

# ARCADES : MODÉLISATION STRATIGRAPHIQUE DES BASSINS SÉDIMENTAIRES

---





## ● Contexte: Etude des bassins sédimentaires

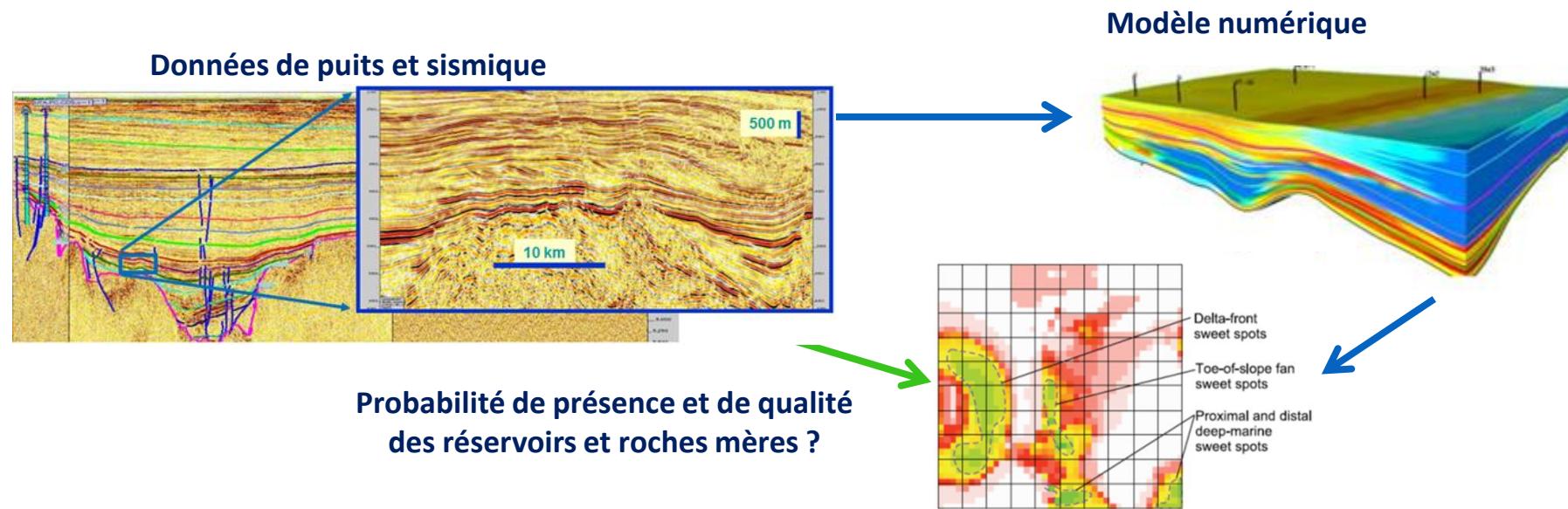
- Recherche de nouvelles ressources énergétiques (hydrocarbures, hydrates...)
- Stockage d'énergie (gaz, hydrogène...) ou de déchets (CO<sub>2</sub>...)

## ● Besoin industriel

- Caractériser la géométrie (volume des ressources récupérables/stockables) et la nature des couches sédimentaires (propriétés pétrophysiques [écoulement des fluides] et géomécaniques [résistance aux contraintes / fracturation]) à grande échelle

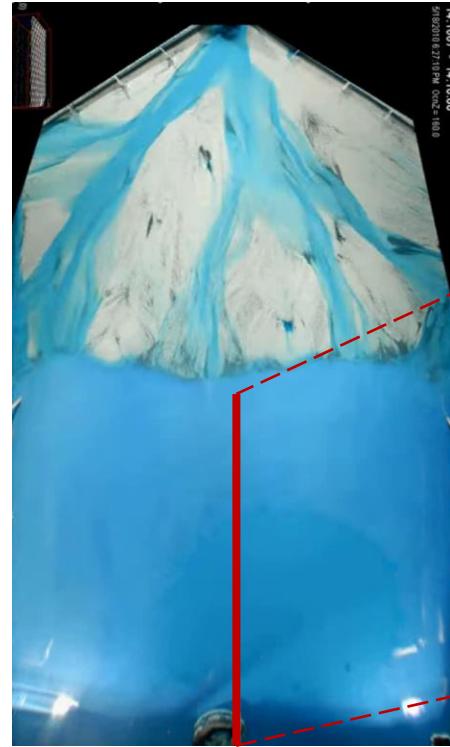
- 1) Méthode classique : Extrapoler les données disponibles (puits, sismique ...) avec des méthodes statistiques
- 2) Méthode Dionisos : Construire un modèle stratigraphique numérique en simulant les processus géologiques ayant contribué à la formation du bassin sédimentaire

Déformation du bassin, écoulement de l'eau, production de coraux / algues, transport des sédiments...



DionisosFlow a montré à plusieurs reprises sa capacité à reproduire des architectures stratigraphiques complexes. Des calibrations précises ont pu être menées sur la base de travaux expérimentaux

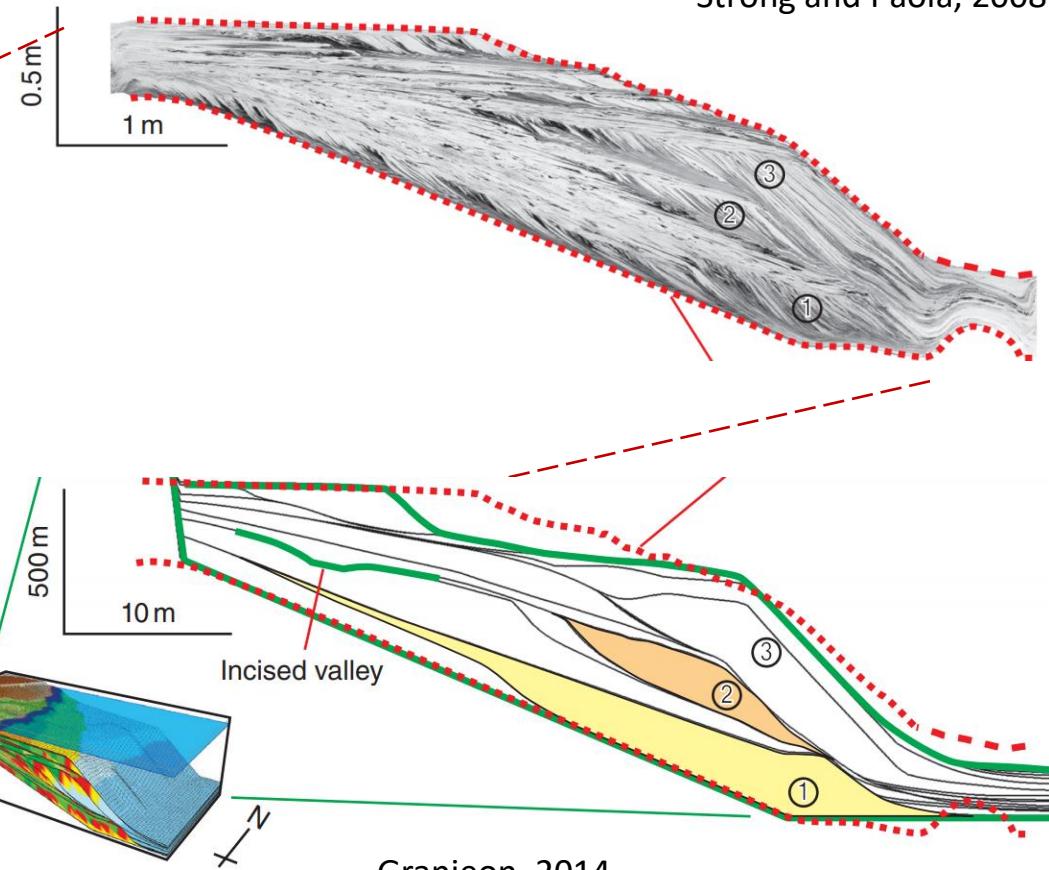
XES (Chris Paola)



