



# Développement d'un logiciel de calcul d' évolution altitudinale de fond de lit au cours de crues torrentielles

Samuel Bacon

PFE année universitaire 2021-2022

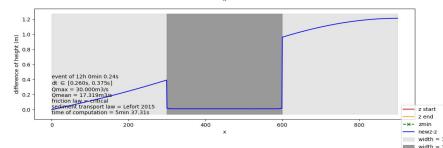
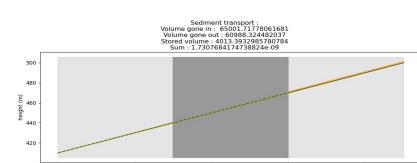
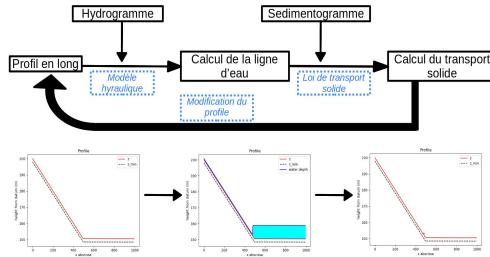
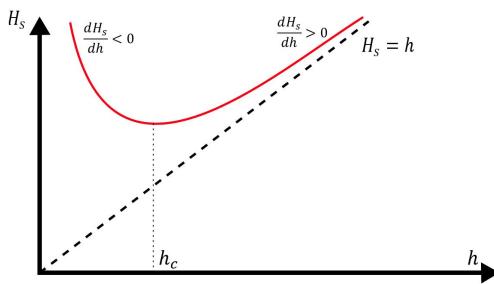
Maître de stage : Damien Kuss – RTM / ONF

Co-encadrant : Clément Roussel – RTM / ONF

Enseignant référent : Éric Blayo – UGA



# Sommaire



## 1 - Introduction

## 1.1 - Le problème

## 1.2 - Evofond, quèsaco ?

### 1.3 - Les objectifs

## 2 - Les éléments de modélisation

## 2.1 - Hydraulique

## 2.2 - Transport solide

## 3 - La solution

### 3.1 - Calcul de la ligne d'eau

### 3.2 - Calcul du transport solide

### 3.3 - Architecture de l'outil

## 4 - Résultats

## 4.1 - Validation du calcul hydraulique

## 4.2 - Analyse de la solution complète

## 5 - Conclusion

# 1- Introduction



## 1.1 - Le problème

# Les crues torrentielles



Funiculaire de Monfort -  
crue de Décembre 2021



## **Les crues torrentielles**



## Les crues torrentielles



Photos prise suite à la crue du Domeynon - Domène (Isère) - 22/08/2008



Photos prise suite à la crue de la Vésubie (tempête Alex) - Roquebillière (Alpes Maritimes) - 02/10/2020

## Les crues torrentielles

Quelles sont les particularités des crues torrentielles ?

- ⇒ Fortes pentes (de quelques % à plusieurs dizaines de %)
- ⇒ Présence de grands volumes de matériaux (jusqu'à plusieurs milliers de m<sup>3</sup>)
- ⇒ Couplées à d'autres évènements (chute de bloc, fonte des neiges)
- ⇒ **Forte évolution du profil au cours de la crue (érosion ou dépôt de plusieurs mètres)**



# **Comment étudier ce risque ?**

## **Analyse croisée :**

- Approche historique (inventaire et analyse statistique des évènements passés)
- Étude géomorphologique (étude liée au sol, comme l'érosion ou analyse du relief)
- Étude hydraulique (étude de l'écoulement)



# **Comment étudier ce risque ?**

## **Analyse croisée :**

- Approche historique (inventaire et analyse statistique des évènements passés)
- Étude géomorphologique (étude liée au sol, comme l'érosion ou analyse du relief)
- Étude hydraulique (étude de l'écoulement).

**⇒ Outils numériques**



# 1- Introduction



## 1.2 - Evofond

## L'outil Evofond

### **Objectif :**

Déterminer l'évolution d'un cours d'eau durant à une crue (état final/dynamique)

### **Données d'entrée :**

- ⇒ Hydrogramme
- ⇒ Sédimentogramme
- ⇒ Description du profil
- ⇒ Granulométrie

**Front :** Excel

**Back :** Python

(liaison avec xlwings)



