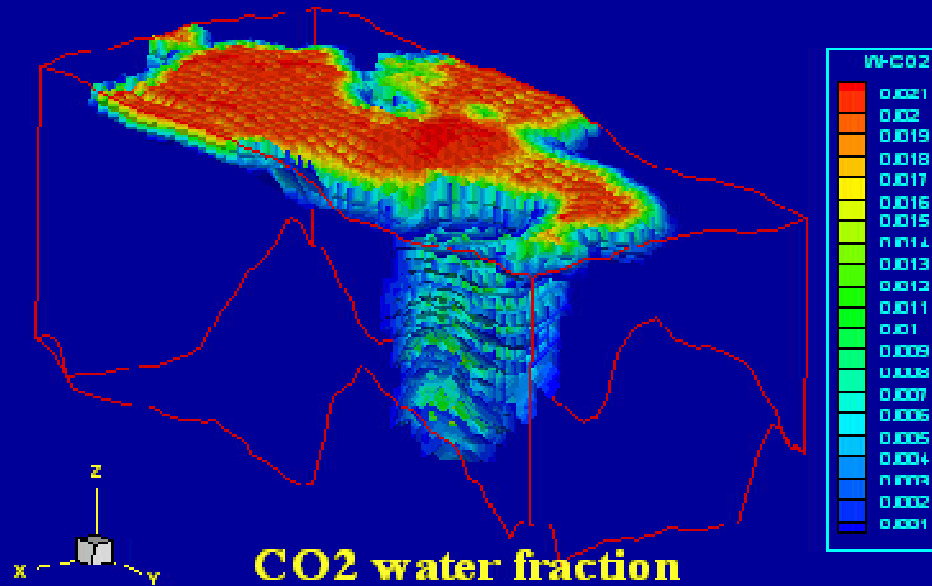


**CO2 water fraction**

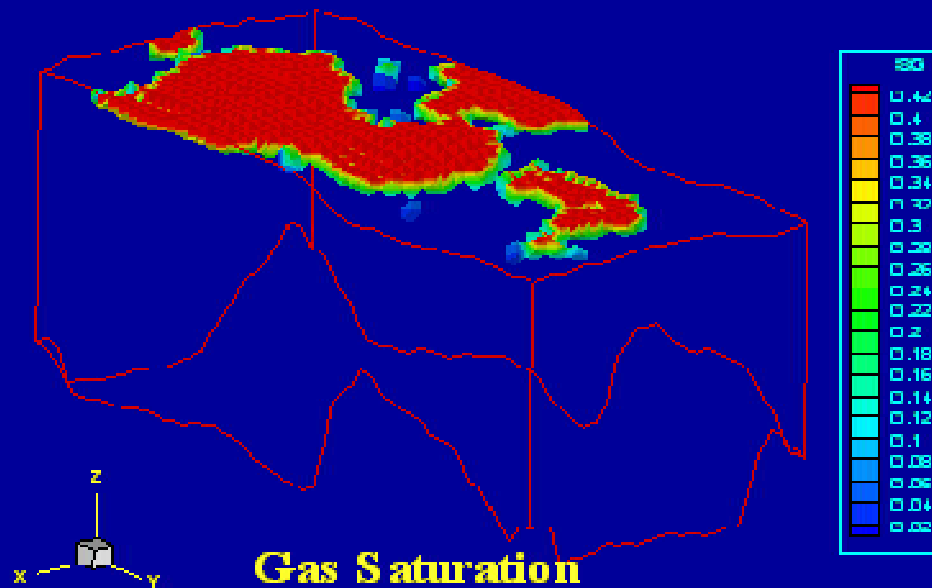
**50 years**

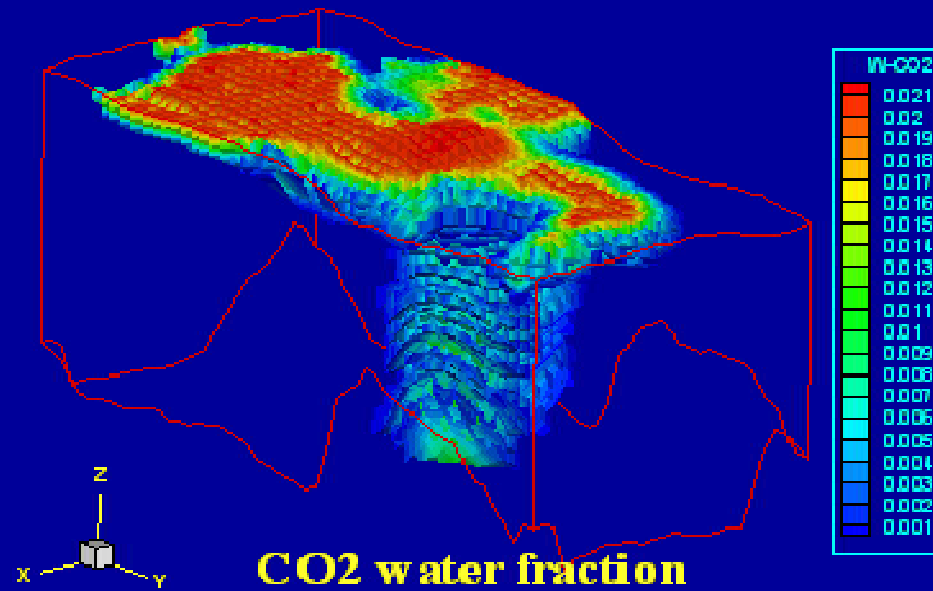


**Gas Saturation**

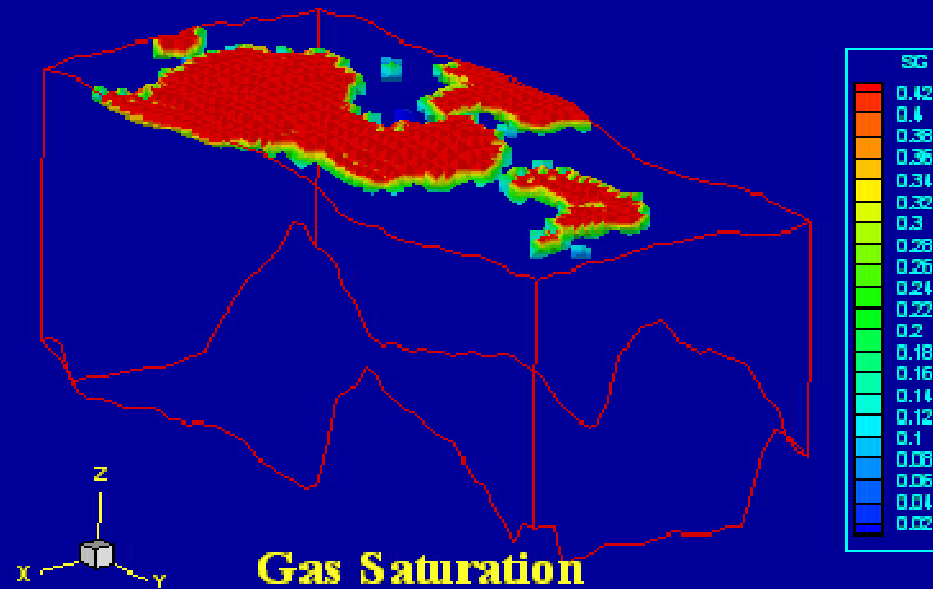


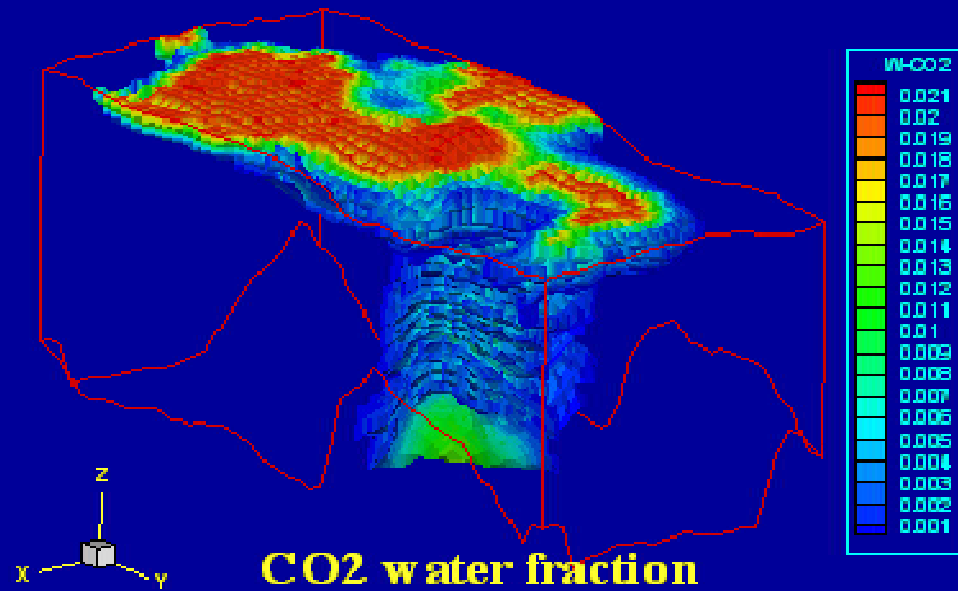
**75 years**



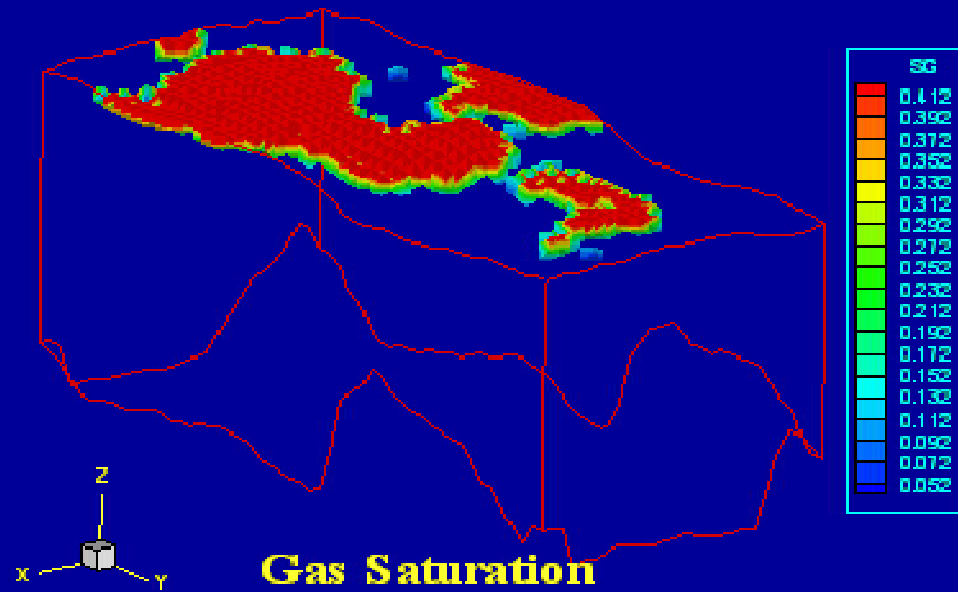


475 years





975 years



# Quelques exemples d'apport des mathématiques

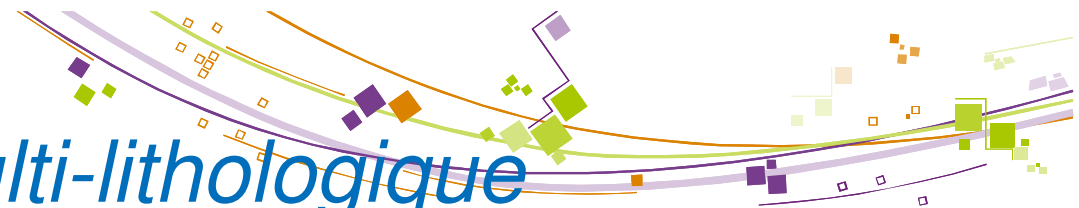
- Modèles stratigraphiques
  - Modélisation
- Ecoulements polyphasiques en milieux poreux
  - Discrétisation, solveurs, HPC
- Couplage écoulement – transport réactif pour la modélisation du stockage du CO<sub>2</sub>
  - Schémas de couplage
- Modèles de bassin
  - Discrétisation des failles
- Calage des données dynamiques en simulation de réservoir