Reproduction d'un système deltaïque à l'échelle labo

Transport / érosion

Dépôt



Coupé dans le dépôt sédimentaire  
Strong and Paola, 2008

Granjeon, 2014

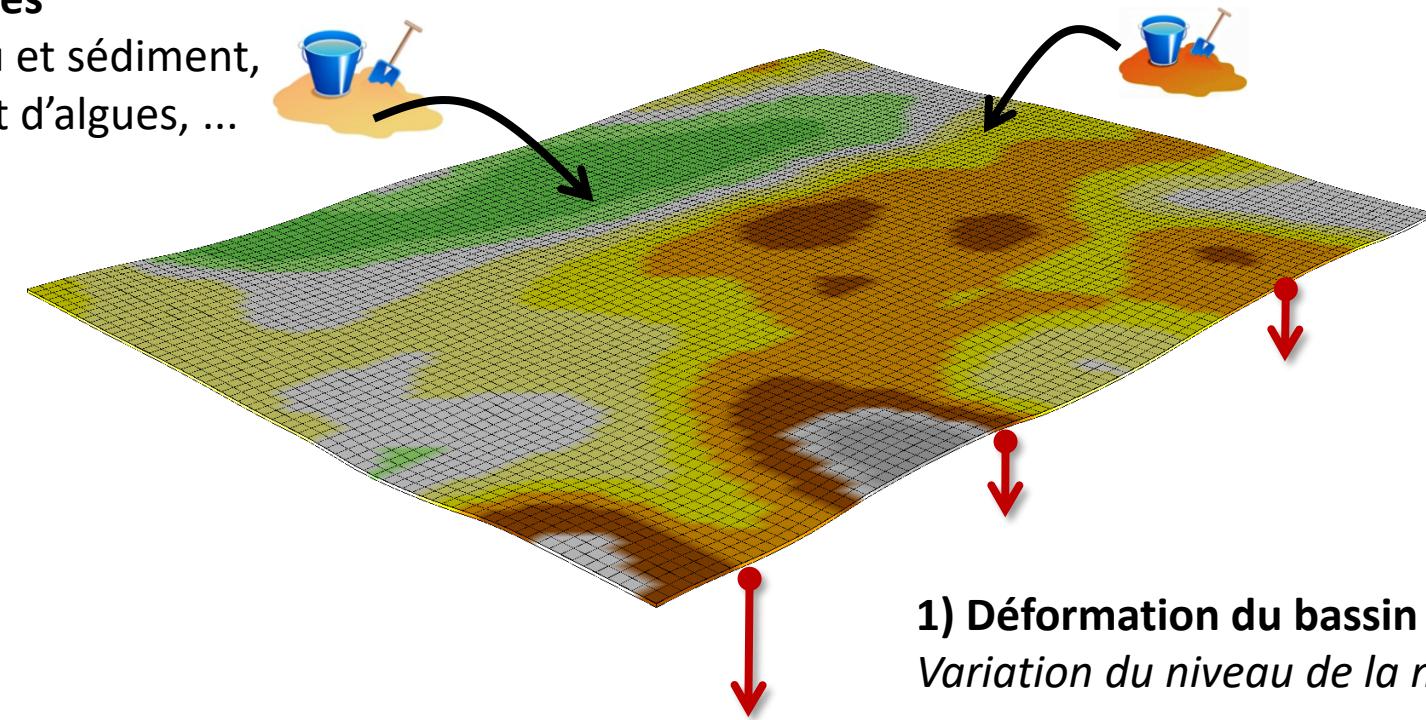
# EXEMPLE : LE BASSIN PANNONIEN (HONGRIE)

HYDROCARBURES  
RESPONSABLES

Topographie du bassin hongrois  
il y a 10 millions d'années

## 2) Apports sédimentaires

Apports fluviaux en eau et sédiment,  
Production de coraux et d'algues, ...



## 1) Déformation du bassin sédimentaire

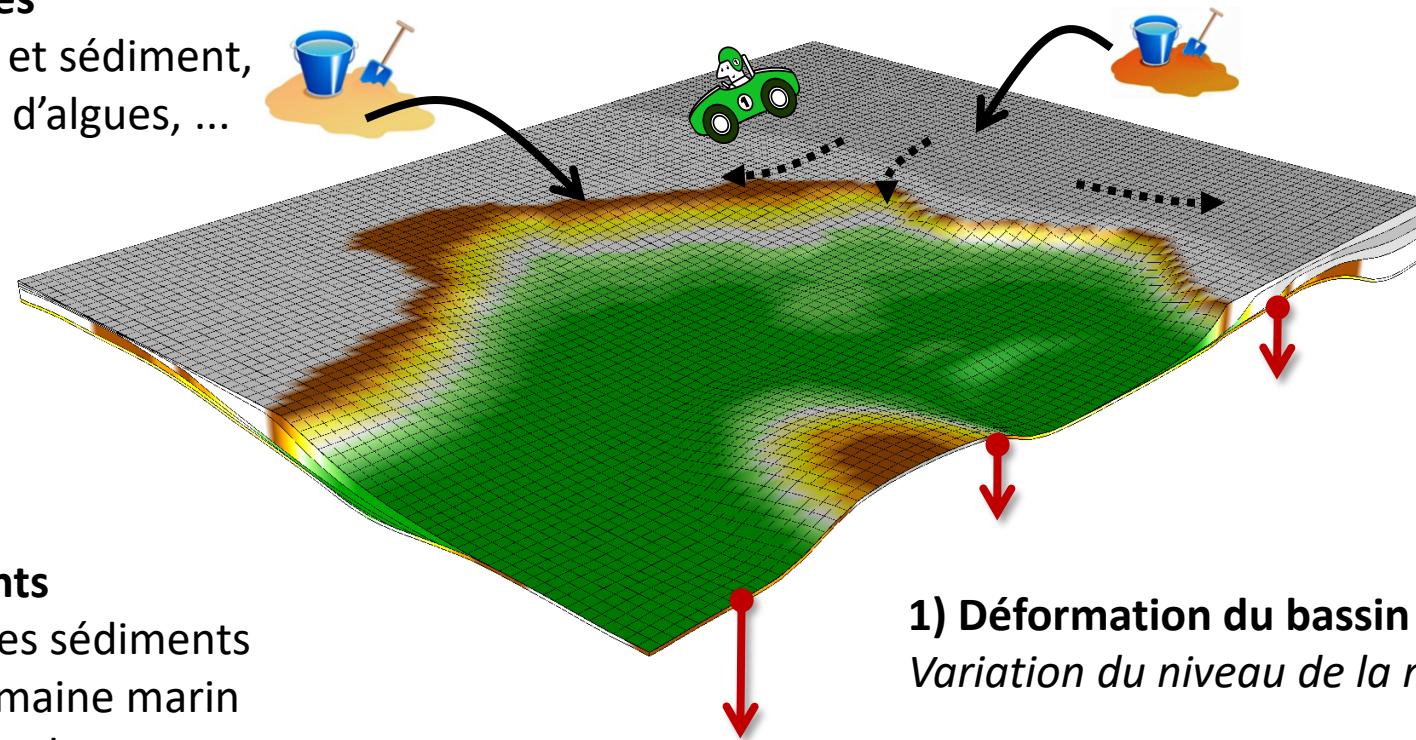
*Variation du niveau de la mer, tectonique...*

Modélisation du Bassin Pannónien (Hongrie)  
[L= 140 km x 185 km; T=10 My] (Csato et al., 2013)

Stratigraphie du bassin hongrois  
il y a 8 millions d'années

## 2) Apports sédimentaires

Apports fluviaux en eau et sédiment,  
Production de coraux et d'algues, ...