# L'outil Evofond

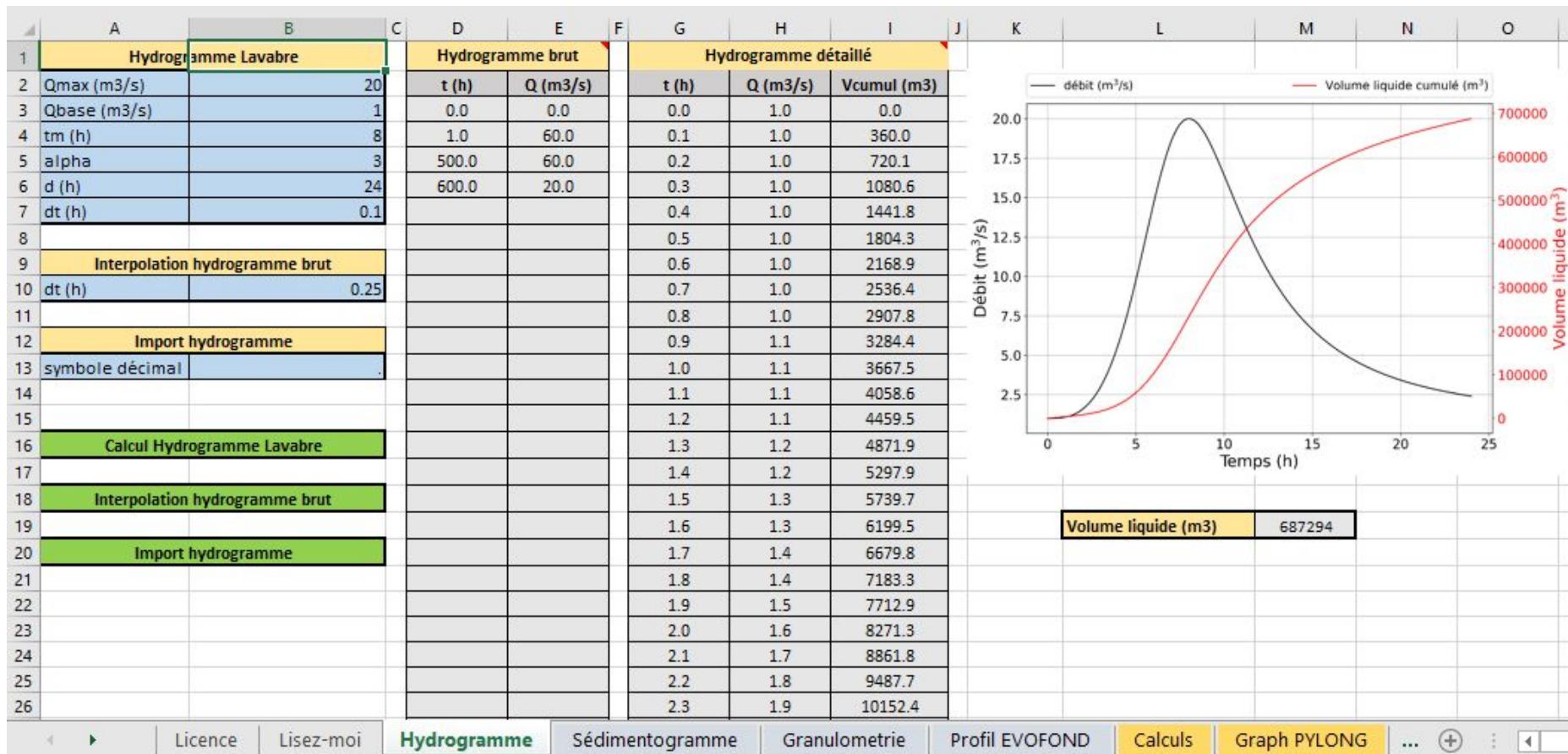


Illustration interface Evofond : l'hydrogramme

# L'outil Evofond

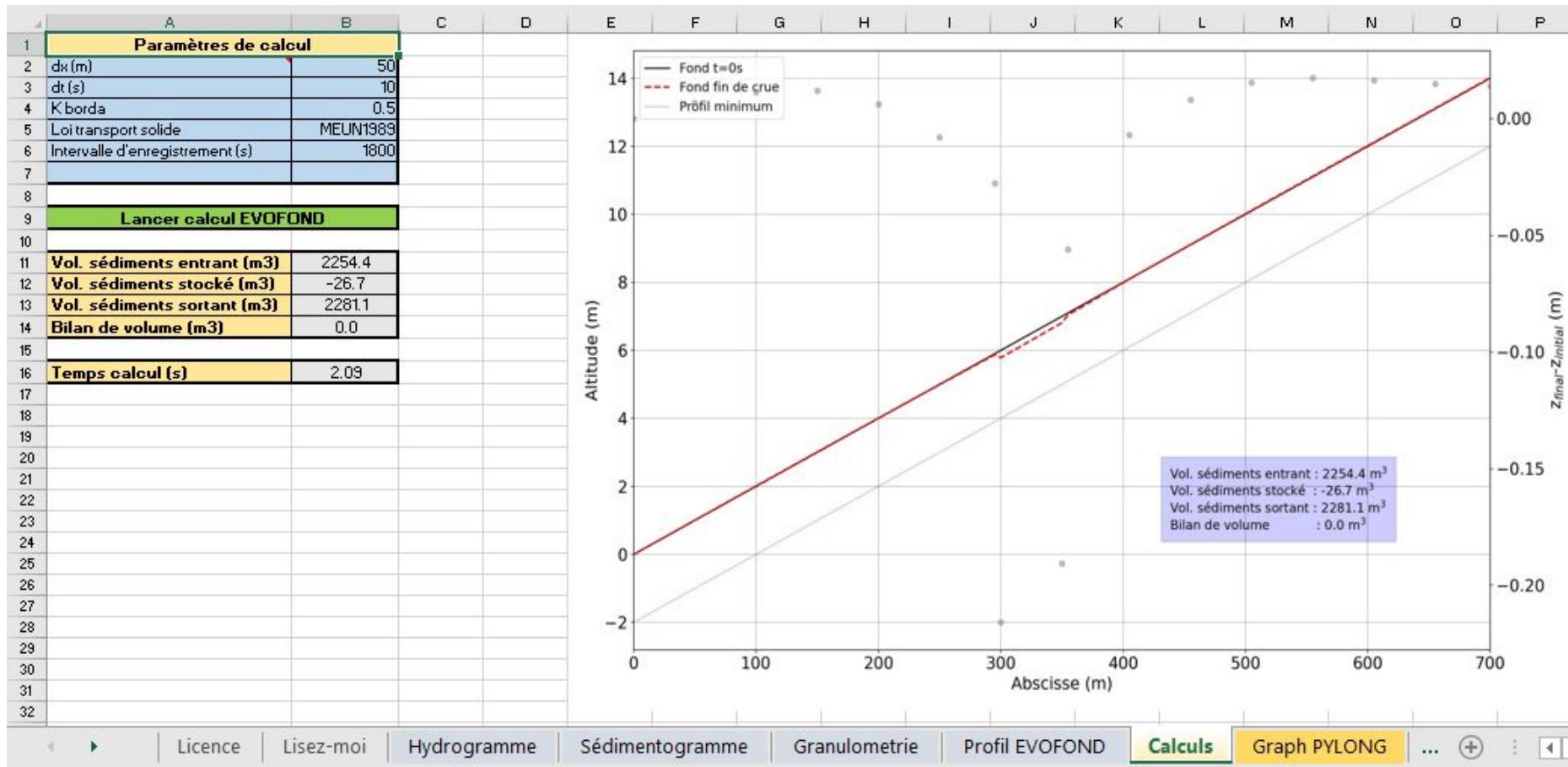


Illustration interface Evofond : les résultats

# 1- Introduction



## 1.3 - Les objectifs

# Objectifs du stage

*Qu'est ce qu'on veut faire ...*

- Comprendre les modèles hydrauliques mis en jeu
- Comprendre comment considérer le transport solide
