

Les Arcanes de la géosciences : une boite (de pandore ?) nommée ArcaDES

Equipe ArcaDES : Julien Coatléven, Léo Agelas, Benoit Chauveau, Didier Granjeon, Sylvie Pegaz-Fiornet, Xavier Tunc

Contexte

- Une partie des logiciels IFPEN dédiés géosciences embarque des calculateurs développés depuis la plateforme Arcane. ArcaDES est le calculateur utilisé par un logiciel DionisosFlow conçu pour la modélisation stratigraphique

Modélisation de bassin : simulation dynamique de l'évolution d'un bassin sédimentaire



Modélisation stratigraphique : modélisation des processus d'érosion-transport-dépôt en fonction des évolutions climatiques, modèle de nappe



Représentation des milieux matriciels hétérogènes (modélisation géostatistique)

CobraFlow

Représentation des milieux fracturés → extension aux conduits karstiques

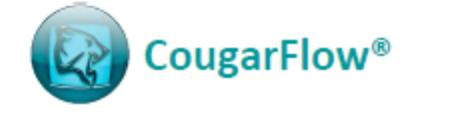


Modélisation de l'écoulement et du transport (réactif) en milieux poreux complexes :

- Modèle simple et double milieu
- Modèle emboîté
- Transport réactif



Gestion des incertitudes
(identification des paramètres influents, optimisation des modèles)



Préambule

- ArcaDES est un modèle qui embarque de nombreux processus pour simuler des scénarios géologiques complexes
- ArcaDES une boîte de Pandore ?
 - ❖ Faire ou commencer quelque chose qui causera des nombreux problèmes imprévus
- Au sens du géologue, qui vient confronter ces modèles conceptuels aux modélisations physiques, ArcaDES va lui poser des problèmes imprévus
- Cependant, ce sont au travers de ces imprévus que le géologue affinera sa compréhension



Modélisation stratigraphique

- « Un modèle stratigraphique est une représentation des relations spatiales et temporelles des unités sédimentaires, basée sur des données et des principes géologiques »
- Plusieurs étapes d'observation, de caractérisation et d'interprétation sont nécessaires avant de pouvoir établir un modèle stratigraphique => exemple simplifié tiré d'une étude sur l'île de Samos par Hamon et al. (2023)



Contexte géographique

Samos est une petite île grecque (45 km de long, 20 km au plus large), qui se situe dans l'Est de la mer Egée, tout proche de la Turquie.

Contexte géodynamique

Position stratégique en arrière-arc dans le système de subduction Afrique-Europe, à la transition entre deux domaines géodynamiques distincts.

Modélisation stratigraphique

- « Un modèle stratigraphique est une représentation des relations spatiales et temporelles des unités sédimentaires, basée sur des données et des principes géologiques »
- Plusieurs étapes d'observation, de caractérisation et d'interprétation sont nécessaires avant de pouvoir établir un modèle stratigraphique => exemple simplifié tiré d'une étude sur l'île de Samos par Hamon et al. (2023)



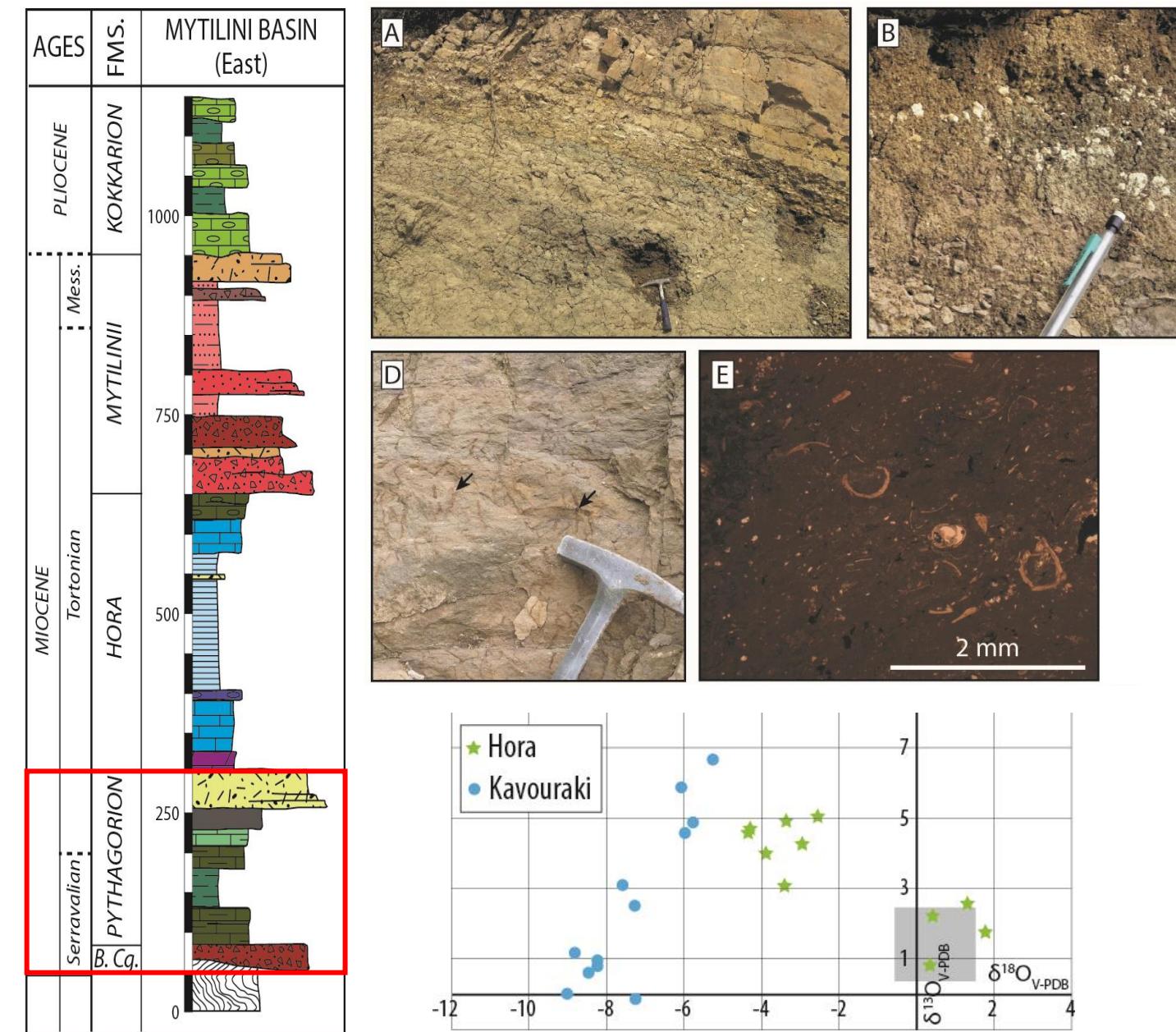
Contexte géologique

Couvre une période qui va de ~13 My à ~3 My, ce qui intègre la crise de salinité Messinienne

Contraintes âges

- Datations sur les dépôts volcaniques

Remplissage d'un bassin sédimentaire sous contrainte climatique



Première formation

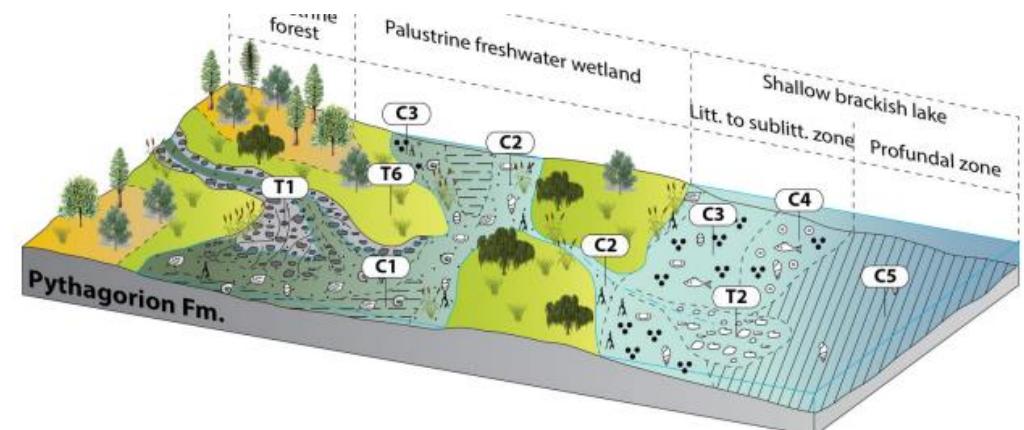
Les observations de terrain indiquent un environnement peu profond et calme

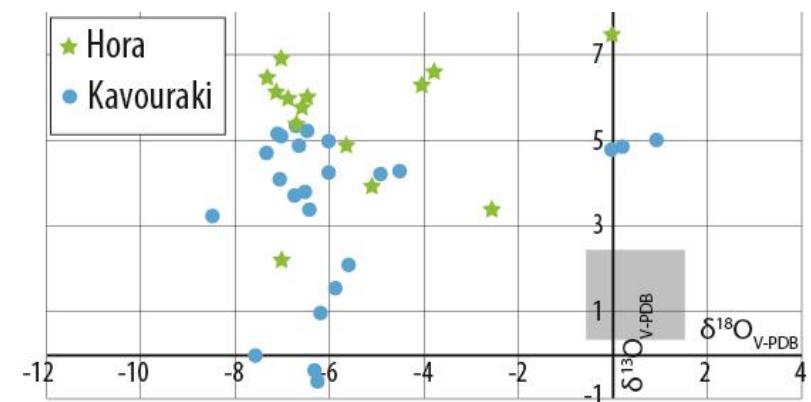
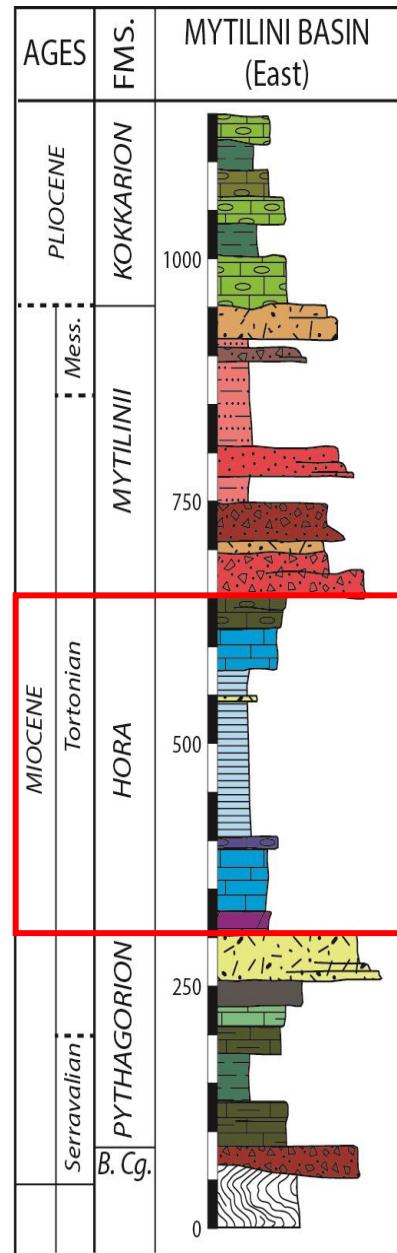
- Facies marneux
- Texture boueuse

Les observations géochimiques confortent les données de terrain

- La covariance des données isotopiques carbone oxygène sont caractéristiques d'un milieu fermé

Enfin, ces mêmes données montrent la présence d'une signature parfois de type marine