## 3) Transport des sédiments

Ecoulement de l'eau et des sédiments  
dans les rivières et en domaine marin  
Stabilité des pentes et écoulements en masse

## 1) Déformation du bassin sédimentaire

*Variation du niveau de la mer, tectonique...*

Modélisation du Bassin Pannionien (Hongrie)  
[L= 140 km x 185 km; T=10 My] (Csato et al., 2013)

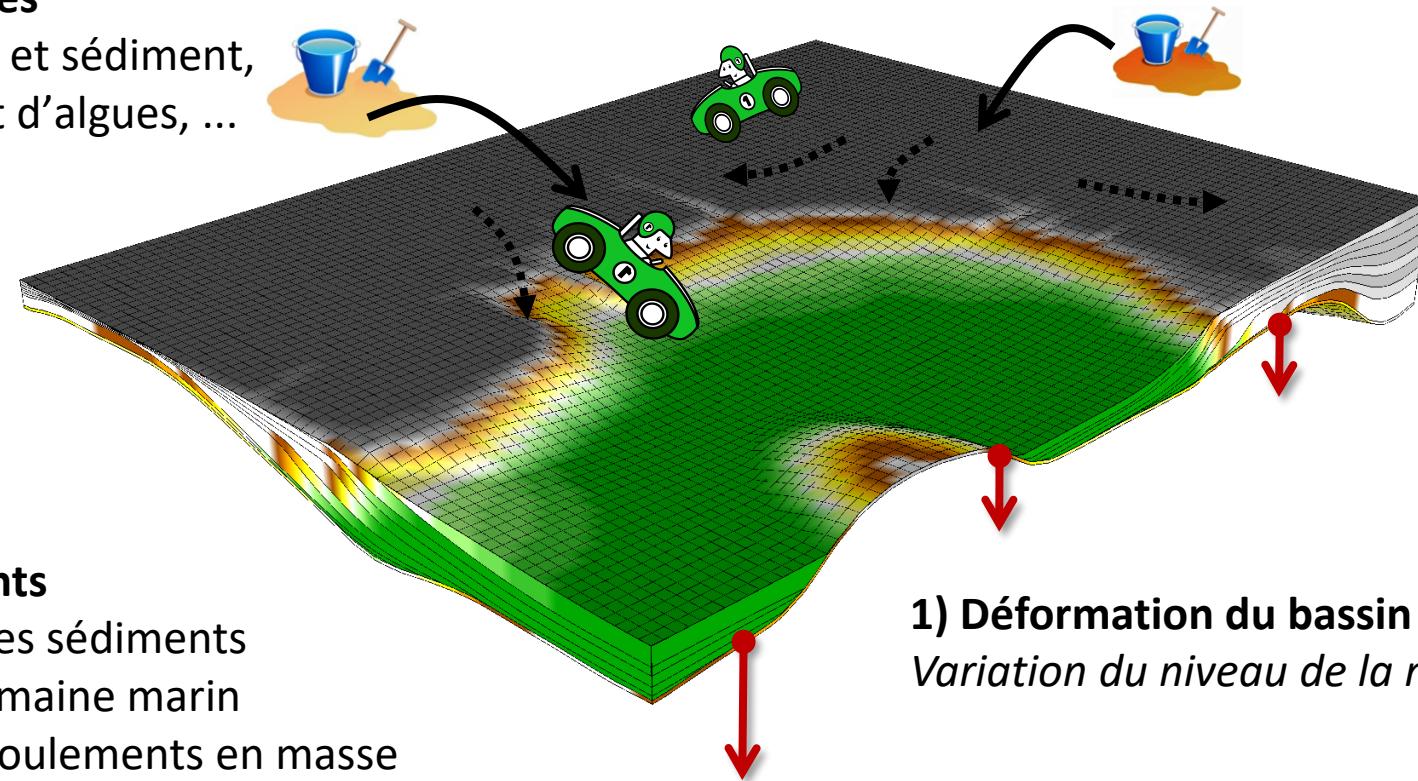
# EXEMPLE : LE BASSIN PANNONIEN (HONGRIE)

HYDROCARBURES  
RESPONSABLES

Stratigraphie du bassin hongrois  
il y a 6 millions d'années  
Chute majeure du niveau de la mer  
( - 200 m !)

## 2) Apports sédimentaires

Apports fluviaux en eau et sédiment,  
Production de coraux et d'algues, ...



## 3) Transport des sédiments

Ecoulement de l'eau et des sédiments  
dans les rivières et en domaine marin  
Stabilité des pentes et écoulements en masse

## 1) Déformation du bassin sédimentaire

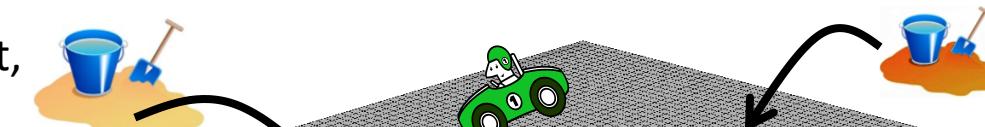
*Variation du niveau de la mer, tectonique...*

Modélisation du Bassin Pannionien (Hongrie)  
[L= 140 km x 185 km; T=10 My] (Csato et al., 2013)

Stratigraphie du bassin hongrois  
il y a 4 millions d'années

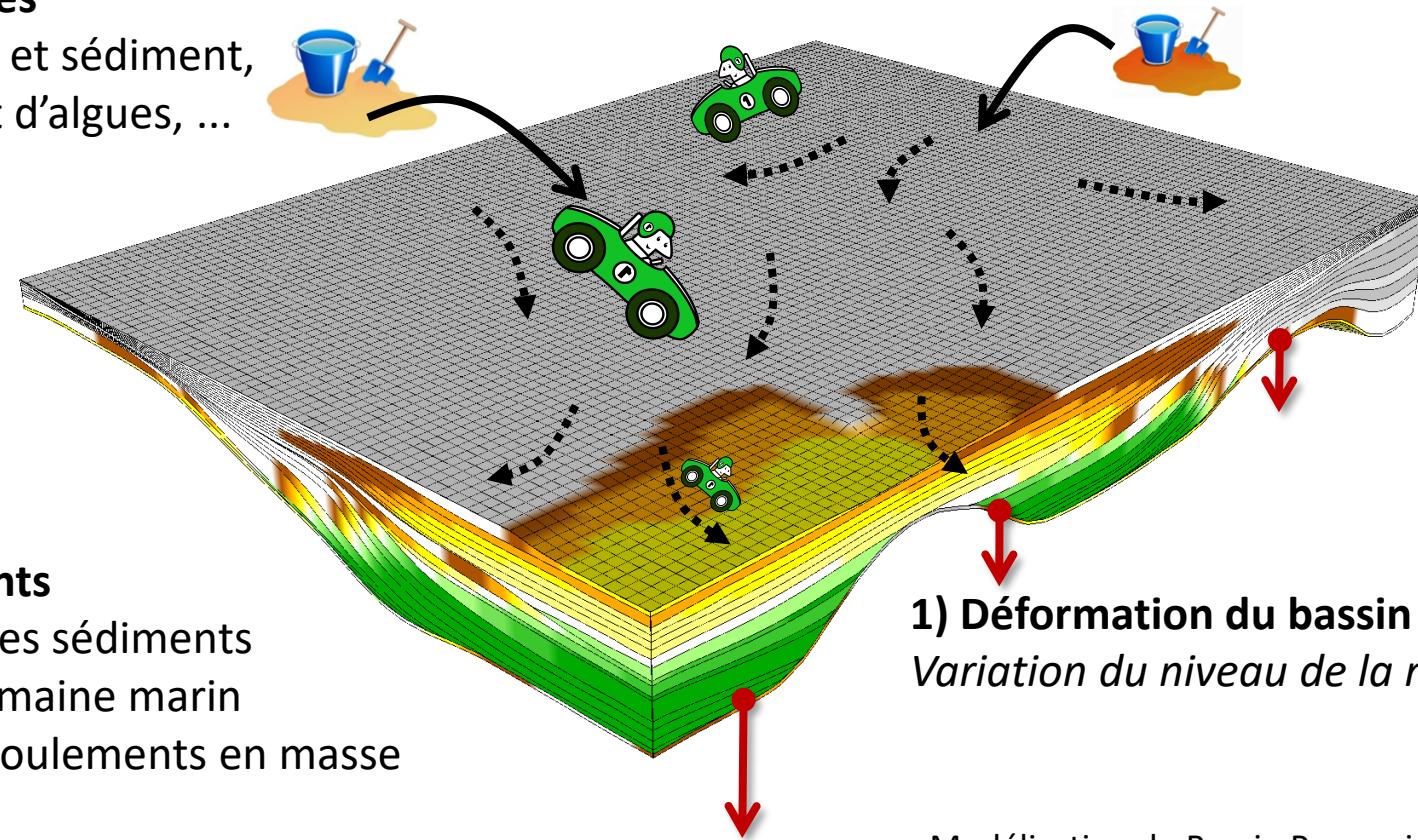
## 2) Apports sédimentaires

Apports fluviaux en eau et sédiment,  
Production de coraux et d'algues, ...



