

# Développement d'un modèle de transport sédimentaire pour l'étude de l'affouillement

De nombreux ouvrages hydrauliques sont construits sur des fonds sédimentaires, ils sont donc soumis à des problématiques d'évolution morphologique du fond à leur voisinage. L'affouillement a toujours été un phénomène difficile à prédire pour les ingénieurs qui conçoivent, construisent et gèrent ces structures hydrauliques à risque telles que les ponts, les digues, les éoliennes offshore et autres ouvrages entravant l'écoulement naturel de l'eau. Une étude de Wardhana et Hadipriono (2003) analyse les causes des ruptures de ponts aux États-Unis sur une période de 11 ans et souligne le rôle joué par les inondations et l'affouillement dans ces ruptures. La capacité des ingénieurs à anticiper le phénomène est donc cruciale aussi bien pour s'assurer de la sécurité des ouvrages existants que pour en concevoir de nouveaux plus résilients face aux événements extrêmes.

Encore aujourd'hui, ce sont principalement des formulations empiriques qui sont utilisées en ingénierie pour estimer la profondeur maximale d'affouillement en fonction des caractéristiques de l'écoulement, des propriétés des sédiments et de la géométrie de l'ouvrage. En fonction de l'ampleur du projet, une étude sur modèle physique en laboratoire peut être réalisée. Ces études sont longues et coûteuses et avec l'augmentation continue de la puissance de calcul il existe une opportunité de développer des modèles numériques capables de résoudre cette interaction complexe entre la structure hydraulique, l'écoulement et l'évolution du fond. Au cours des deux dernières décennies plusieurs modèles numériques ont été développés pour étudier les problèmes liés au transport des sédiments et à l'affouillement local dans les environnements fluviaux et estuariens (Liu and Garcia (2008), Song et. al (2022)). Le développement d'un modèle de transport sédimentaire adapté à l'étude de l'affouillement fait l'objet de travaux de thèse réalisés avec le mécénat de la société Artelia.

Les sédiments sont transportés selon 2 modes distincts, le transport par charriage, les sédiments se déplacent alors en roulant, glissant ou en réalisant de petits sauts le long du lit sédimentaire, et le transport par suspension constitué de particules arrachées au fond et transportées par le fluide. L'ensemble de ces mouvements/échanges de sédiments entraînent l'évolution morphologique généralement représenté par l'équation Exner. Alors la géométrie du lit évolue et affecte à son tour la dynamique de l'écoulement. Plusieurs approches existent pour suivre l'évolution morphologique.

Une première possibilité est l'utilisation d'une méthode aux éléments discrets où les interactions entre particules-particules sont résolues explicitement, cependant cette méthode est limitée par le nombre de particules ce qui la rend non applicable à l'échelle d'un ouvrage. Une deuxième méthode consiste à utiliser un modèle d'écoulement diphasique tel que celui développé par Chauchat et al. (2017). Le milieu granulaire est considéré comme une phase continue non newtonienne pour laquelle une équation de quantité de mouvement est résolue. L'approche diphasique est utilisée principalement dans le monde académique car son coût en calcul la rend son usage compliqué à des échelles d'intérêt pour l'ingénierie. Enfin les méthodes classiques utilisent la conservation de la masse en sédiment pour calculer l'évolution morphologique en fonctions des échanges entre lit et suspension (érosion/déposition) et du transport par charriage. Le lit peut être représenté via la méthode des frontières immergées, qui consiste à immerger une surface se déformant dans le temps dans le domaine de calcul. Les équations du fluide et du transport des sédiments sont alors pénalisées pour tenir compte de la présence de la surface dans le domaine. Ou bien l'utilisation d'un maillage dynamique dont l'une des frontières se déforme pour coïncider avec la position du lit sédimentaire. L'ensemble du maillage doit à son tour se déformer pour éviter la dégradation des cellules le constituant et le retournement de ces dernières.

L'objectif étant l'application du modèle développé dans des problématiques d'ingénierie, le coût de calcul des simulations est un critère d'importance. C'est la raison pour laquelle jusqu'à présent, c'est la méthode avec déformation de maillage vers laquelle nous nous sommes orientés.