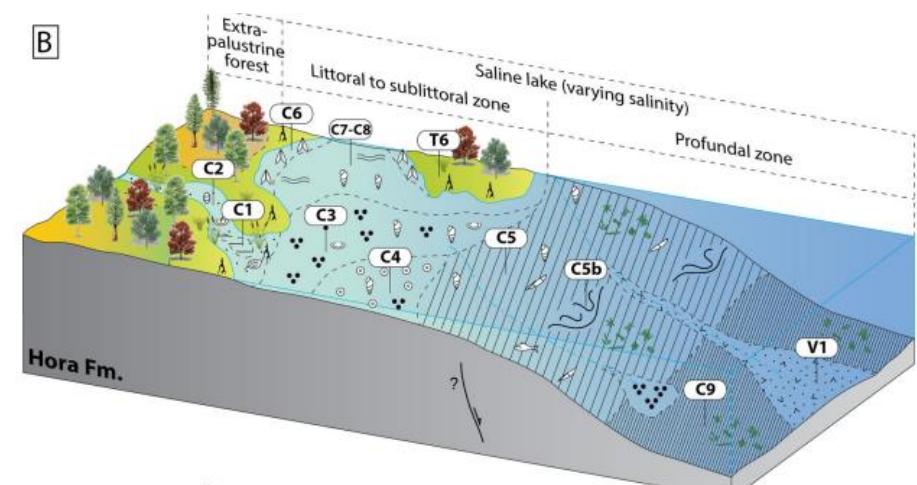


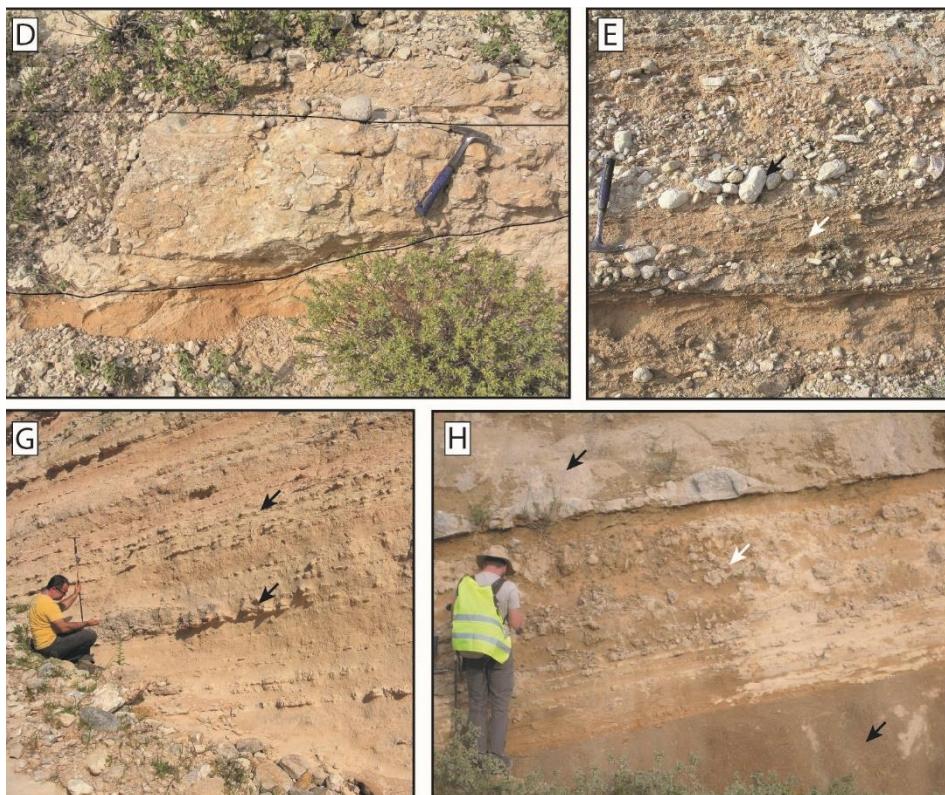
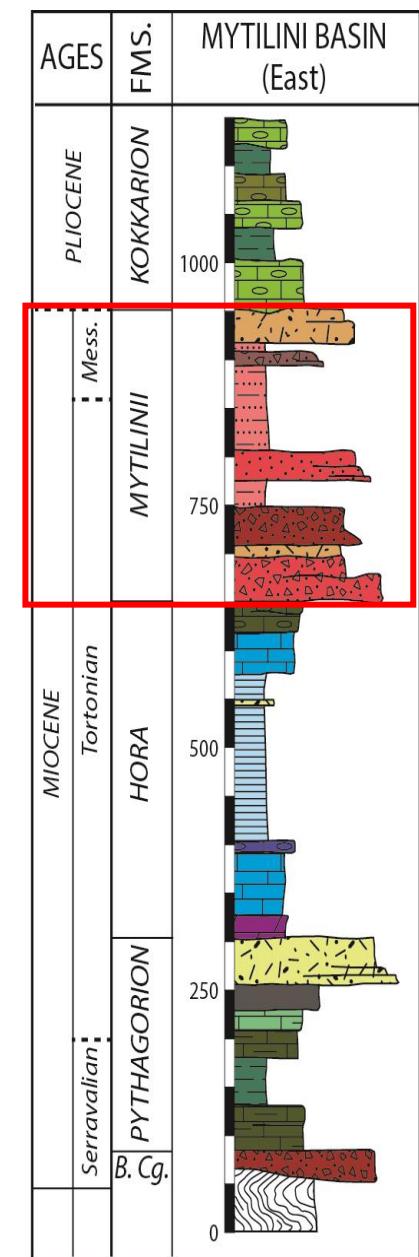


Deuxième formation

Les observations de terrain indiquent

- un environnement qui devient plus profond, en lien avec une activité tectonique
- Un environnement qui devient moins salé (présence de diatomés)
- Le haut de la formation est capé d'une discordance majeure (émergence)
- L'absence de covariance des données isotopiques carbone oxygène sont caractéristiques d'un milieu ouvert

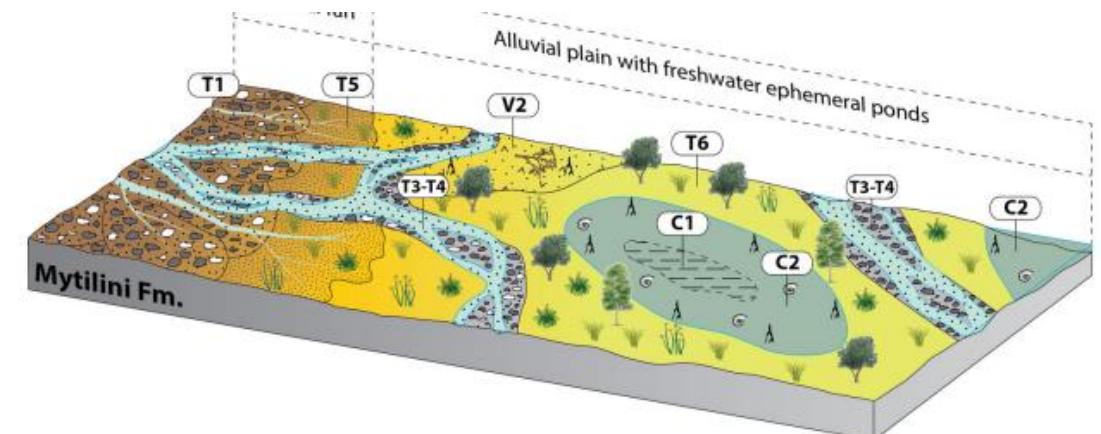


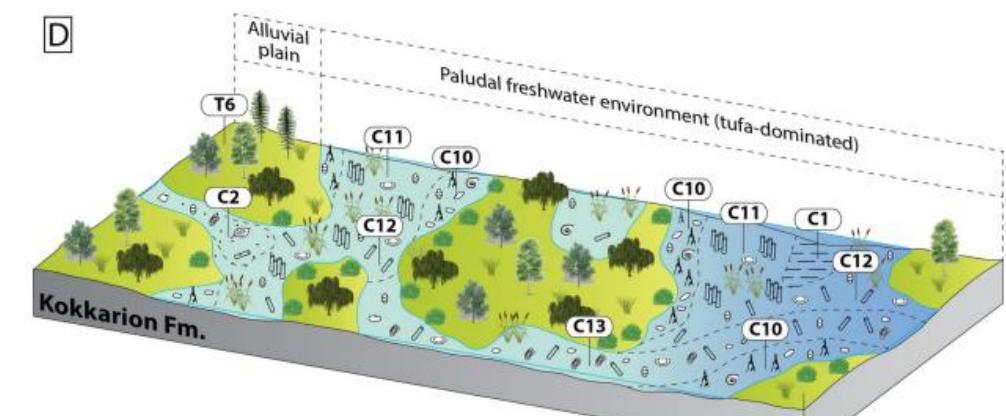
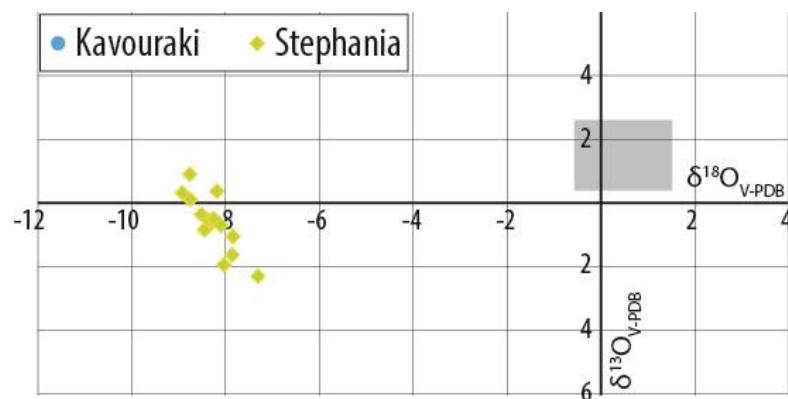
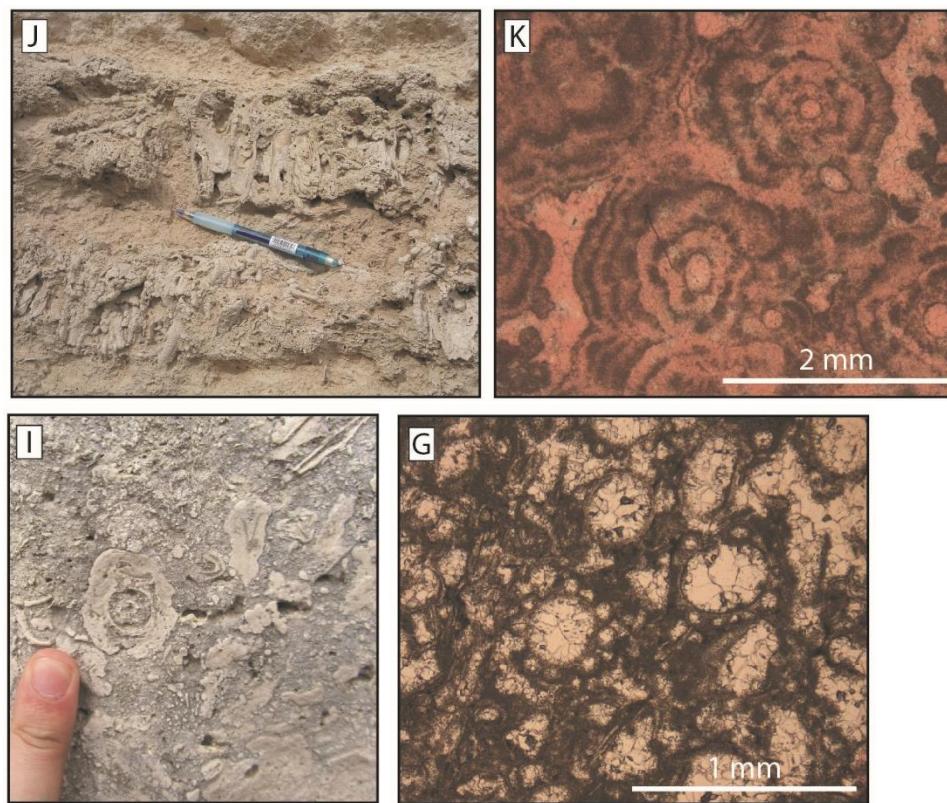
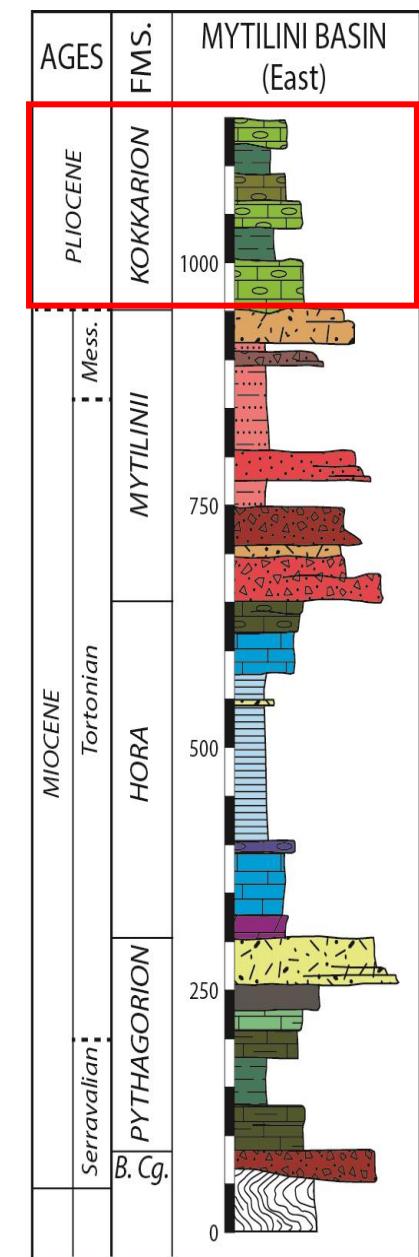