- Définir les modèles ciblés dans cette phase de développement
- Développer la nouvelle version de l'outil avec une approche orientée objet
- Mettre en place une résolution numérique adaptée au modèle choisi
- Finir avec un bilan et différentes évaluations de la solution

*... Et ne pas faire ?*

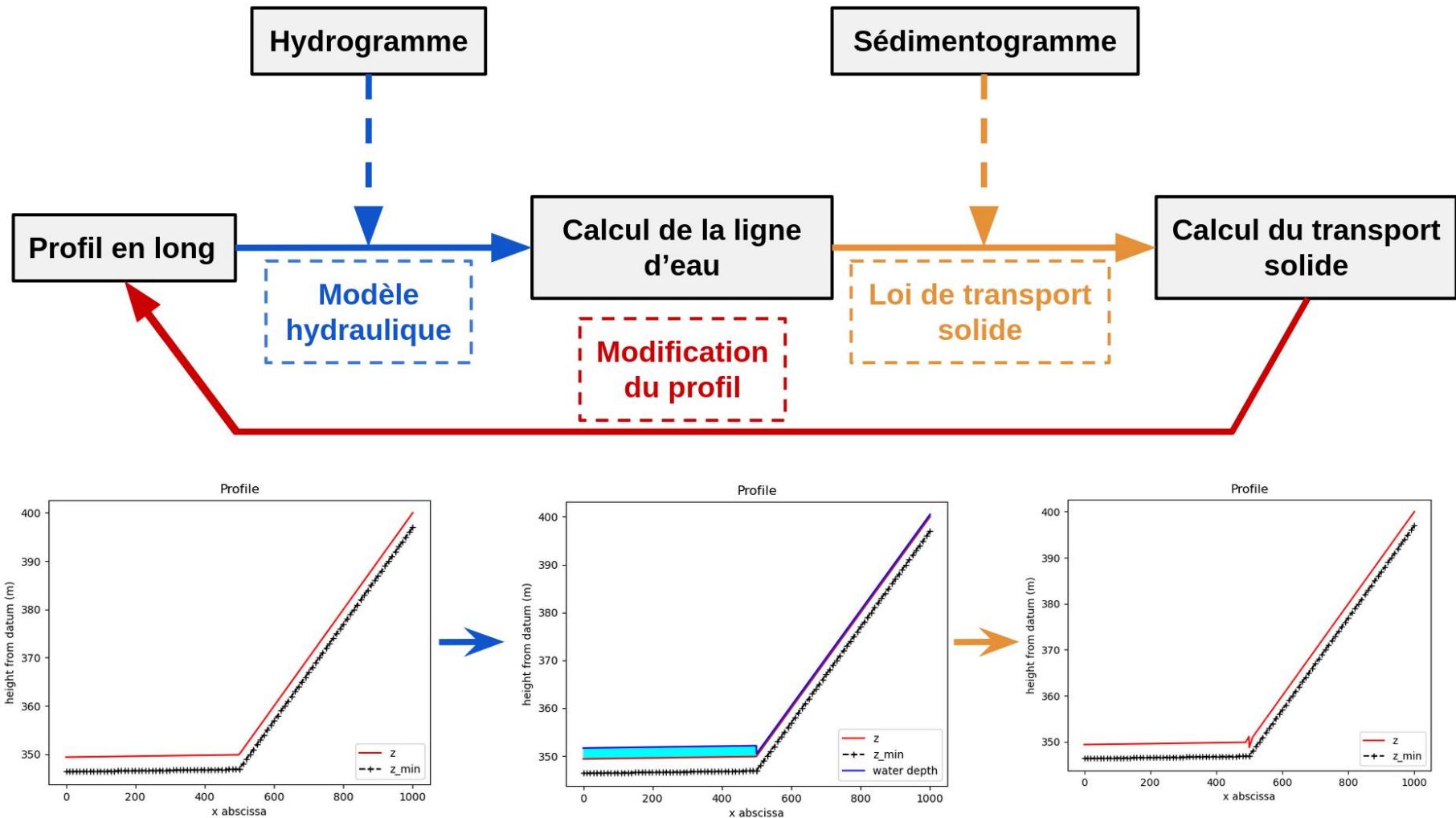
- ✖ Développer une interface graphique fonctionnelle (non prioritaire)