## 3) Transport des sédiments

Ecoulement de l'eau et des sédiments  
dans les rivières et en domaine marin  
Stabilité des pentes et écoulements en masse



## 1) Déformation du bassin sédimentaire

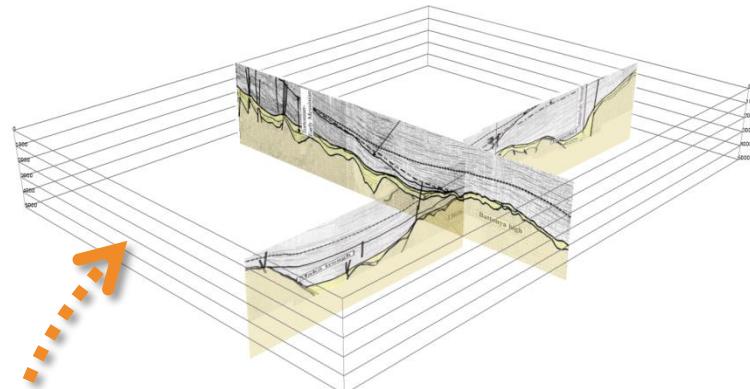
*Variation du niveau de la mer, tectonique...*

Modélisation du Bassin Pannionien (Hongrie)  
[L= 140 km x 185 km; T=10 My] (Csato et al., 2013)

# MODÉLISATION STRATIGRAPHIQUE COMPLÈTE

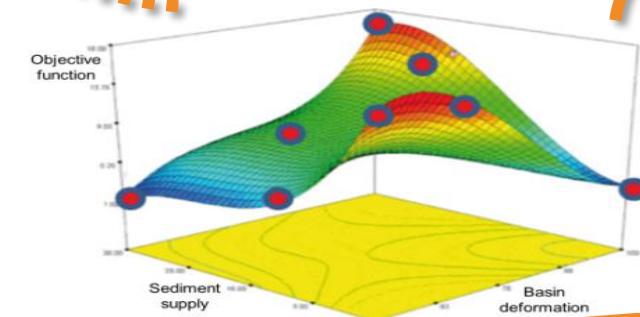
# HYDROCARBURES RESPONSABLES

## Données de forage, diagraphie, sismique...



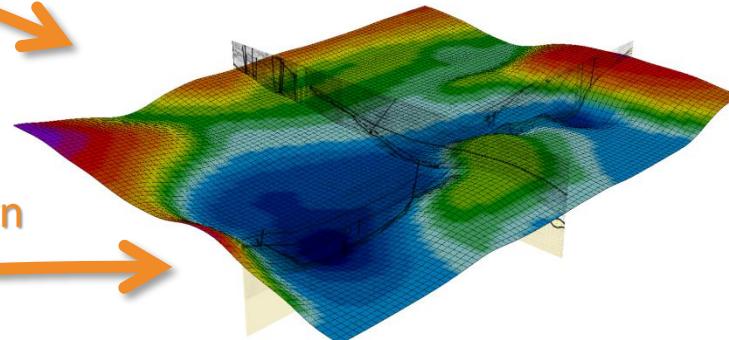
## Contrôle qualité

### Epaisseur, type de sédiments...



## 1) Estimation

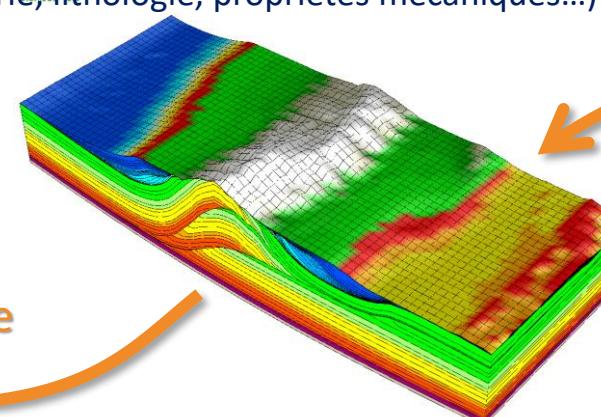
## Paramètres stratigraphiques



## 4) Optimisation

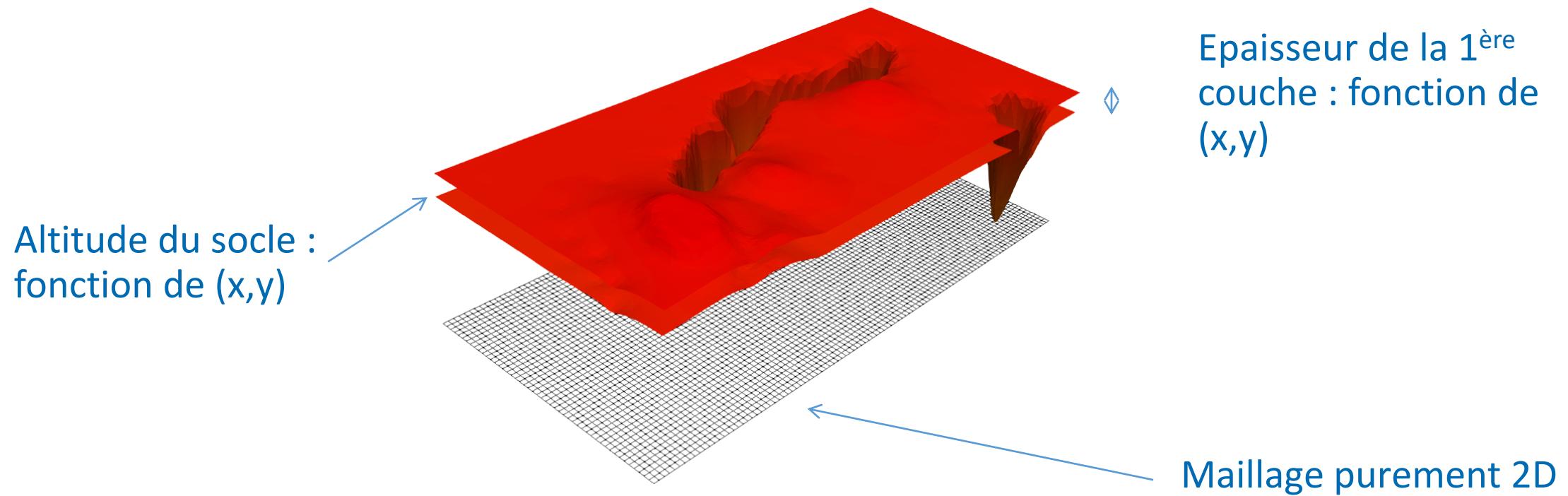
# Modèle stratigraphique

(Géométrie, lithologie, propriétés mécaniques...)



## 2) Simulation

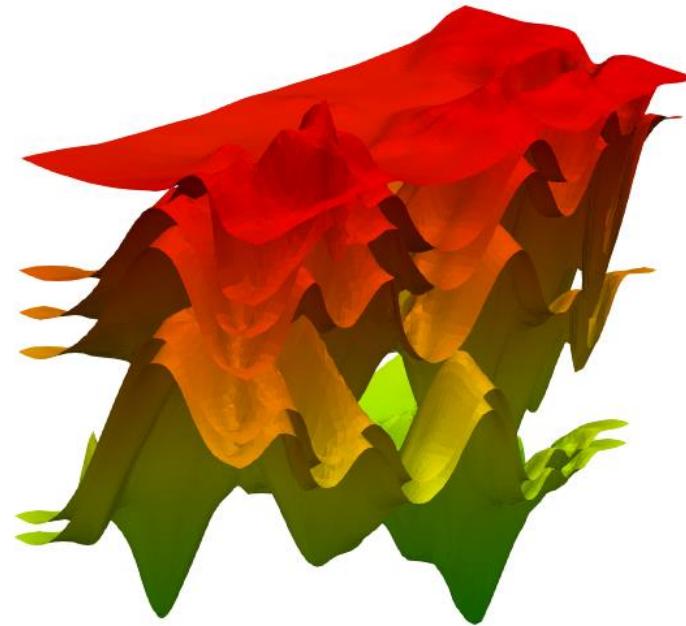
### 3) Analyse



# ARCADES : LES BASES DU SIMULATEUR EN 1 MIN

HYDROCARBURES  
RESPONSABLES

Evolution du socle :  
subsidence et flexure



Evolution de l'épaisseur  
des sédiments :  
transport et érosion  
(composante gravitaire,  
fluviale et due aux  
vagues)