Troisième formation

Les observations de terrain indiquent un environnement alluviale

- Argilitte rouge
- Conglomérats
- Forte pédogénèse
- Présence localement de carbonate formés dans les petits lacs éphémères





Quatrième formation

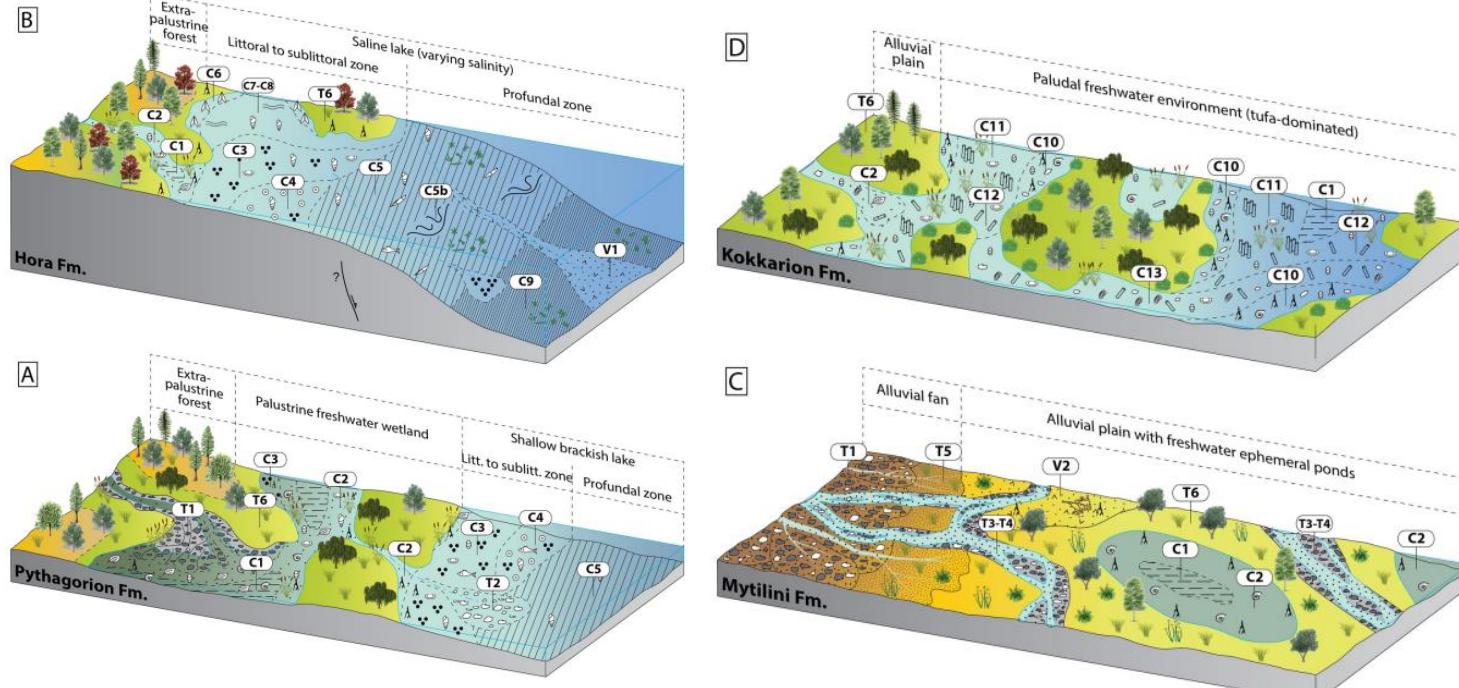
Les observations de terrain indiquent un environnement marécageux

- Phragmites (roseaux)
- Entouré de calcaire (environnement alcalin)

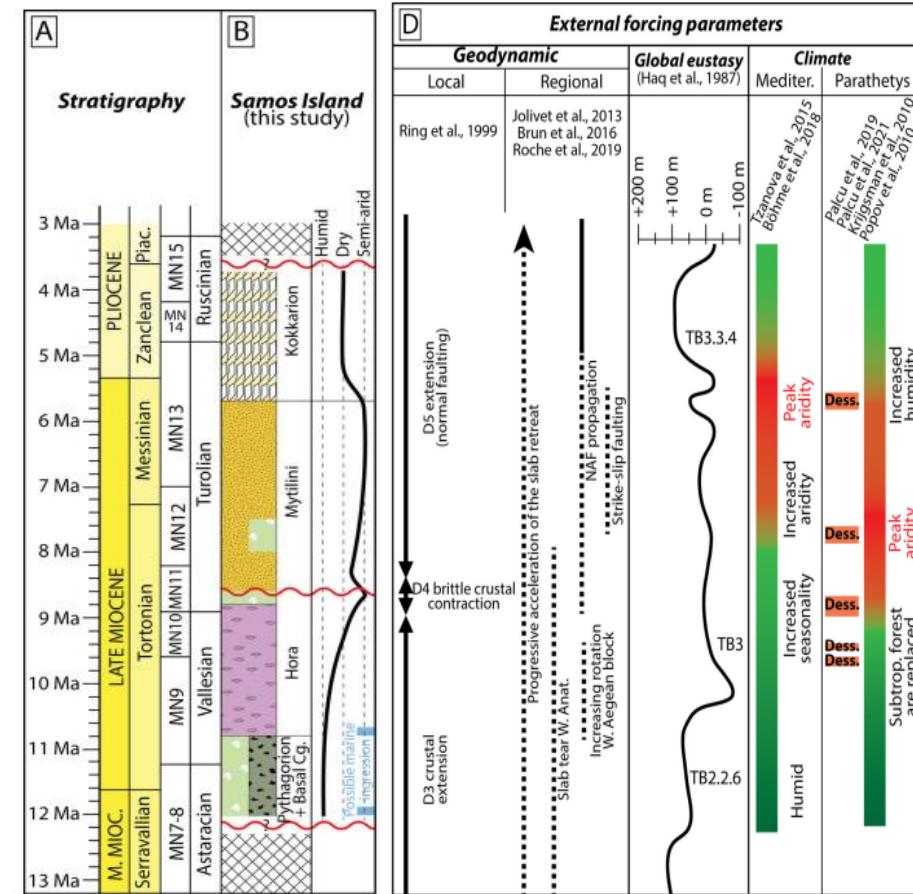
La covariance négative des isotopes carbone oxygène indiquent un origine météoritique des eaux et des processus biologiques associés à la végétation et au sol d'un environnement marécageux

Modélisation stratigraphique

- « Un modèle stratigraphique est une représentation des relations spatiales et temporelles des unités sédimentaires, basée sur des données et des principes géologiques »
- Plusieurs étapes d'observation, de caractérisation et d'interprétation sont nécessaires avant de pouvoir établir un modèle stratigraphique

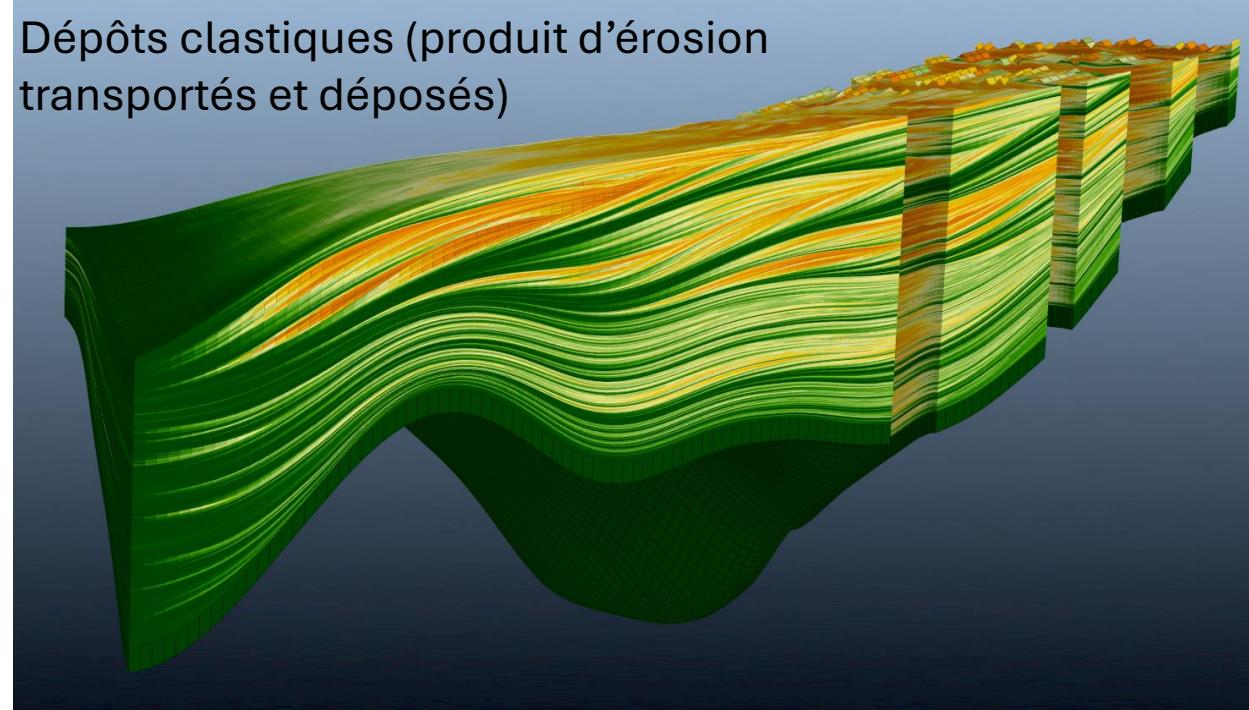


Modèles de dépôts

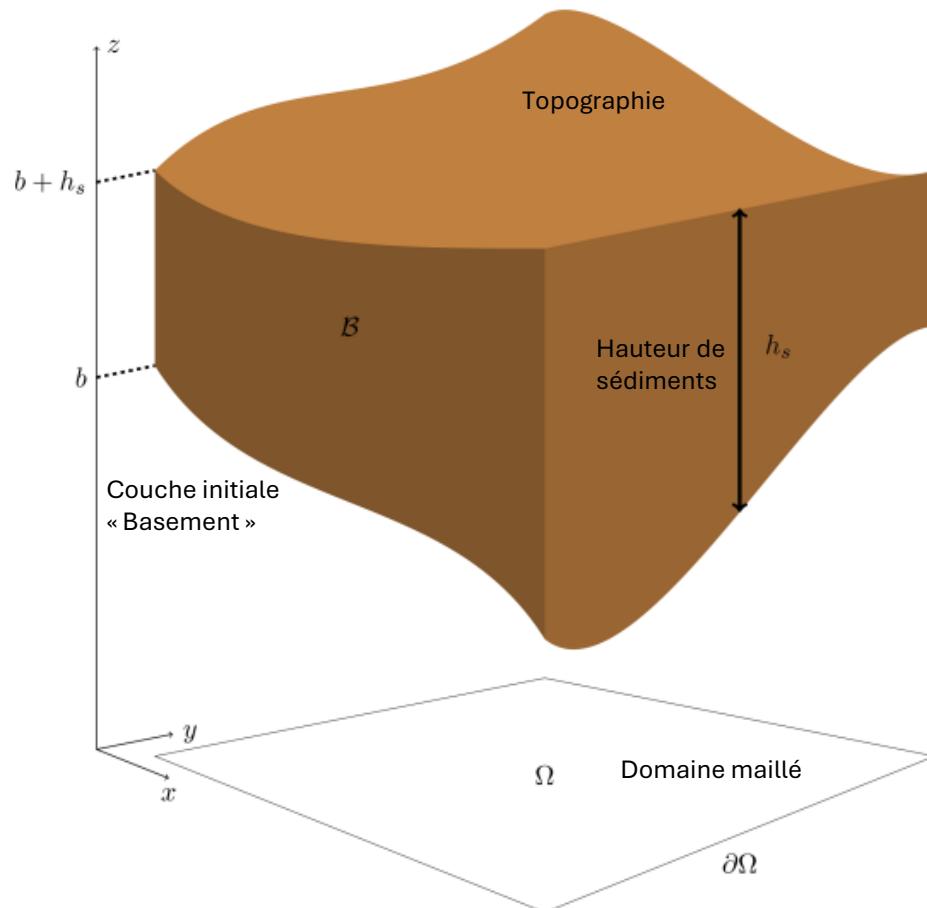


ArcaDES au service de la modélisation stratigraphique

- ArcaDES est historiquement conçu pour faire de la modélisation stratigraphique. L'utilisateur va alors chercher à reconstruire un modèle géologique conceptuel et ainsi tester la robustesse des hypothèses qui le soutiennent.