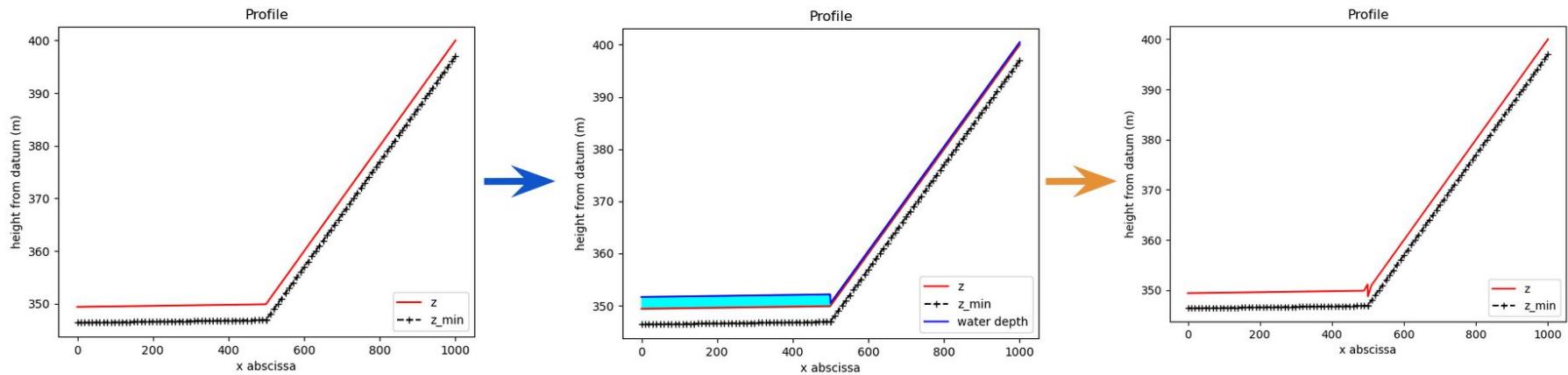
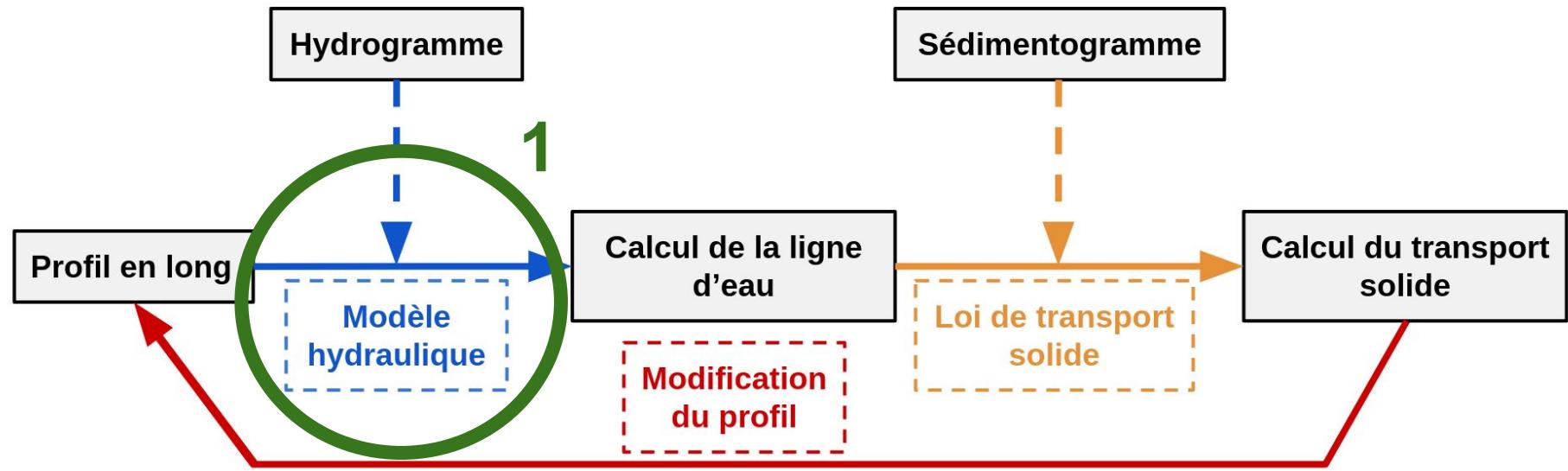
## 2- Modélisation