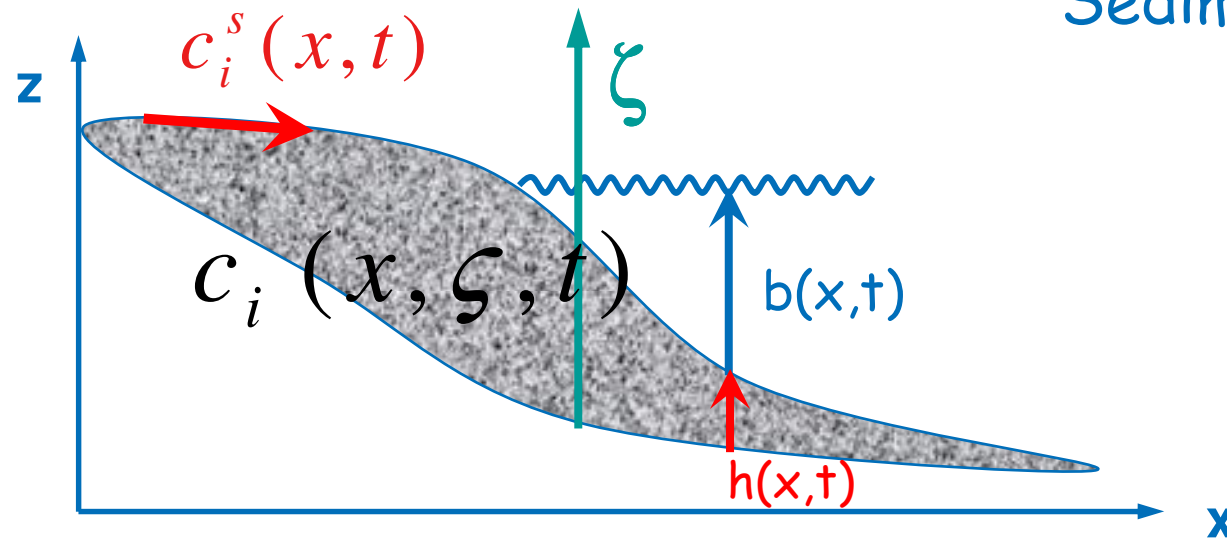
# Modélisation stratigraphique

- **Modèles EDPs aux grandes échelles de temps et d'espace**
- **Apport des mathématiques**
  - *Meilleure formalisation mathématique du modèle en partant du modèle discret mis au point par D. Granjeon (Géologie)*
  - *Schéma numérique plus précis et plus performant*

# Modèle multi-lithologique



Sédiments = mélange de  
**L lithologies**



$$c_i \geq 0$$

$$\sum_{j=1}^L c_j = 1$$

$b+h$ =accomodation donnée

Loi de transport:  $q_{i,s} = k_i(b) C_i^s \nabla b$



## Modèle diffusif multi-lithologique

- Conservation de  $h_i(x, t) = \int_0^{h(x, t)} c_i(x, \zeta, t) dz,$

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_t h_i + \operatorname{div} q_{i,s} = 0 \quad \text{sur } \Omega \times (0, T) \text{ pour tout } i = 1, \dots, L, \\ \sum_{i=1}^L c_i^s = 1 \quad \text{sur } \Omega \times (0, T), \end{array} \right.$$

- Conservation des  $c_i$  (pas de compaction):

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_t c_i = 0 \quad \text{sur } \{(x, \zeta, t), x \in \Omega, t \in (0, T), -\infty < \zeta < h(x, t)\}, \\ c_i|_{\zeta=h} = c_i^s \quad \text{sur } \{(x, t) \in \Omega \times (0, T) / \partial_t h(x, t) > 0\}, \\ c_i|_{t=0} = c_i^0 \quad \text{sur } \{(x, \zeta), x \in \Omega, -\infty < \zeta < h^0(x)\}, \end{array} \right.$$



## Réécriture du système

Terme  
d'accumulation

$$\partial_t \left( \int_0^{h(x,t)} c_i(x, \zeta, t) d\zeta \right) = c_i(x, h(x, t), t) \partial_t h(x, t)$$

Changement de  
coordonnées

$$(x, \xi, t) \in \Omega \times (0, +\infty) \times (0, T) \quad \xi = h(x, t) - \zeta$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial_t u_i + \partial_\xi (u_i \partial_t h) = 0 \quad \text{sur } \Omega \times (0, +\infty) \times (0, T) \\ u_i|_{\xi=0} = c_i^s \quad \text{sur } \{(x, t) \in \Omega \times (0, T) \mid \partial_t h(x, t) > 0\}, \\ u_i|_{t=0} = u_i^0 \quad \text{sur } \Omega \times (0, +\infty). \end{array} \right.$$



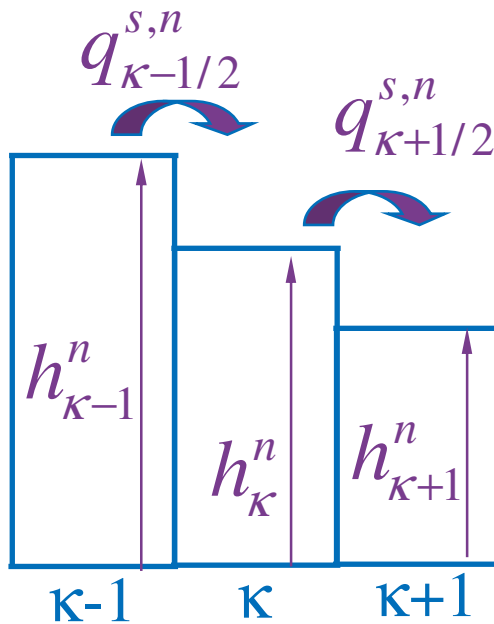
## Modèle multi-lithologique

$$\begin{aligned}
 u_i|_{\xi=0} \partial_t h + \operatorname{div} \left( c_i^s k_i(b) \nabla b \right) &= 0, & \text{sur } \Omega \times (0, T) \\
 \sum_{i=1}^L c_i^s &= 1 & \text{sur } \Omega \times (0, T) \\
 h|_{t=0} &= h^0 & \text{sur } \Omega, \\
 c_i^s k_i(b) \nabla b \cdot \mathbf{n} &= \mu_i g & \text{sur } \{(x, t) \in \partial\Omega \times (0, T) \mid g(x, t) < 0\}, \\
 \sum_{i=1}^L c_i^s k_i(b) \nabla b \cdot \mathbf{n} &= g & \text{sur } \{(x, t) \in \partial\Omega \times (0, T) \mid g(x, t) \geq 0\}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \partial_t u_i + \partial_\xi \left( u_i \partial_t h \right) &= 0 & \text{sur } \Omega \times (0, +\infty) \times (0, T), \\
 u_i|_{\xi=0} &= c_i^s & \text{sur } \{(x, t) \in \Omega \times (0, T) \mid \partial_t h(x, t) > 0\}, \\
 u_i|_{t=0} &= u_i^0 & \text{sur } \Omega \times (0, +\infty).
 \end{aligned}$$

# Disponibilité limitée en sédiments transportables par érosion

$$\rightarrow \partial_t h \geq -E$$



$$|\kappa| \frac{h_{\kappa}^{n+1} - h_{\kappa}^n}{\Delta t} + q_{\kappa+1/2}^{s,n} + q_{\kappa-1/2}^{s,n} = 0$$

$$h_{\kappa}^{n+1} - h_{\kappa}^n \geq -E\Delta t$$

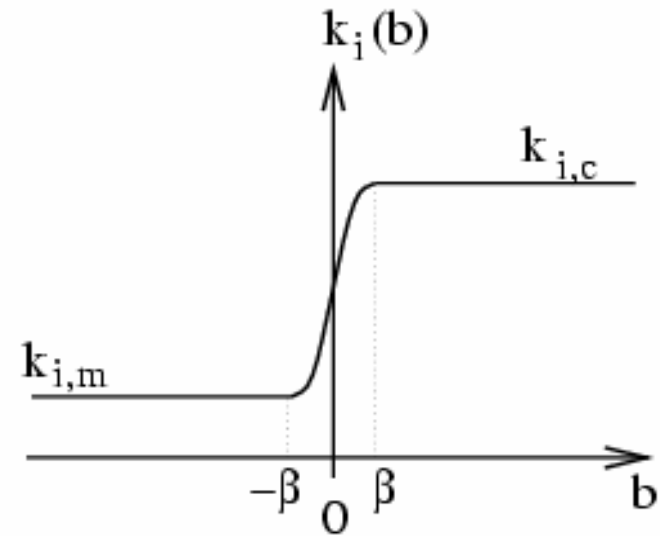
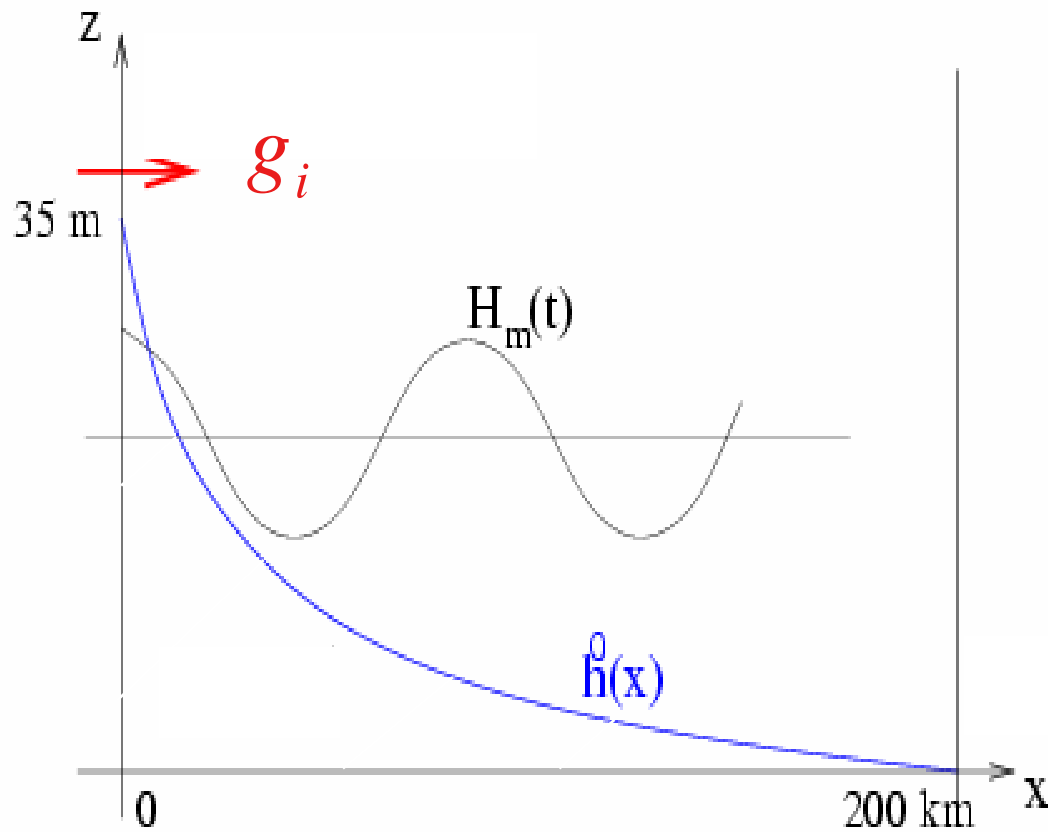
$$q_{\kappa+1/2}^{s,n} = \min \left[ k_{\kappa+1/2}^n \frac{h_{\kappa}^n - h_{\kappa+1}^n}{\Delta x}, E|\kappa| - q_{\kappa-1/2}^{s,n} \right]$$

- Limiteur de flux:  $\lambda$   $\partial_t h + \text{div}(\lambda k(b) \nabla b) = 0$  sur  $\Omega \times (0, T)$ .