ArcaDES : contexte



- ArcaDES modélise l'évolution en espace et en temps d'un bassin sédimentaire.
 - ❖ Le bassin sédimentaire se présente comme un empilement de surfaces 2D sur lesquelles sont inscrites diverses propriétés
- Si l'accumulation de couches 2D permettent de reconstruire un bloc 3D, ArcaDES reste bien un modèle fondamentalement 2D (tous les modèles physiques sont formulées sur Ω)
 - ❖ Compromis pratique visant à équilibrer la simplicité de mise en œuvre et la précision des résultats.

Les sédiments : l'ingrédient central d'un modèle stratigraphique

- Evolution de la distribution de la masse \mathcal{M}_i du sédiment i dans le domaine

$$\partial_t \mathcal{M}_i - \operatorname{div} (\lambda \mathbf{J}_i) = S_i + R_i$$

$$\lambda \mathbf{J}_i \cdot \mathbf{n} = B_i$$

- Sous cette équation simple, où interviennent des termes sources (S et R), un flux J (associé à un limiteur de flux) et des conditions aux limites B, se dissimule une multitude de processus géologiques complexes.
- C'est précisément ici que la modularité d'Arcane déploie tout son potentiel

Les sédiments : l'ingrédient central d'un modèle stratigraphique

- Evolution de la distribution de la masse \mathcal{M}_i du sédiment i dans le domaine

$$\partial_t \mathcal{M}_i - \operatorname{div} (\lambda \mathbf{J}_i) = S_i + R_i$$

$$\lambda \mathbf{J}_i \cdot \mathbf{n} = B_i$$

L'expression du flux de sédiments \mathbf{J}_i dépend de la **pente topographique** et de la combinaison de trois moteurs de diffusion : **diffusion gravitaire**, **diffusion par le flux d'eau**, **diffusion par action des vagues**

$$\mathbf{J}_i = \boxed{||\nabla(h+b)||^{p-2}} \left(\boxed{\nabla \psi_i^g(h+b, w_t, e)} + \boxed{\frac{q_w^m}{q_{w,ref}^m} \nabla \psi_i^w(h+b, w_t, e)} + \boxed{\frac{J_W^{tot}}{J_{W,ref}} \nabla \psi_i^{wa}(h+b)} \right)$$

Les sédiments : l'ingrédient central d'un modèle stratigraphique

- Evolution de la distribution de la masse \mathcal{M}_i du sédiment i dans le domaine

$$\partial_t \mathcal{M}_i - \operatorname{div} (\lambda \mathbf{J}_i) = S_i + R_i$$

$$\lambda \mathbf{J}_i \cdot \mathbf{n} = B_i$$

- Termes sources : Flux de sédiments depuis les bords du domaine B_i
 Production in-situ de sédiments S_i
 Réaction Transformation ou dissolution R_i

L'expression du flux de sédiments \mathbf{J}_i dépend de la **pente topographique** et de la combinaison de trois moteurs de diffusion : **diffusion gravitaire**, **diffusion par le flux d'eau**, **diffusion par action des vagues**

$$\mathbf{J}_i = \boxed{\|\nabla(h + b)\|^{p-2}} \left(\boxed{\nabla \psi_i^g(h + b, w_t, e)} + \frac{q_w^m}{q_{w,ref}^m} \boxed{\nabla \psi_i^w(h + b, w_t, e)} + \boxed{\frac{J_W^{tot}}{J_{W,ref}} \nabla \psi_i^{wa}(h + b)} \right)$$

Diffusion gravitaire $\nabla \psi_i^g$

$$\nabla \psi_i^\alpha(h + b, w_t, e) = K_{i,\alpha}(h + b, e) \nabla(h + b)|$$



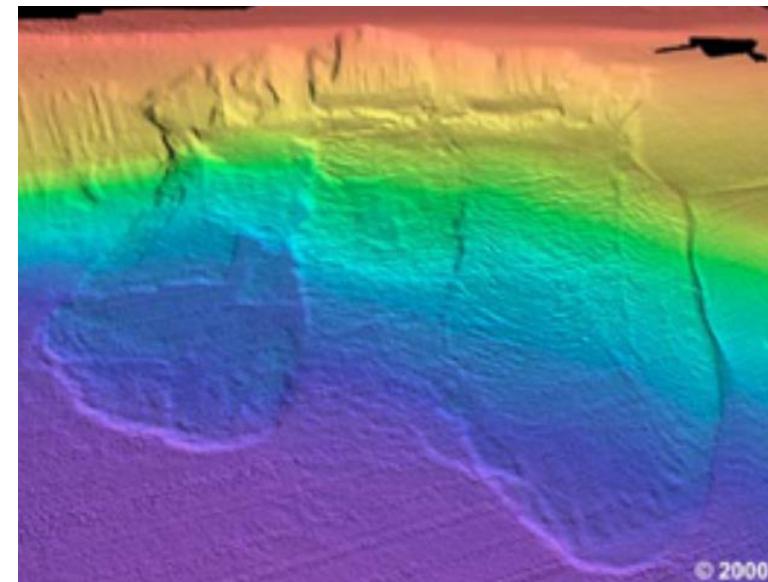
Environnement de dépôt dépendant



Glissement de terrain (Canada)



Cônes d'éboulis (Norvège)



Debris Flow (coulée) sous marine

Diffusion par le flux d'eau $\nabla \psi_i^w$

$$\nabla \psi_i^\alpha(h + b, w_t, e) = K_{i,\alpha}(h + b, e) \nabla(h + b)|$$



Environnement de dépôt dépendant
Flux d'eau dépendant



fleuve Waimakariri (Nouvelle Zelande)

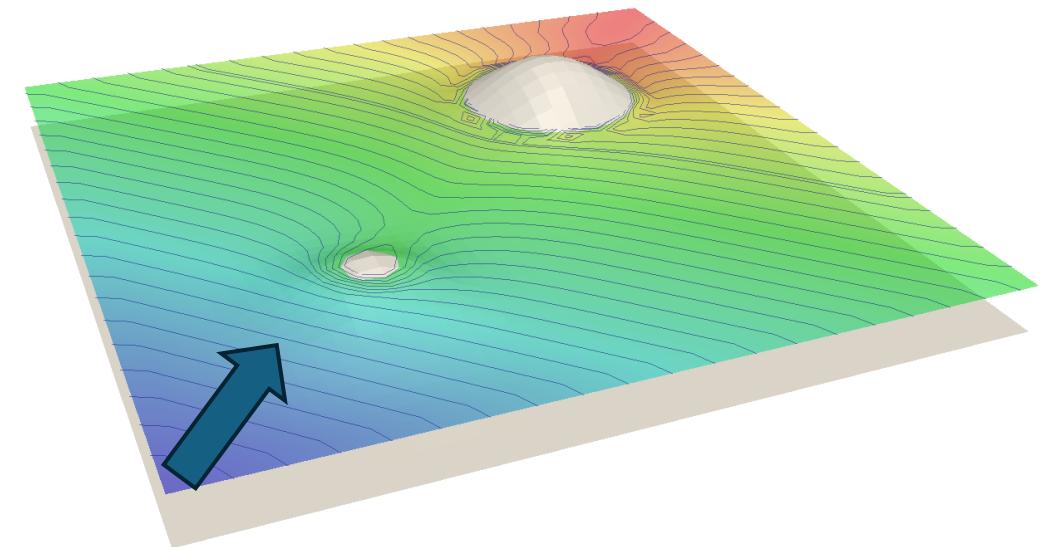
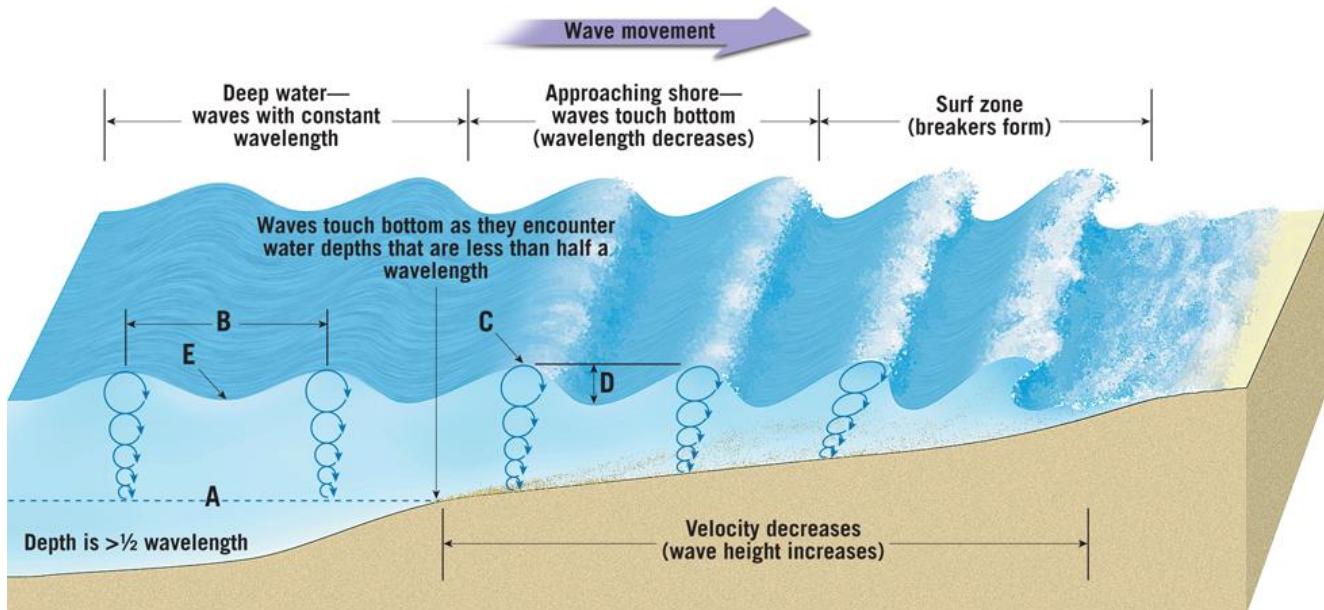
Fjaðrárgljúfur (Islande)



Lac de clairvaux (France)

Diffusion par action des vagues $\nabla \psi_i^{wa}$

- Ajoute de l'énergie pour permettre le transport (par défaut toujours dans le sens de la pente)