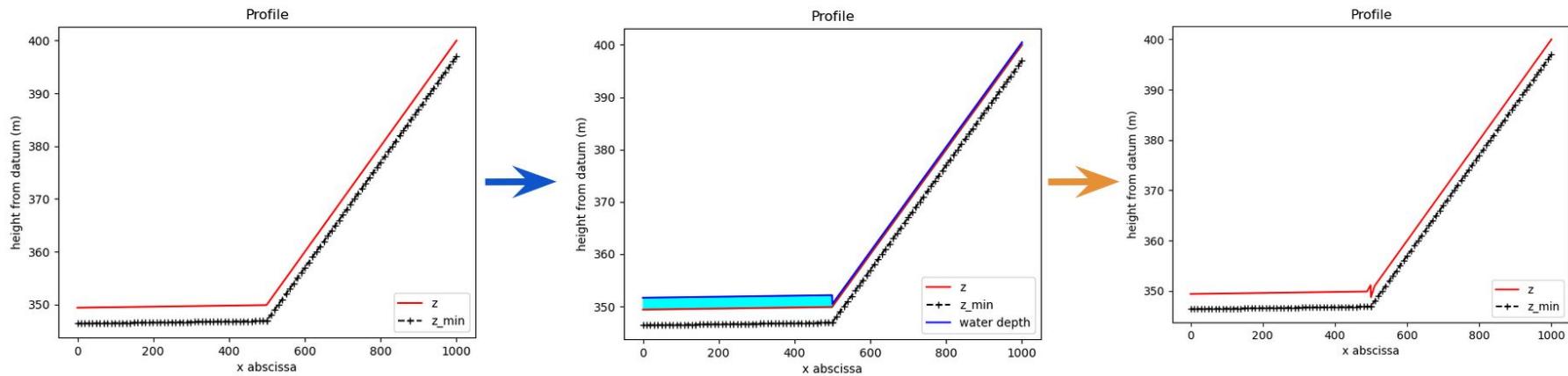
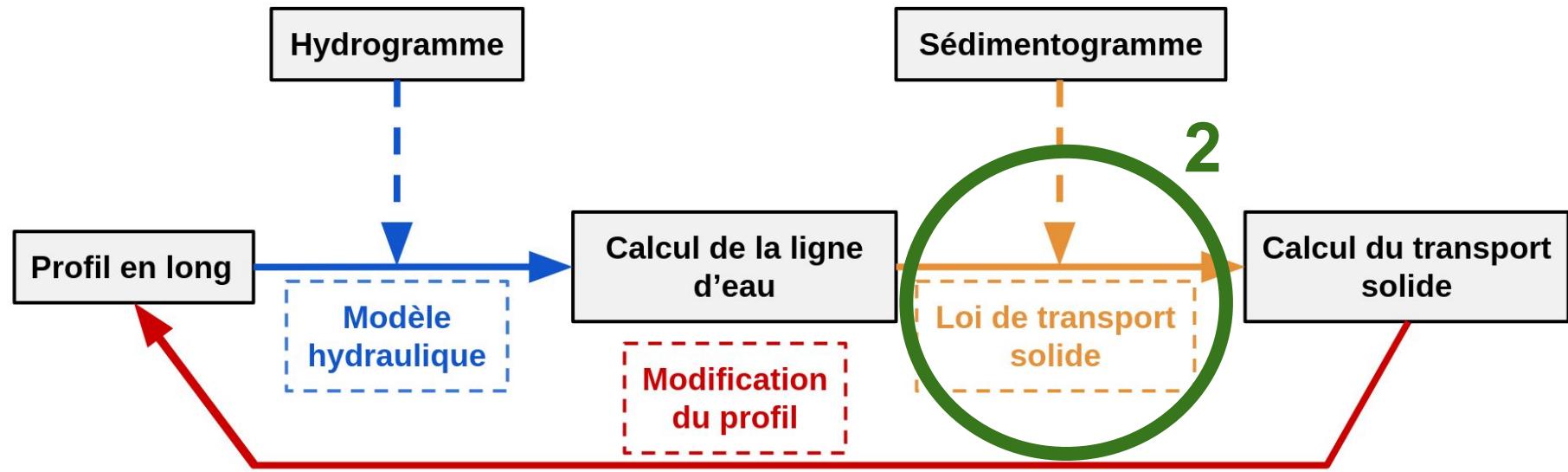
# Processus de résolution



