

Simulations de réservoirs dans l'industrie pétrolière

Pierre SAMIER – TOTAL EP PAU

**Journée MoMas – Université de PAU et des Pays de l'Adour
9 octobre 2006**

PLAN

- La simulation de réservoir – aspects numériques
- La simulation de réservoir – usage dans l'industrie pétrolière
- Thèmes de recherche en simulation de réservoir
- Conclusion



Qu'est-ce qu'un simulateur de réservoir ?

BUT: Reproduire le comportement et l'évolution des réservoirs pétroliers

Composants:

- Un modèle physique et mathématique pour représenter les écoulements multi-phasiques dans un réservoir (roche poreuse), équations (conservation de la masse, loi de Darcy, thermodynamique, ..), conditions aux limites et conditions initiales.
- Des techniques numériques pour résoudre les équations dans le temps (volumes finis, itérations de Newton)
- Un logiciel, manuels et le pré et post-traitement associé



Modèle mathématique

- Equation de continuité

équation de conservation de la masse pour le constituant j

$$\iint_{\Sigma} \rho \vec{V} \cdot d\vec{n} = \iiint_{V} \frac{\partial \rho}{\partial t}$$



$$\frac{\partial m_j}{\partial t} = - \sum_{l \in F_j} \left(\text{div}(c_{j,l} \rho_l \vec{V}_l) + q_l \right)$$

- Loi de Darcy

relie la vitesse de la phase l (fluid velocity= rate) au gradient de pression

$$\vec{V}_l = - \underline{\underline{K}} \frac{kr_l}{\mu_l} \left(\vec{\nabla} P_l - \rho_l g \vec{z} \right)$$

$$\Lambda_l = \underline{\underline{K}} \frac{kr_l}{\mu_l}$$

- Conditions aux limites et initiales *Mobilité de la phase l*



Le modèle numérique

- ◆ Inconnues: S_l saturations et P_l pressions (phase I)

$$m_j = \phi \sum_{l \in F_j} c_{j,l} \rho_l S_l$$

- ◆ Coefficients: fonctions dépendant des inconnues

$$\phi(P), \quad c_{j,l}(P), \quad \rho_l(P), \quad kr_l(S)$$



Modèle NON LINEAIRE

$$m = m(\phi(P))$$

$$\Lambda = \Lambda(S_{n/w}, P_{n/w}); \quad kr(S); \quad \mu(P)$$

$$Pc = Pc(S_w)$$



Conditions aux limites

□ limites externes du réservoir:

- fermées: flux nuls entrant dans les mailles externes
- alimentées (aquifère): termes source q_w dans les mailles concernées ou conditions aux limites

□ puits:

- condition de Dirichlet: P_f imposée
- condition de Neumann: Q imposé
- relation pression-débit: $q = IP \text{ kr}/\mu (P - P_f)$

⇒ terme source dans les mailles où se trouvent les puits



Types de Simulateur

Différents types de simulateurs correspondant à différents modèles mathématiques:

- Equations de base pour eau, huile, gaz + propriétés fluides =f(P)
 - ✓ simulateur black-oil
- Equations de base par constituant + équations thermodynamiques
 - ✓ simulateur compositionnel
- Equations de base pour matrice et fissures + termes d'échange matrice-fissures
 - ✓ simulateur double milieu
- Equations de base + équation de conservation de l'énergie
 - ✓ simulateur thermique



Hypothèses du modèle BLACK-OIL

- ◆ Description simplifiée des fluides de gisement par 3 *pseudo*-constituants:
 - ✓ eau (e, = w water phase)
 - ✓ huile de stockage (h, ≠ o oil phase)
 - ✓ gaz surface (v, ≠ g gas phase)dont la composition ne varie pas au cours de la simulation
- ◆ **Modèle black-oil généralisé:**
 - **la phase gaz, dans le réservoir, contient aussi le constituant huile.**
 - utilisé pour représenter les **gaz à condensats**



Simulateur compositionnel

- ◆ Description des fluides de gisement par N *pseudo-constituants*:
 - ✓ C1, C2, C3, eau, C4, CO2, NO
- ◆ Equations d'état de chaque constituant
 - Penq – Robinson, RWK

$$PV = \frac{RT}{V-b} - \frac{A(w,T)}{V^2+2vb-b^2}$$



Modèle numérique

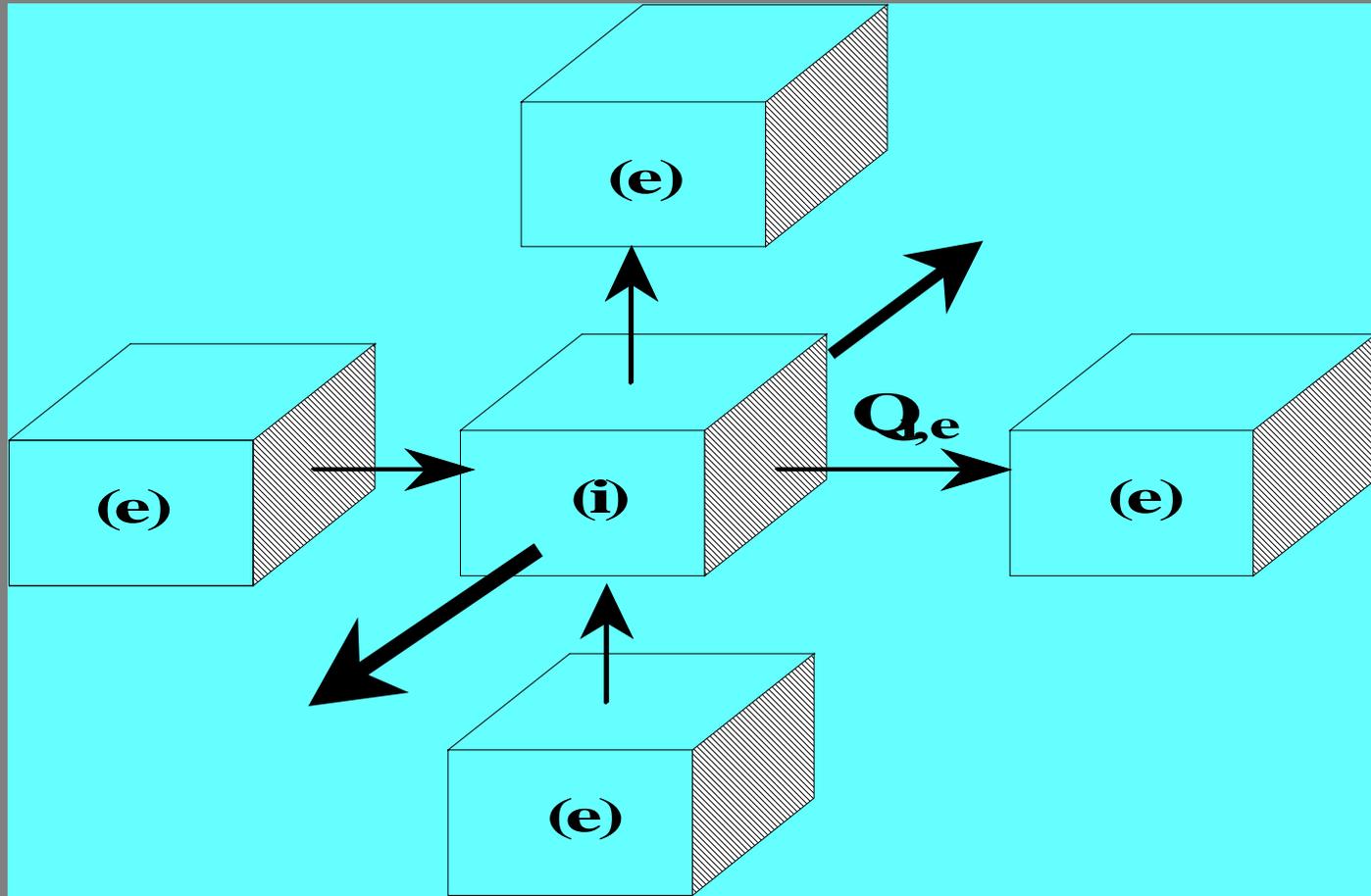


Schéma à 7 points avec des NNC



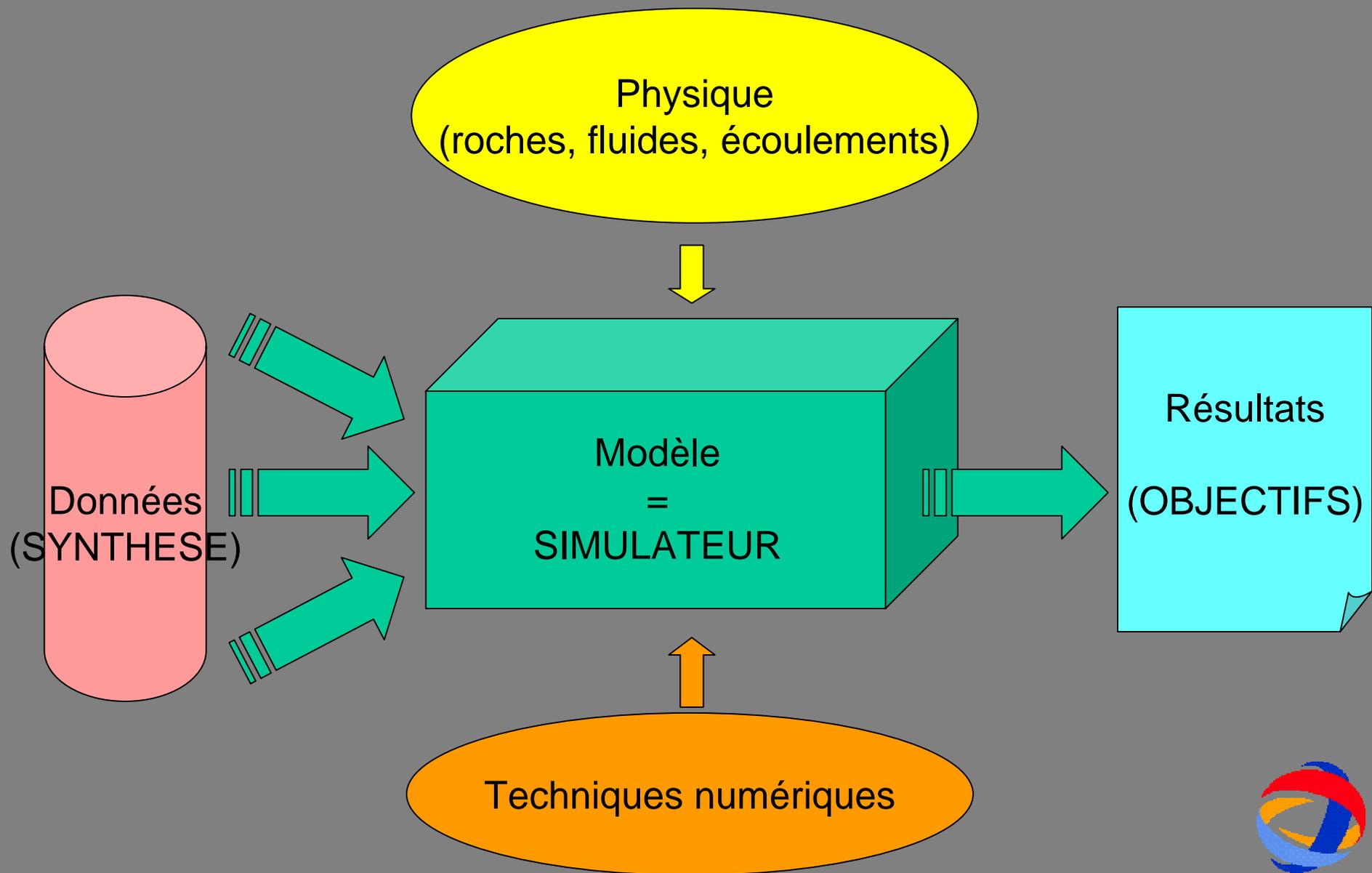
Schémas 9 – 11 – 27 points

Si on tient compte des flux échangés avec les mailles dans toutes les directions (y.c. «en diagonale»), on a:

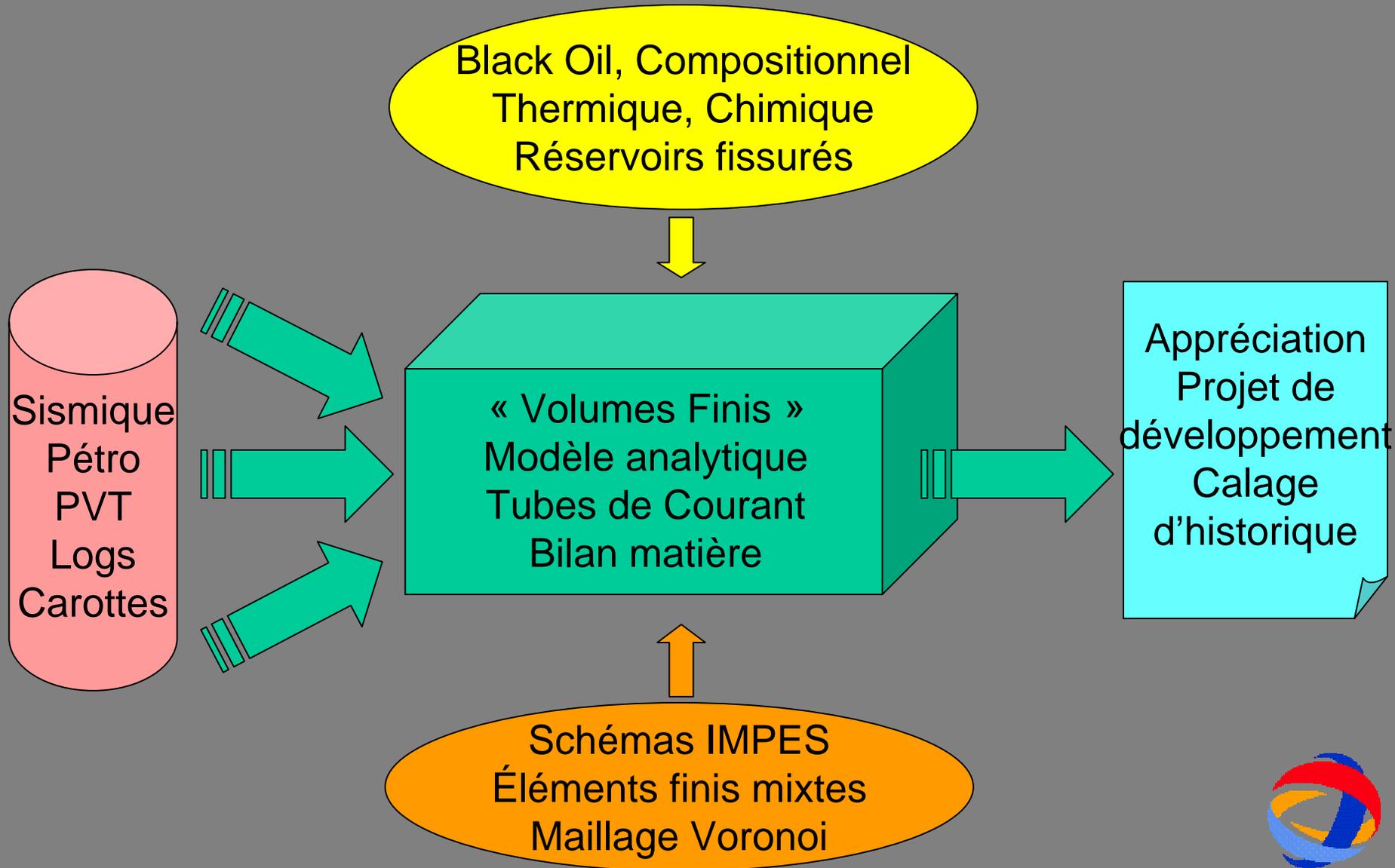
- un schéma à 9 points en 2D
- un schéma à 11 ou 27 points en 3D
 - ➔ indispensable pour tenir compte des tenseurs de perméabilité non diagonaux
 - ➔ plus coûteux en temps de calcul



Simulation de Réservoir



Exemples



PLAN

- La simulation de réservoir – aspects numériques
- **La simulation de réservoir – usage dans l'industrie pétrolière**
- Thèmes de recherche en simulation de réservoir
- Conclusion



Pourquoi utiliser la simulation numérique ?