- Contraintes de complémentarité

$$\begin{cases} (1 - \lambda)(\partial_t h + E) = 0, \\ (1 - \lambda) \geq 0, \\ (\partial_t h + E) \geq 0, \end{cases} \text{ sur } \Omega \times (0, T),$$

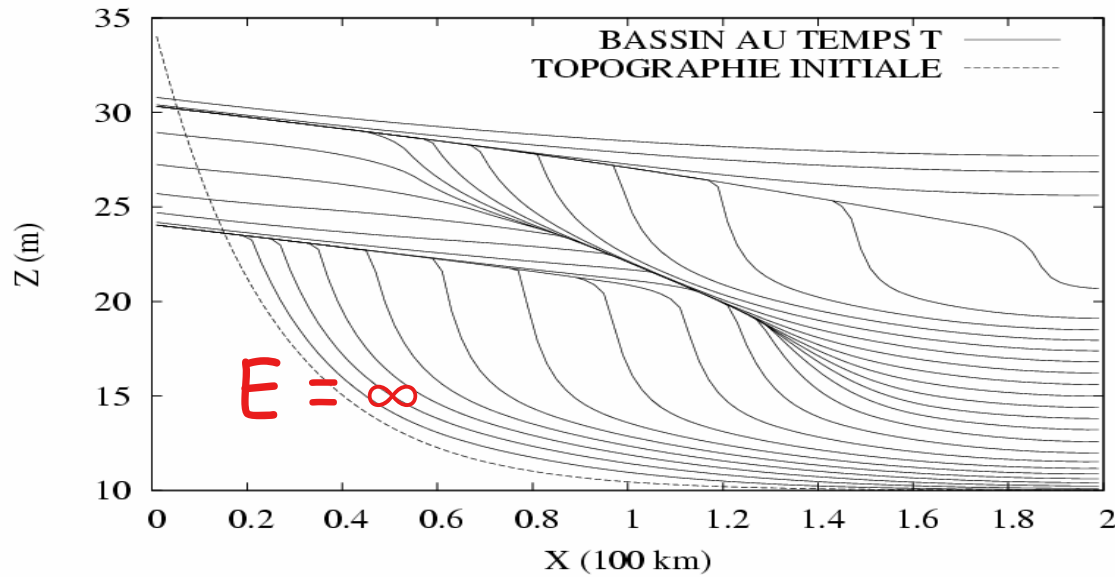
## Exemple de progradation d'un Delta



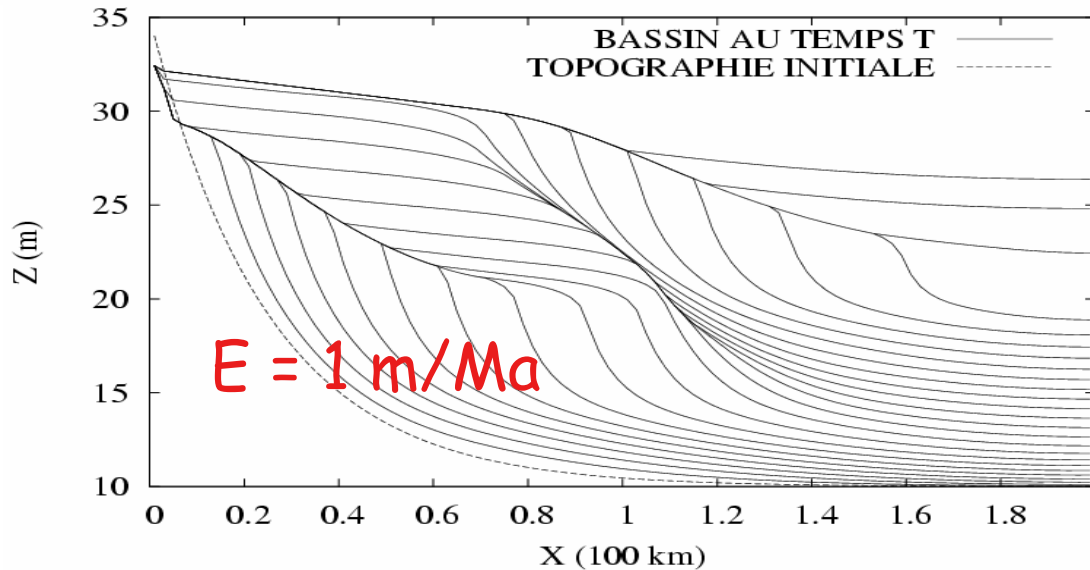
$$k_{1,c} = 10^5, \quad k_{1,m} = 10^4 \text{ m}^2/\text{yr},$$

$$k_{2,c} = 5 \cdot 10^4, \quad k_{2,m} = 10^3 \text{ m}^2/\text{yr}$$

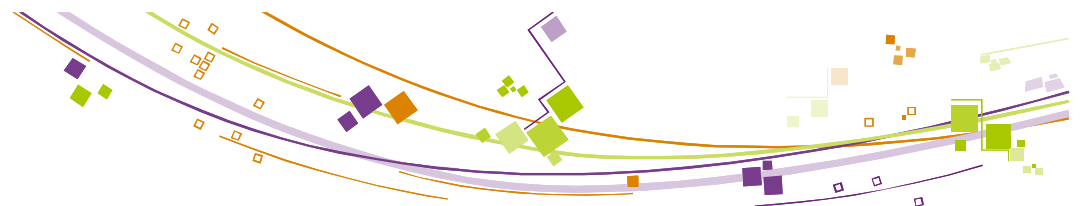
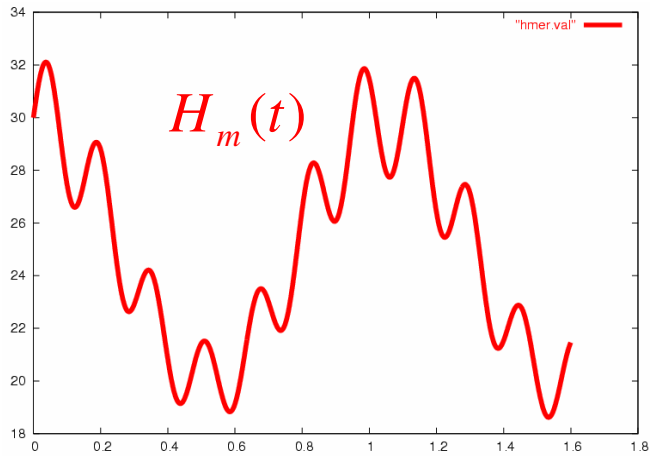
# Exemple de progradation rétrogradation d'un Delta



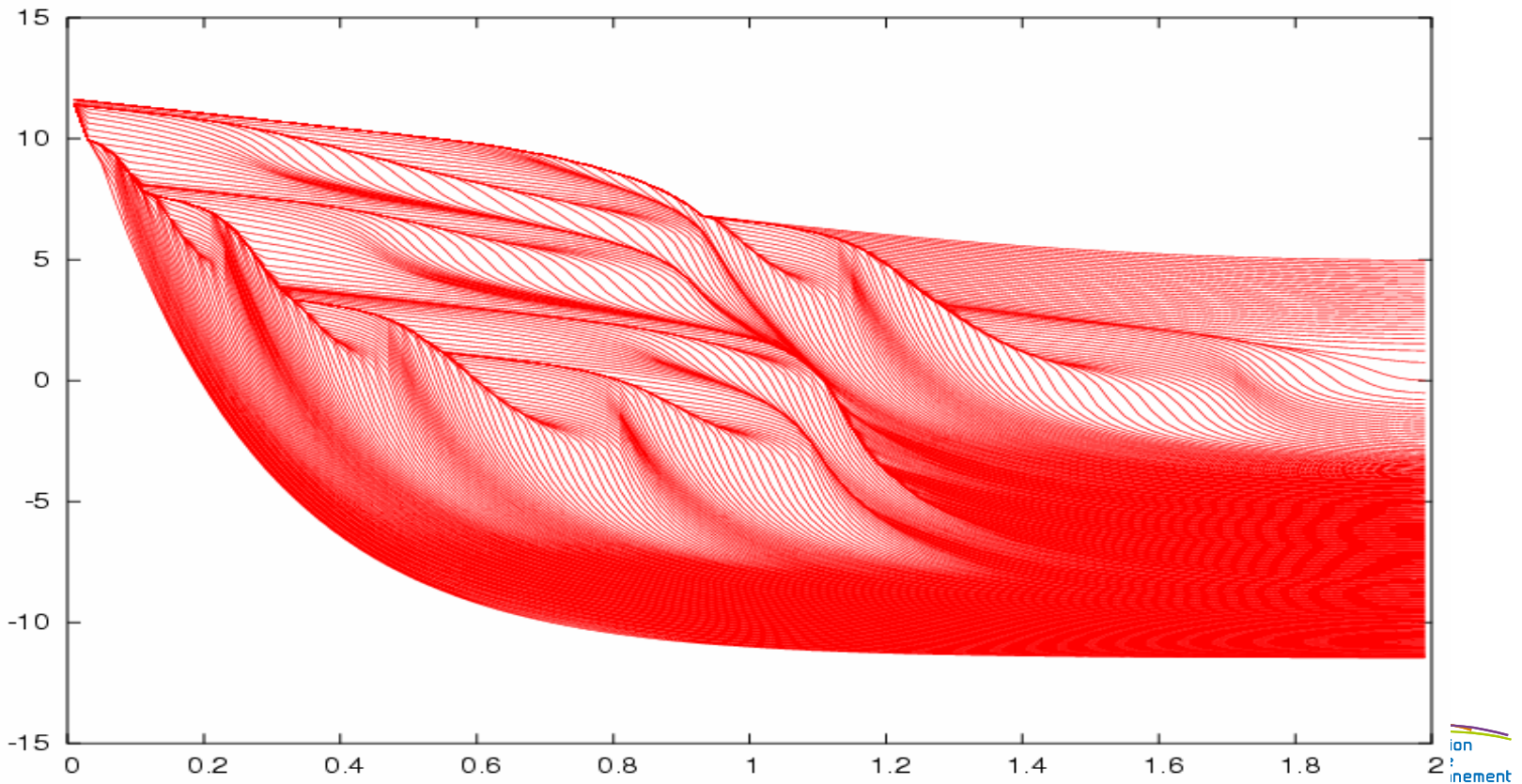
la zone en érosion sous  
contrainte suit la ligne de  
côte