# Processus de résolution



# Processus de résolution



## 2- Modélisation



### 2.1 - Hydraulique

## Généralités : profil en long

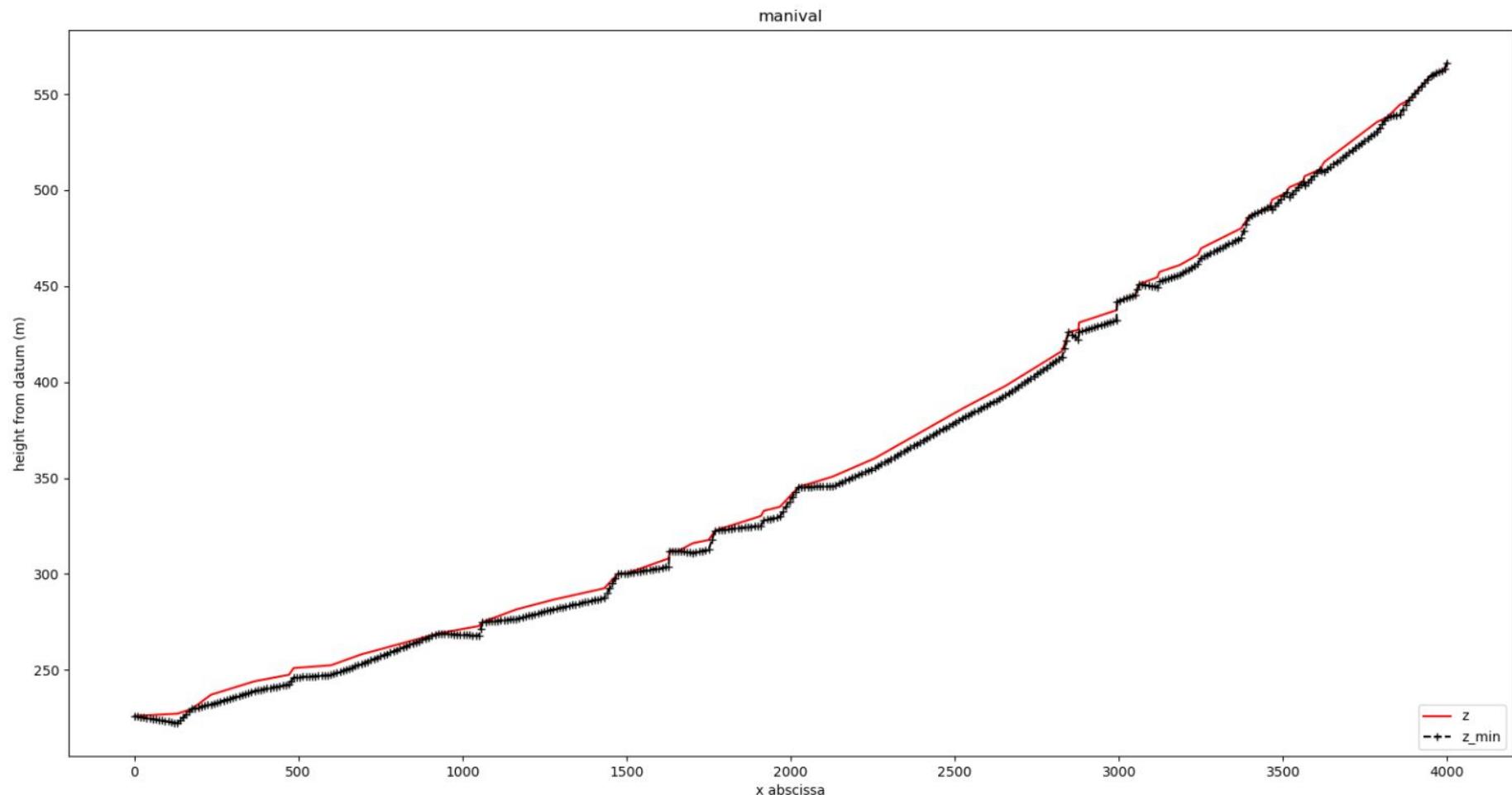