Usage:

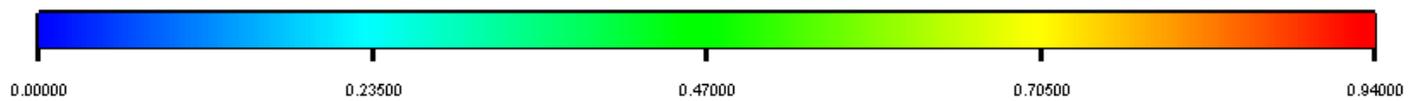
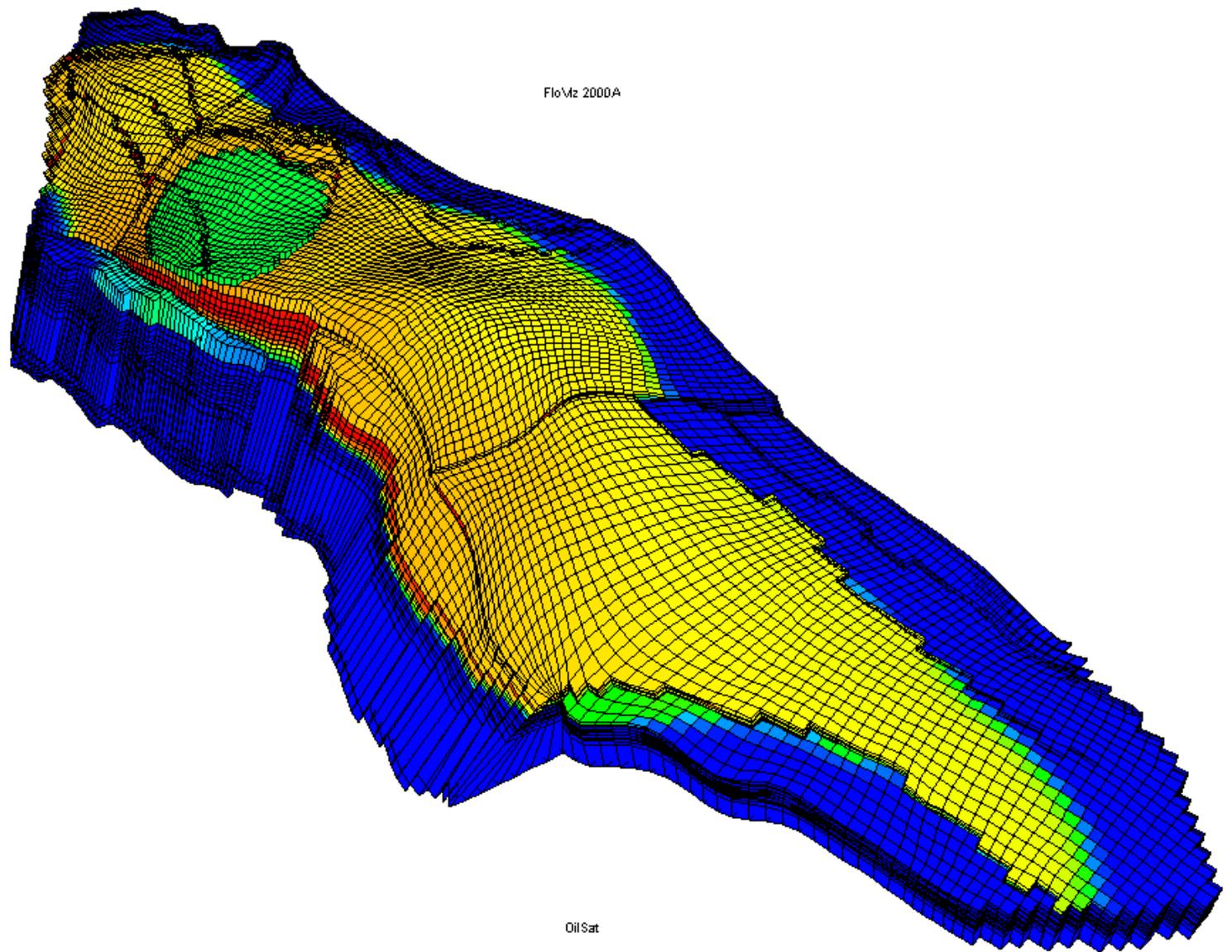
- pour un projet de développement: nouveau champ
- durant la production
- **Outil d'intégration (collecte des données et synthèse)**
- **Outil d'interprétation (caractérisation réservoir)**
- **Outil de prédiction (prévision)**
- **Outil de gestion et de monitoring des réservoirs**



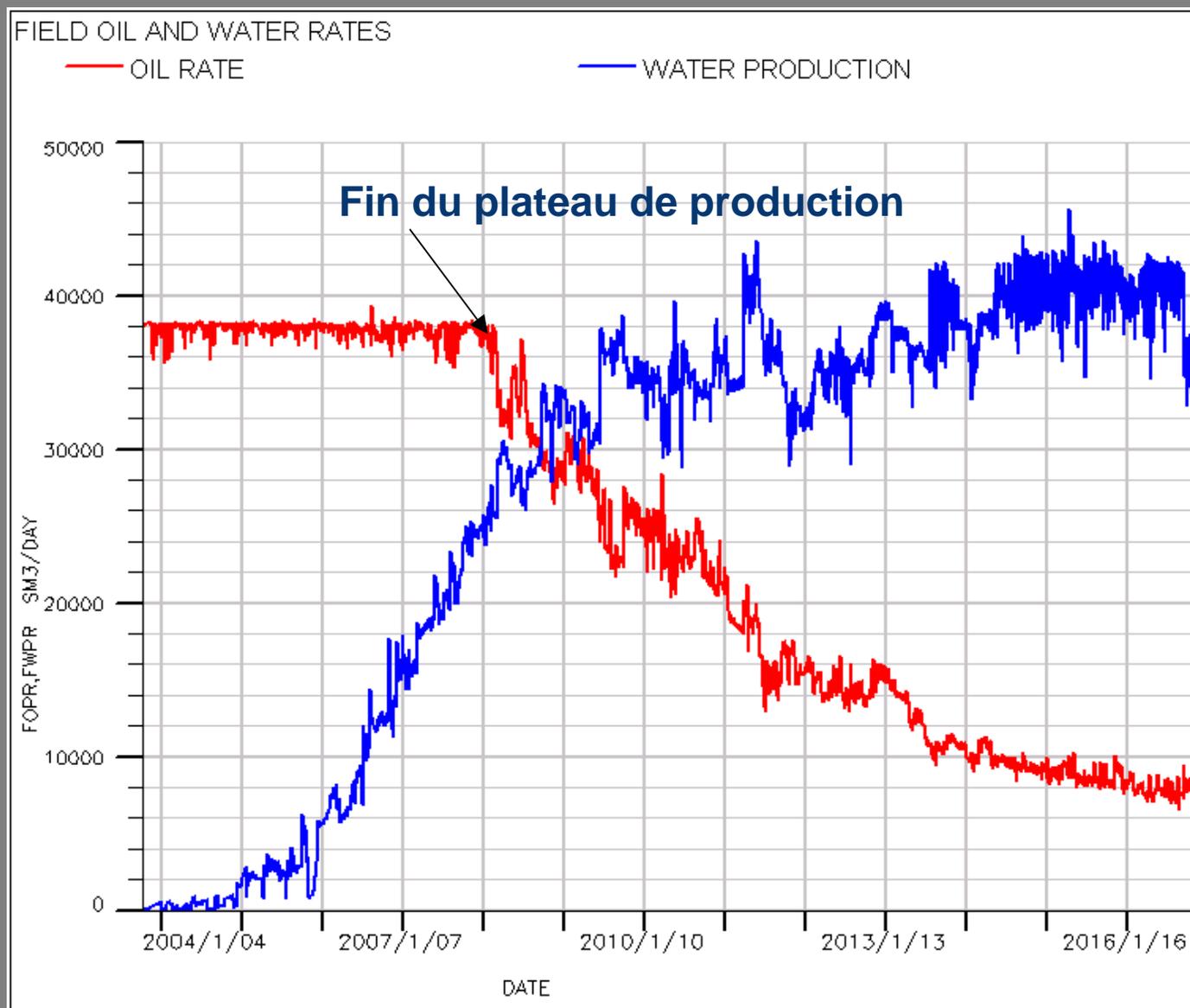
Usage 1: Cas d'un projet de développement

- Définir la meilleure stratégie d'exploitation
- Optimiser le nombre, la localisation et le type de puits
- Quantifier le risque du projet (analyse incertitudes)
- Définir des mesures complémentaires
- Fournir des profils de production aux économistes et aux architectes





Objectif principal des simulations: profils de production



USAGE 2: Cas d'un champ en production

- Meilleure compréhension et description du réservoir par le calage d'historique -> meilleure prédiction
- Optimiser la gestion en tenant compte de toutes les contraintes
- Justifier l'intérêt de forer des puits complémentaires, de modifier les complétions des puits et les installations de surface
- **Estimer les profils prévisionnels de production: débits, Water-cut, Gas-oil ratio, Pressions...**



USAGE 2: Cas d'un champ en production

Généralement deux phases:

- Etude de calage (durée: 1 mois à un an)

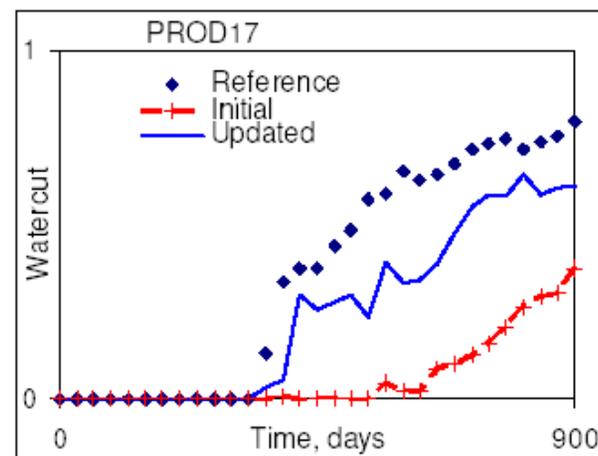
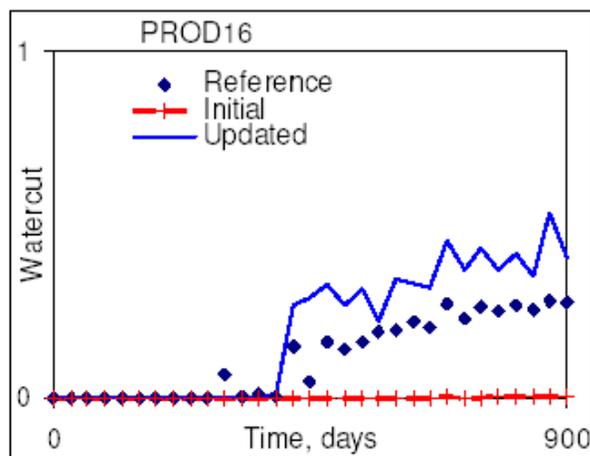
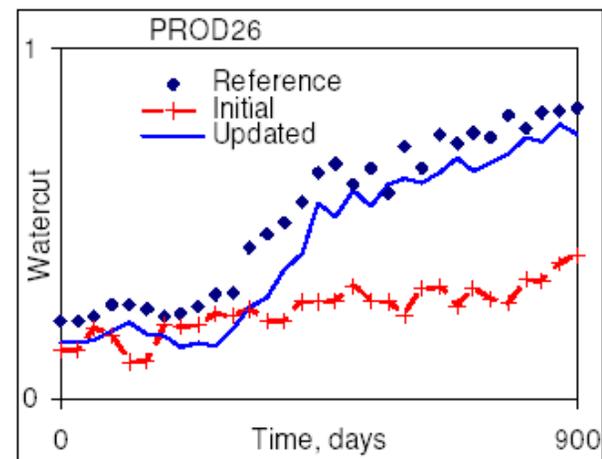
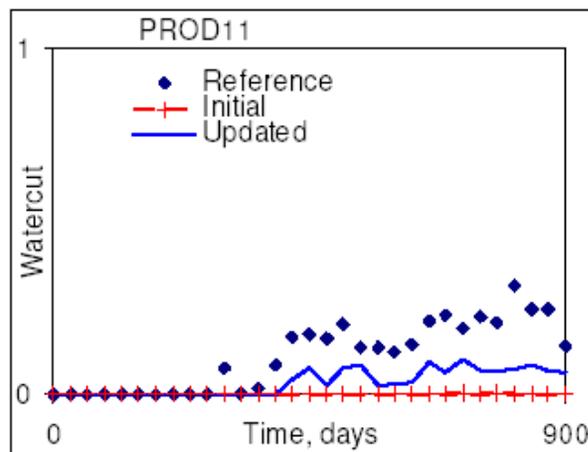
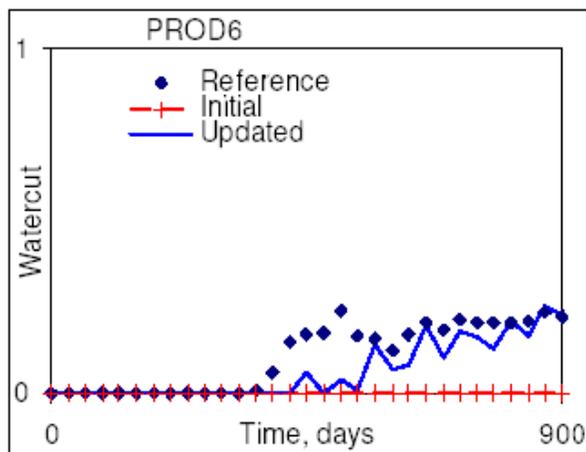
Ajuster le modèle réservoir dans le but de reproduire les mesures observées depuis le démarrage de la production (débits, pressions, percée d'eau et de gaz aux puits ...).