Enregistrement des  
anciennes épaisseurs des  
sédiments : définition  
implicite des strates

Evolution du socle :  
subsidence et flexure



Evolution de l'épaisseur  
des sédiments :  
transport et érosion  
(composante gravitaire,  
fluviale et due aux  
vagues)

Enregistrement des  
anciennes épaisseurs des  
sédiments : définition  
implicite des strates

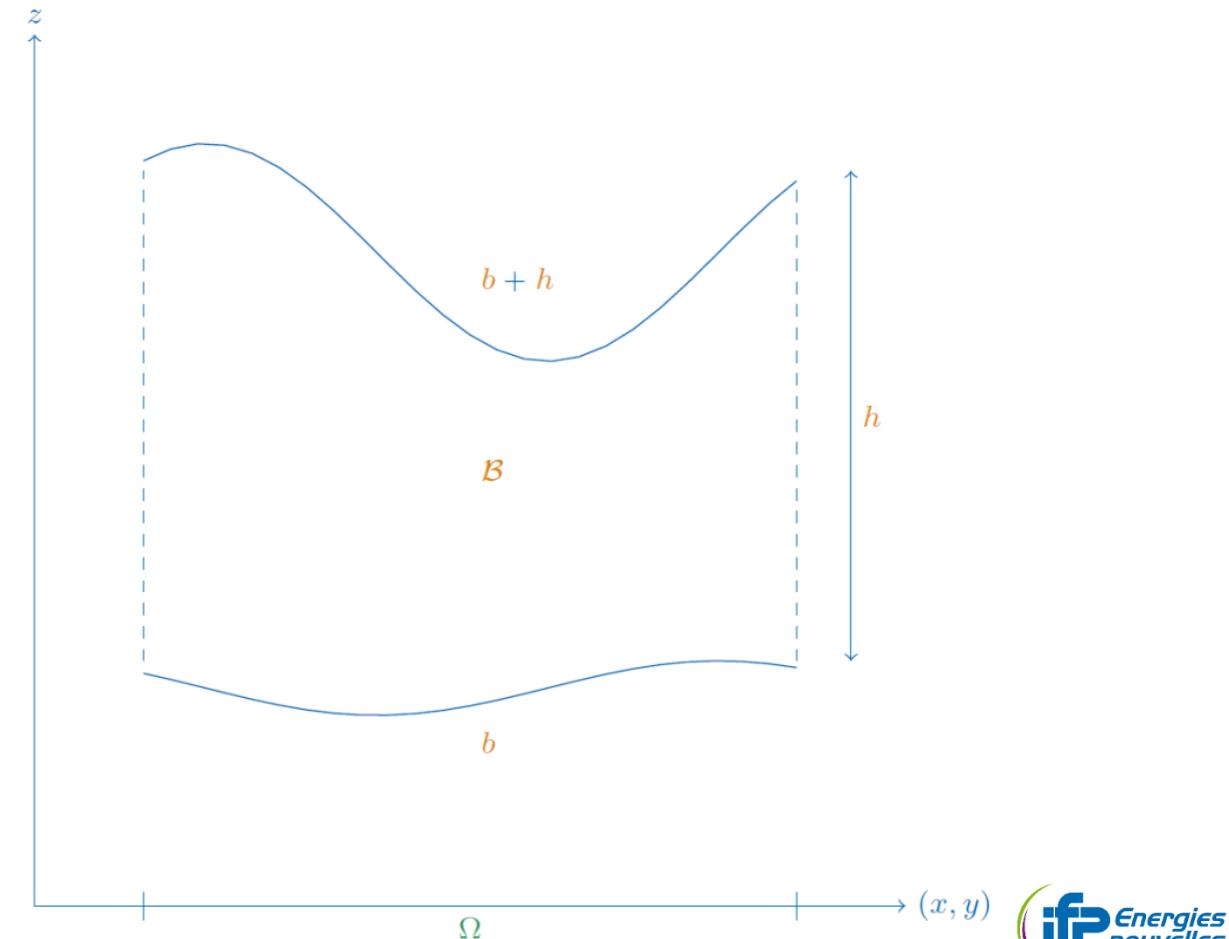
Description du bassin :

$$\mathcal{B}(t) = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid (x, y) \in \Omega \text{ and } b(x, y, t) \leq z \leq b(x, y, t) + h(x, y, t)\}$$

$b(x, y, t)$  : basement (socle) qui évolue par subsidence et flexure

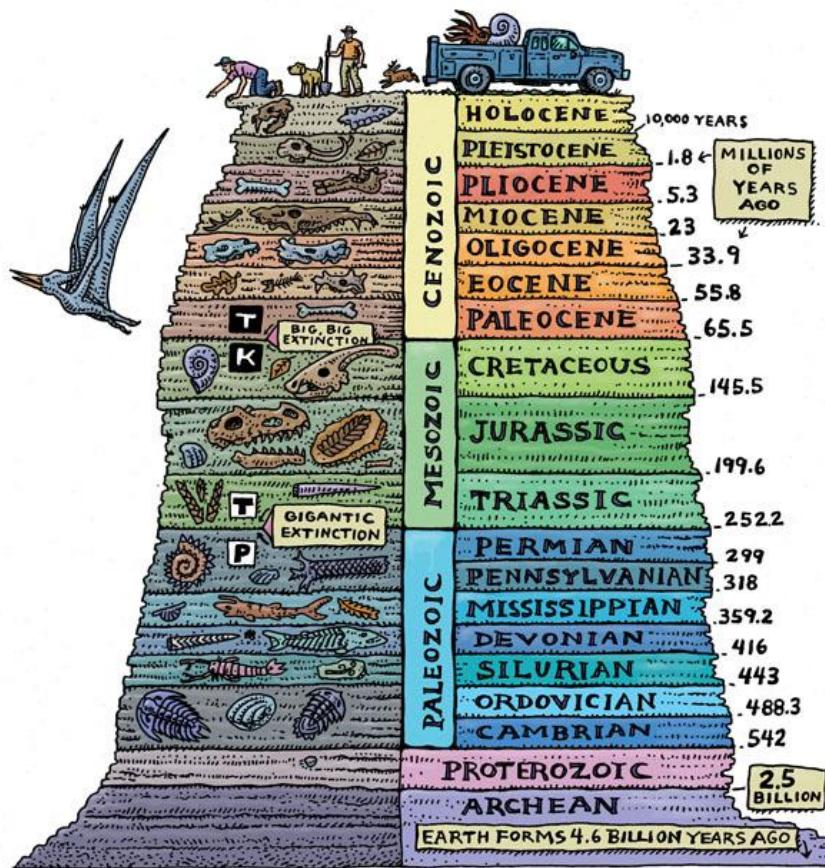
$h(x, y, t)$  : épaisseur totale de sédiments : inconnue principale de la modélisation stratigraphique

$N_{litho}$  types de sédiments



## Notion d'unité stratigraphique (ou couche sédimentaire)

Une **unité stratigraphique** correspond aux sédiments déposés pendant un **intervalle de temps donné**.