Questions :

Comment simuler numériquement l'évolution morphologique d'un lit sédimentaire soumis à l'action d'un fluide en mouvement. Quelles stratégies adopter ?

références :

- Kumalasari Wardhana and Fabian C Hadipriono. Analysis of recent bridge failures in the united states. *Journal of performance of constructed facilities*, 17(3):144–150, 2003
- Julien Chauchat, Zhen Cheng, Tim Nagel, Cyrille Bonamy, and Tian-Jian Hsu. Sedfoam-2.0: a 3-d two-phase flow numerical model for sediment transport. *Geoscientific Model Development*, 15(12):4367–4392, 2017.
- Lai, Yong G., et al. Three-dimensional numerical modeling of local scour: A state-of-the-art review and perspective. *Journal of Hydraulic Engineering* 148.11 (2022): 03122002.
- Yalan Song, Yuncheng Xu, Hassan Ismail, and Xiaofeng Liu. Scour modeling based on immersed boundary method: A pathway to practical use of three-dimensional scour models. *Coastal Engineering*, 171:104037, 2022.
- Xiaofeng Liu and Marcelo H García. Three-dimensional numerical model with free water surface and mesh deformation for local sediment scour. *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering*, 134(4):203–217, 2008.

# Développement d'un modèle de transport sédimentaire pour l'étude de l'affouillement

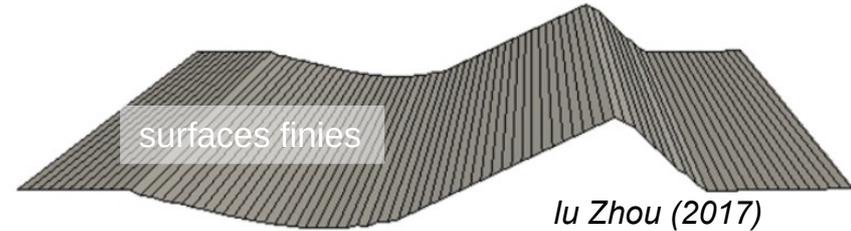
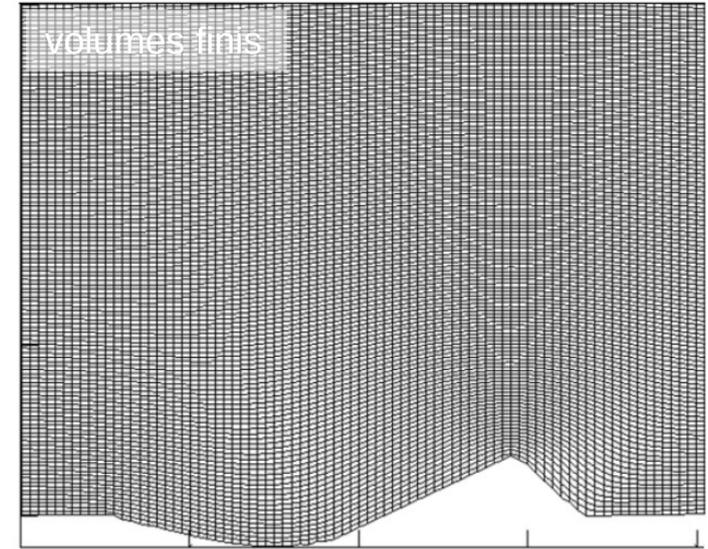
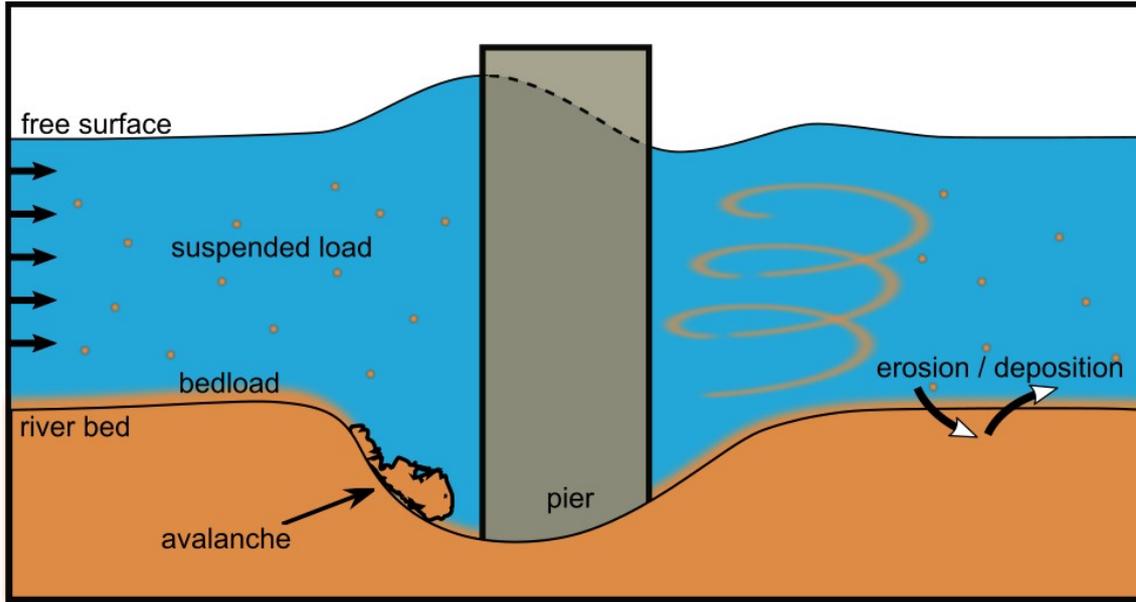