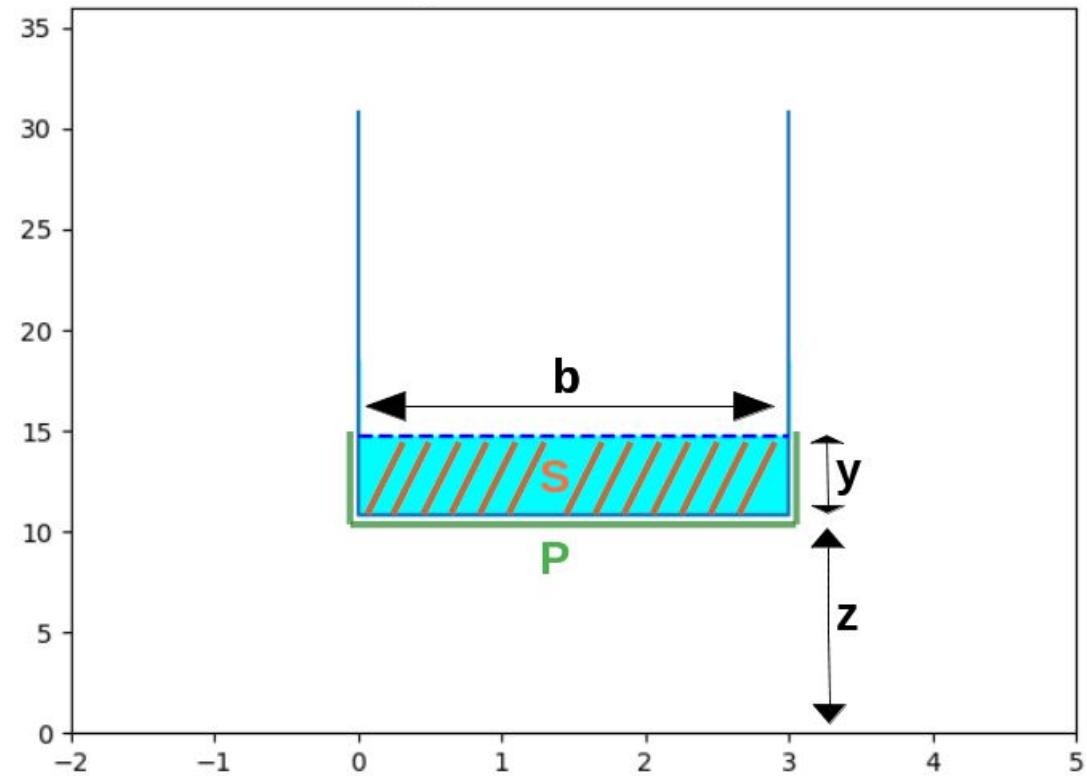
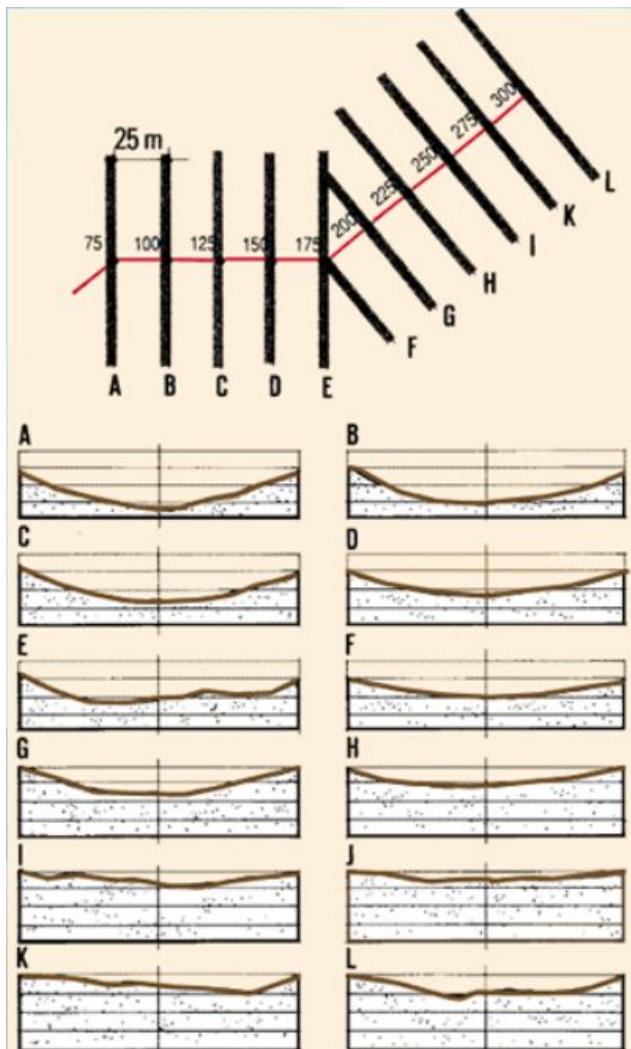


Illustration d'un profil en long (torrent du Manival)