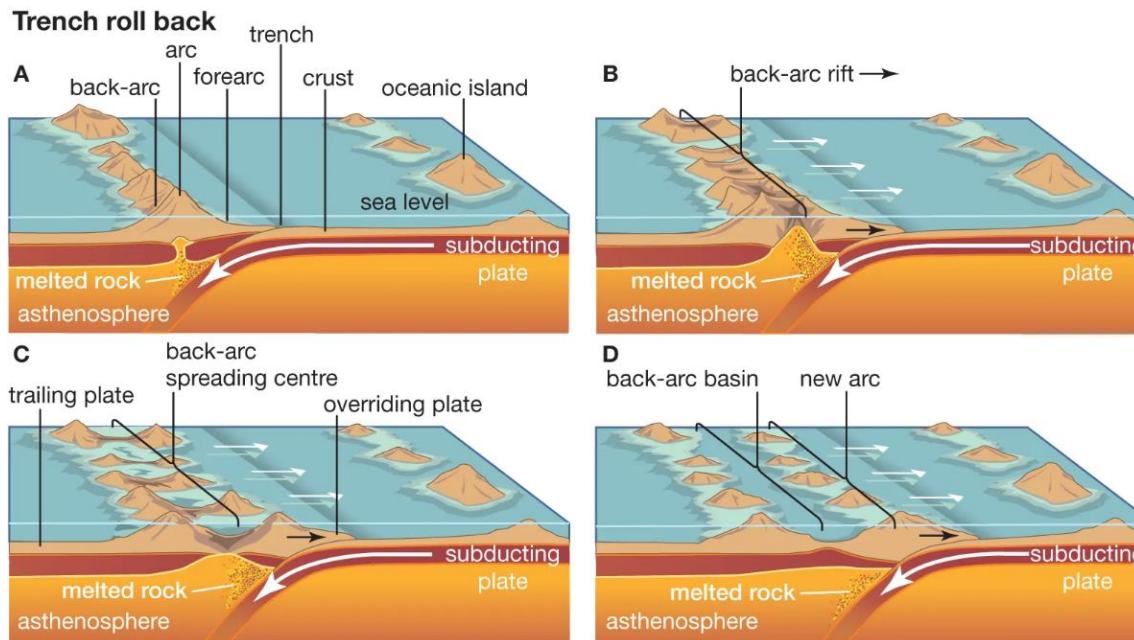
Déformation du solce (subsidence)

b

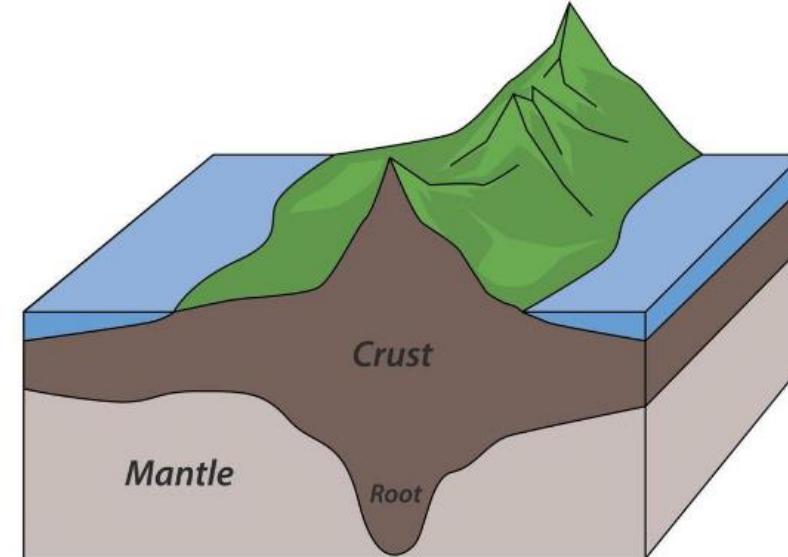
$$: ||\nabla(h + b)||^{p-2} \left(\underbrace{\nabla\psi_i^w + \nabla\psi_i^{wa} + \nabla\psi_i^g}_{\nabla(h + b)} \right)$$

■ Intervient dans tous les moteurs de transport du sédiment

- ❖ Données d'entrée sous forme de carte (x,y,z,t)
- ❖ Modèle physique flexural



Différents services pour alimenter
les données « carte de subsidence (x,y,z,t) »



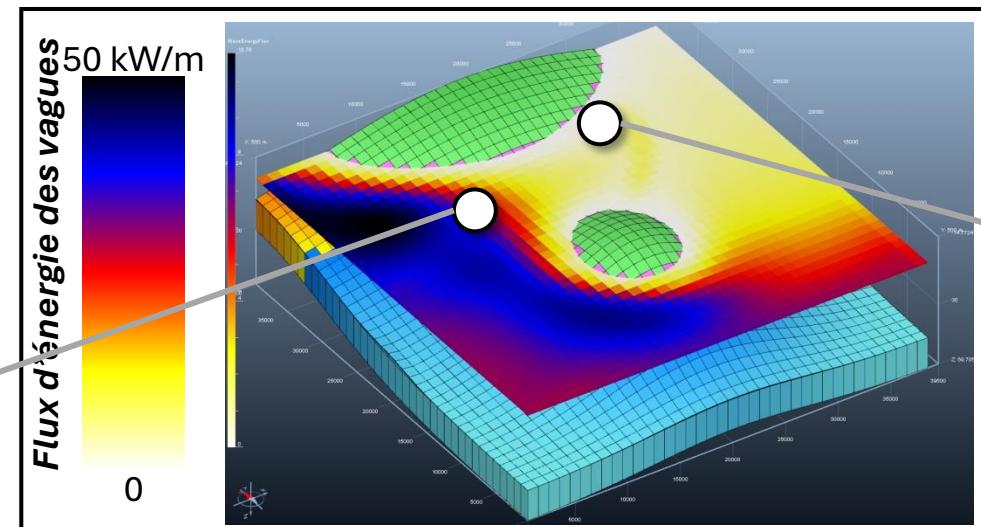
Modèle physique flexural

$$R_i / S_i$$

- Production de sédiments : carbonates, évaporites, matière organique
- La production et la dissolution sont modulables par un ensemble de conditions environnementales liées à
 - ❖ l'énergie des vagues
 - ❖ La turbidité (concentration en sédiments dans l'écoulement)
 - ❖ La salinité
 - ❖ La température
 - ❖ La nature du sol
 - ❖



Récif corallien



Calcul de l'énergie des vagues et de l'état de la mer avec ArcaDES
Visualisation avec DionisosFlow / OpenFlow



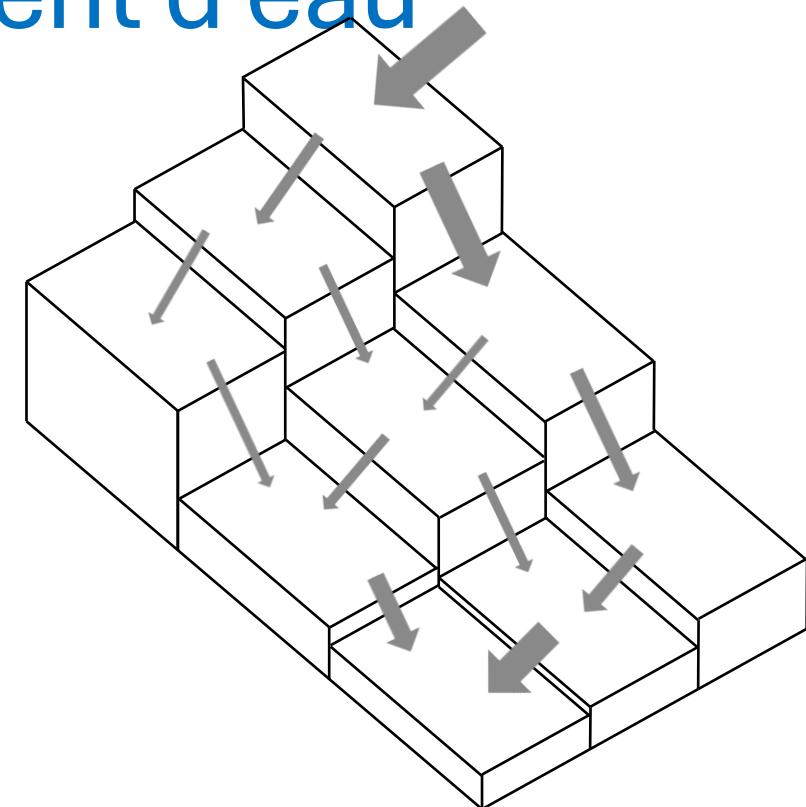
Algues et herbiers
Zone simulée : 40 km x 40 km
(dx=1 km)

Les Arcanes d'ArcaDES : l'écoulement d'eau

- Le cœur du calculateur est un couplage entre un écoulement d'eau et un transport sédimentaire
- **Module Hydro:** On résout un algorithme de type MFD (Multiple Flow Direction) pour déterminer un « réseau hydrique » en régime permanent
 - ❖ Principe : Les flux d'eau sont répartis d'une cellule vers ses cellules voisines proportionnellement à la pente, permettant de mieux représenter les écoulements complexes dans des terrains à topographie variée.
 - ❖ Résolution : exprimable sous la forme d'un système linéaire



- ❖ Les travaux récents (Coatléven, 2020) ont montré que ces algorithmes reviennent à résoudre l'équation de Gauckling-Manning-Strickler (GMS) si l'on prend la correcte expression du flux (qui assurera la consistance).



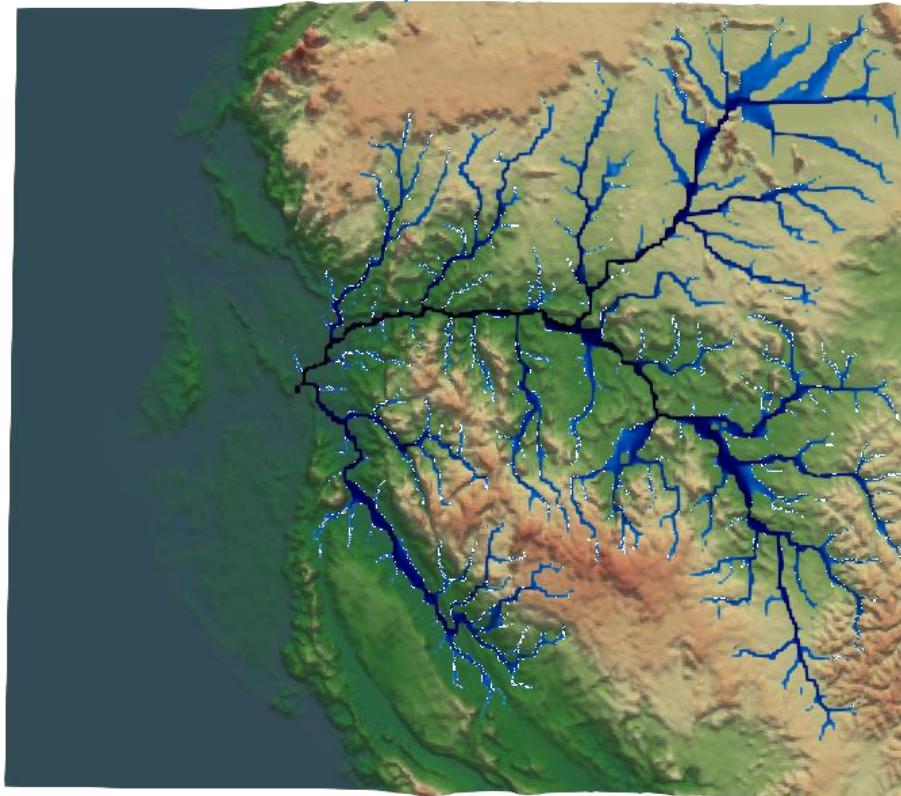
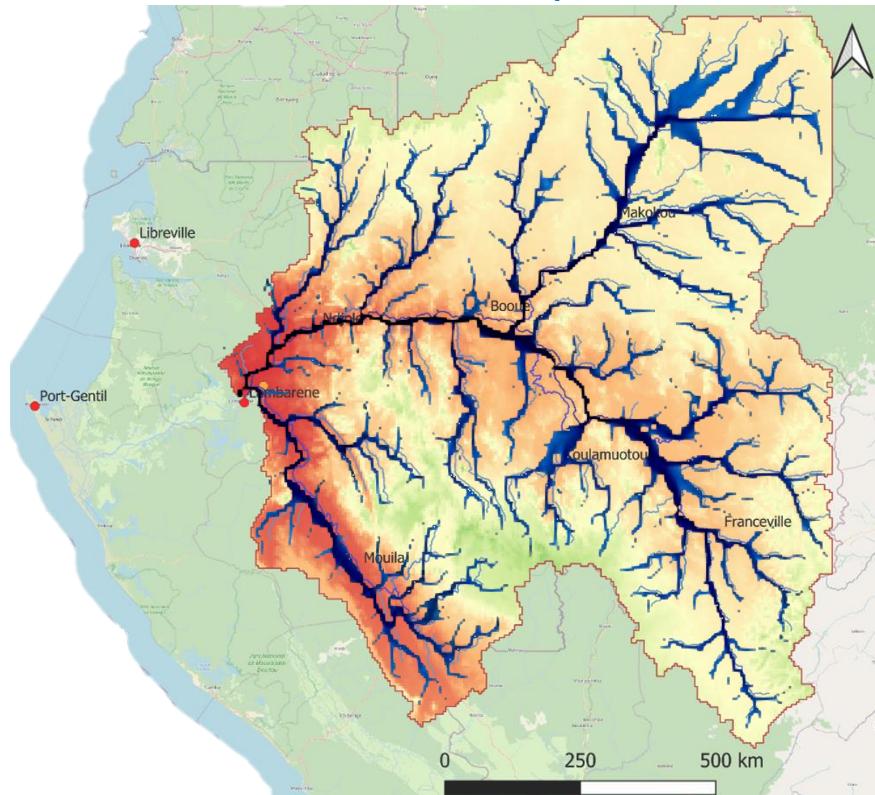
$$\mathbf{Q}_w = -\frac{k_m h_w \eta_w(h_w)}{s_{ref}^{pw}} ||\nabla(h_s + b)||^{p_w} \nabla(h_s + b),$$