ation  
ie  
nnement



# Progradation Rétrogradation d'un Delta



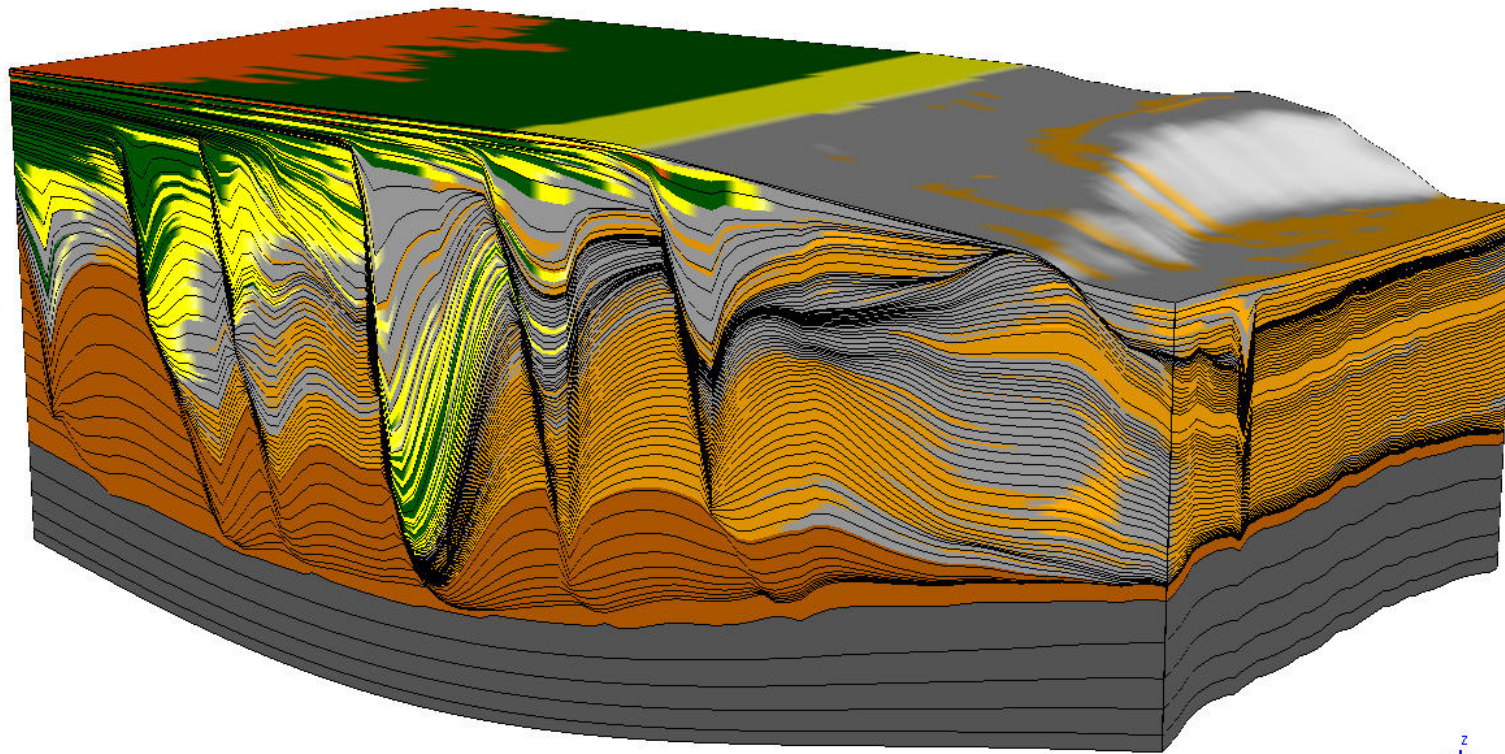
# *Diffusion d'un mélange galets-sable*



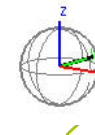


# Cas en géométrie complexe

Dionisos - 4.25 - 04\_BQI.pro - 03\_5.sav loaded  
Age = 3.50 My



Vertical Exageration = x 10





# Modélisation stratigraphique ...

- Discrétisation
  - Volume Fini
- Solveurs linéaires
  - Méthodes Multigrilles
- Problème inverse
  - Approche par réduction de modèle
- Estimation de paramètres, Incertitudes



# Écoulements en milieux poreux

- **Modèles, formulation**
- **Discretisation**
- **Solveurs linéaires, HPC**
- **Couplage écoulement – géochimie**
- **Failles dans les modèles de bassin**

# *Écoulements en milieux poreux*



- **Modèle dynamique: multi-physique et non linéarités**
  - **Gamme de modèles**
    - Du monophasique au triphasique compositionnel thermique en simple et double milieu
  - **Lois de fermetures complexes**
    - Equations d'état
    - Equilibres thermodynamique et géochimique
    - Lois hydrodynamiques: Kr, Pc, Hystérésis
  - **Nombreux couplages**
    - Thermique
    - Réservoir – Voisinage puits - puits – réseau de surface
    - Cinétique (interaction eau-roche, craquage, combustion)
    - Géomecanique

# Modèles Polyphasiques Compositionnels

Phases:  $\alpha = 1, \dots, N_p$  (eau, huile, gaz, ...)

Composants  $i=1, \dots, N_c$  ( $H_2O$ , HCs,  $CO_2$ , ...)

Inconnues

$$P, S_\alpha = \frac{Vol_\alpha}{Vol_{Pore}}, C_i^\alpha = \frac{m_i^\alpha}{m^\alpha}$$

Loi de Darcy  
polyphasique

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{V}_\alpha = -\frac{k_{r,\alpha}}{\mu_\alpha} K (\nabla (P + P_{c,\alpha}) + \rho_\alpha \vec{g}) \\ \partial_t \left( \phi \sum_\alpha \rho_\alpha C_i^\alpha S_\alpha \right) + \text{div} \left( \sum_\alpha \rho_\alpha C_i^\alpha \mathbf{V}_\alpha \right) = Q_i \\ \sum_\alpha S_\alpha = 1 \end{array} \right.$$

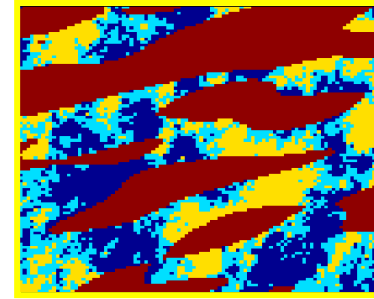
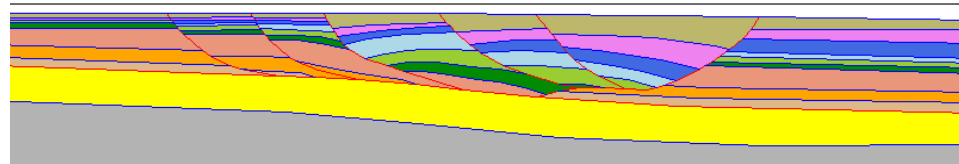
Conservation de la masse

Conservation du volume de pore

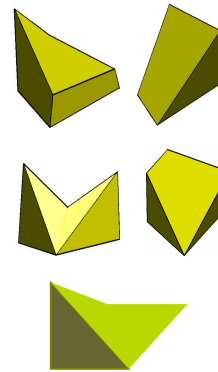
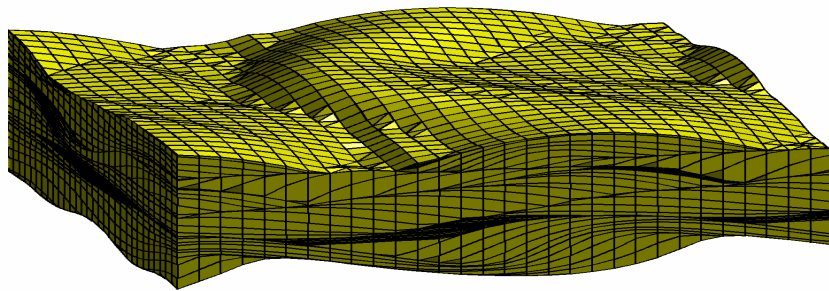
+ Equilibre thermodynamique

# Géométries-Maillages

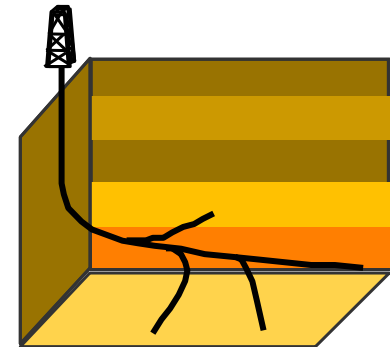
Milieux stratifiés hétérogènes  
anisotropes



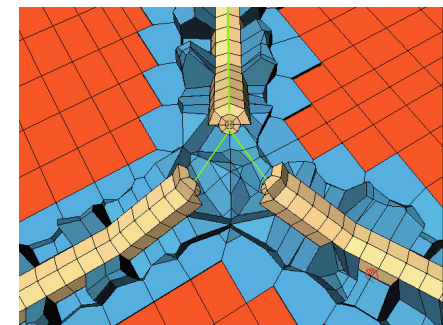
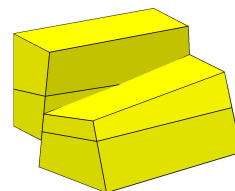
Erosions