Définition des couches liste de temps :  $t_{l_0}, t_{l_1}, \dots, t_{l_N}$

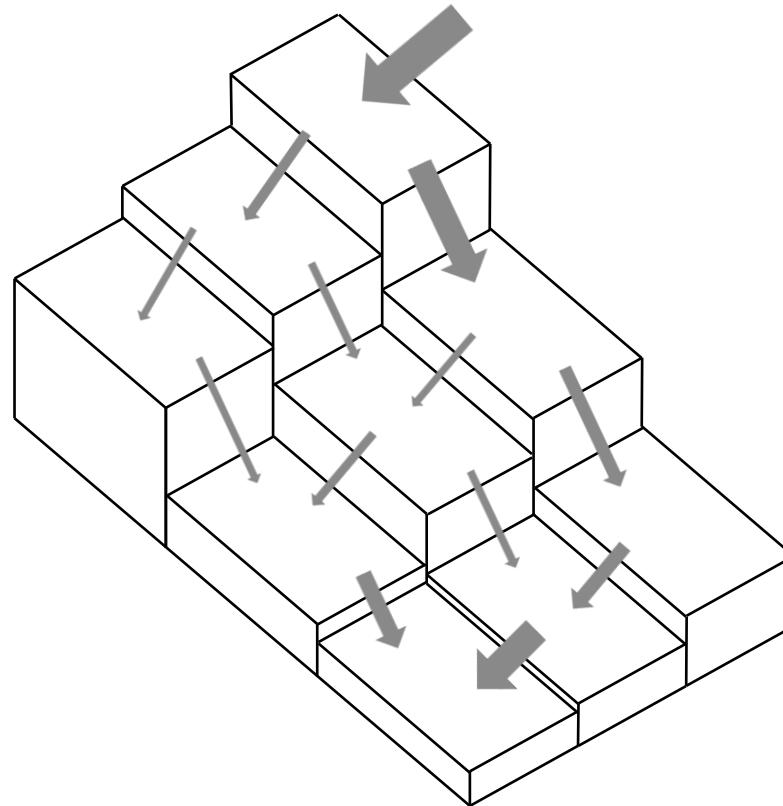
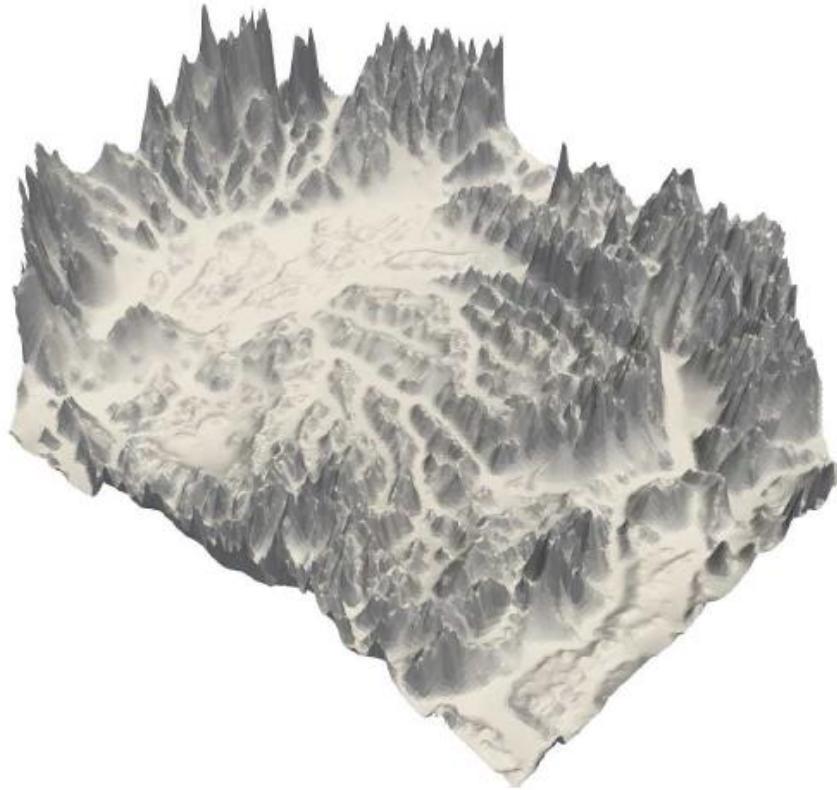
Couche  $l_k$

$$h_{l_k} = h(t_k) - h(t_{k-1})$$

$$\phi_{l_k} = \frac{1}{h_{l_k}} \int_{h(t_{k-1})}^{h(t_k)} \phi(z) dz$$

$$c_{i,l_k} = \frac{1}{(1 - \phi_{l_k})h_{l_k}} \int_{h(t_{k-1})}^{h(t_k)} (1 - \phi(z)) c_i(z) dz$$

Historiquement : algorithme « multiple flow direction » (MFD)



$$\mathcal{M} = (\mathcal{T}, \mathcal{F})$$

$$\overline{\Omega} = \cup_{K \in \mathcal{T}} \overline{K}$$

$$\partial K = \cup_{\sigma \in \mathcal{F}_K} \overline{\sigma}$$

$$\mathcal{T}_\sigma = \{K \in \mathcal{T} \mid \sigma \in \mathcal{F}_K\}$$

$$d_{KL} = \|\boldsymbol{x}_K - \boldsymbol{x}_L\| \quad s_{KL} = \frac{|\sigma|}{d_{KL}} (b_K - b_L)$$

$$s_K = \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}, b_K \geq b_L} \frac{|\sigma|}{d_{KL}} (b_K - b_L)$$

- Tri topographique :  $b_0 = \max \{b_K \mid K \in \mathcal{T}\}$     $\mathcal{T}_0 = \{K \in \mathcal{T} \mid b_K = b_0\}$     $\hat{\mathcal{T}}_{-1} = \emptyset$

$$\hat{\mathcal{T}}_n = \bigcup_{0 \leq i \leq n} \mathcal{T}_i \quad \mathcal{T}_i = \{K \in \mathcal{T} \mid b_K = b_i\} \quad b_i = \max \{b_K \mid K \in \mathcal{T} \setminus \hat{\mathcal{T}}_{i-1}\}$$

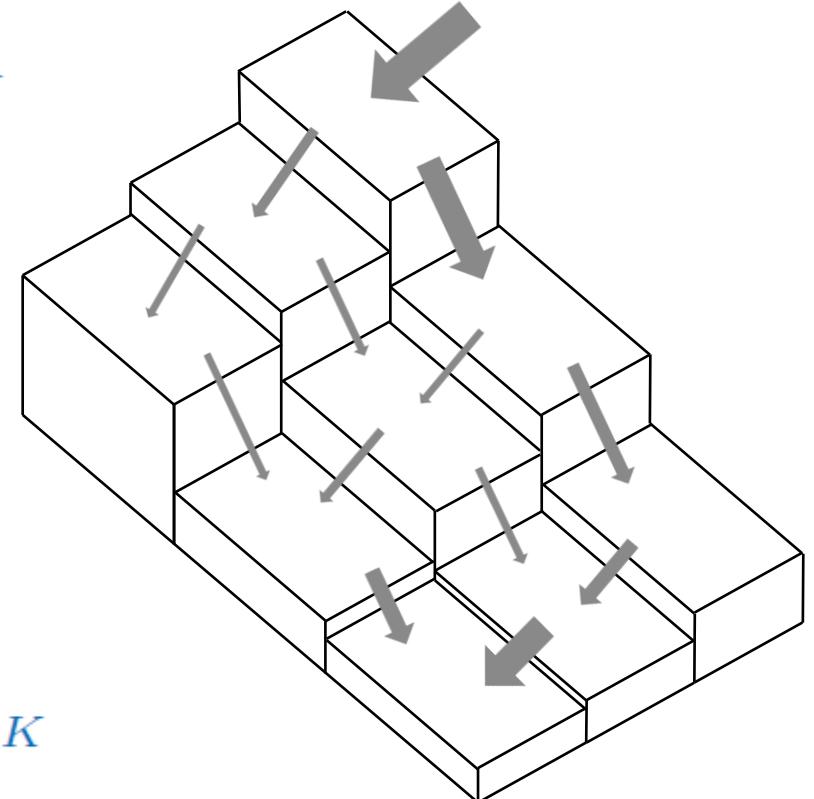
- Initialisation: mailles les plus hautes :  $K \in \mathcal{T}_0$     $\tilde{q}_K = |K|f_K$

Boucle sur  $n$  : tant qu'il reste des mailles non traitées

- On répartit le flux depuis les mailles traitées    $L \in \hat{\mathcal{T}}_{n-1}$

$$\tilde{q}_K \leftarrow \tilde{q}_K + \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}, b_K < b_L, L \in \hat{\mathcal{T}}_{n-1}} \frac{|\sigma| \tilde{q}_L}{d_{KL} s_L} (b_L - b_K) \quad \text{for all } K \in \mathcal{T}_n$$

- On ajoute la source locale    $K \in \mathcal{T}_n$     $\tilde{q}_K \leftarrow \tilde{q}_K + |K|f_K$



En analysant bien les dépendances:

$$\tilde{q}_K - \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}, b_K < b_L} \frac{|\sigma| \tilde{q}_L}{d_{KL} s_L} (b_L - b_K) = |K| f_K \quad \forall K \in \mathcal{T}$$

$$s_K = \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}, b_K \geq b_L} \frac{|\sigma|}{d_{KL}} (b_K - b_L)$$

⇒ C'est un système linéaire !