- **Prévision**

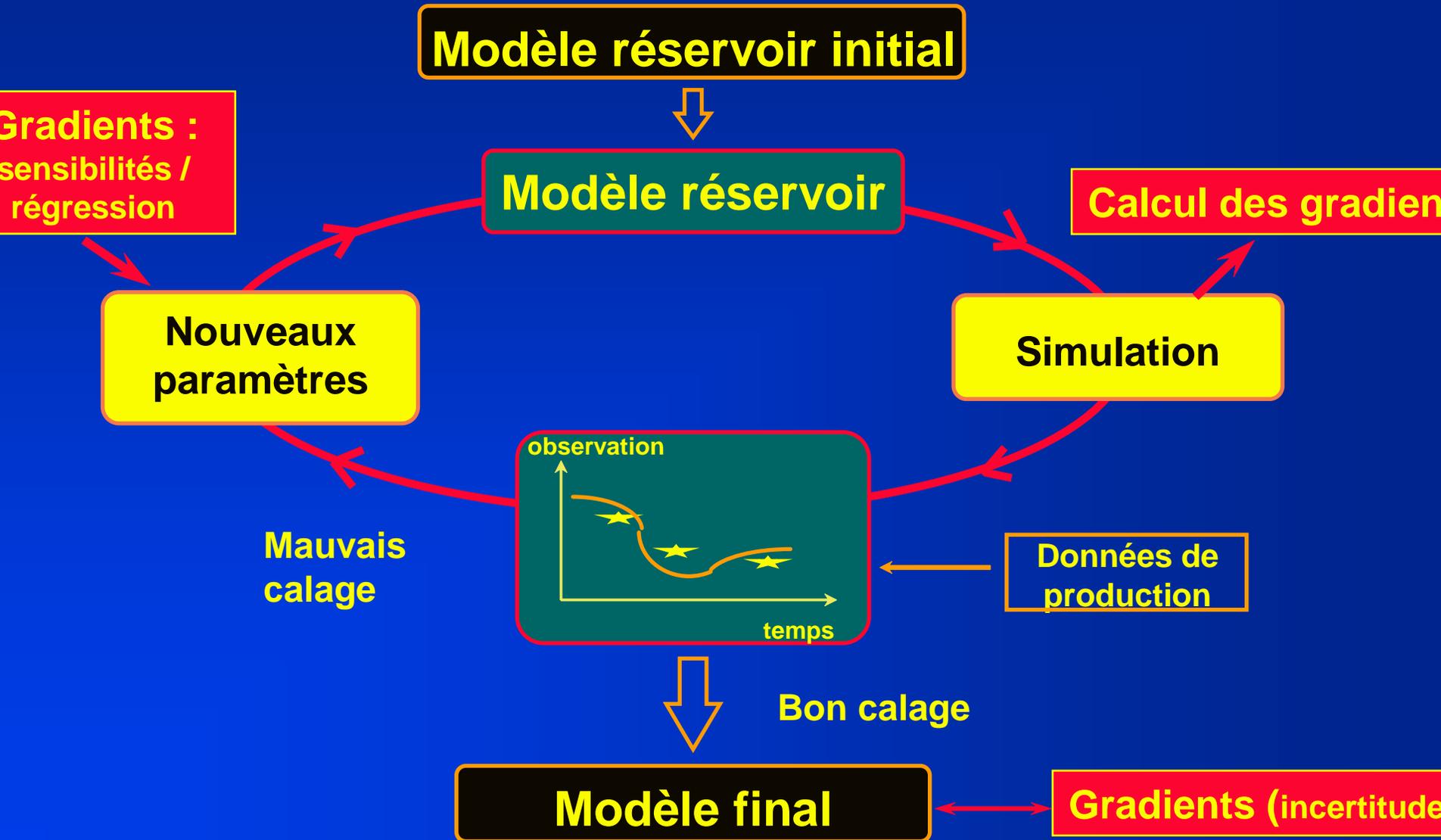
On espère qu'un modèle calé peut prédire de nouveaux scénarii, évaluer les effets de puits complémentaires et mettre jour les profils de production du schéma initial de développement.



Etude de calage: caler les percées



Logiciel d'aide au calage



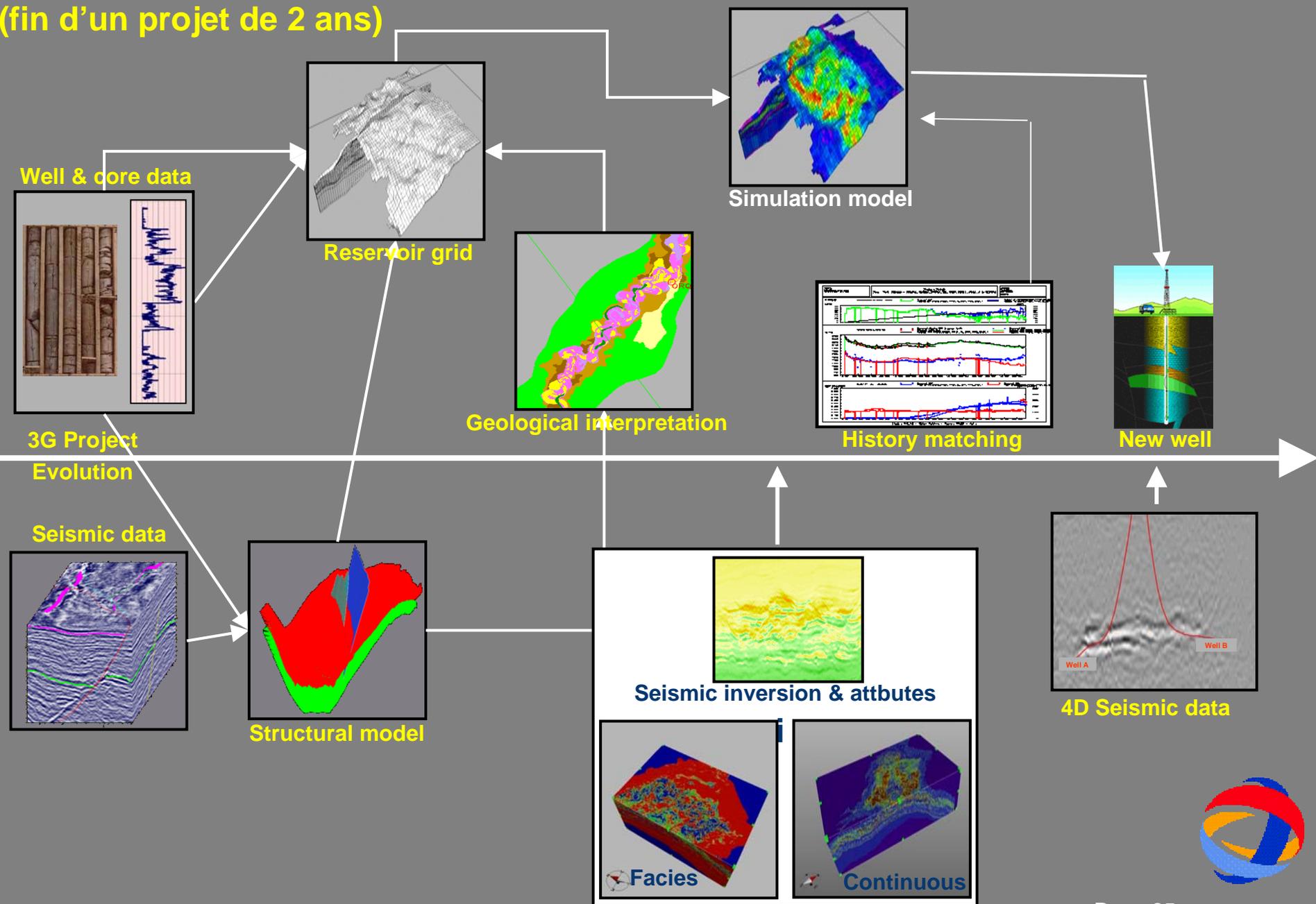
Domaines simulés ?

3 domaines principaux de simulations:

- **Full field**
 - Synthèse finale de toutes les études sub-surface réalisées en amont
 - Projet de développement
 - Champ en production
- **Sector model: étude phénoménologique**
 - Injection de gaz (miscible ou non miscible)
 - Well Patterns
- **Puits**
 - Optimisation du type de puits et de son architecture

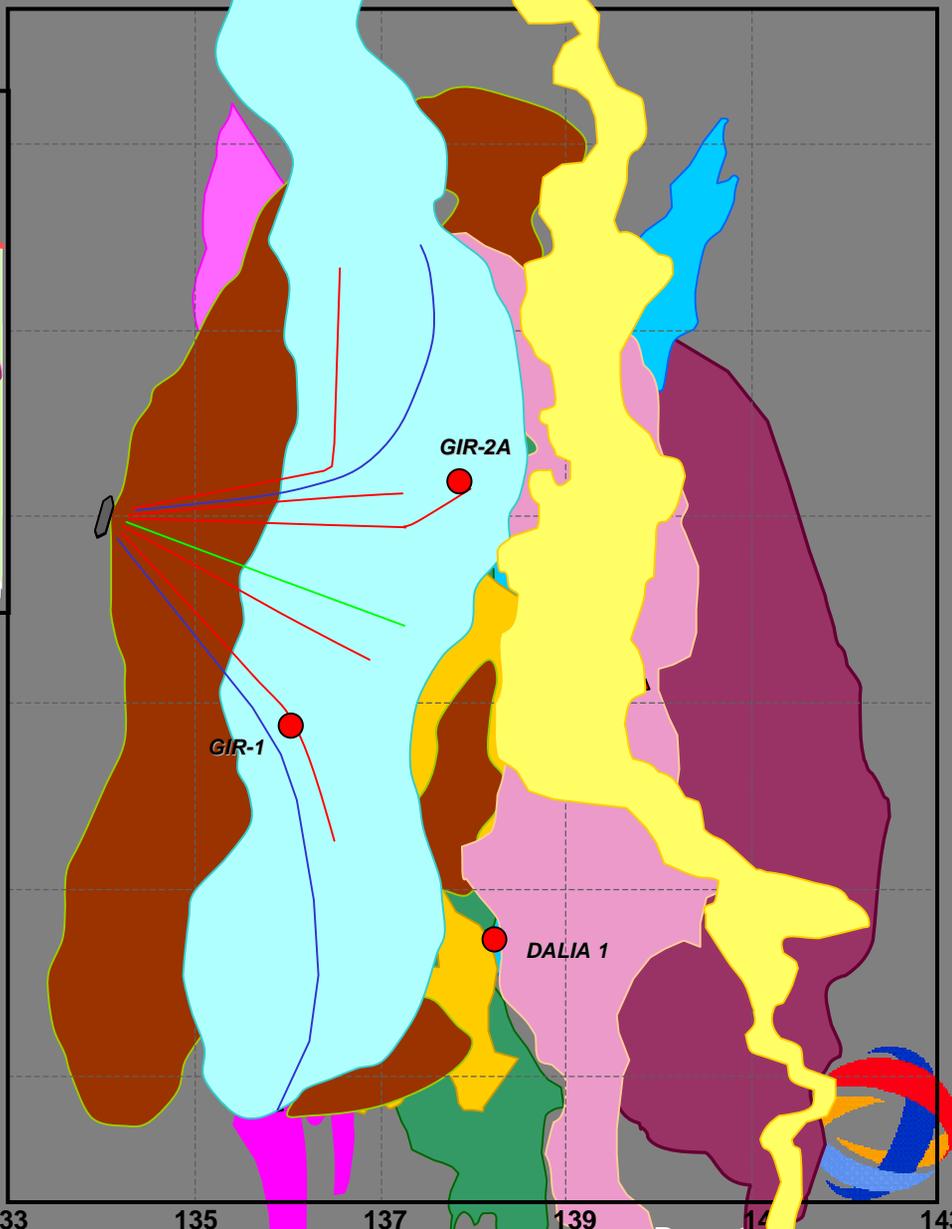
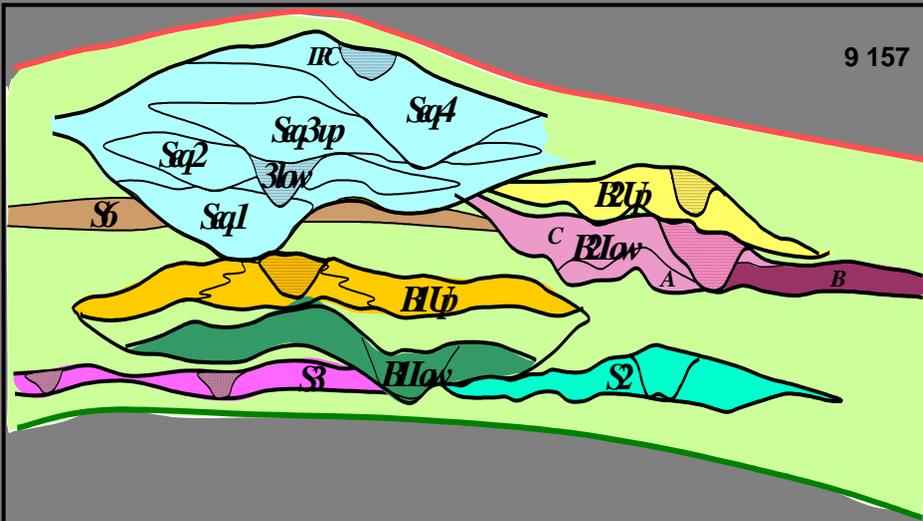


Reservoir simulation: étape ultime de synthèse des études 3G (fin d'un projet de 2 ans)



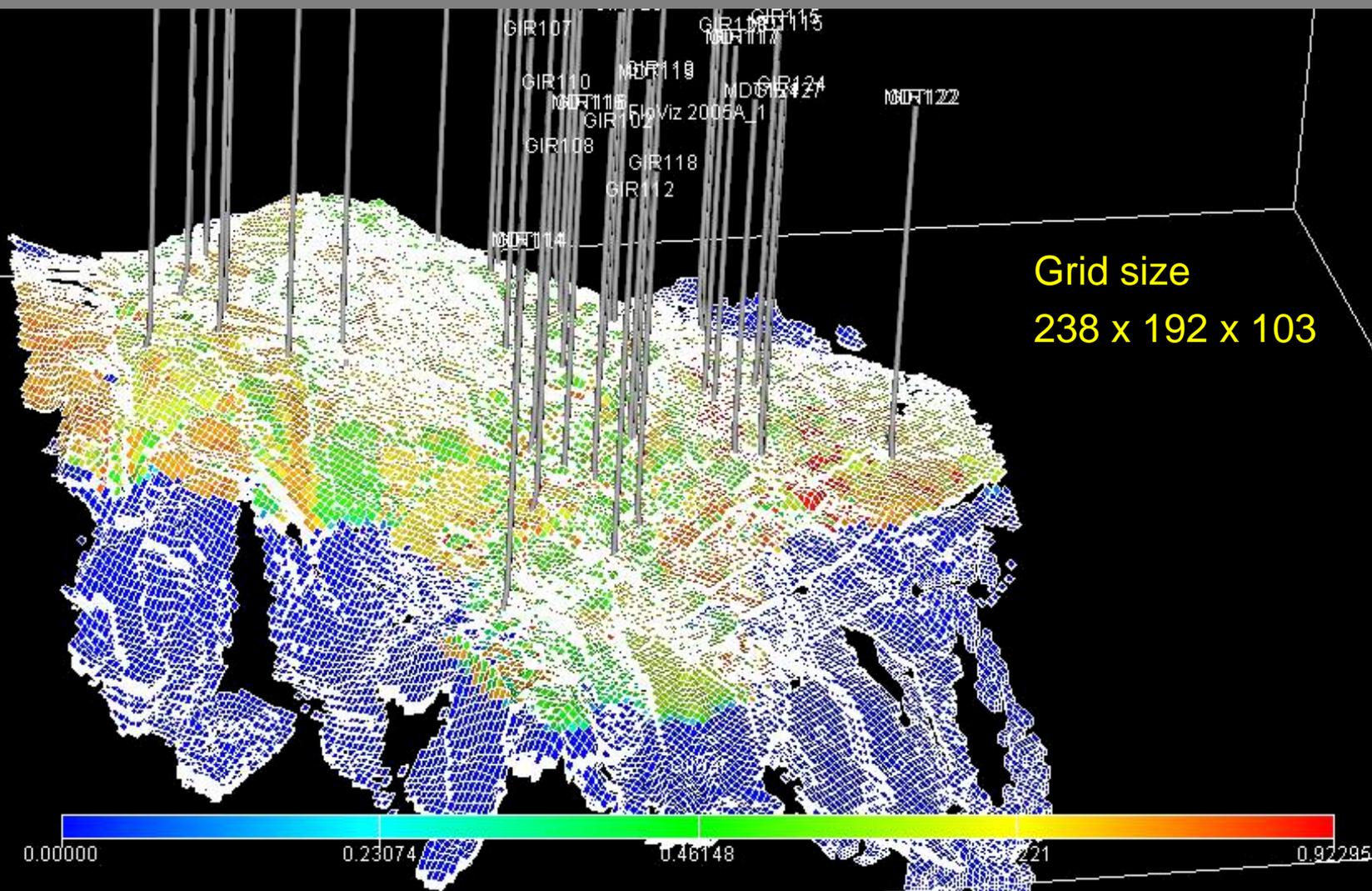
Vertical cross-section

Top view



- B3 Complex
- B2 Upper
- B2 Lower (East)
- B2 Lower (West)
- Sheet S6
- B1U Complex
- B1L Complex
- S3
- S2