Puits



Failles

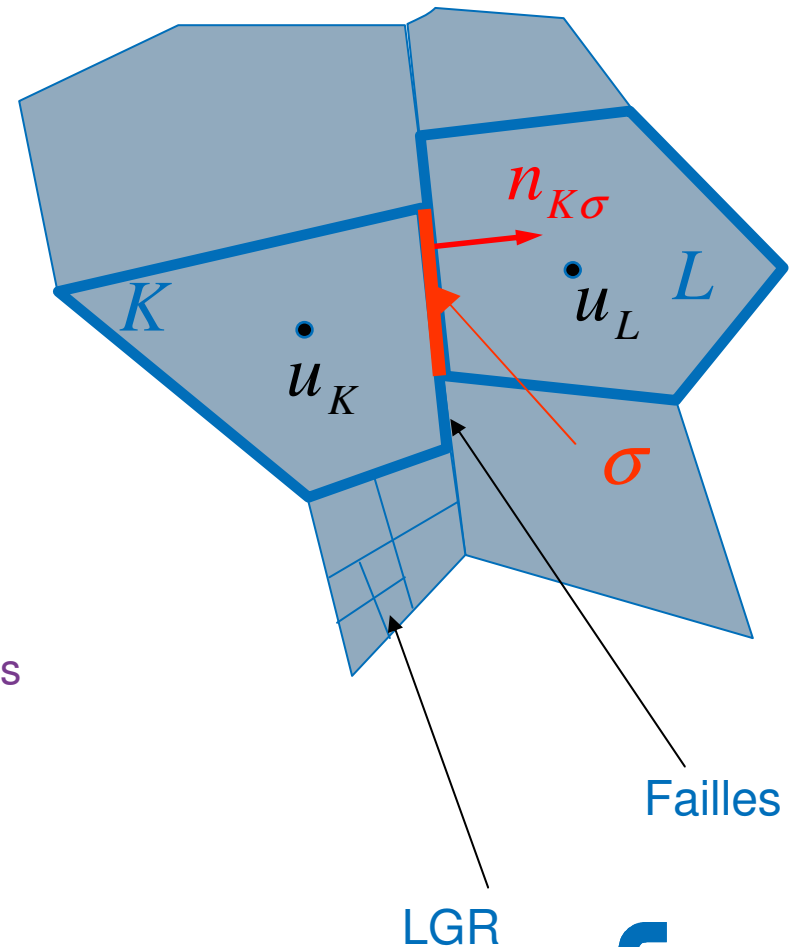


# Discrétisation volume fini des flux diffusifs

$$\int_{\sigma} -K \nabla u \cdot n_{K,\sigma} ds = \sum_{M \in T_{\sigma}} T_{K,\sigma}^M u_M$$

$$u = P, P_{c,\alpha}(S), C_i^{\alpha}, T$$

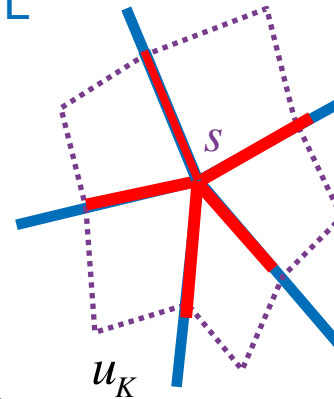
- Maillages généraux
- Milieu hétérogène, anisotrope
- Coût minimal et robustesse
  - Stencil compact, schémas centrés
  - Coercivité
  - Monotonicité



# Schémas VF pour les flux diffusifs (ANR VFSitCom)

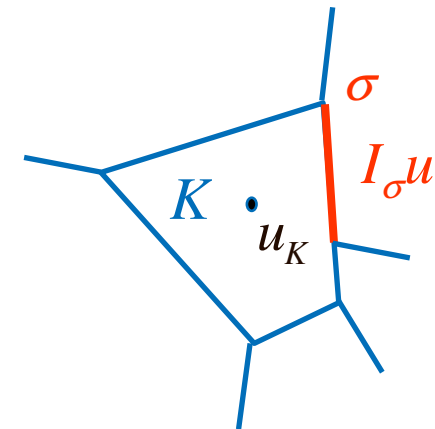
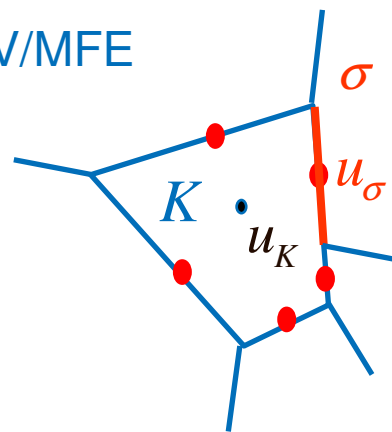
Schémas centrés

O/G/L



Schémas hybrides

MFD/HFV/MFE



Gradient par maille

# Systemes non lineaires et lineaires

$$X = (X_K)_{K \in T} = (P_K, S_K^\alpha, C_K^\alpha)_{K \in T}$$

$$\begin{cases} M_K (X_K^{n+1}) + \sum_{\sigma \in \Sigma_K} F_{K,\sigma} (P^{n+1}, S^*, C^*) = 0 \\ C_K (X_K^{n+1}) = 0 \end{cases} \quad * = n, n + 1$$

- **Systeme non lineaire** 5 à 50% du temps calcul
  - Algorithme de type Newton
  - Gestion des changements de phase par le Flash thermodynamique
- **Systeme lineaire** ← 80 à 50% du temps calcul
  - Réduction du systeme par élimination des lois de fermeture et des inconnues explicites

# Méthode Combinative-AMG

$$\begin{pmatrix} J_{pp} & J_{pc} \\ J_{cp} & J_{cc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Y_p \\ Y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_p \\ b_c \end{pmatrix}$$

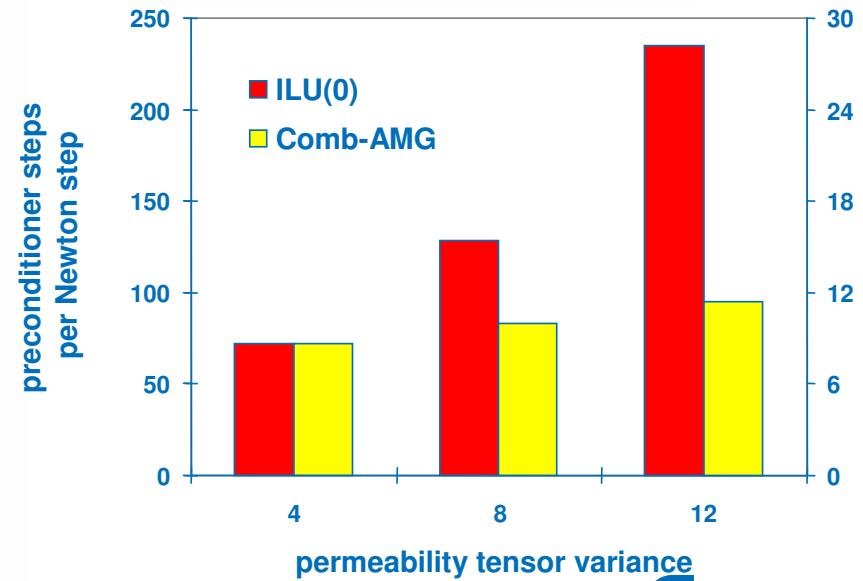
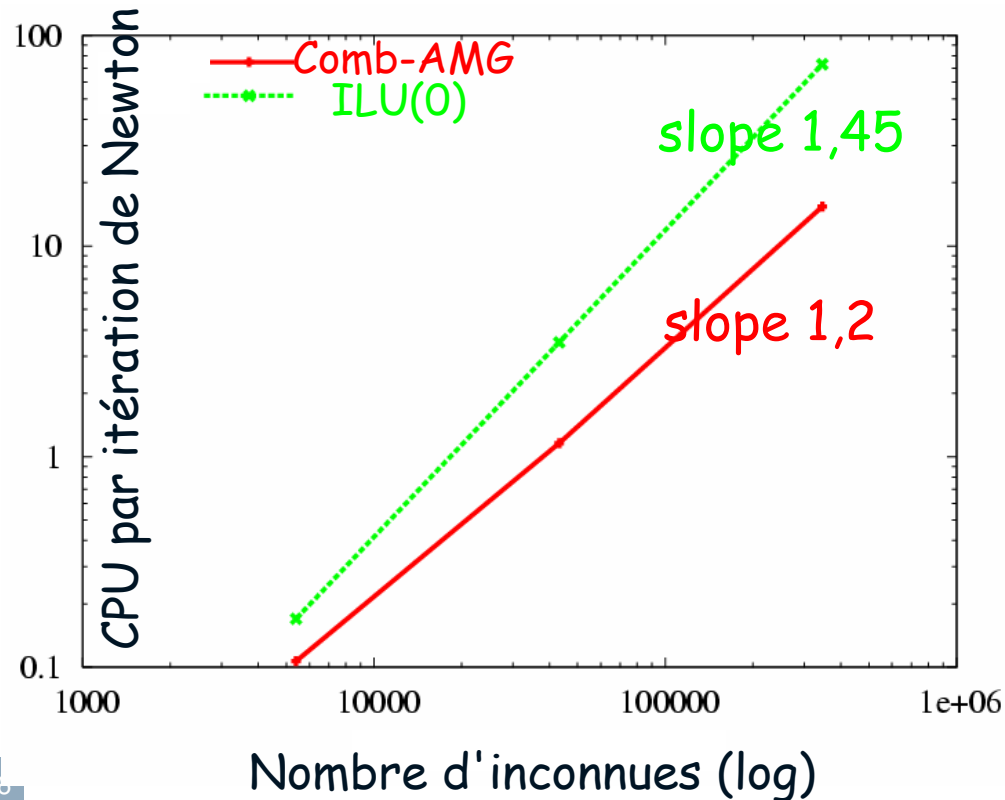
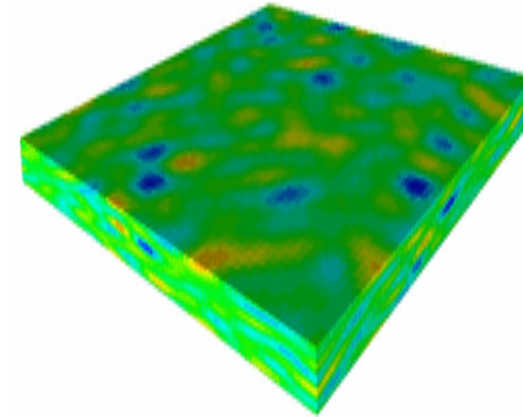
$$\begin{pmatrix} Y_p^{(1)} \\ Y_c^{(1)} \end{pmatrix} = C_{ILU(0)}^{-1} \begin{pmatrix} b_p \\ b_c \end{pmatrix} \quad \text{Préconditionnement ILU(0) du système}$$

$$Y_p^{(2)} = C_{AMG}^{-1} \left( b_p - J_{pp} Y_p^{(1)} - J_{cp} Y_c^{(1)} \right) \quad \text{Vcycle(s) AMG sur le bloc pression}$$

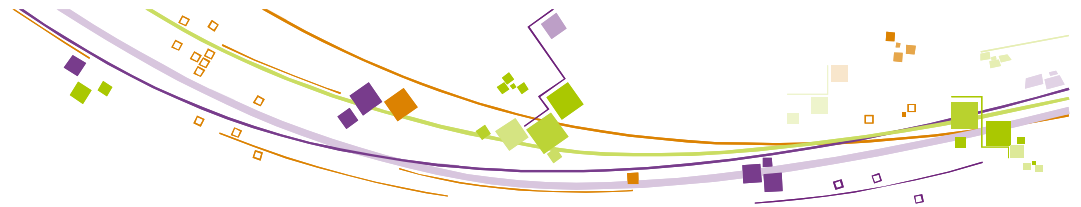
$$\begin{pmatrix} Y_p \\ Y_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_p^{(1)} + Y_p^{(2)} \\ Y_c^{(1)} \end{pmatrix} = \left[ C_{ILU(0)}^{-1} + \begin{pmatrix} C_{AMG}^{-1} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} (I - J C_{ILU(0)}^{-1}) \right] b$$