⇒ Techniques usuelles de résolution, de parallélisation, etc...

$$\partial\Omega_{in} = \{x \in \partial\Omega \mid \nabla b \cdot n > 0\}$$

$u$  hauteur d'eau

● Modèle de Manning instationnaire :

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} - \operatorname{div}(\lambda u^m \nabla b) = f & \text{in } \Omega \\ -u^m \nabla b \cdot n = 0 & \text{on } \partial\Omega_{in} \end{cases}$$

● Modèle de Manning stationnaire :

$$\begin{cases} -\operatorname{div}(\lambda u^m \nabla b) = f & \text{in } \Omega \\ -\lambda u^m \nabla b \cdot n = 0 & \text{on } \partial\Omega_{in} \end{cases}$$

$$m = 1$$

## ● Modèle de Manning stationnaire :

$$\begin{cases} -\operatorname{div}(\lambda \mathbf{u} \nabla b) = f & \text{in } \Omega \\ -\lambda \mathbf{u} \nabla b \cdot \mathbf{n} = 0 & \text{on } \partial\Omega_{in} \end{cases}$$

## ● Maillage orthogonal

$$\bar{\mathbf{x}}_K \in \mathring{K} \quad \forall K \in \mathcal{T} \quad \text{and} \quad \frac{\bar{\mathbf{x}}_L - \bar{\mathbf{x}}_K}{\|\bar{\mathbf{x}}_L - \bar{\mathbf{x}}_K\|} = \mathbf{n}_{K,\sigma} \quad \text{for} \quad \sigma \in \mathcal{F}_{int}, \sigma = \{K, L\}$$

## ● Schéma volumes finis décentré amont:

$$\sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}} \tau_{KL} \tilde{u}_\sigma^{up} (b_K - b_L) = |K| f_K$$

$$\tilde{u}_\sigma^{up} = u_K \quad \text{si} \quad b_K \geq b_L$$

$$\tilde{u}_\sigma^{up} = u_L \quad \text{si} \quad b_K < b_L$$

$$\sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}, b_K \geqslant} \tilde{q}_K - \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}, b_K < b_L} \tau_{KL} \frac{\tilde{q}_L}{s_L} (b_L - b_K) = |K| f_K - \kappa \textcolor{brown}{b}_K = |K| f_K$$

$$s_K = \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}, b_K \geqslant b_L} \tau_{KL} (b_K - b_L) \quad \quad \quad \tilde{q}_K = s_K u_K$$

$$\begin{cases} -\operatorname{div}(\lambda \textcolor{brown}{u} \nabla b) = f & \text{in } \Omega \\ -\lambda \textcolor{brown}{u} \nabla b \cdot n = 0 & \text{on } \partial\Omega_{in} \end{cases} \quad \quad \quad \tilde{q}_K \approx \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K} \int_{\sigma} \textcolor{brown}{u} (-\lambda \nabla b \cdot \textcolor{violet}{n}_{K,\sigma})^+$$

$\Rightarrow$  non consistant avec le vrai flux d'eau  $||\lambda \textcolor{brown}{u} \nabla b||$

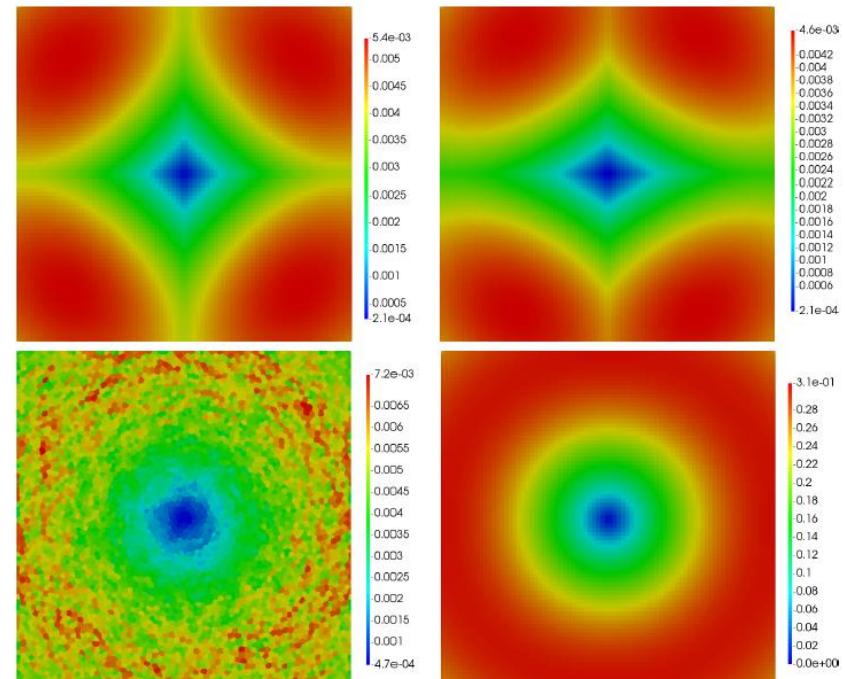
$$\mathbf{Q}_K = \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}, b_K > b_L} \frac{\tau_{KL} \tilde{q}_K}{|K| s_K} (b_K - b_L) (\mathbf{x}_\sigma - \mathbf{x}_K) - \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K \cap \mathcal{F}_{int}, b_K < b_L} \frac{\tau_{KL} \tilde{q}_L}{|K| s_L} (b_L - b_K) (\mathbf{x}_\sigma - \mathbf{x}_K)$$