GIRASSOL BLOC 17 – MODEL 6 – 5 million de mailles



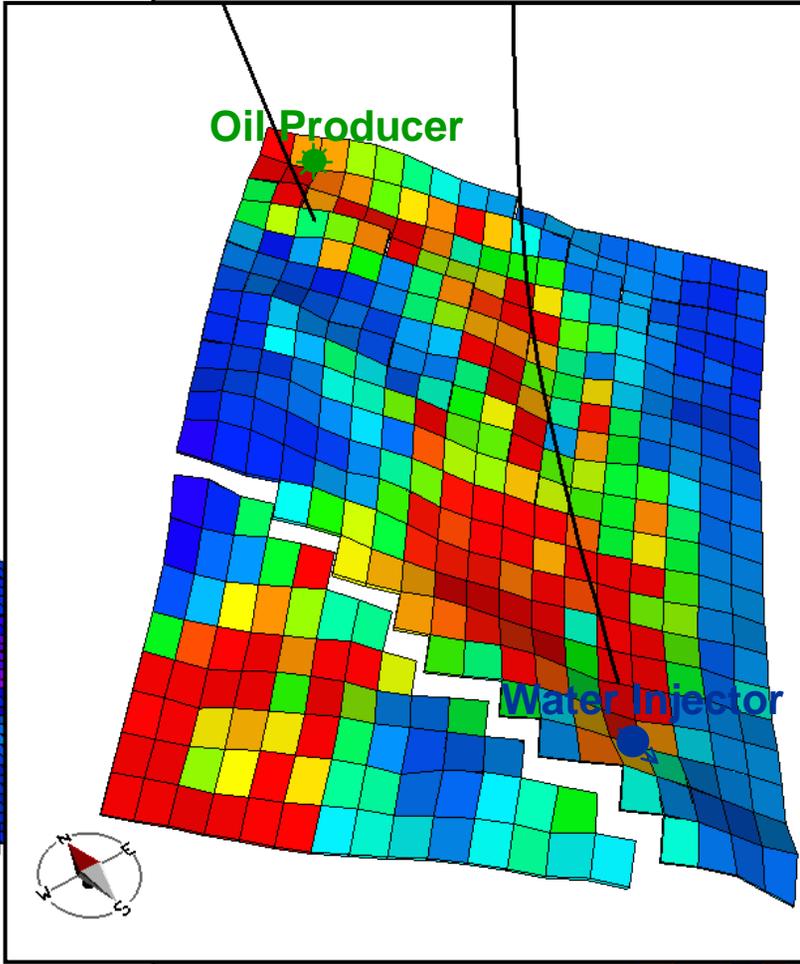
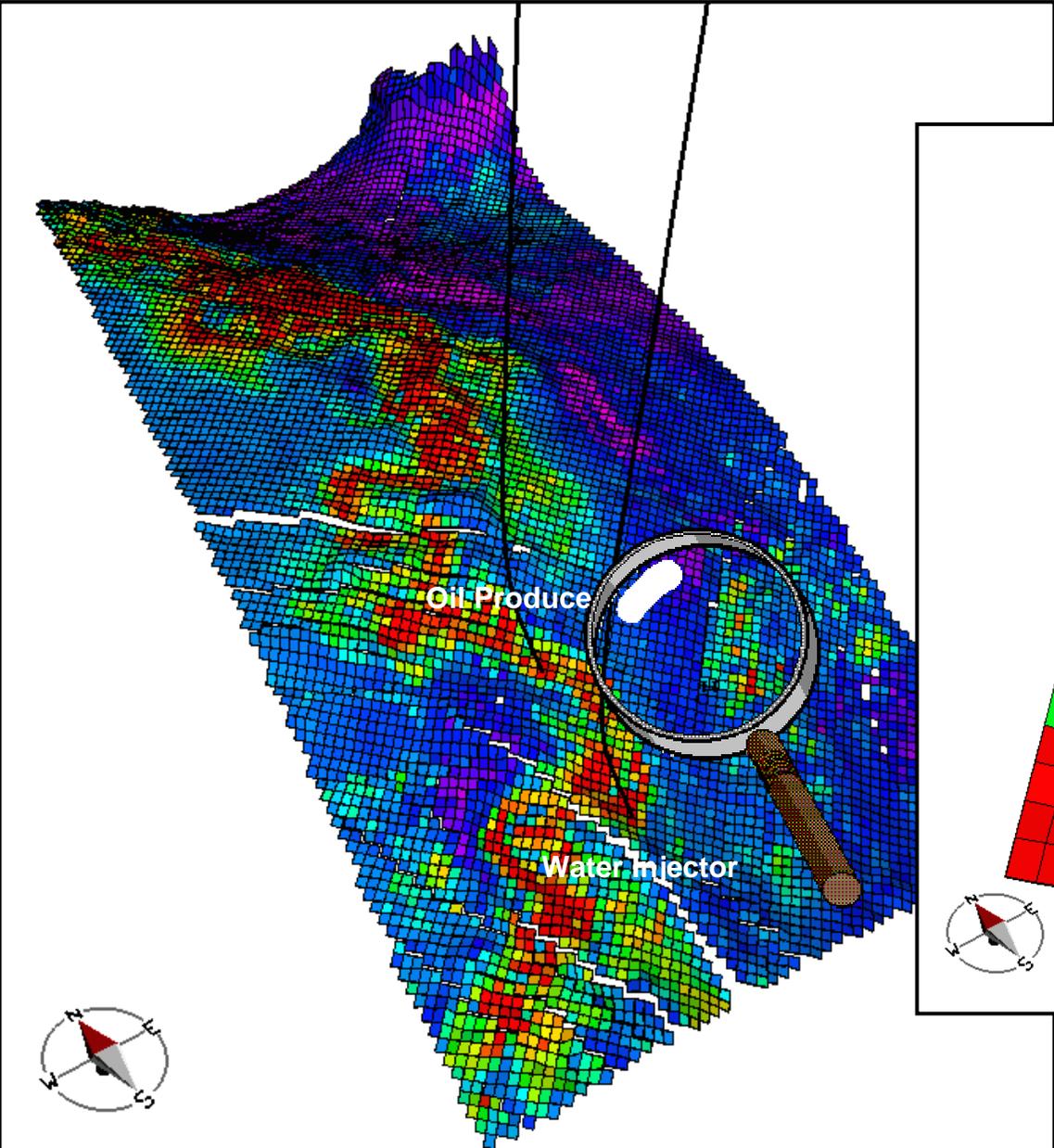
Domaines simulés ?

3 domaines principaux de simulations:

- **Full field**
 - Synthèse finale de toutes les études sub-surface en amont
 - Projet de développement
 - Champ en production
- **Sector model: étude phénoménologique**
 - Injection de gaz (miscible ou non miscible)
 - Well Patterns
- **Puits**
 - Optimisation du type de puits et de son architecture



Sector model simulation

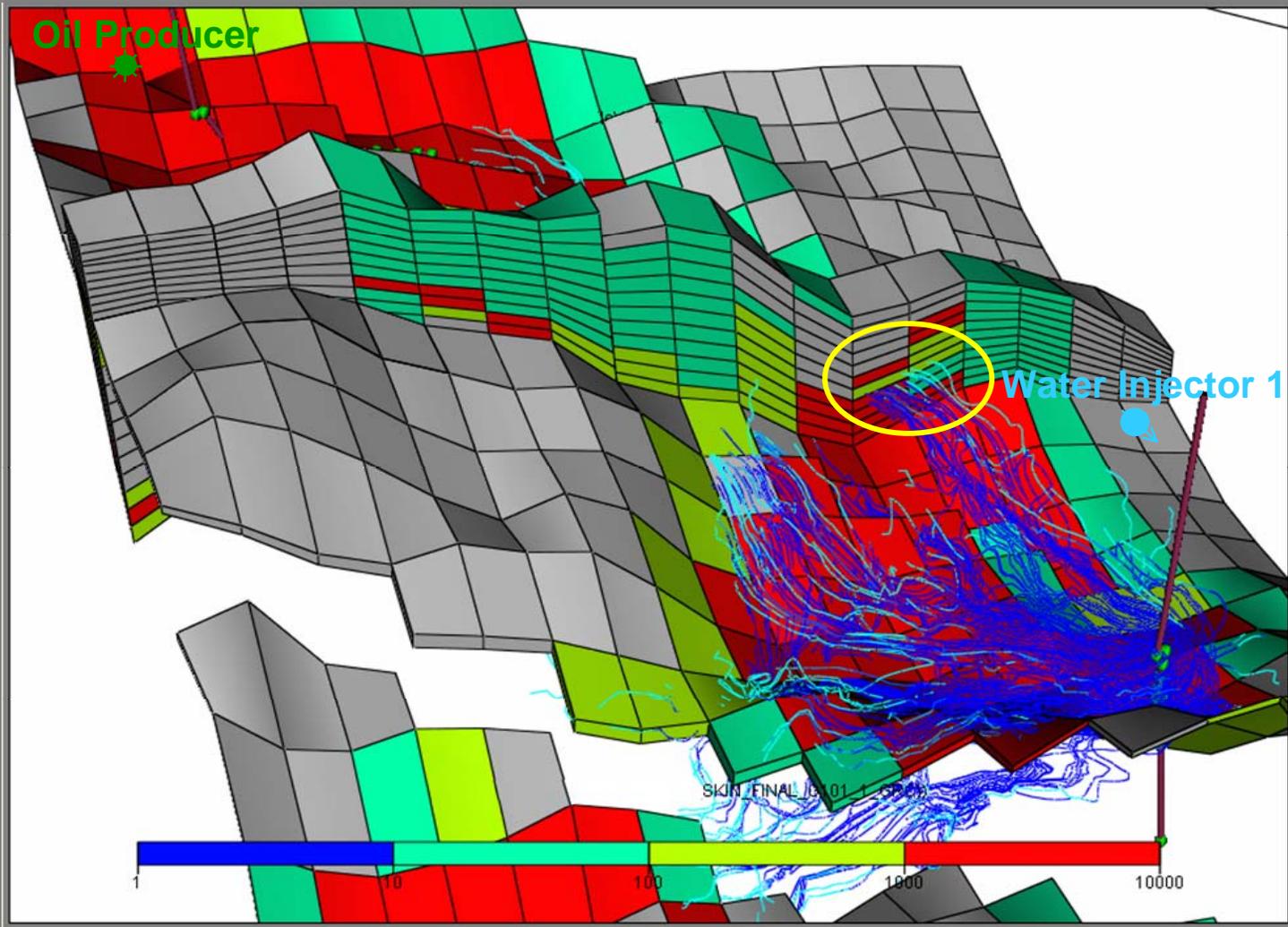


Autres types de simulation de réservoir

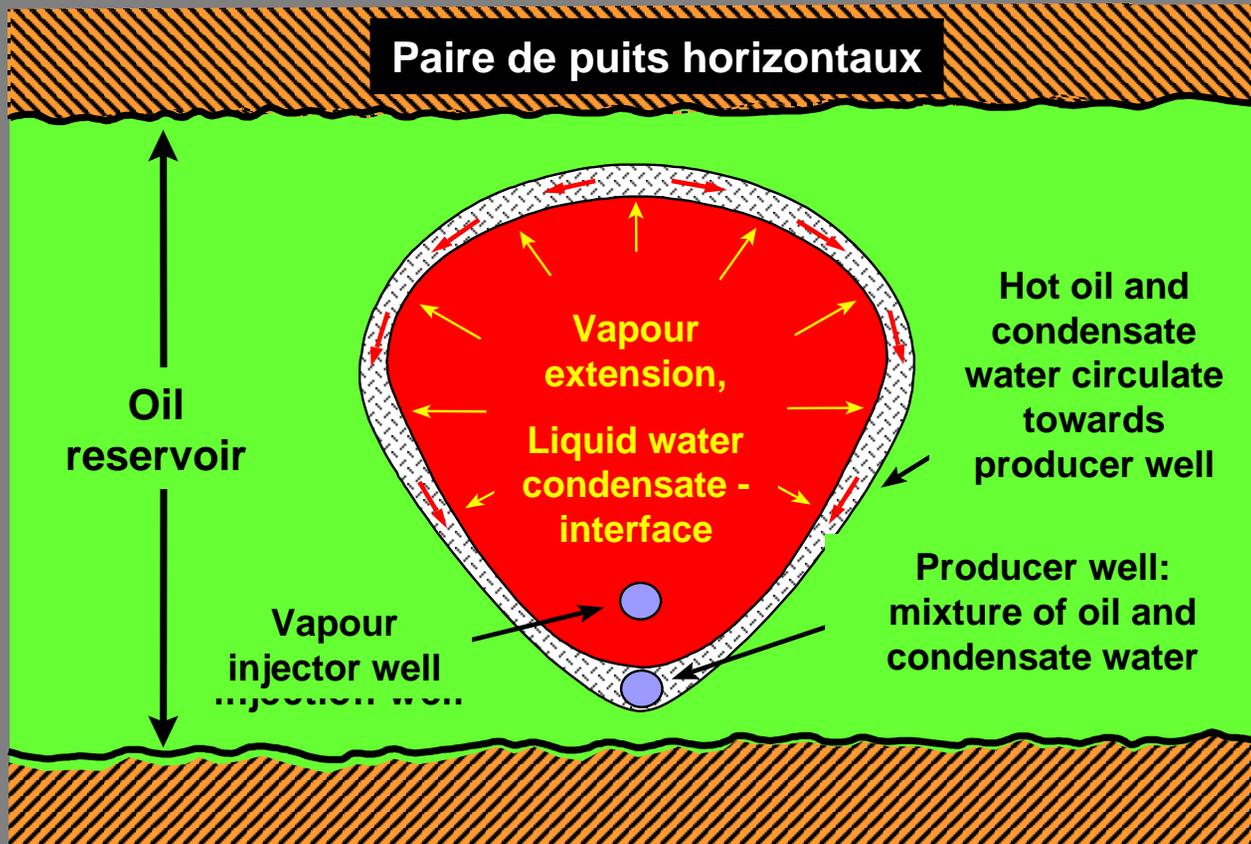
- Simulation lignes de courant
“Streamlines simulator”
- Simulation thermique



Streamlines simulation



Simulation thermique: technique SAGD



- Thermal fluxes
- 3-phase flows
- Phase change
- Hot liquid and vapour water circulating inside wells
- Possible chemical reactions (combustion, mass transfer...)