# Cas test synthétiques Black Oil en simulation de réservoir

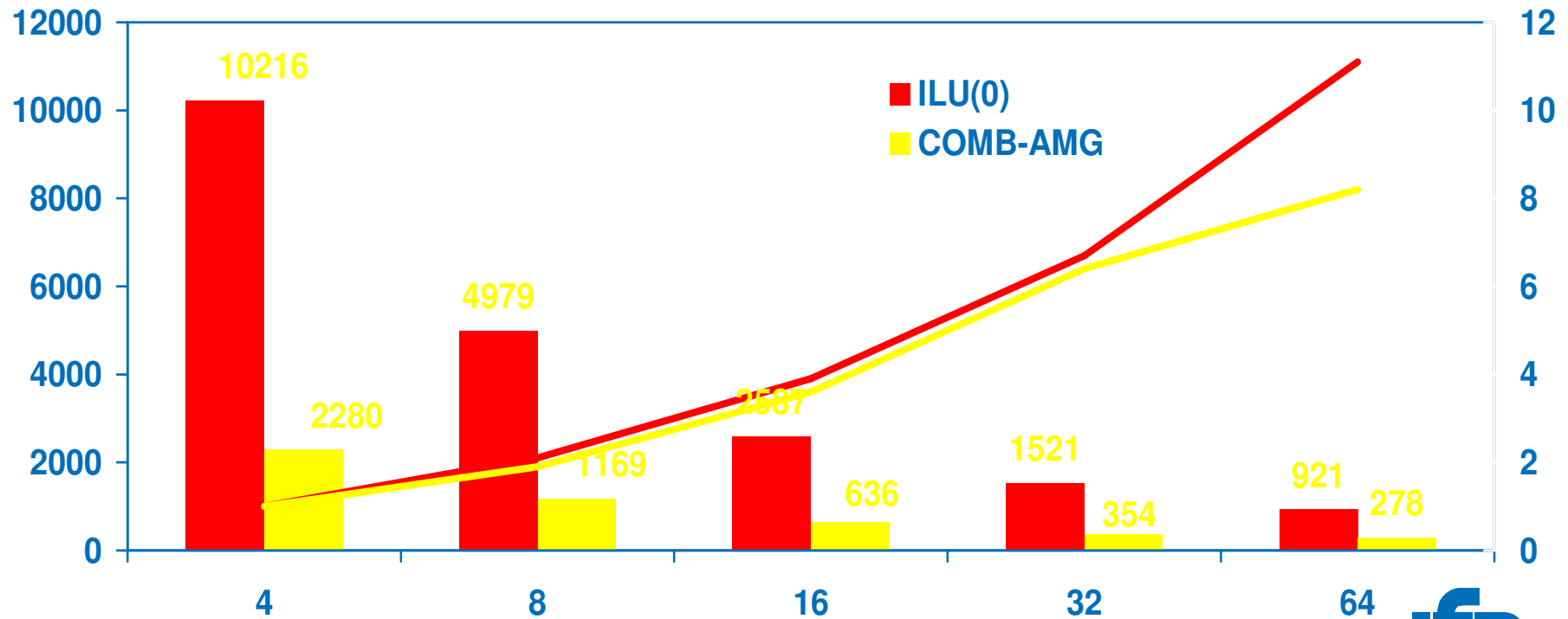
- Modèle Black Oil (3 inconnues par maille)
- Champ de perméabilité log-normal



# Cas test PAB



- Black Oil
- 3 inconnues par maille
- 4.200.000 mailles

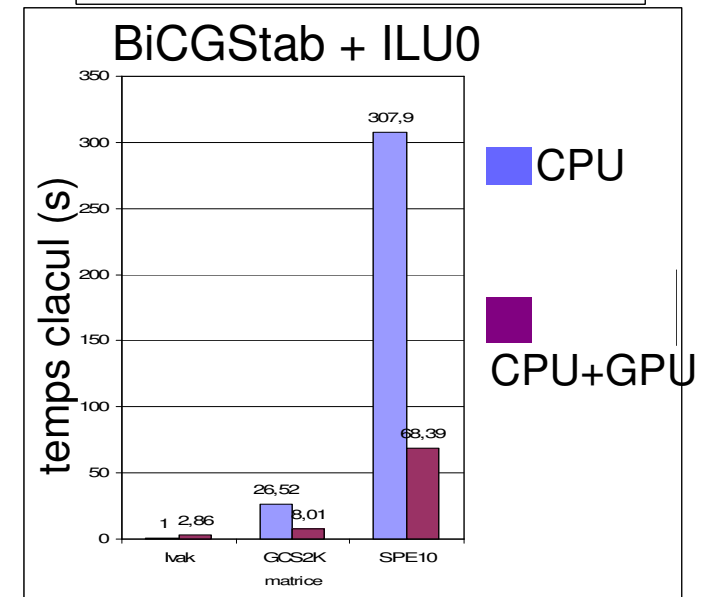
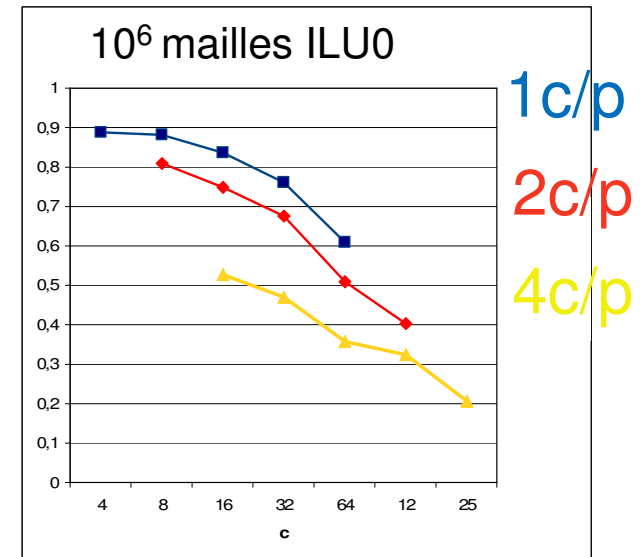


# Calcul Haute Performance

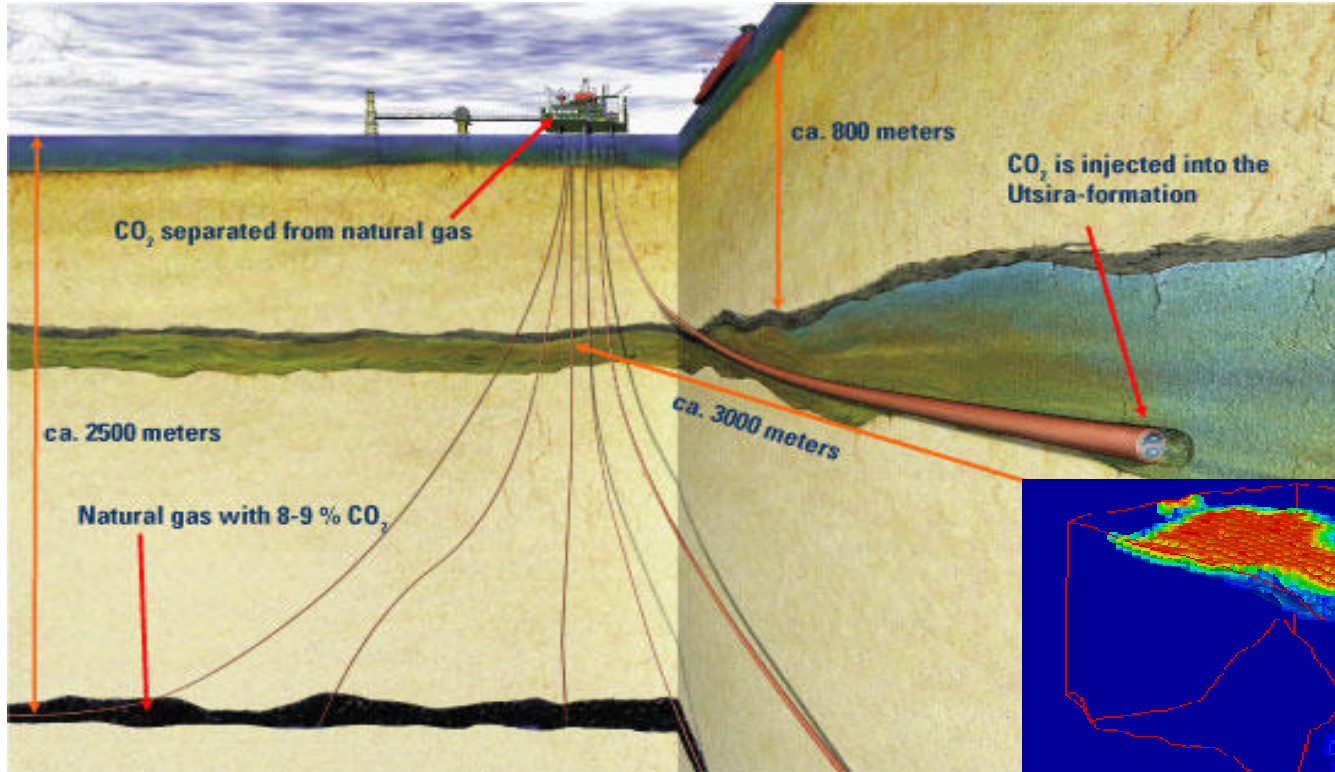
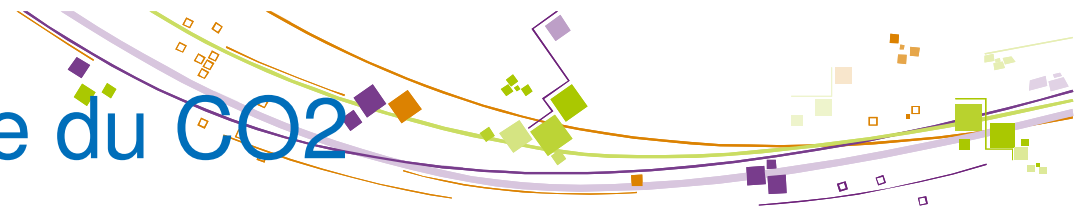
## ■ Scalabilité forte

- Comment exploiter les nouvelles architectures à taille de problème fixée

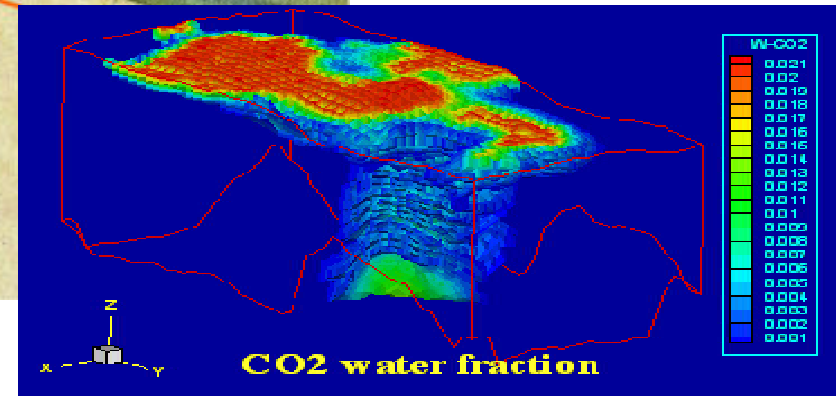
- Solveurs ILU adaptés au multi-coeurs (ANR PETAL)
- Hybride CPU+GPU
  - Solveur linéaire
  - Flash thermodynamique