$$\operatorname{div}(\mathbf{Q}_w) = S_w \quad \text{in } \Omega,$$

$$\mathbf{Q}_w \cdot n = B_w \quad \text{on } \partial\Omega_{in},$$

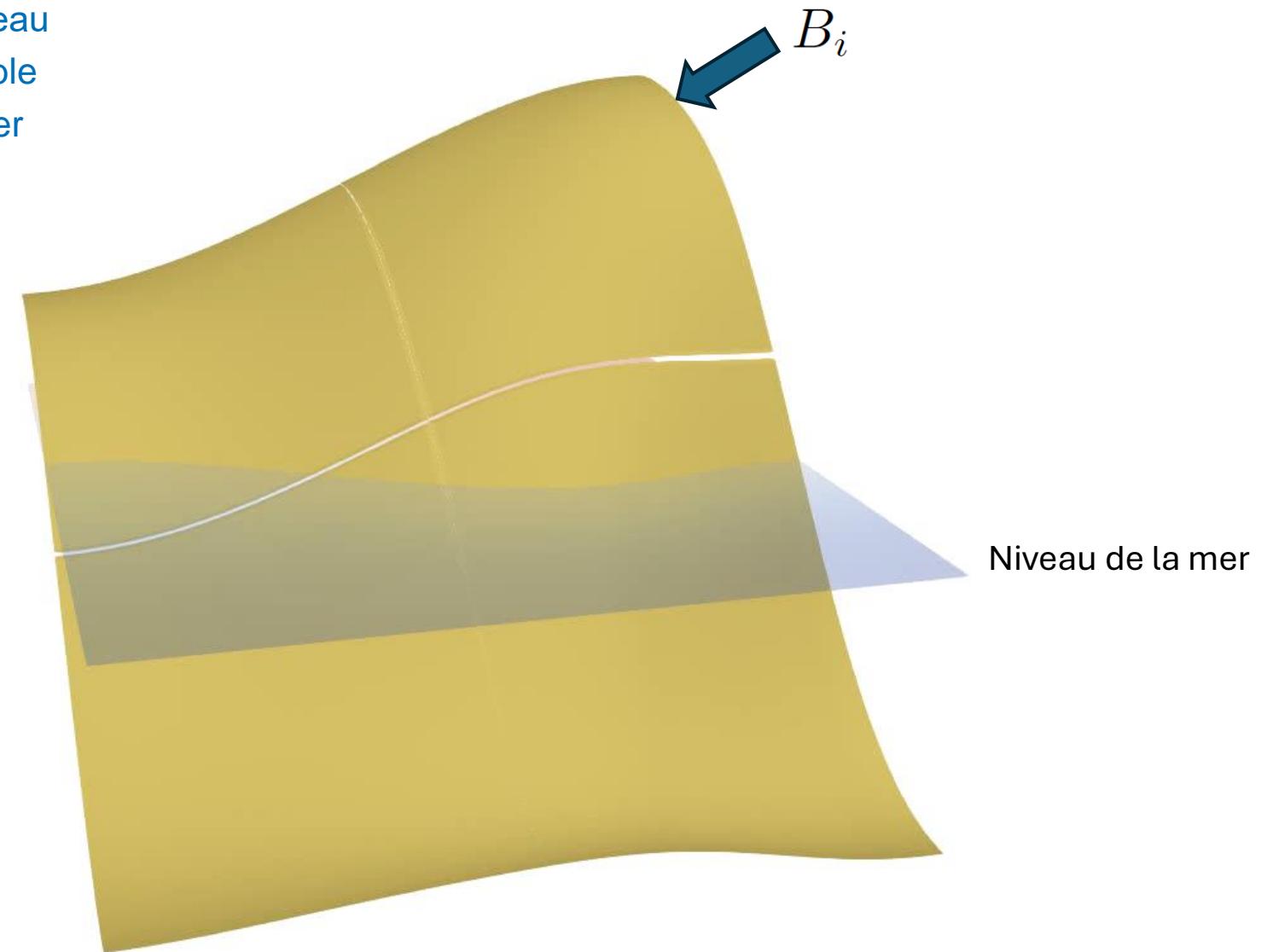
Bassin de l'Ogooué

- Exemple d'un écoulement sur une topographie réelle (bassin de l'Ogooué, Gabon)
- Nécessite une correction topographique pour assurer la drainance du bassin versant (approche classique)
- Etude qui a permis la simulation des exports de carbone (utilisation de traceurs)



- Exemple d'un écoulement sur une topographie synthétique qui évolue dans le temps (simulation avec 4procs)

- ❖ Un flux de sédiment + un flux d'eau
- ❖ Un coefficient de Manning variable
- ❖ Une variation du niveau de la mer



Les Arcanes d'ArcaDES : l'écoulement d'eau

- **2eme module Hydro:** on résout le modèle suivant

$$\begin{aligned}
 \mathbf{Q}_w &= -\frac{k_m h_w \eta_w(h_w)}{s_{ref}^{p_w}} ||\nabla(h_w + h_s + b)||^{p_w} \nabla(h_w + h_s + b), \\
 \operatorname{div}(\mathbf{Q}_w) &= S_w \quad \text{in } \Omega, \\
 \mathbf{Q}_w \cdot n &= B_w \quad \text{on } \partial\Omega_N, \\
 h_w &= 0 \quad \text{on } \partial\Omega_D,
 \end{aligned}$$

Qui découle du modèle de shallow-water sous deux hypothèses

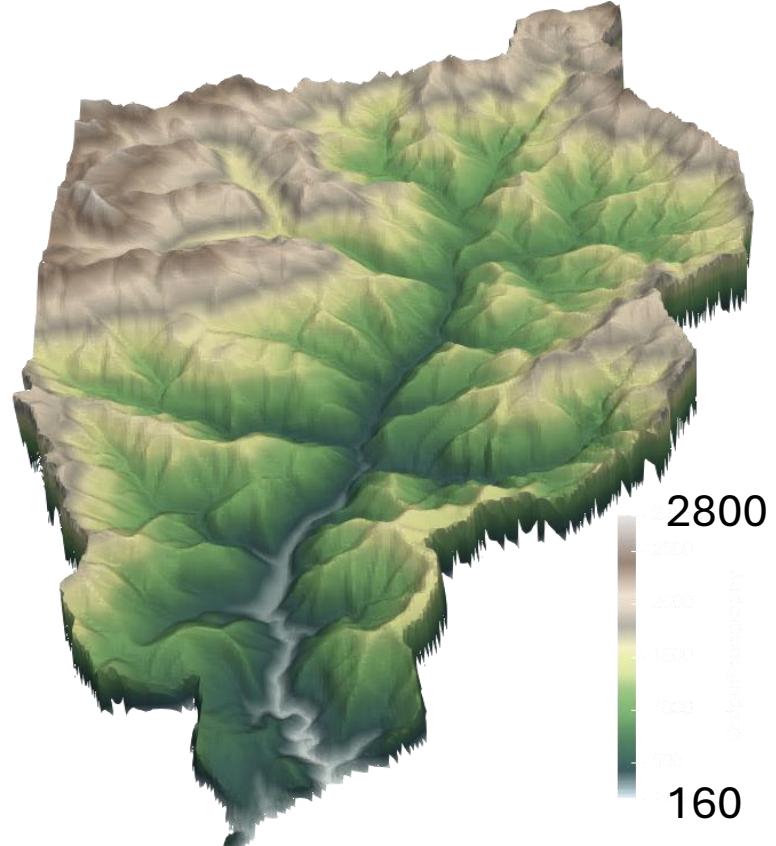
- état stationnaire de la conservation de la masse d'eau
- écoulement en temps long => termes sont dominés par la gravité

$$\begin{aligned}
 \cancel{\frac{\partial h_w}{\partial t}} + \operatorname{div}(h_w \mathbf{u}_w) &= 0, \\
 \cancel{\frac{\partial}{\partial t}}(h_w \mathbf{u}_w) + \operatorname{div}(h_w \cancel{\mathbf{u}_w} \otimes \mathbf{u}_w) + g h_w \nabla(h_s + b + h_w) + \\
 &= -\kappa_w(h_w, ||\nabla(h_w + h_s + b)||) |\mathbf{u}_w|^{r_w} \mathbf{u}_w,
 \end{aligned}$$



Les Arcanes d'ArcaDES : l'écoulement d'eau

- Ce deuxième modèle implémenté est naturellement un peu plus cher qu'un écoulement d'eau résolu avec un algo de MFD, mais il apporte un réalisme nécessaire pour simuler des écoulements d'eau + sédiments sur des topographies « réelles »



Topographie de la Roya (m)