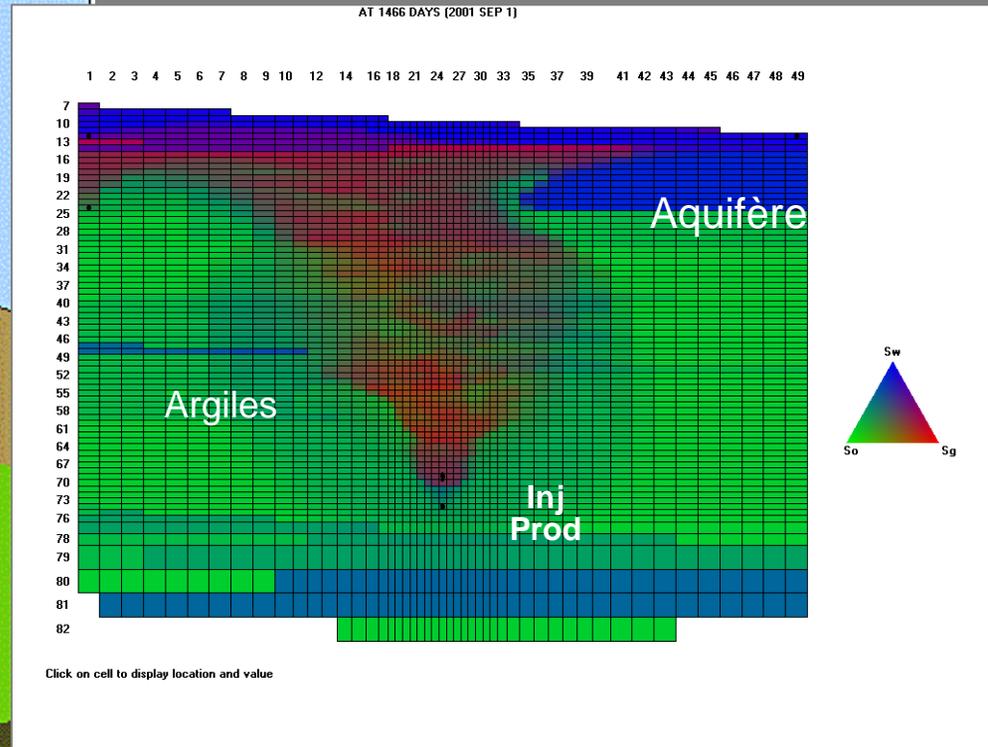
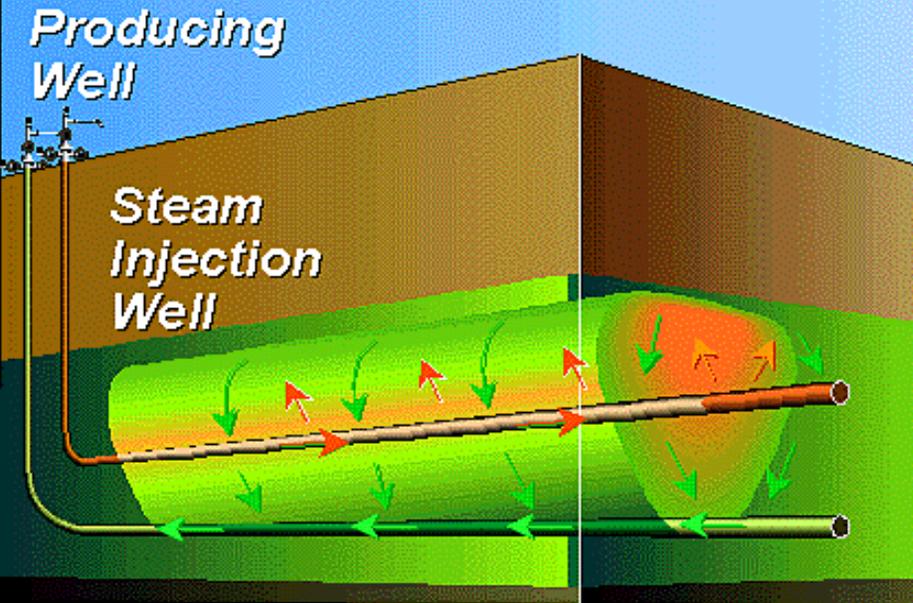


Thermal simulation

SAGD: Steam Assisted Gravity Drainage

Champ: Surmont (Canada)

Steam assisted gravity drainage



PLAN

- La simulation de réservoir – aspects numériques
- La simulation de réservoir – usage dans l'industrie pétrolière
- **Thèmes de recherche en simulation de réservoir**
- Conclusion

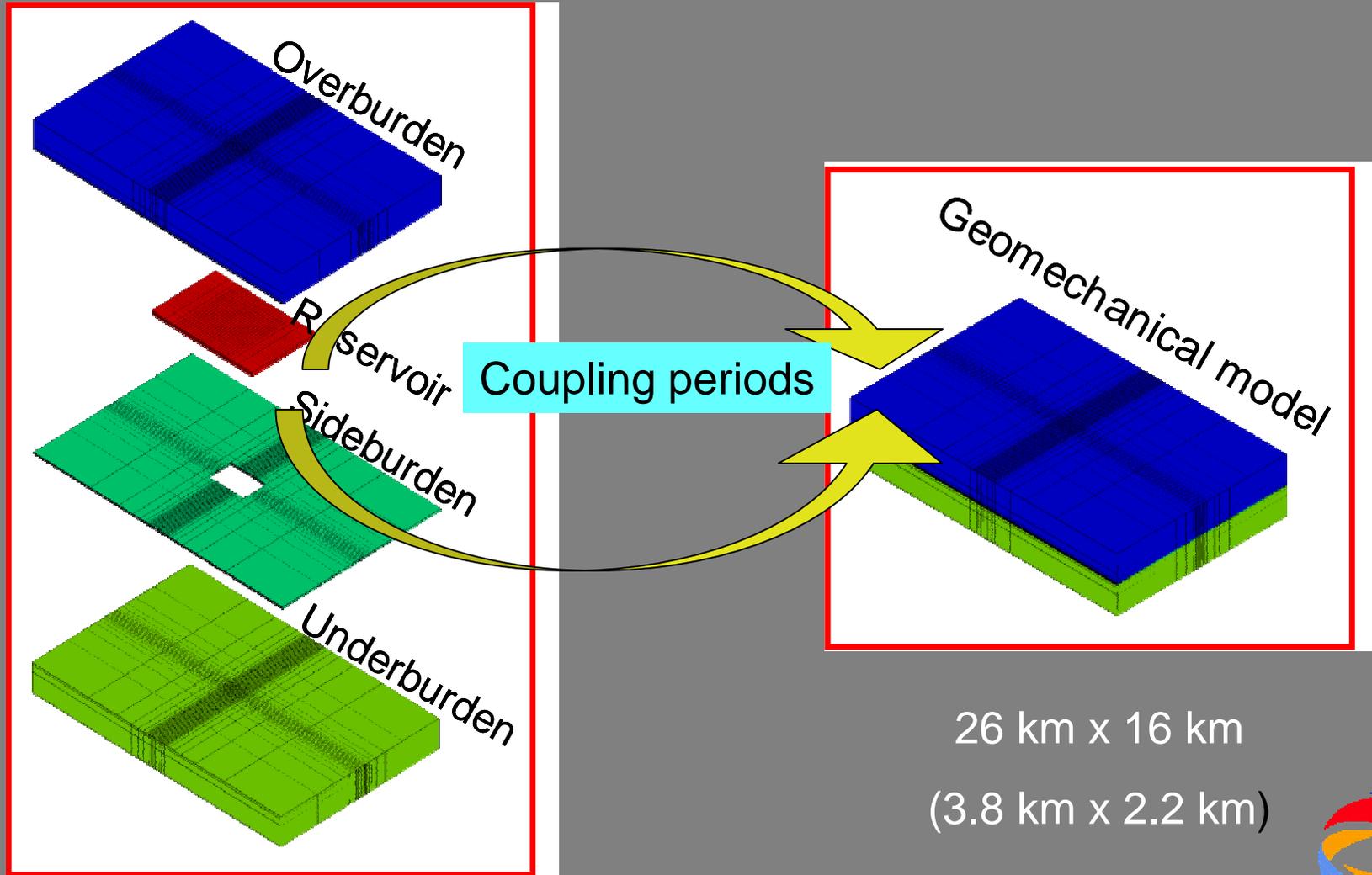


Thèmes de recherche en simulation de réservoir

- ❑ Modèles à plusieurs millions de mailles, réservoirs multiples, simulateur massivement parallèle (256 ou + processeurs)
- ❑ Ouverture: intégration du couplage avec d'autres simulateurs: géomécanique, écoulement du réseau de surface, procédés



Couplage Itératif explicite



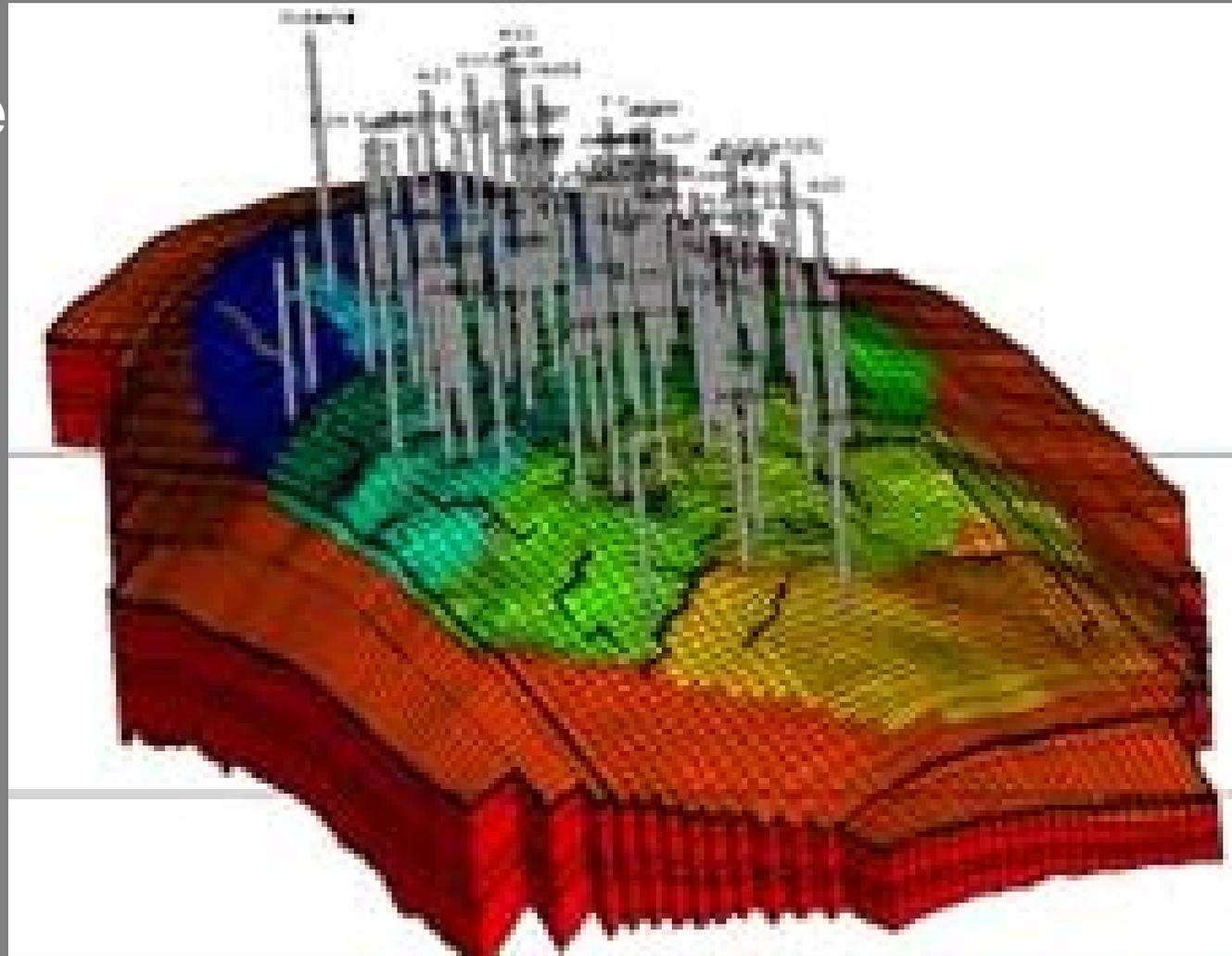
26 km x 16 km

(3.8 km x 2.2 km)