# Stockage géologique du CO<sub>2</sub>

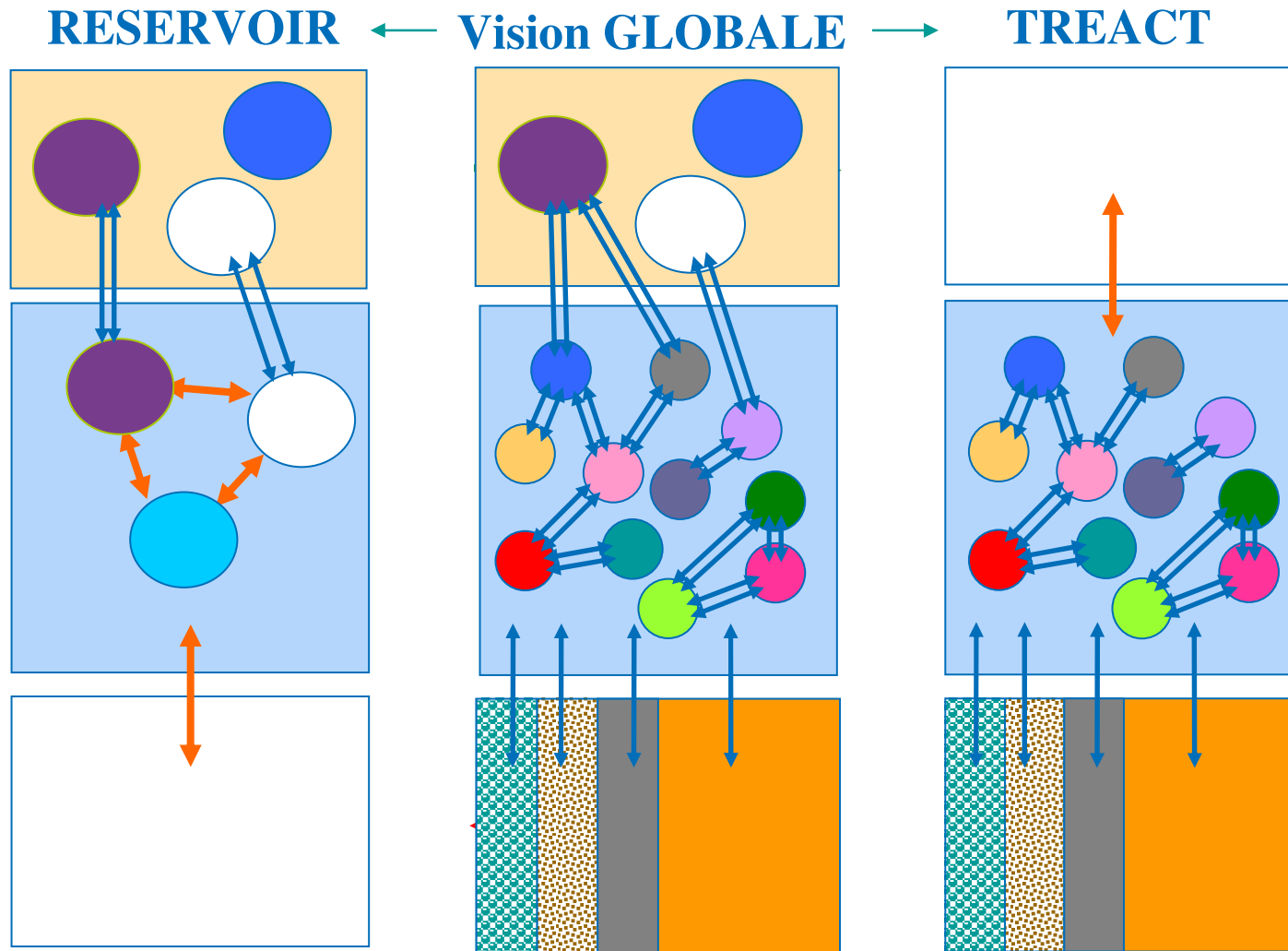


Sleipner



- Etude des piégeages du CO<sub>2</sub>
  - Géologique, capillaire, par dissolution, minéralogique
- Couplage écoulement polyphasique – transport – géochimie

# Stratégie de résolution découplée du système réactif



# Modèles de bassin

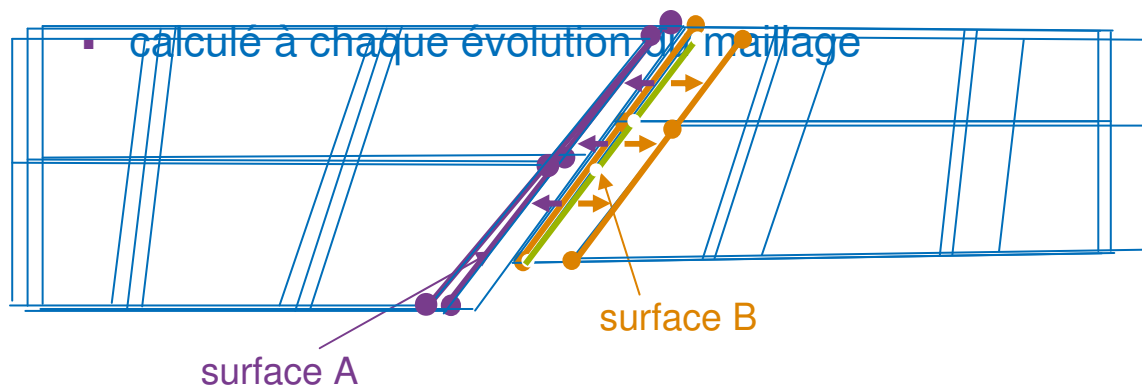
## Couplage compaction, écoulement

- Compaction moteur de l'écoulement
- Inconnues
  - Pression
  - Contrainte verticale
  - Porosité
- Equations couplées
  - Conservation masse, loi de Darcy
  - Equilibre mécanique vertical
  - Rhéologie (porosité/contrainte effective)
  - Perméabilité (porosité)
- Verrous
  - Failles conductrices
  - Schémas pour  $\text{Div}(K\text{Grad})$  en maillage très déformé
  - Calculs géométriques, Maillages

# Failles



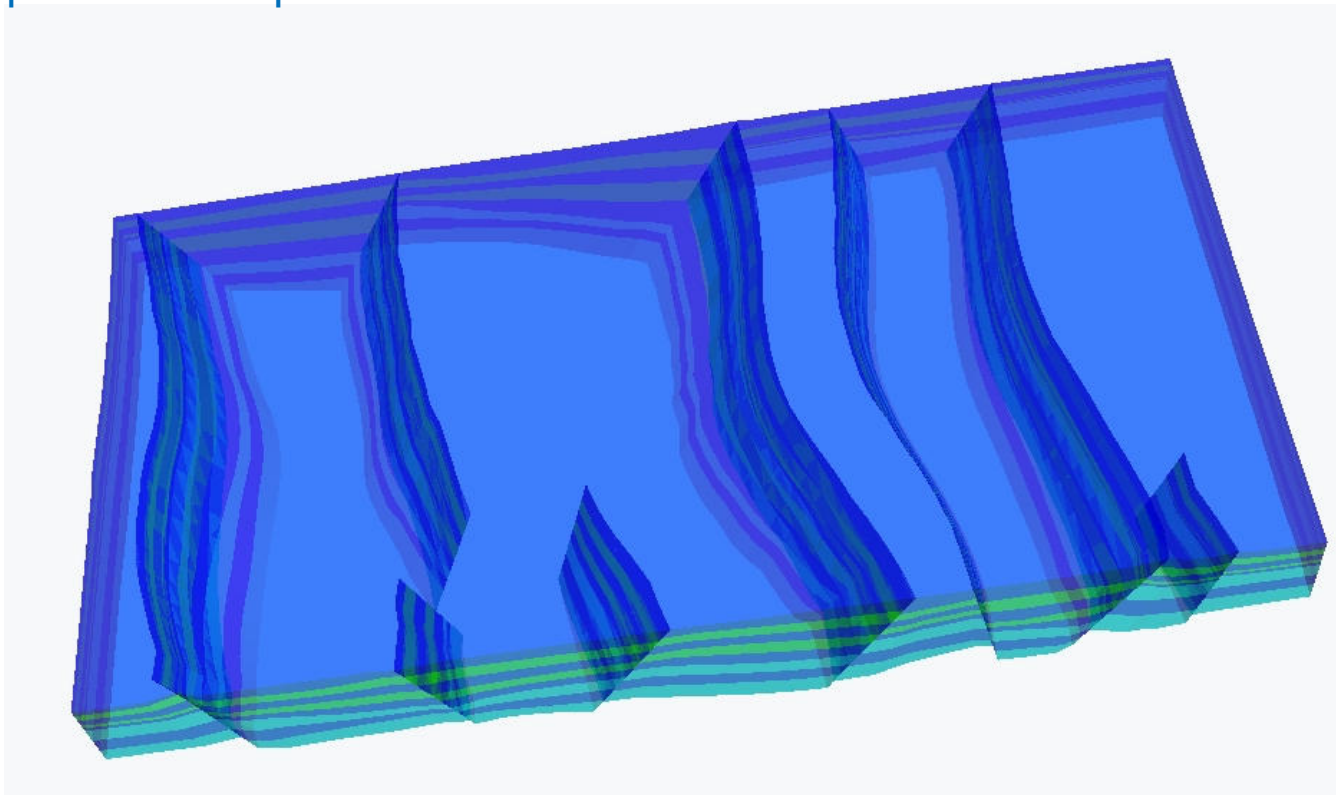
- Influence importante sur l'écoulement
  - connectivité transverse, propriétés
  - zone de faille, épaisseur faible, chemin préférentiel
  - évolue au cours du temps
- Maillage
  - 1 faille : 2 surfaces potentiellement en contact
  - Calculs géométriques
- Ecoulements à travers les failles
  - propriétés de faille affectée à chaque face
  - flux à travers les faces en contact