Matthias Renaud

encadrants:

Julien Chauchat, Cyrille Bonamy & Olivier Bertrand Bertrand

# Description du modèle



hydrodynamique, N.S. + filtre

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = \frac{-1}{\rho_f} \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} \cdot (\nu \vec{\nabla} \vec{u} + \tau_{filt})$$

transport par suspension

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot [(\vec{u} + \vec{w}_s) c_s] = \vec{\nabla} \cdot (\varepsilon_s \vec{\nabla} c_s)$$

équation Exner

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_b = D - E$$

lu Zhou (2017)

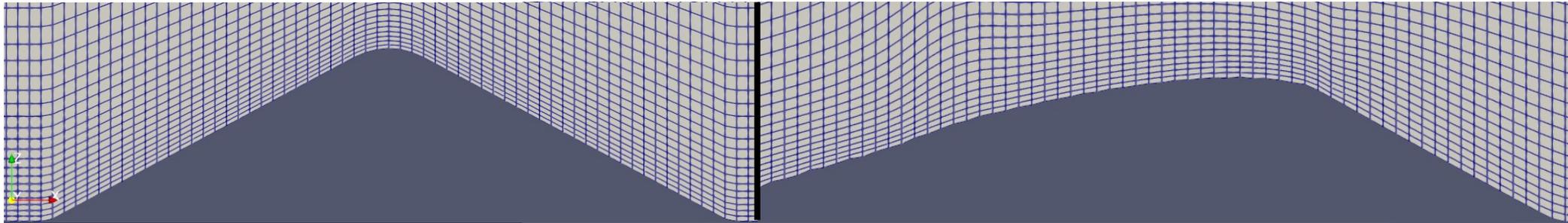
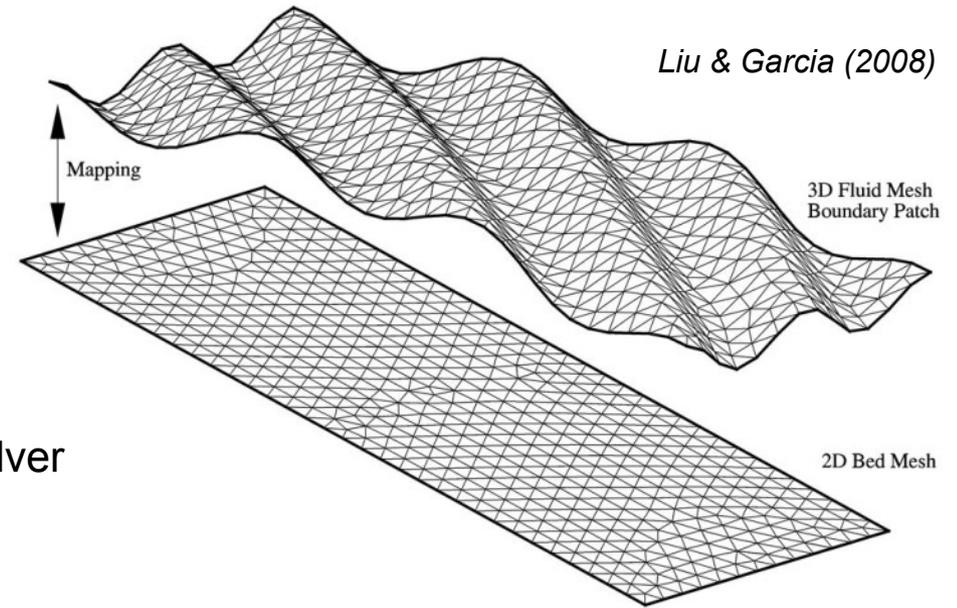
# Morphodynamique

équation Exner: 
$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_b = D - E$$

étapes:

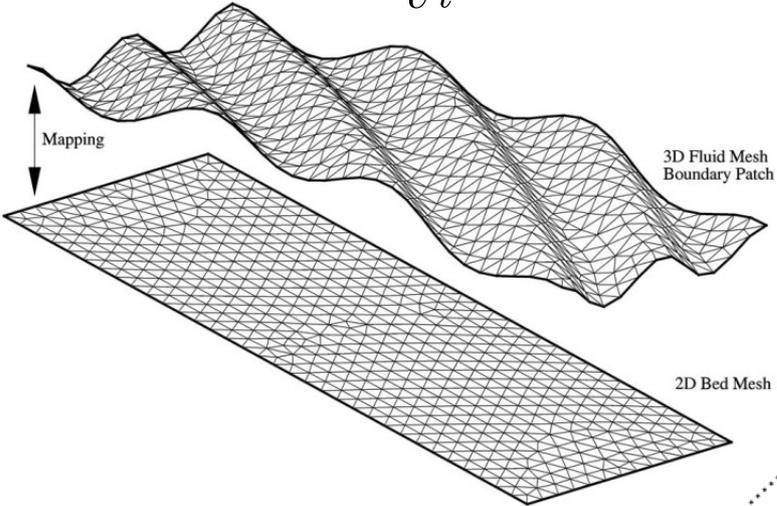
- calculer  $\delta z_b$  au centre des faces
- interpolation,  $\delta z_b$  des faces vers les points
- condition limite -> *pointDisplacements*
- déformation du maillage, displacementLaplacian solver

$$\nabla \cdot (\Gamma_c \nabla X_c) = 0$$

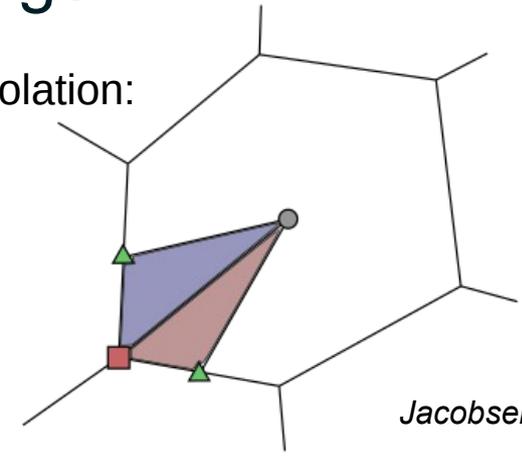


# Interpolation et mouvement du maillage

équation Exner: 
$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_b = D - E$$



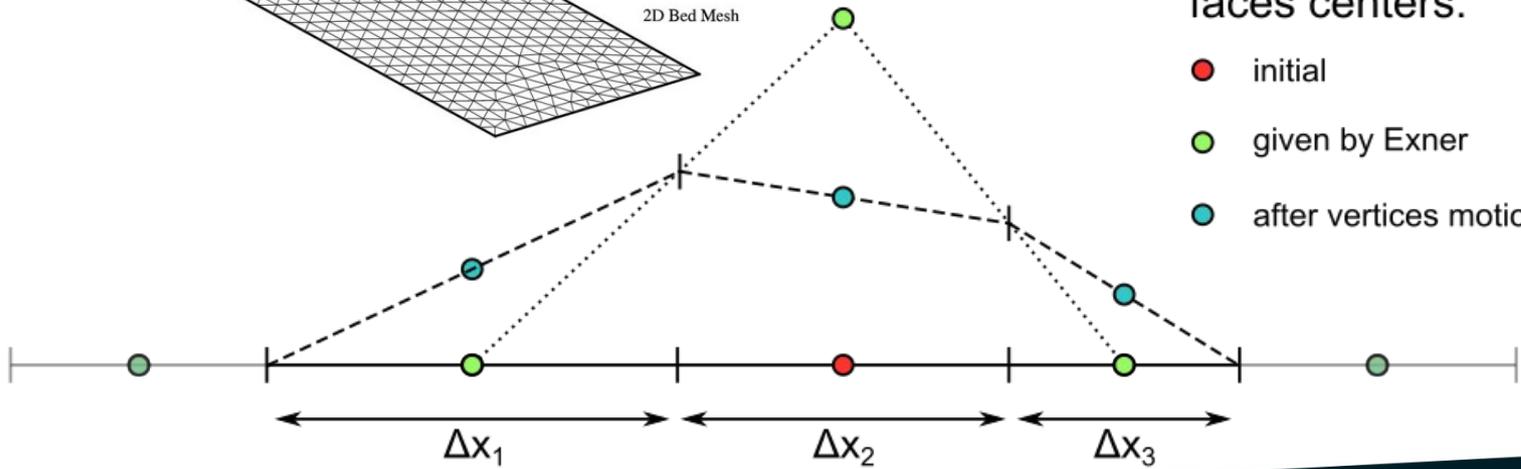
interpolation:



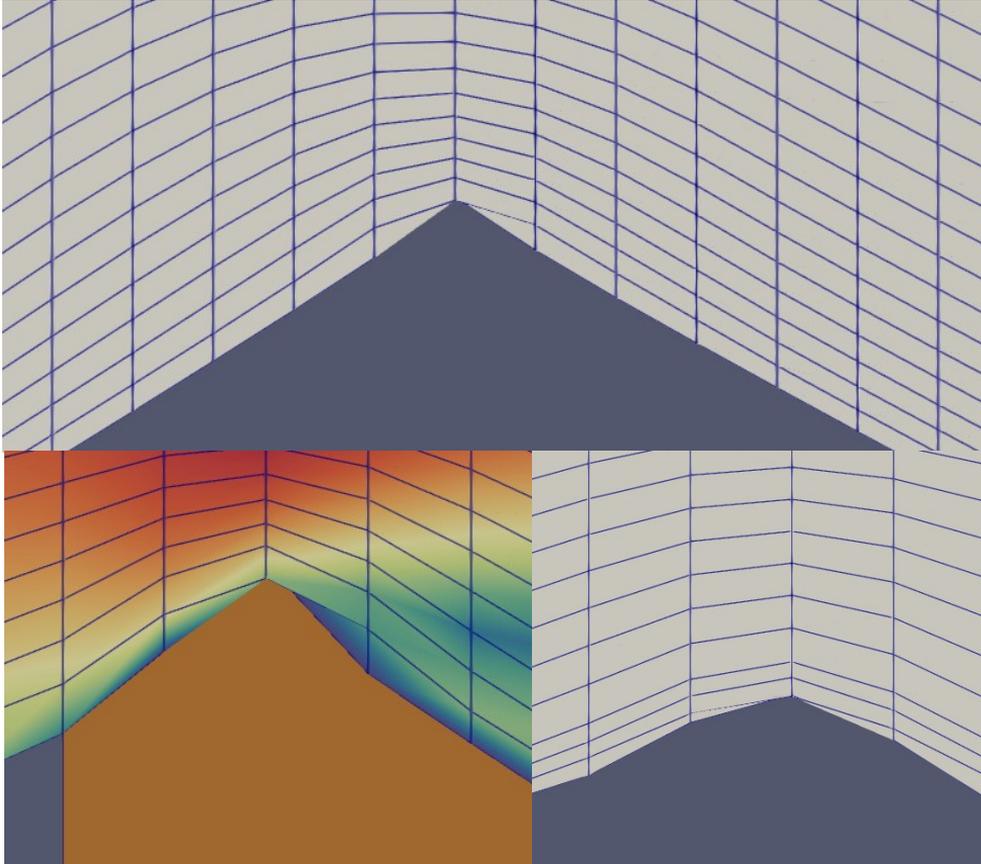
Jacobsen (2014)

faces centers:

- initial
- given by Exner
- after vertices motion

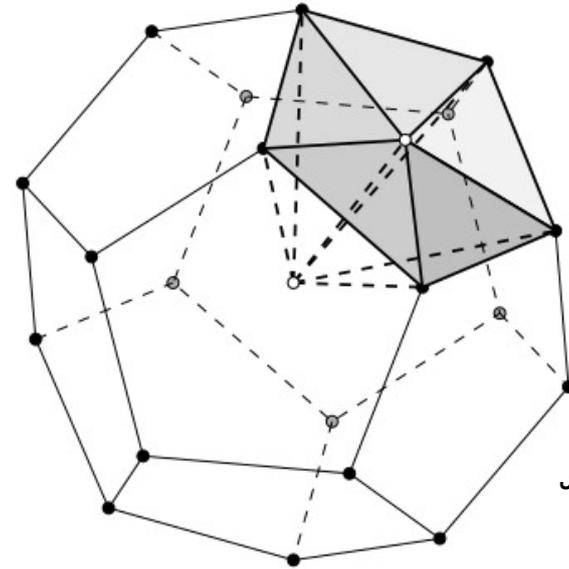


# Déformation du maillage



équation de Laplace :  $\nabla \cdot (\Gamma_c \nabla X_c) = 0$

volumes finis  $\rightarrow$  éléments finis  
décomposition en tétraèdre



*Jasak (2006)*

- quelles stratégies pour déformer le maillage en évitant la dégénération des cellules
- résolution de l'équation Exner sur un fond mobile sans projection

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{q}_b = D - E$$

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} = D - E - \frac{1}{S_f} \sum_e \vec{q}_b^e \cdot \vec{l}_e$$