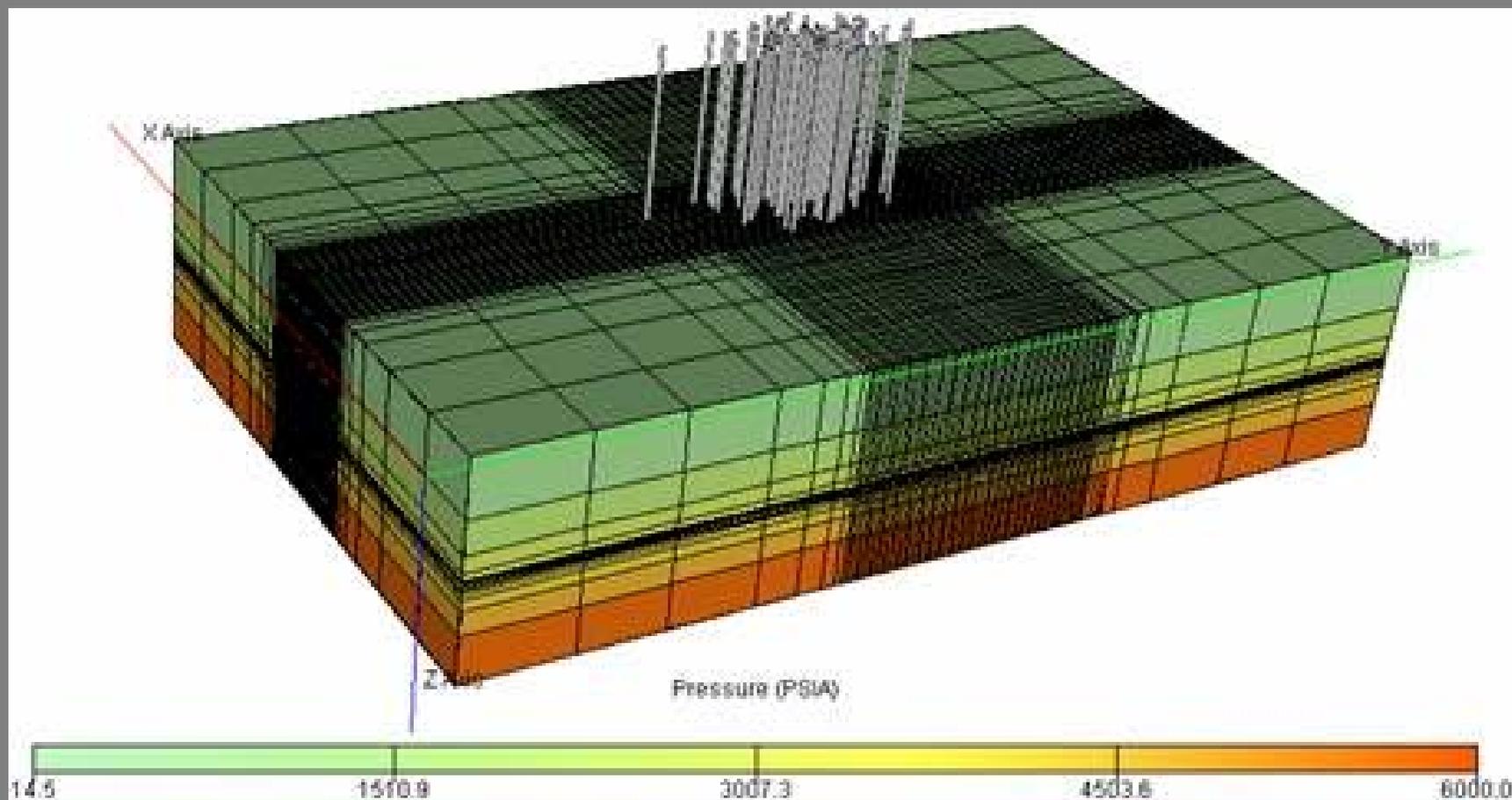


Champ de Valhall: zone réservoir

Compaction de
la craie
subsidence
97 puits
producteurs



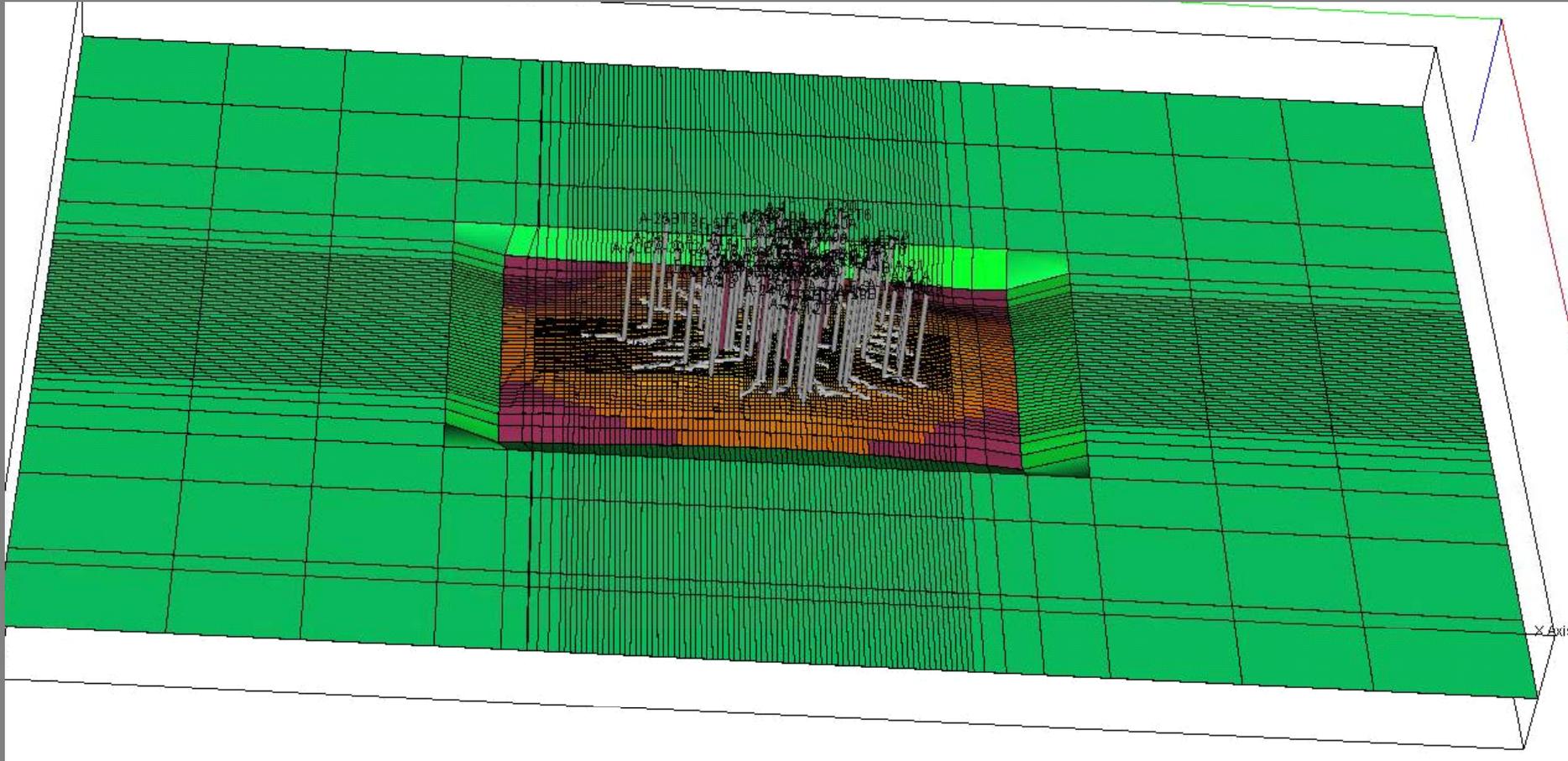
Maillage du champ jusqu'au fond marin



Overburden, sideburden and underburden included



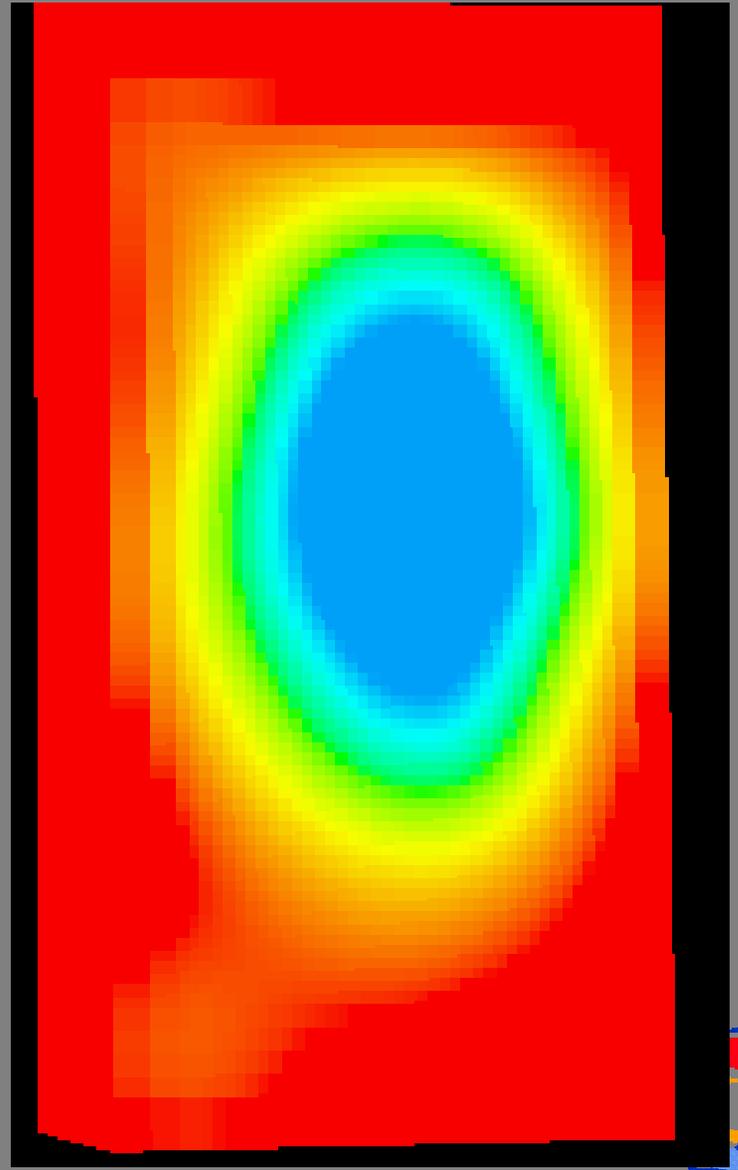
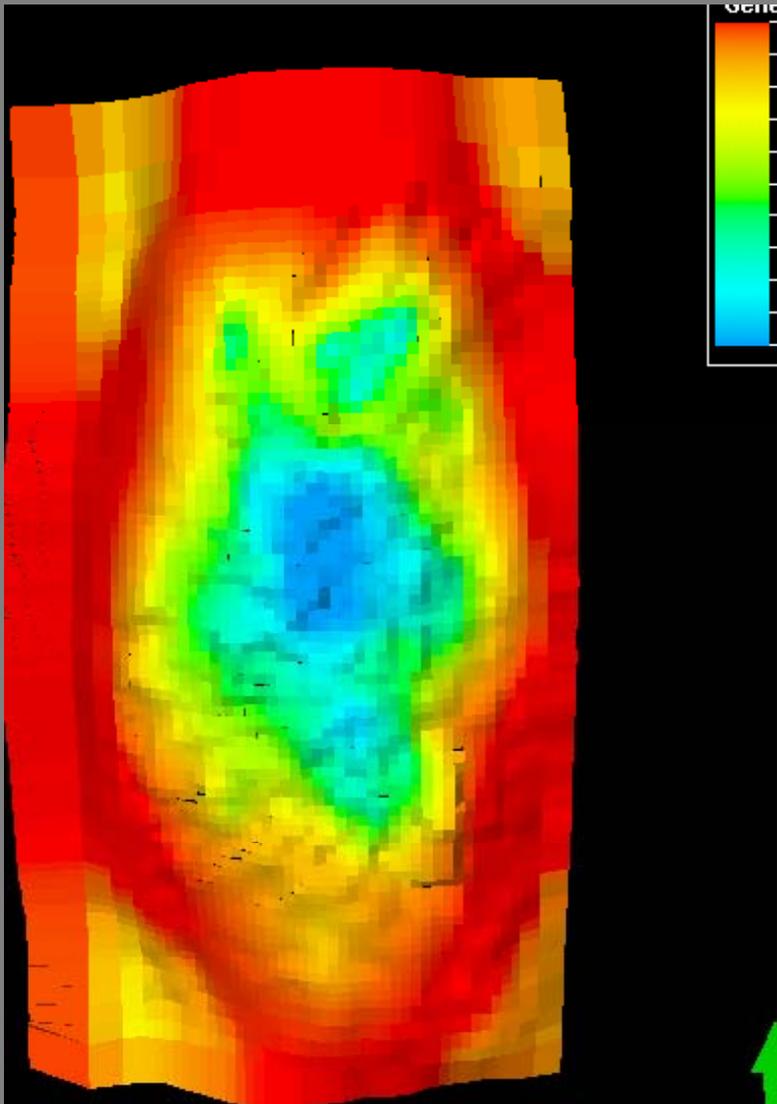
Couplage réservoir et géomécanique



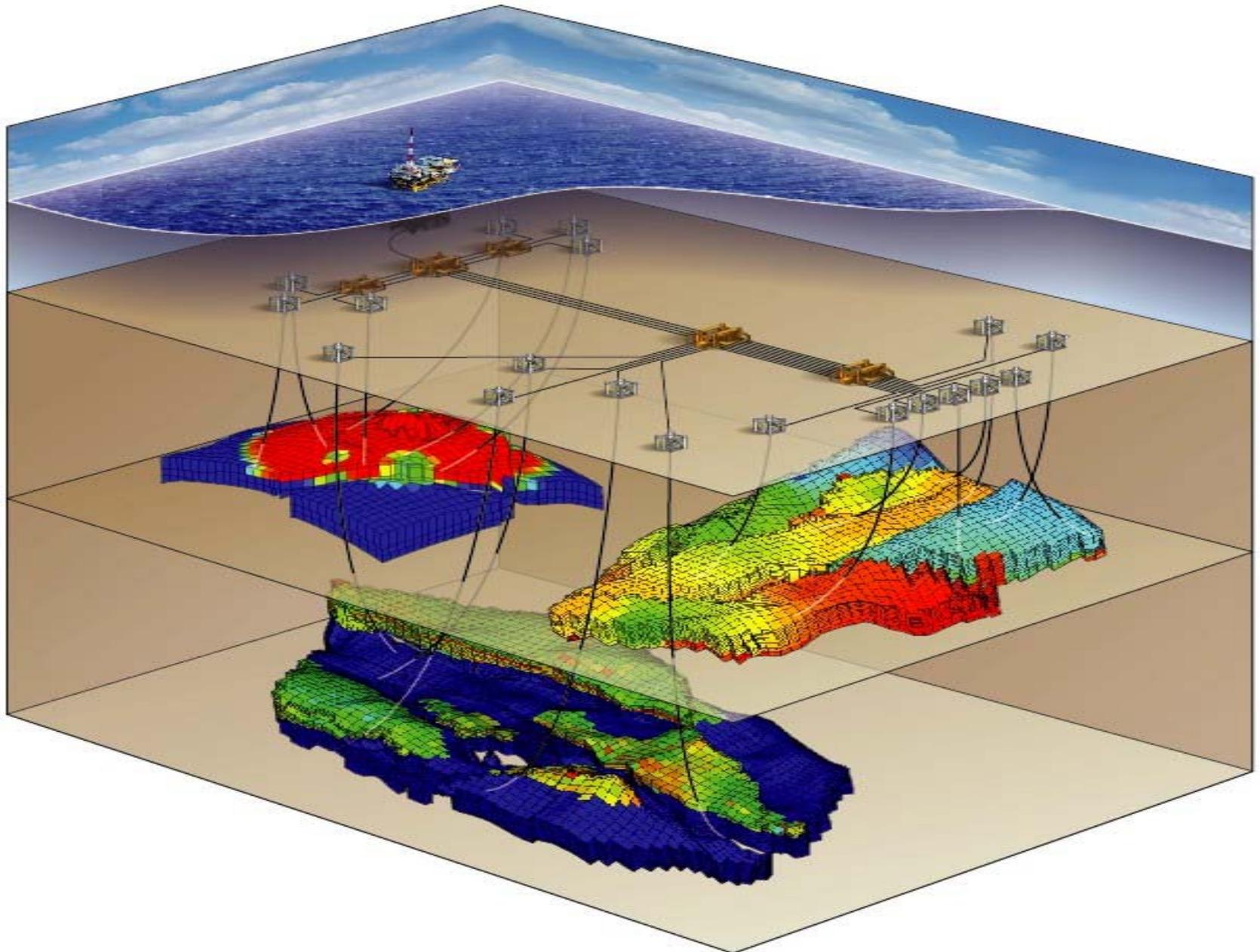
Coupe XY et liaison du réservoir avec le sideburden



Compaction maximale (6m) - subsidence (3m50)