$$q_K = \|\mathbf{Q}_K\|$$

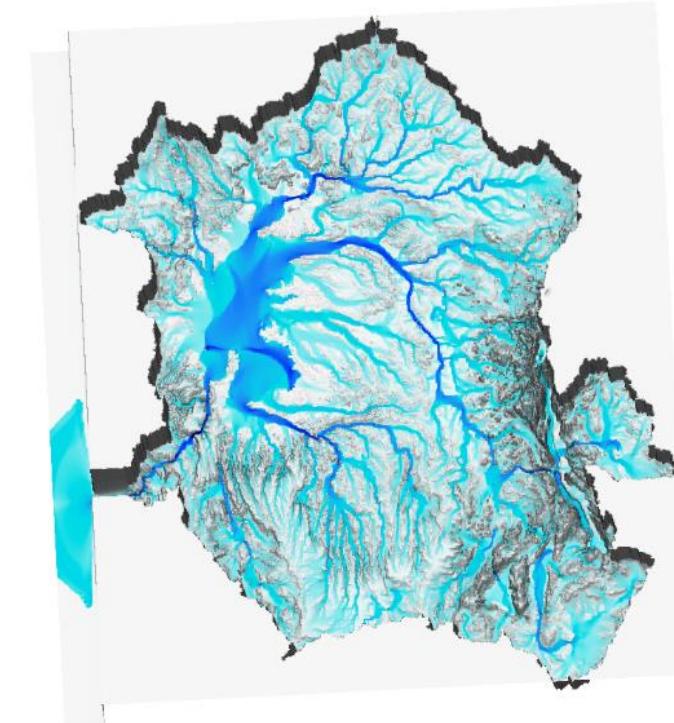
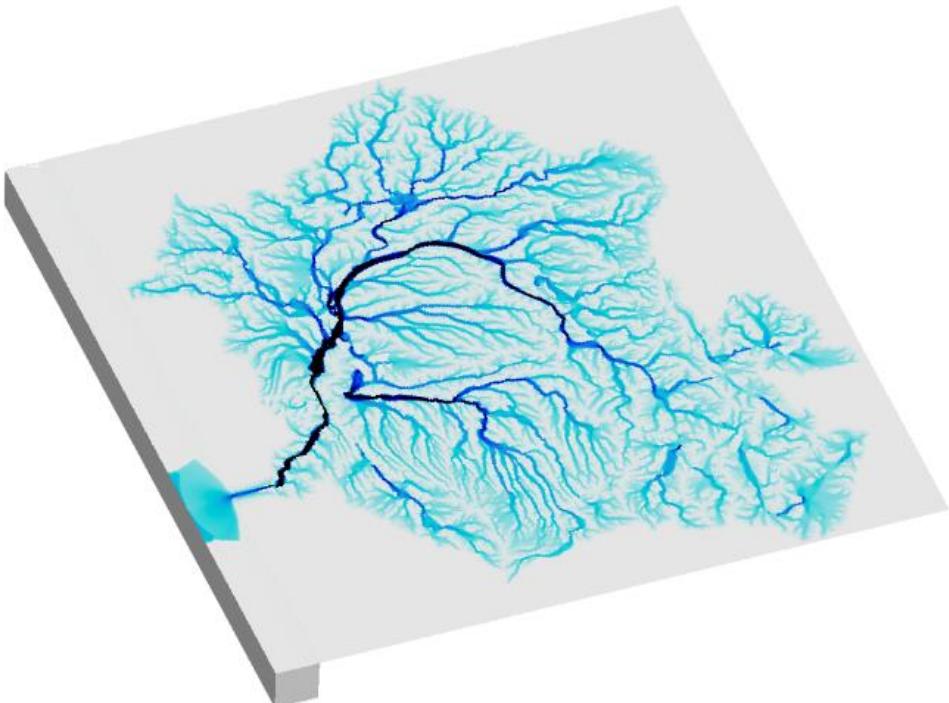
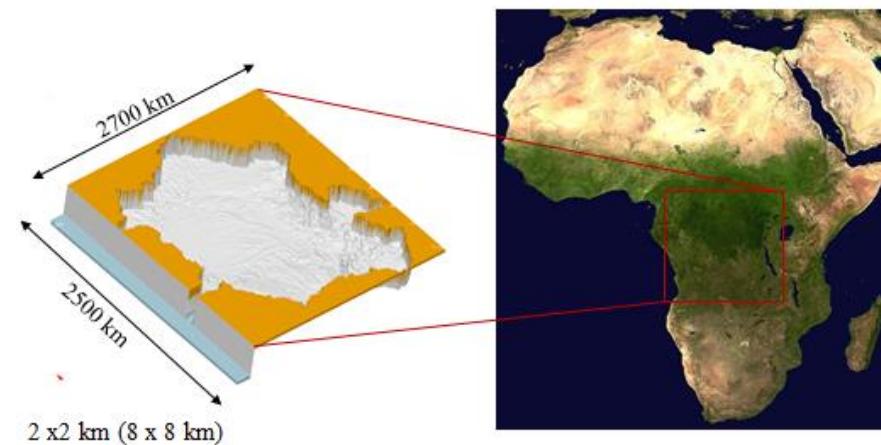
$\Rightarrow$  consistant avec le vrai flux d'eau  $\|\lambda \mathbf{u} \nabla b\|$

	2dSquareCart	2dRectCart	2dVoronoi
TPFA	0.943	0.942	1.147

$$\tilde{q}_K \approx \sum_{\sigma \in \mathcal{F}_K} \int_{\sigma} \mathbf{u} (-\lambda \nabla b \cdot \mathbf{n}_{K,\sigma})^+$$



## Bassin du congo

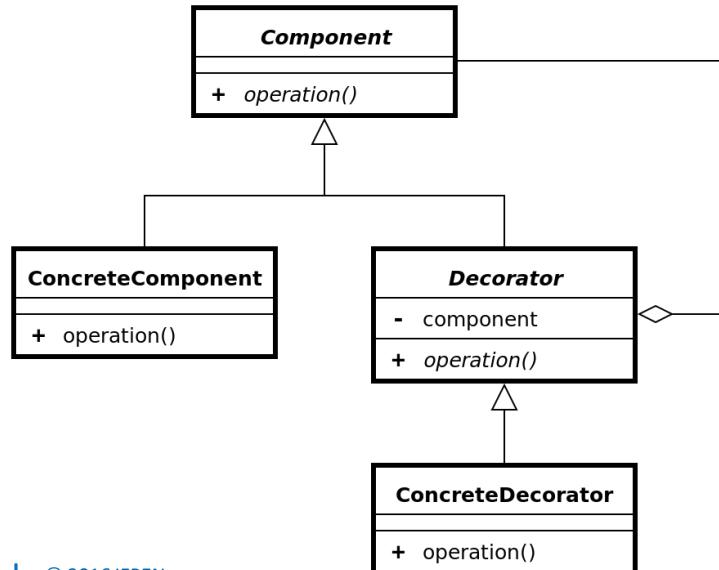


### ● ArcaDES : de nombreuses physiques différentes, toutes couplées à divers degrés :

- Ecoulement fluvial
- Bilan hydrologique des lacs
- Stratigraphie (transport/érosion)
- Propagation des vagues
- Déformation du socle sous le poids des sédiments (flexure)
- Compaction des sédiments
- Effondrement des pentes (glissements de terrain, turbidites)
- Caractérisation des écosystèmes (domaine marin, distance à la côte, distance à la côte des lacs, upwelling, fermetures topographiques, calcul de salinité, calcul d'oxygène)
- Termes de production des carbonates
- Termes de réaction (dissolution des sédiments, transformation des sédiments, dégradation de la matière organique, etc...)
- Etc...



- Des modèles très variés : équations aux dérivées partielles, inéquations variationnelles, définitions implicites...
- Nécessité d'avoir une vision unifiée : utilisation des DoF Arcane (mailles et faces)
- Couplage de modèles :
  - le plus souvent découplé au sens strict : un système après l'autre, interdépendance en jouant sur l'ordonnancement et le décalage en temps
  - couplage fort en utilisant le pattern décorateur



```

class IComputeEquation
{
public:

    // Destructeur de la classe
    virtual ~IComputeEquation() {}

public:

    /// Apply service function
    virtual void apply(ArcaDES::EquationSystemLinker & EqSystLink,
                      ArcaDES::EquationSystem & EqSyst) = 0;
};

class IComputeEquationPart : public IComputeEquation
{
public:

    IComputeEquation * m_ComputeEquation;

    // Constructeur
    IComputeEquationPart(IComputeEquation* comp)
        : m_ComputeEquation(comp){}

    // Destructeur de la classe
    virtual ~IComputeEquationPart() {}

    /// Apply service function
    void apply(ArcaDES::EquationSystemLinker & EqSystLink, ArcaDES::EquationSystem & EqSyst)
    {
        m_ComputeEquation->apply(EqSystLink,EqSyst);
        applySelf(EqSystLink,EqSyst);
    }

    virtual void applySelf(ArcaDES::EquationSystemLinker & EqSystLink, ArcaDES::EquationSystem & EqSyst) = 0;
};
  
```

- Des physiques très variées : données très nombreuses et hétérogènes
- Utilisation intensive des services Arcane
- (Presque) toutes nos données sont définies via des interfaces
- Exemple : hydrologie

- Pluie :
  - IRainData implemented by
    - RainDataMapsTimeInterpolation ()
    - RainDataTabulated ()
- Infiltration :
  - IIInfiltrationData implemented by
    - InfiltrationDataAveragedByLitho ()
    - InfiltrationDataTabulated ()
- Evaporation :
  - IEvaporationData implemented by
    - EvaporationDataMapsTimeInterpolation ()
    - EvaporationDataTabulated ()
- Coefficient de Manning :
  - IManningStricklerPerturbationData implemented by
    - ManningStricklerPerturbationDataBathymetry ()
    - ManningStricklerPerturbationDataCartesianRandom ()
    - ManningStricklerPerturbationDataTabulated ()
    - ManningStricklerPerturbationDataWaterFlux ()

## ● Arcane à tous les niveaux

- Gestion du maillage déstructuré (cartésien pour l'instant, Voronoï pour le futur)
- Parallélisme (partitionnement géométrique avec Zoltan)
- Résolution des systèmes linéaires avec 
- Systèmes définis sur les DoF
- Mise en donnée via les services
- Sorties au format ixm
- Documentation html générée automatiquement : plugin applicatif pour le script axldoc d'Arcane (Stéphane de Chaisemartin et Pascal Havé)

*Innover les énergies*

Retrouvez-nous sur :

🌐 [www.ifpenergiesnouvelles.fr](http://www.ifpenergiesnouvelles.fr)

🐦 [@IFPENinnovation](https://twitter.com/IFPENinnovation)