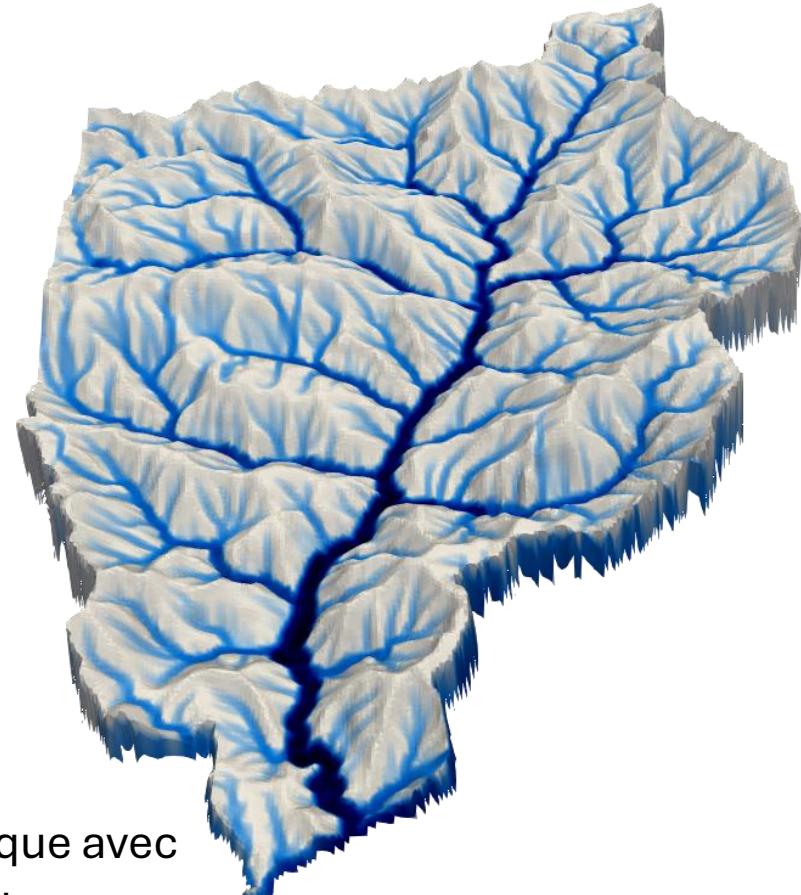
Réseau hydrique MFD



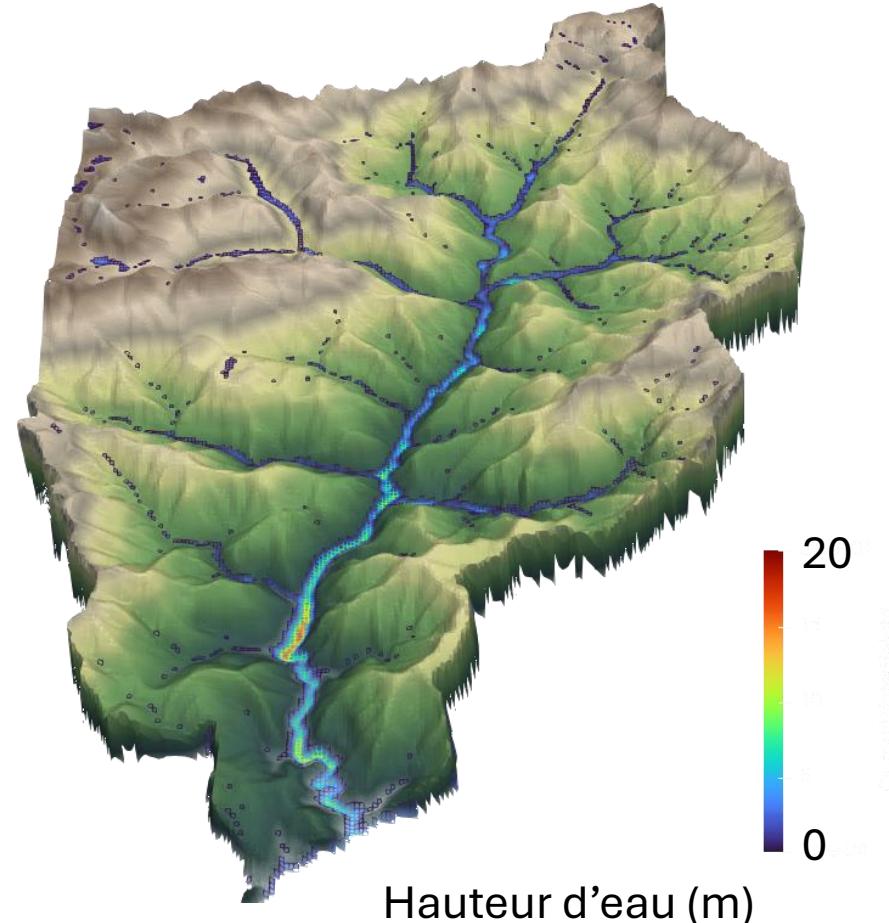
Réseau hydrique MFD + lac

Les Arcanes d'ArcaDES : l'écoulement d'eau

- Ce deuxième modèle implémenté est naturellement un peu plus cher qu'un écoulement d'eau résolu avec un algo de MFD, mais il apporte un réalisme nécessaire pour simuler des écoulements d'eau + sédiments sur des topographies « réelles »

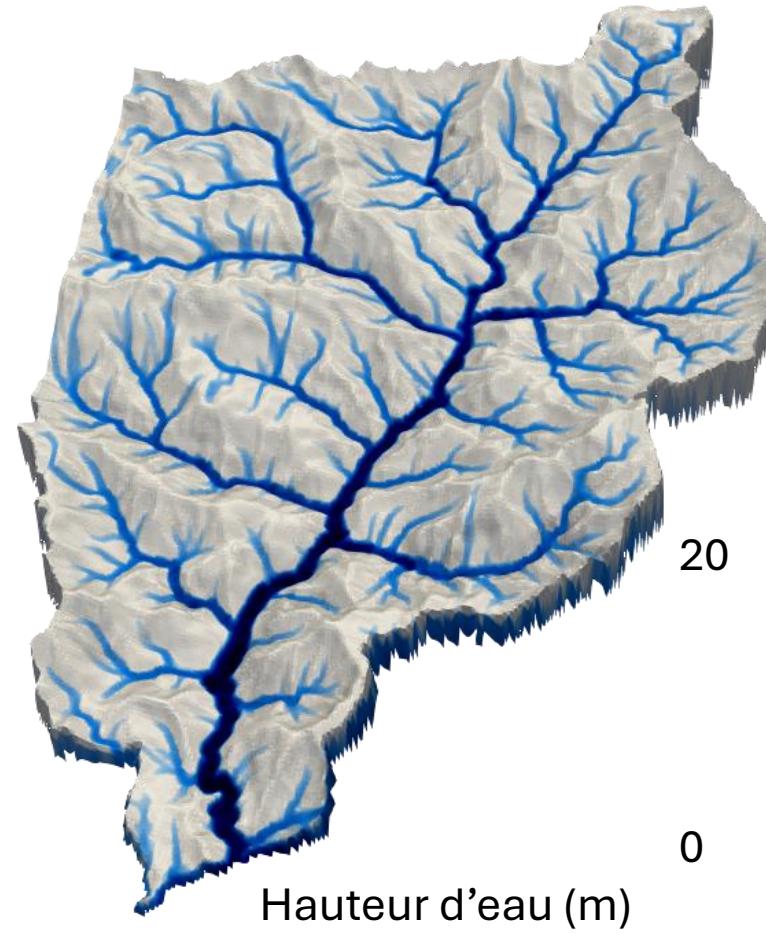
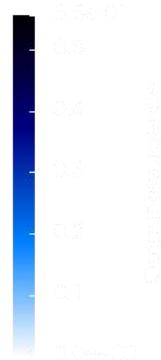


Réseau hydrique avec
hauteur d'eau



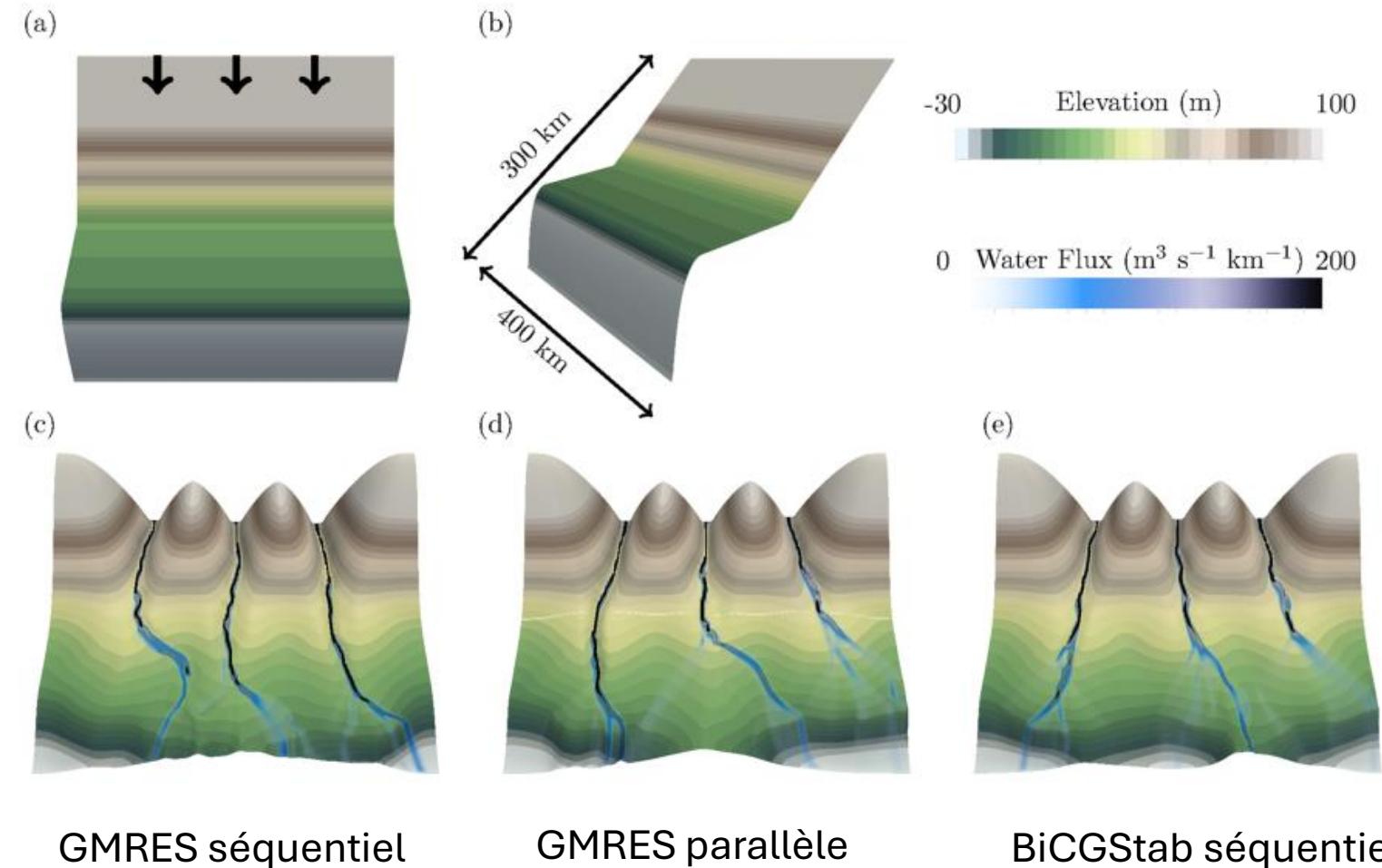
Les Arcanes d'ArcaDES : l'écoulement d'eau

- Simulation avec hauteur d'eau
- Simulation avec modèle de nappe phréatique (modèle de Dupuit-Forccheimer)



Le couplage eau – sédiment: zone de turbulence approche

- Sans traitement particulier du couplage eau-sédiment (peu importe le modèle d'écoulement de l'eau), les résultats sont réalistes ... mais peuvent être faux



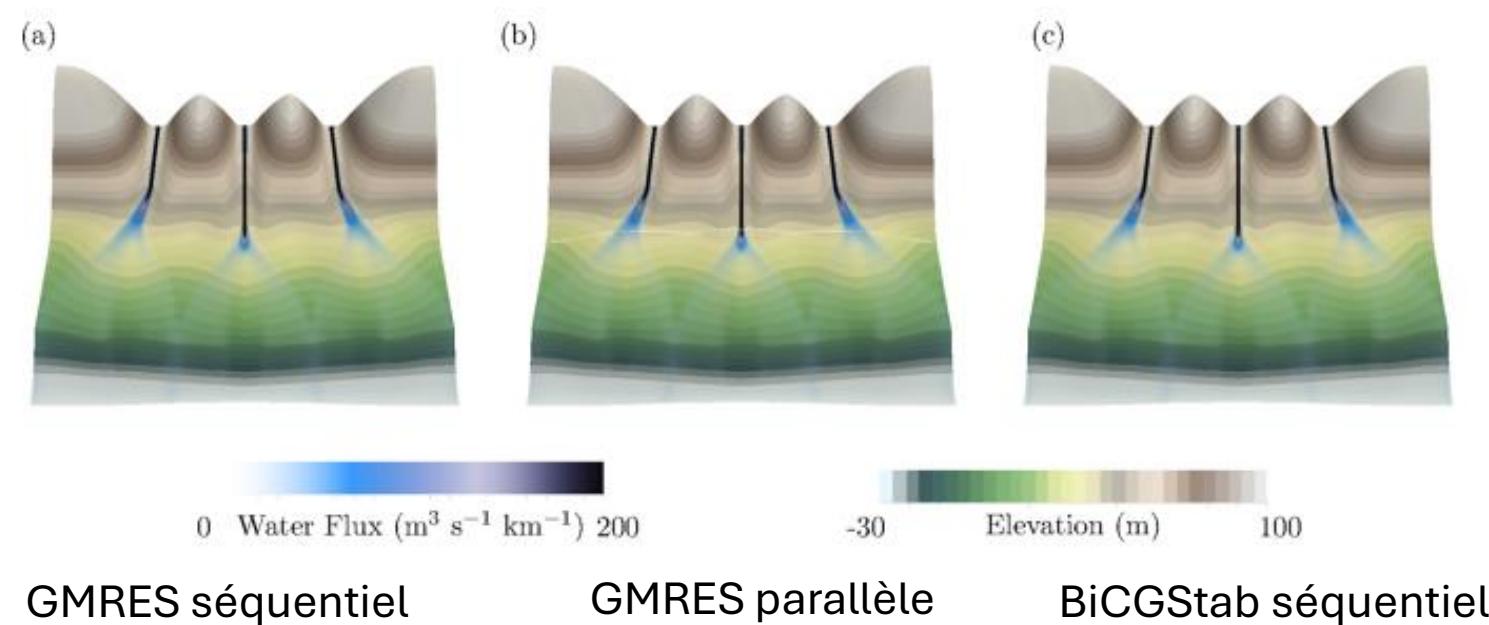
Le couplage eau – sédiment: zone de turbulence approche