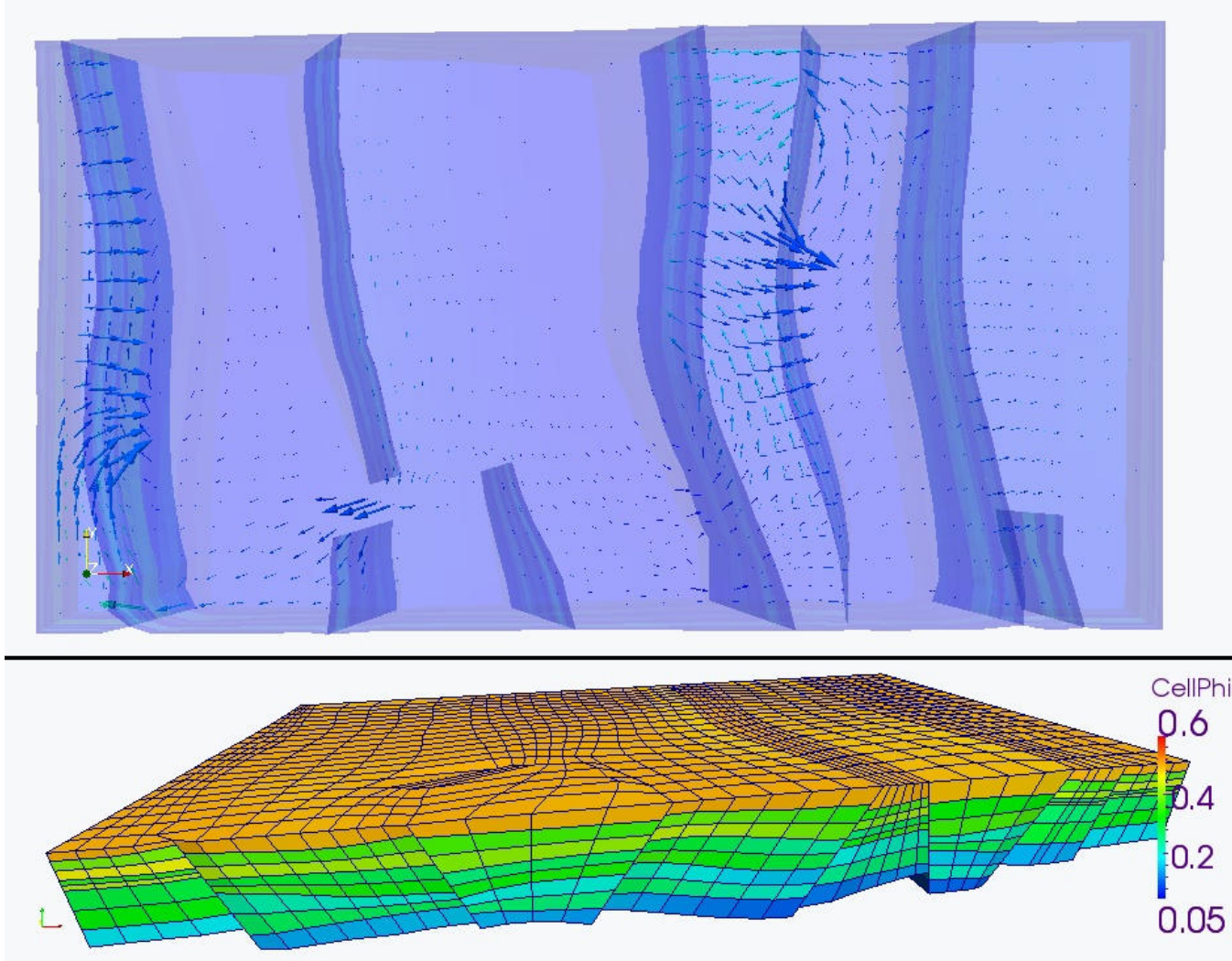
# Cas en extension

Alternance couches  
imperméables-perméables





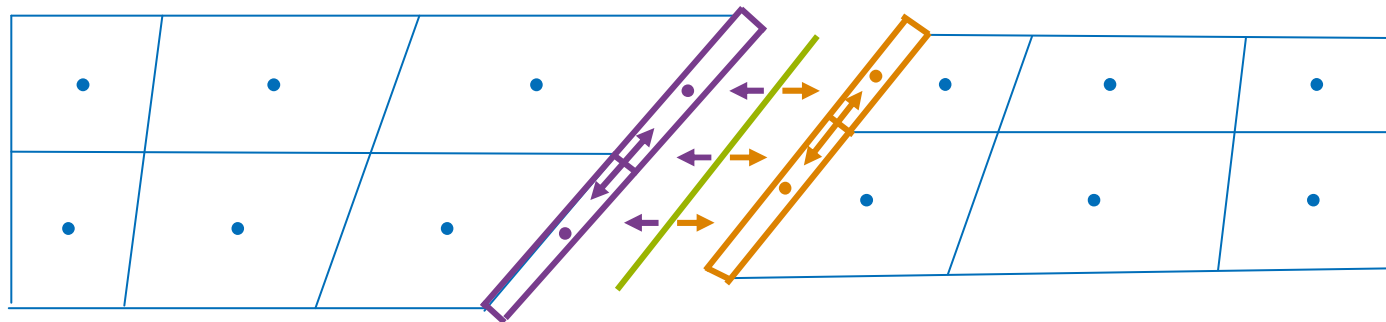
## Champ de vitesse et porosité



# Écoulement le long des failles

## ■ Discrétisation

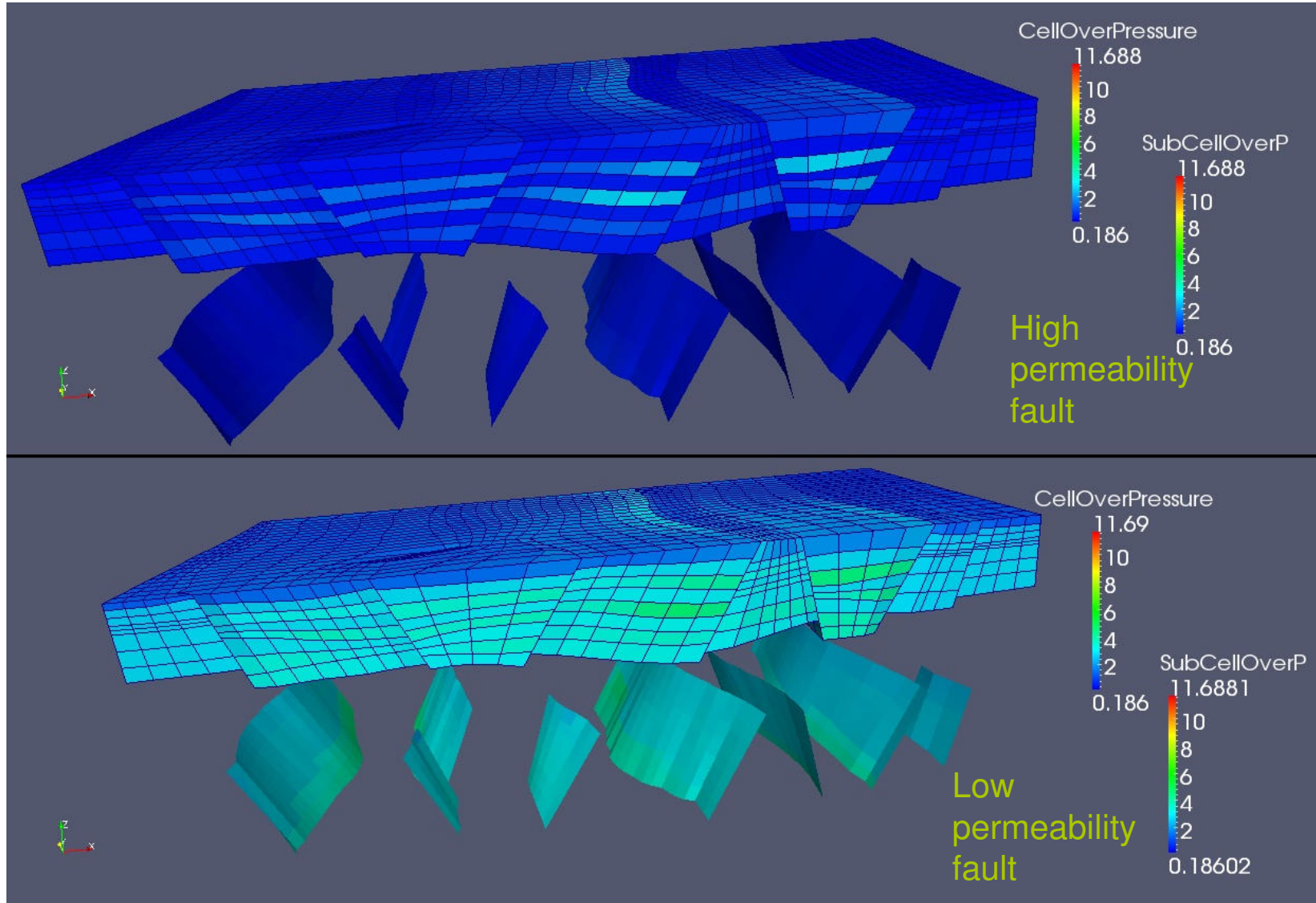
- Écoulements le long des deux surfaces associées à une faille
  - Bilan de masse dans chaque maille fictive de faille
- Connectés par l'écoulement transverse



## ■ Propriétés des mailles de faille

- Perméabilités transverse et longitudinale
- Épaisseur de la zone de faille

# Zone de faille à forte et faible perméabilité





# Écoulements en milieux poreux ...

- **Couplage géomécanique**
  - **Réservoir, CO2, bassin**
- **Couplage réservoir – puits – réseaux de surface**
- **Procédés de récupération thermique**
- **Estimation de paramètres**
- **Incertitudes**

# Calage des données dynamiques en simulation de réservoir



- Calage de données de production et sismiques 4D
  - Millions de données, dizaines de paramètres
  - Simulations coûteuses: de qq. mn. à qq. heures
  - Dérivées non disponibles en général
- Propagation des incertitudes des entrées sur les sorties
- Calcul des incertitudes sur les entrées (estimation de paramètres)

• Paramètres pétrophysiques:  
porosités, perméabilités  
propriétés des failles  
• Paramètres des puits:  
skin, IP ...

FORWARD



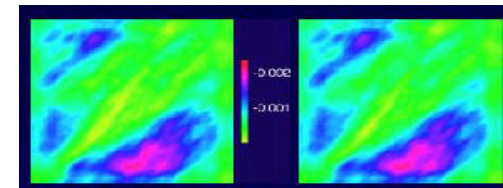
problem



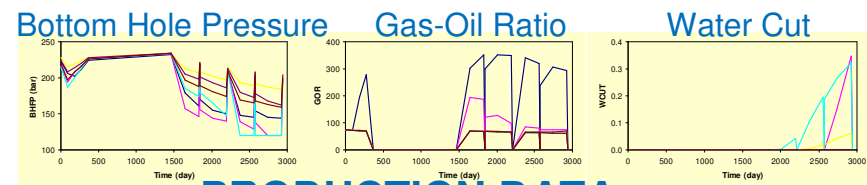
INVERSE

Time 1

Time 2



4D SEISMIC DATA :  
impedance maps



PRODUCTION DATA



# Méthodes d'optimisation

- **Optimisation "classique" (SQP)**
  - Code SQP quasi Newton avec contraintes linéaires et non linéaires
    - optimisation non linéaire sous contraintes (local)*
- **Optimisation à base de modèles approchés**
  - DFO: *derivative free optimization* (Powell, Toint)  
Région de confiance + modèles approchés
    - optimisation locale/globale sans dérivées avec contraintes*
  - DACE: *surrogate optimization* à base de krigeage
    - optimisation globale sans dérivées*
- **Algorithmes évolutionnaires**
  - optimisation globale sans/avec dérivées,*
  - optimisation multi-objectifs*



# Statistique

- Propagation des incertitudes
- Estimation de paramètres (incertitudes sur les entrées tenant compte des données)
- Analyse de sensibilités
- Planification d'expériences
- Surfaces de réponses

# Postes en mathématiques appliquées pour les géosciences

- Stages M1, M2
  - Thèses
  - Postdocs
  - CDD
  - CDI (docteurs)
- 
- Deux directions principalement concernées à l'IFP
    - Ingénierie de réservoir
    - Mathématiques Appliquées et Informatique Scientifique



# Compétences recherchées

- Modélisation
- Formulation – couplages
- Schémas numériques
  
- Solveurs linéaires
- Calcul Haute Performance
- Conception logicielle
- Génie logiciel
  
- Géométrie – maillages
  
- Optimisation
- Statistique