Réservoirs multiples connectés au même réseau



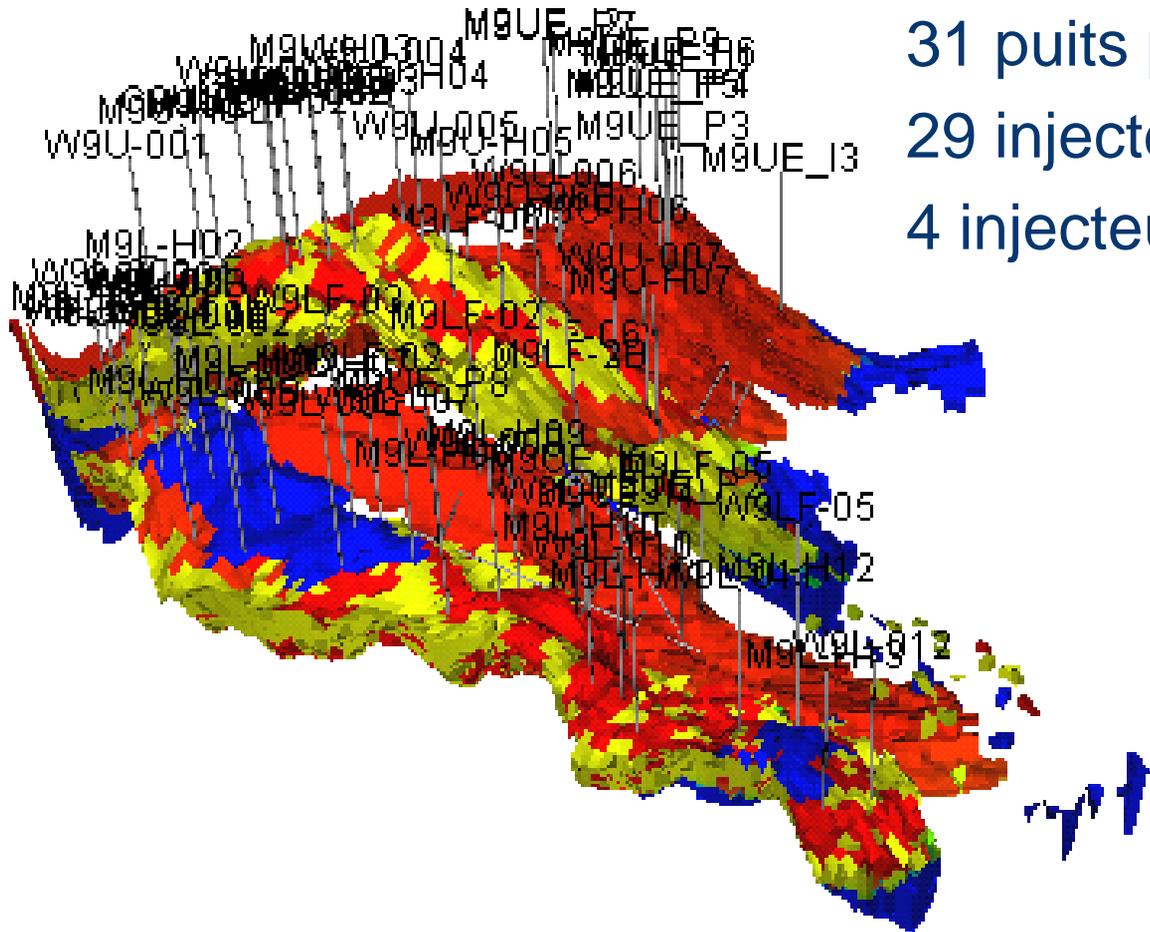
Champ de Dalia - Angola

4 réservoirs

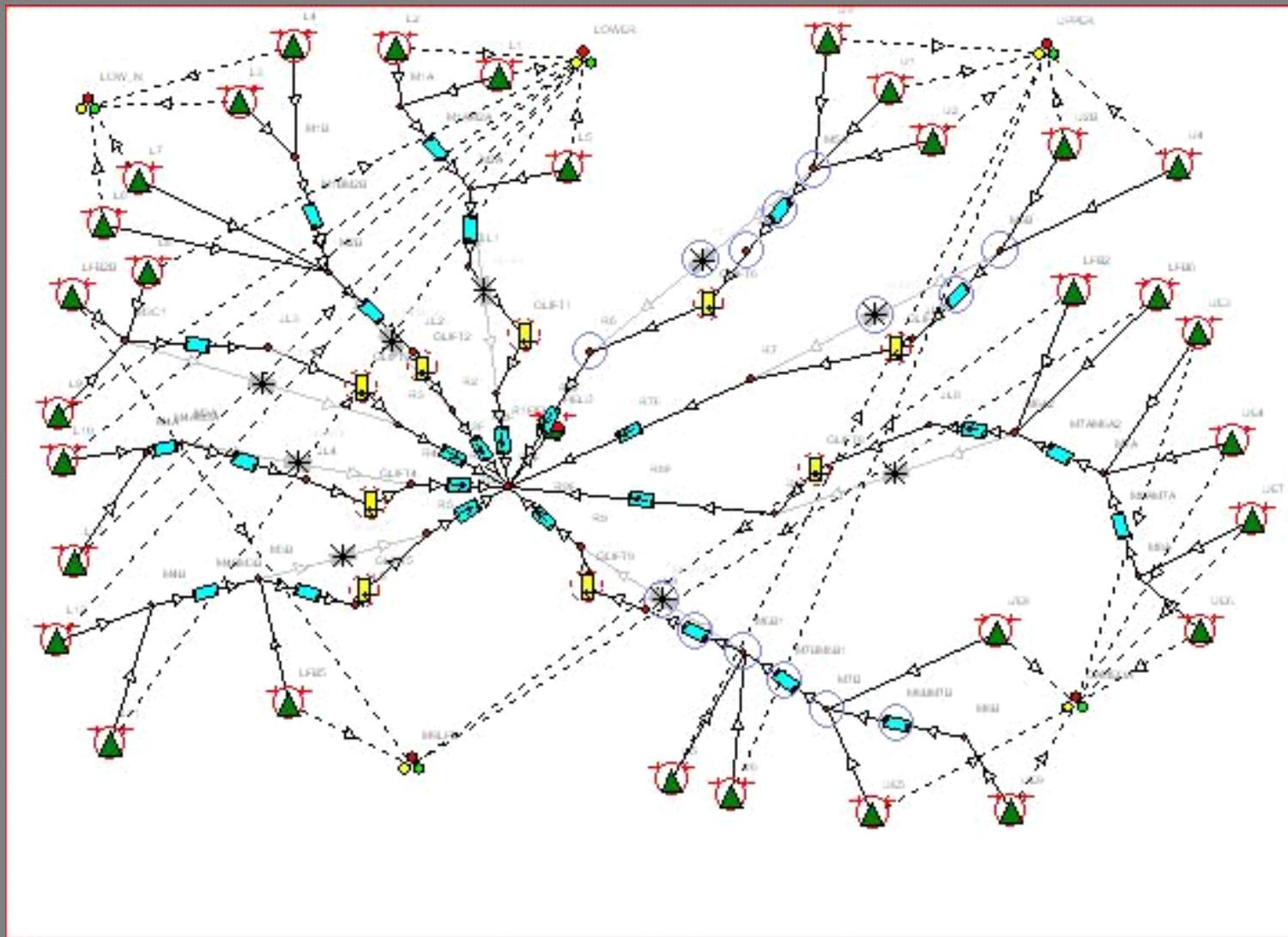
31 puits producteurs

29 injecteurs eau

4 injecteurs de gaz



Couplage avec le réseau de surface



Thèmes de recherche en simulation de réservoir

Maillages déstructurés

Simulation du stockage géologique de CO₂



Maillage hybride sur un secteur modèle

C. Bennis - IFP

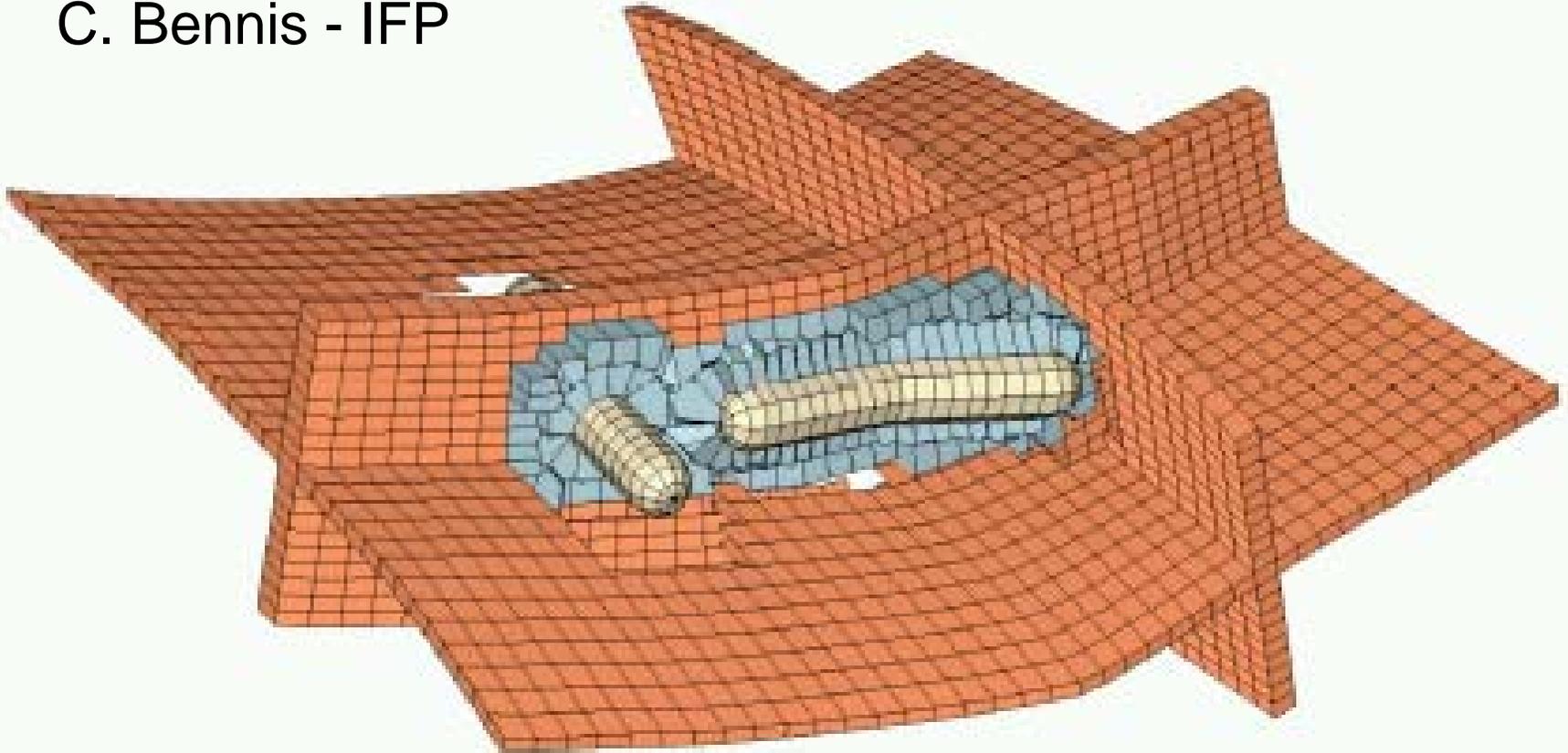


Figure 7: Hybrid mesh with two wells.



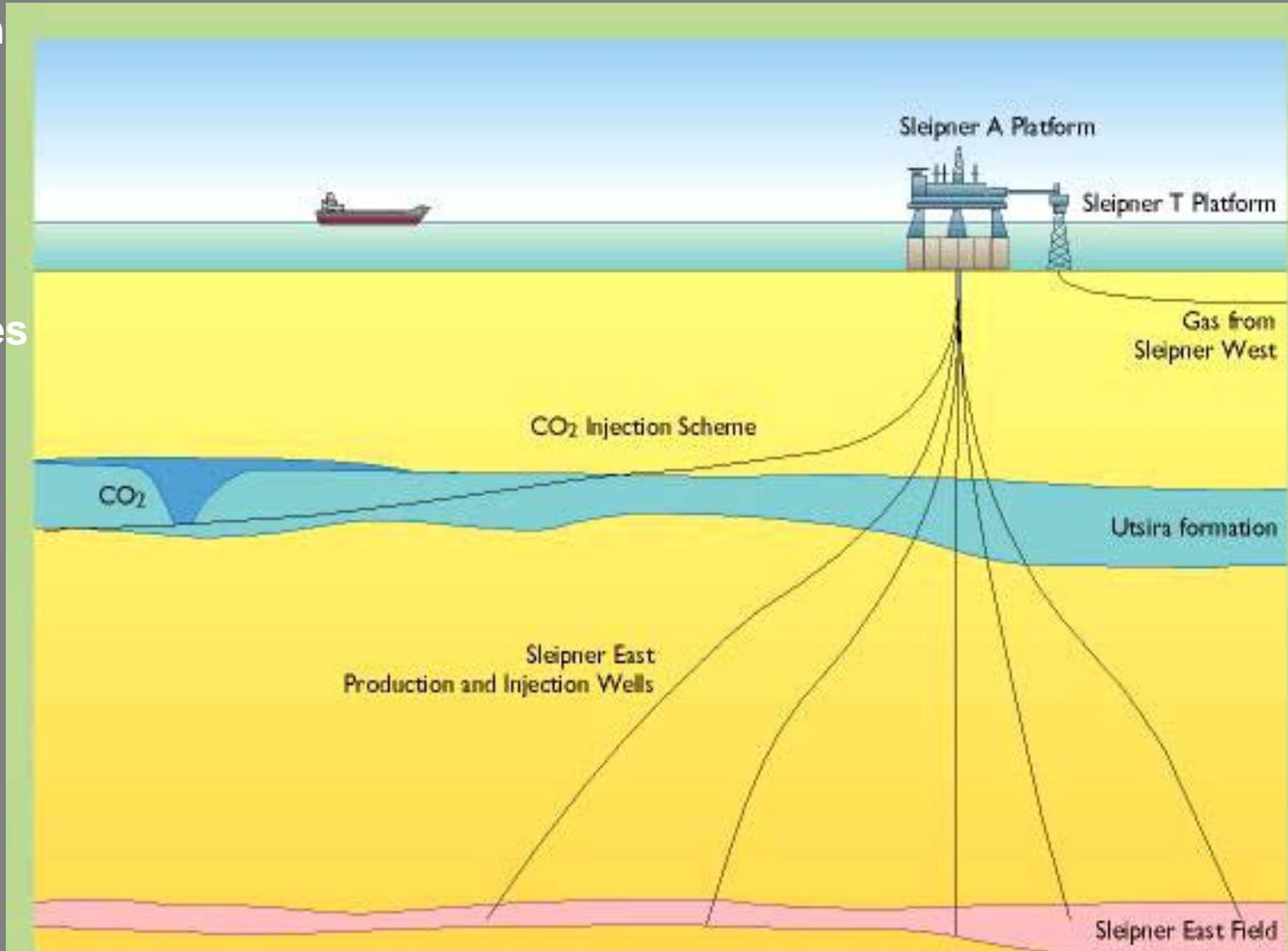
Stockage du CO2 dans les formations

But:

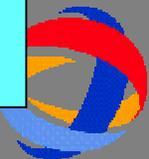
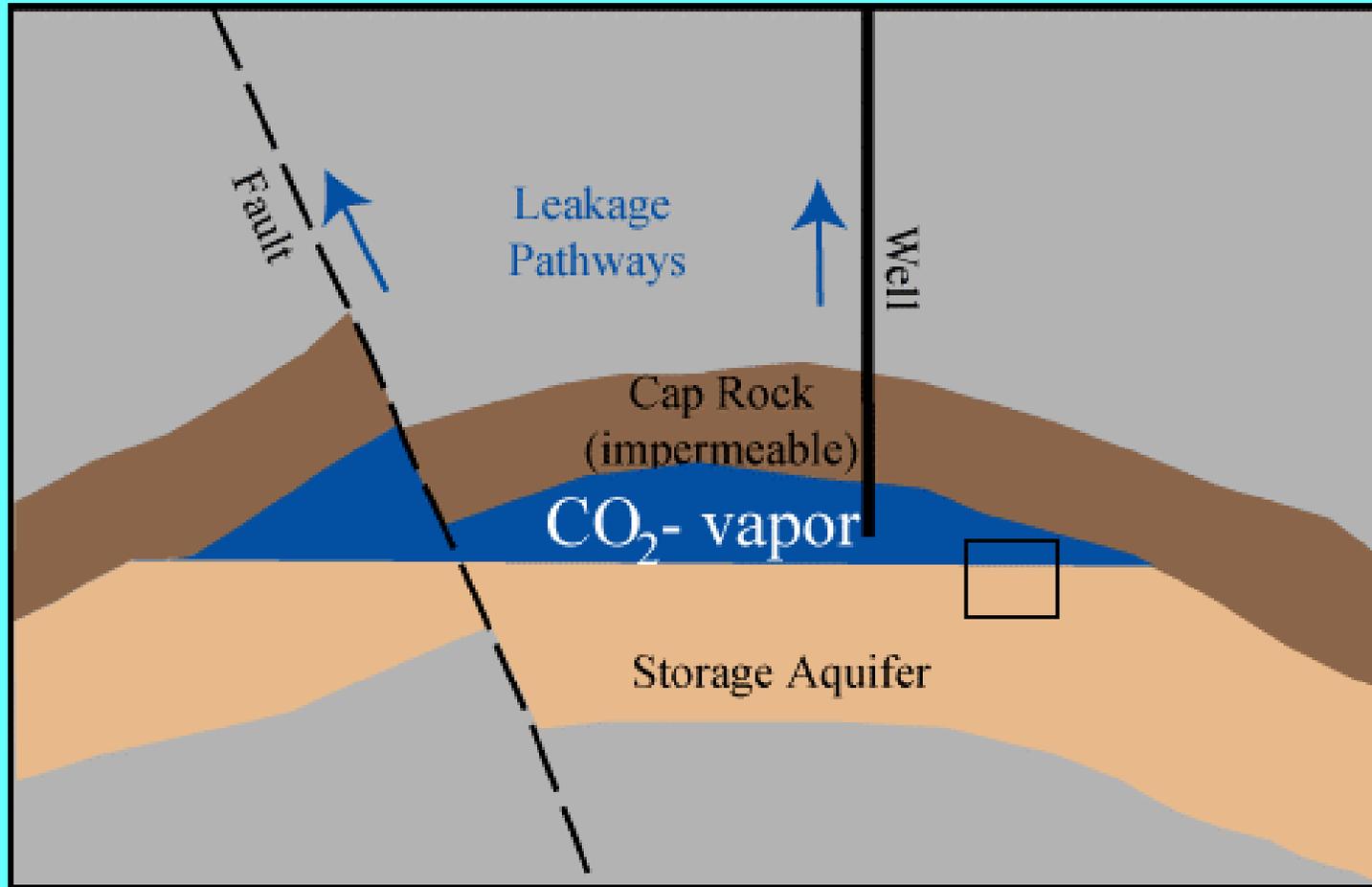
Eviter l'émission de CO2 provenant de l'extraction des hydrocarbures

Problèmes:

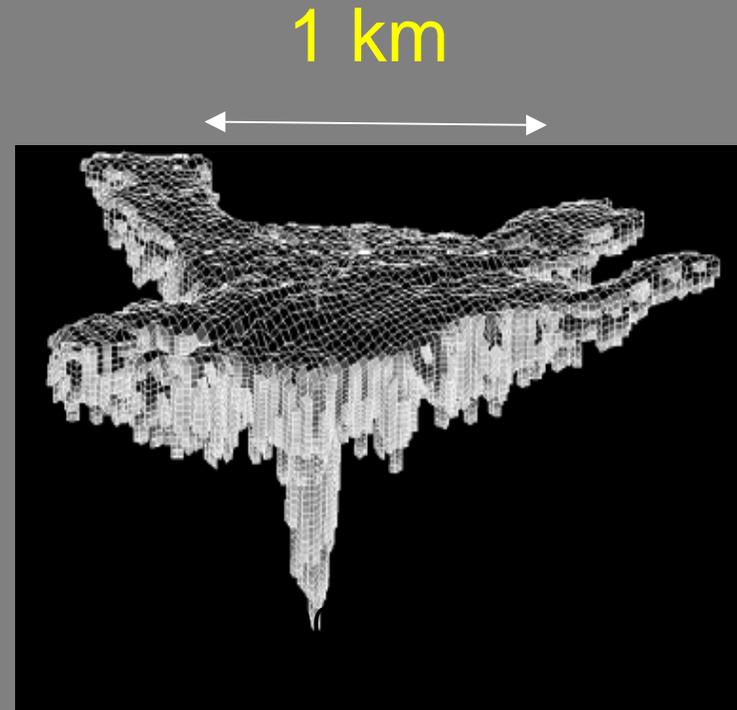
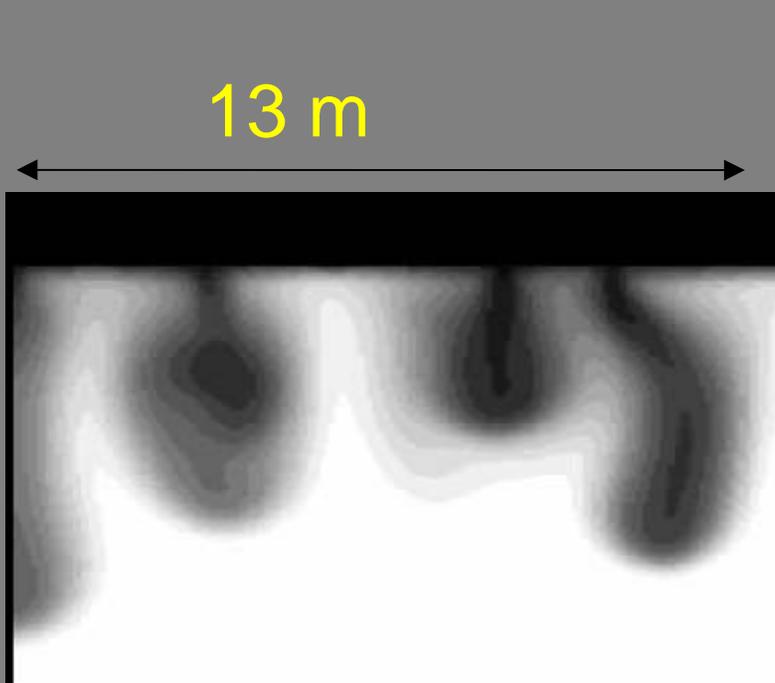
- Coût
- Devenir long terme
- Fuite



Bulle de CO₂ dans un piège structural



Modélisation - diffusion et convection



- Concentration de CO₂

Taille des mailles: **3cm x 4cm**

100m x 100m x ? (~50m)

Echelle des temps: **2 ans**

100 ans

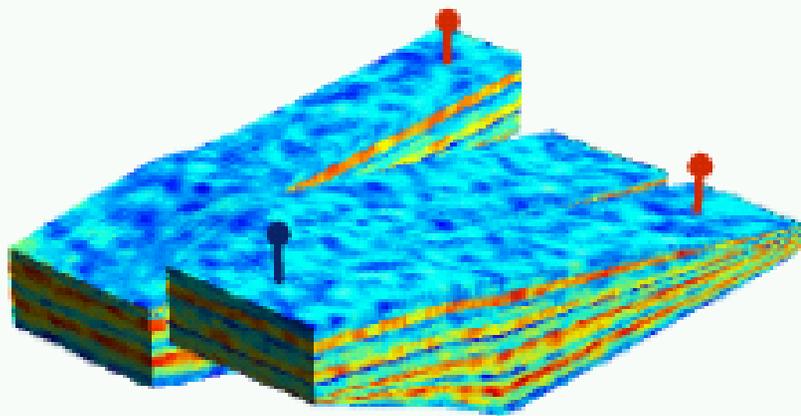
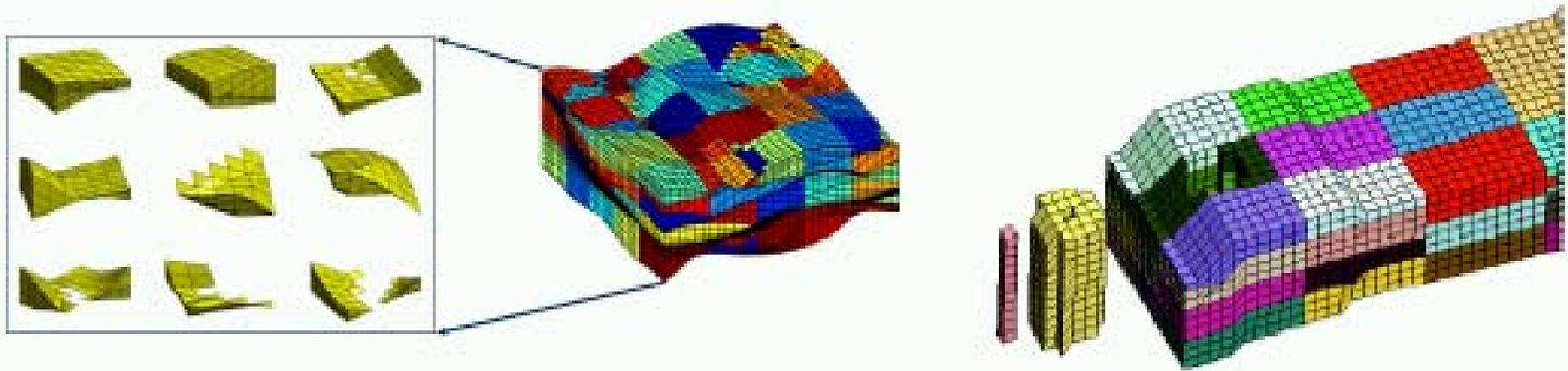


Thèmes de recherche en simulations de reservoir

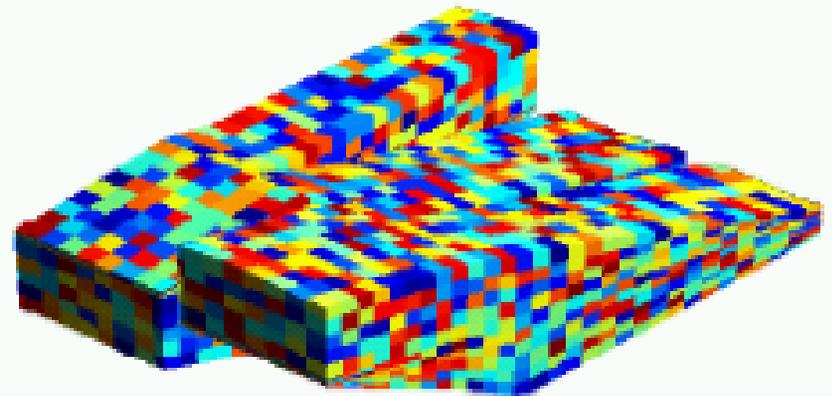
- ❑ Upscaling mono et multi-phasique
- ❑ Méthodes numériques multi-scale
- ❑ Multiréalisations , incertitudes, plan d'expériences
- ❑ Calage d'historique: méthode Ensemble Kalman Filter



Méthodes multi-scales



Fine scale



Coarse scale

Conclusion: objectifs long terme

- ❑ Améliorer l'intégration de la simulation avec les autres disciplines amont et aval (géomodélisation, sismique 4D, procédés, géomécanique)
- ❑ Simuler les phénomènes complexes (stockage du CO2 dans les formations géologiques, récupération thermique des huiles lourdes)
- ❑ Un environnement logiciel compatible avec la gestion et l'internationalisation du personnel (renouvellement permanent des équipes, processus de décision rapide, multi-réalisation, standardisation)



Conclusion: objectifs long terme

- ❑ Meilleur contrôle de la qualité des développements logiciels
- ❑ Meilleure connaissance interne du coeur des logiciels (ingénieur réservoir avec une formation numérique et mathématiques appliquées)
- ❑ Capacité de développer en interne des modules intégrant le savoir faire d'entreprise et les résultats de la recherche
- ❑ Impact positif sur l'image de la compagnie TOTAL vis à vis de nos partenaires et des compagnies nationales qui nous confient le développement de leur champs



FIN

Questions



BACK -UP

slides



Types de simulateurs utilisés à Total

Simulateurs du marché:

- Mass balance simulator :
MBAL (Petroleum Expert - Edinburgh)
- Black oil simulator (simplified thermodynamics – 3 phases oil, water and gas, 3 components) : **Most used 80% - Eclipse 100 (Schlumberger- SIS), Reveal** (Petroleum Expert)
- Compositional simulator (one equation per hydrocarbon component, C1, C2, C3, C4 , water, etc..) : **Eclipse 300** (SIS)
- Dual porosity simulator : **Athos** (BEICIP- Rueil)
- Thermal simulator (heavy oil , ..) : **STARS** (CMG – Calgary)
- Streamlines simulators: **3DSL** (Streamsim, SF), **Frontsim** (SIS)



Simulators status within TOTAL

Nombre d'utilisateurs

❖ Sites centraux

- 160
- full time : equivalent of 75 man.year

❖ Subsidiaries: 80

- ➔ 4 to 10 users: USA, Argentina, Angola, Norway, Indonesia, GCP, Bloc-17, UK, Venezuela, Nigeria
- ➔ One or 2 users:
Yemen, Bolivia, Brunei, Gabon, Iran, TEPF, Italy, Libya, Qatar, Russia, TABK, TOGV, ...

Number of licences

- Eclipse: 78 + 129 batch
- STARS: 50
- Reveal: 40
- Athos: 1



OUTLINE

- Reservoir simulators
- Status of reservoir simulators within TOTAL
- **Status of reservoir simulators within others oil companies**
- TOTAL – Schlumberger – Chevron Intersect Project



Other oil companies strategy

❖ Simulateur interne :

SHELL, EXXON-MOBIL, ConocoPhillips, ARAMCO

❖ Partenariat avec un éditeur logiciel

CHEVRON with SIS (Intersect)

BP with Landmark (VIP -> Nexus)

SHELL with CMG (**new strategy**)

TOTAL with SIS and Chevron (**new strategy**)

❖ Utiliser les logiciels du marché

TOTAL, Statoil, Norsk-Hydro, ENI, Repsol YPF

Most of national companies (Petrobras, Rosneft, Yucos, PEMEX, NIOC,...)



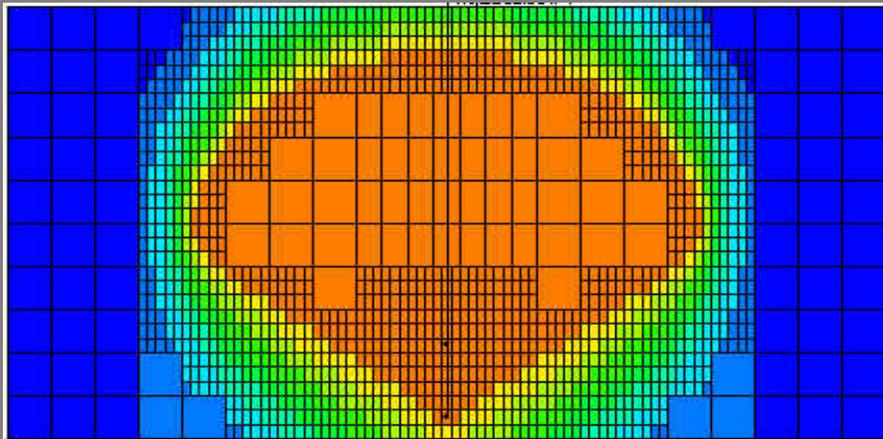
OUTLINE

- Reservoir simulators
- **Status of reservoir simulators within TOTAL**
- Status of reservoir simulators within others oil companies
- TOTAL – Schlumberger – Chevron Intersect Project



Thermal simulators

- Parallel version – 4 processors
- Dynamic gridding in development
 - ↳ adaptive mesh along the vapour front (automated amalgamation and /or local refinement)
 - ↳ in order to decrease the number of cells and therefore CPU time



Amalgated cells for low temperature gradient