- La solution implémentée (Coatéven et Chauveau, 2024) consiste à introduire un filtre de type Leray- α qui amorti les perturbations dont la taille caractéristique est trop petite

$$\mathbf{J}_s = -\eta_s(h_s) s_{\text{ref}}^{-p_s} \|\nabla(h_s + b)\|^{p_s} \left(\left(\frac{\mathcal{F}_{\alpha}^N(q_w)}{q_{\text{ref}}} \right)^{r_s} \right.$$
$$\left. \nabla \psi_w(h_s + b) + \nabla \psi_g(h_s + b) \right) \text{ in } \Omega \times [t_0, T[,$$

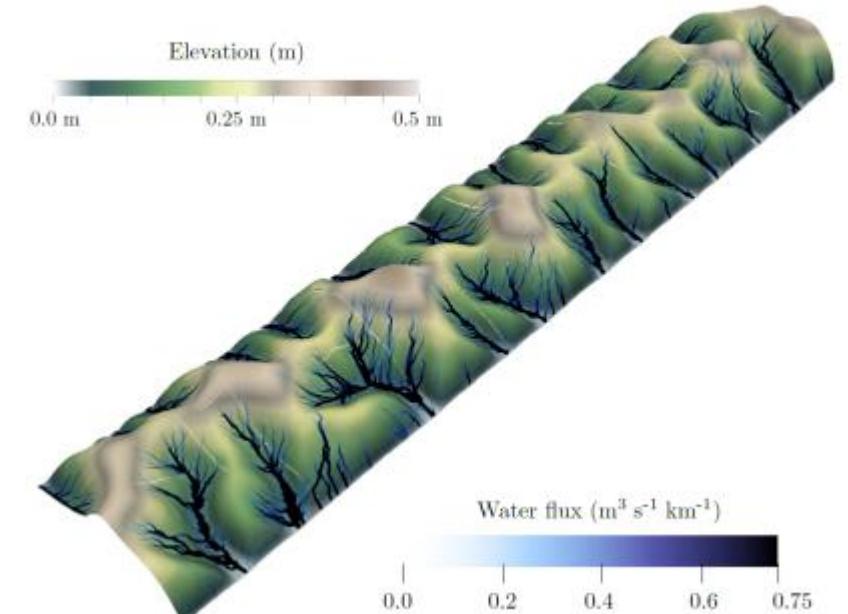
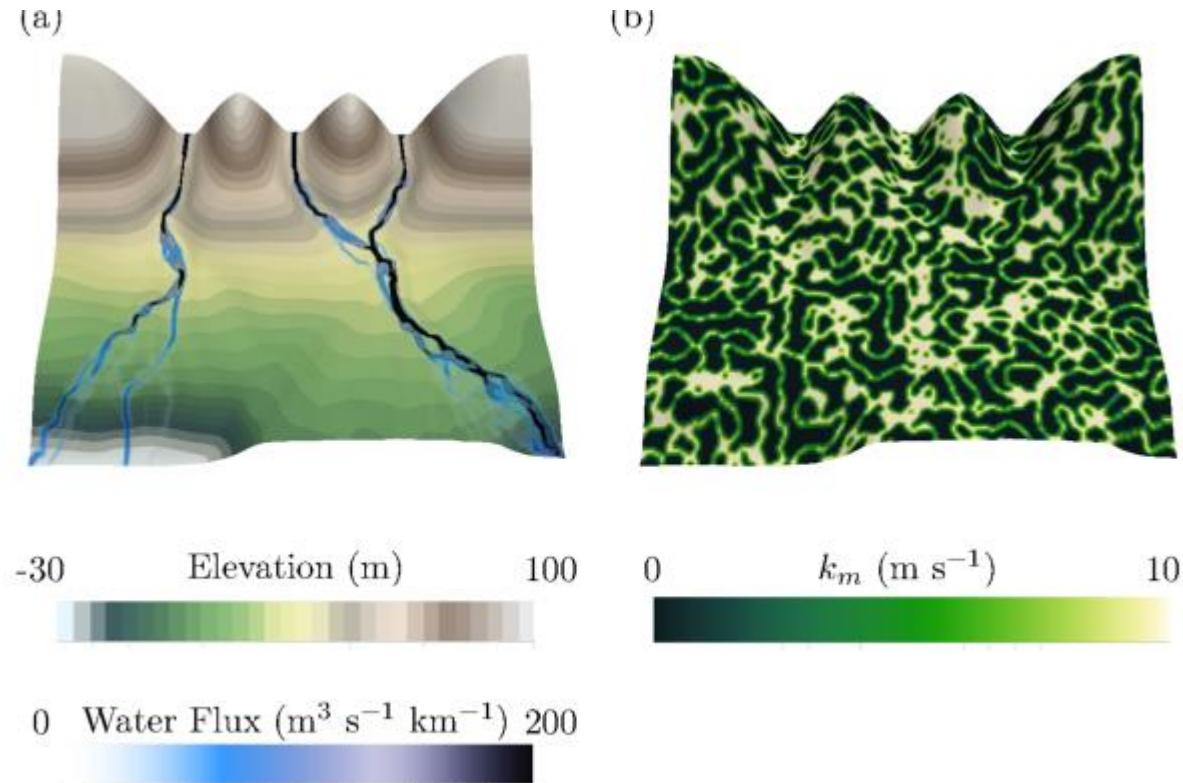
$$\mathbf{Q}_w = -\frac{k_m h_w \eta_w(h_w)}{s_{\text{ref}}^{p_w}} \|\nabla(\mathcal{F}_{\alpha}(h_s + b))\|^{p_w} \nabla(\mathcal{F}_{\alpha}(h_s + b)),$$
$$\text{div}(\mathbf{Q}_w) = S_w \quad \text{in } \Omega,$$

$$\mathbf{Q}_w \cdot n = B_w \quad \text{on } \partial\Omega_{\text{in}},$$



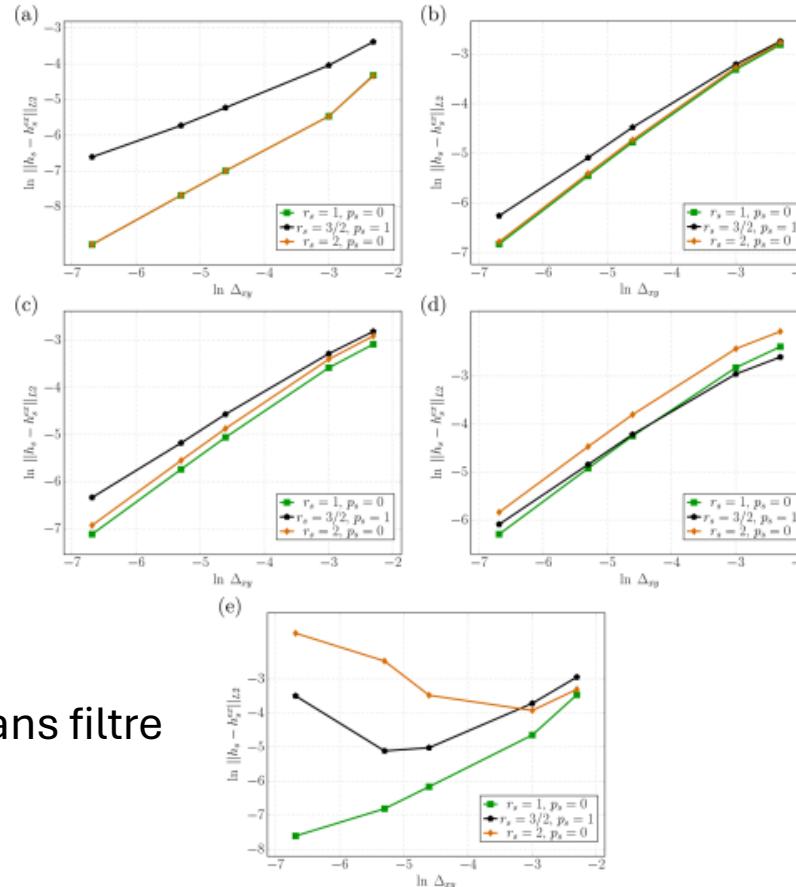
Le couplage eau – sédiment: zone de turbulence approche

- Les hétérogénéités dans le réseau hydrique peuvent alors être amorcées un jeu de données qui contient des hétérogénéités

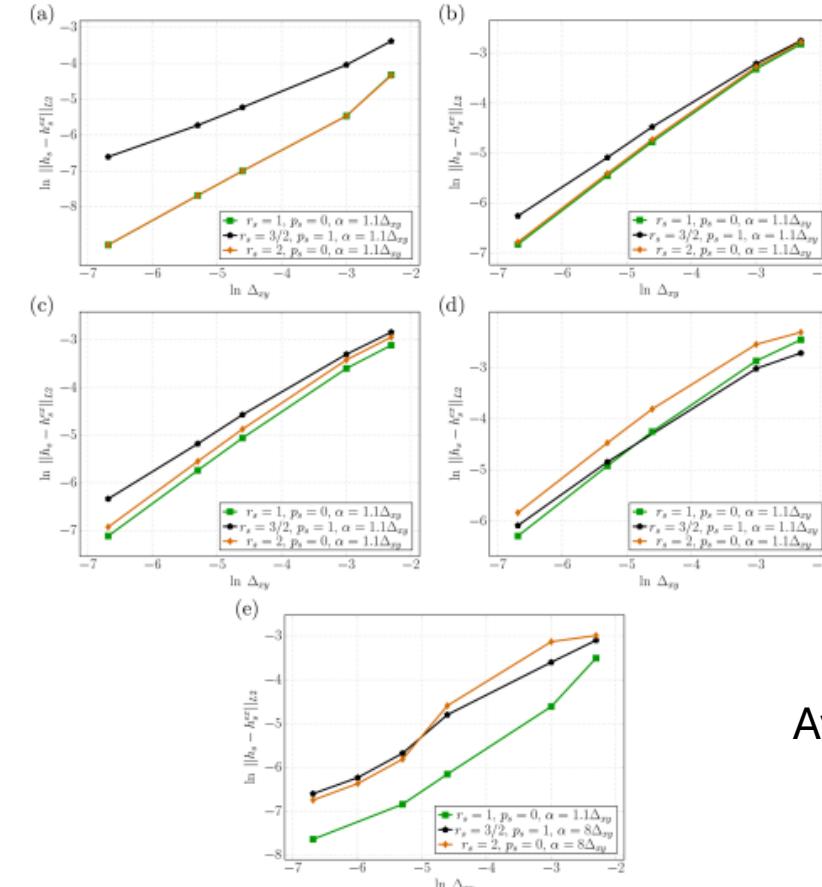


Les Arcanes d'ArcaDES : l'écoulement d'eau

- Pour valider ce travail, plusieurs courbes de convergence ont été établies
- Ces tests ont demandé de nombreux runs, tous configurés pour tourner avec 108 processeurs



Sans filtre



Avec filtre

Exemple de courbes de convergence pour différentes configurations d'écoulement (turbulence)