# Généralités : sections en travers



Illustrations des sections en travers et notations associées

# Généralités : résumé des grandeurs

**Récapitulatif pour une section en travers :**

- abscisse  $x$  [m]
  - altitude  $z$  [m]
  - largeur  $b$  [m] (pour une section rectangulaire)
  - hauteur d'eau  $y$  [m]
  - superficie mouillée  $S$  [ $m^2$ ]
  - périmètre mouillé  $P$  [m]
- 
- vitesse d'écoulement moyen  $V$  [ $m/s$ ]
  - débit liquide  $Q = SV$  [ $m^3/s$ ]

**Grandeurs introduites :**

- rayon hydraulique  $R_h = \frac{S}{P}$  [m]
- charge  $H = z + y + \frac{V^2}{2g}$  [m]
- charge spécifique  $H_s = y + \frac{V^2}{2g}$  [m]
- pente du fond  $S_0 = \frac{dz}{dx}$  [m/m]
- pente de la ligne d'énergie  $S_f = \frac{dH}{dx}$  [m/m]

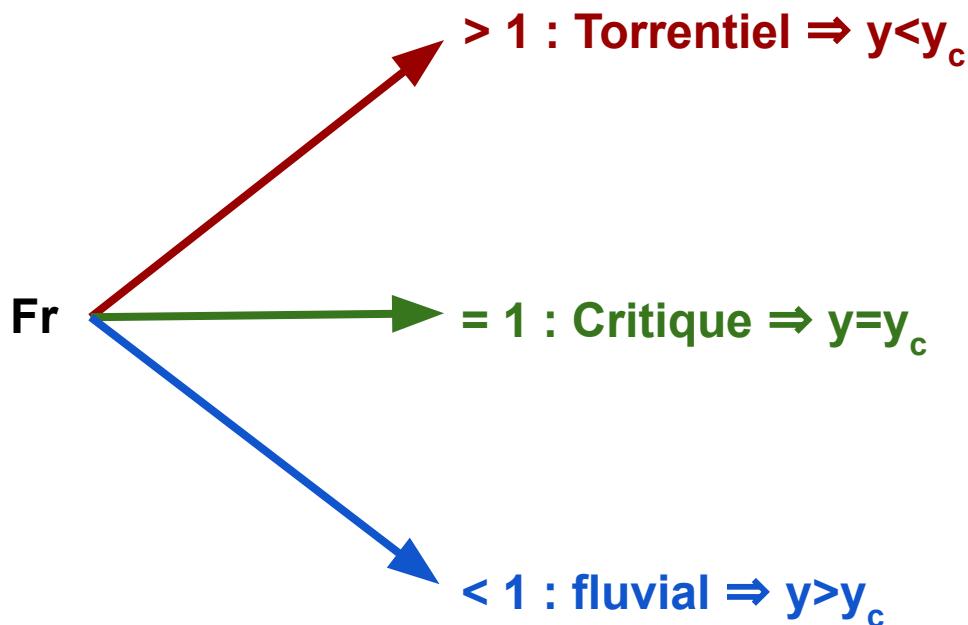


# Généralités : régimes et ressaut

Nombre de Froude :

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}} = \frac{Q}{S\sqrt{gy}} = \frac{Q}{by^{\frac{3}{2}}g^{\frac{1}{2}}}$$

Pour une section rectangulaire



$\Rightarrow$  Hauteur critique pour une section rectangulaire :

$$y_c = \left( \frac{Q}{bg^{\frac{1}{2}}} \right)^{\frac{2}{3}}$$



## Généralités : régimes et ressaut

**Hauteur normale :**

- $y_n$  = Hauteur d'eau dans les conditions d'un régime permanent uniforme, i.e. dans lequel les pertes de charge sont équilibrées par les forces de pesanteurs
- = Hauteur d'eau pour laquelle on a  $S_f = S_0$

$$y_n < y_c$$

Pente forte

$$y_n > y_c$$

Pente faible



## Généralités : régimes et ressaut

Force spécifique :  $F_s = \bar{z}S + \frac{Q^2}{gS}$

Un ressaut se situe à l'égalité des forces spécifiques des deux régimes (torrentiel et fluvial).

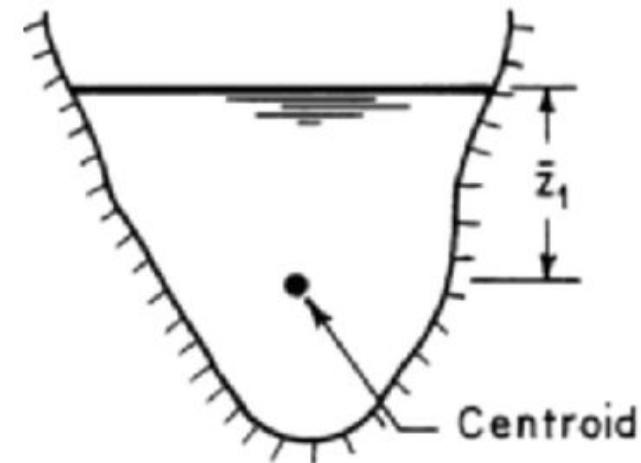
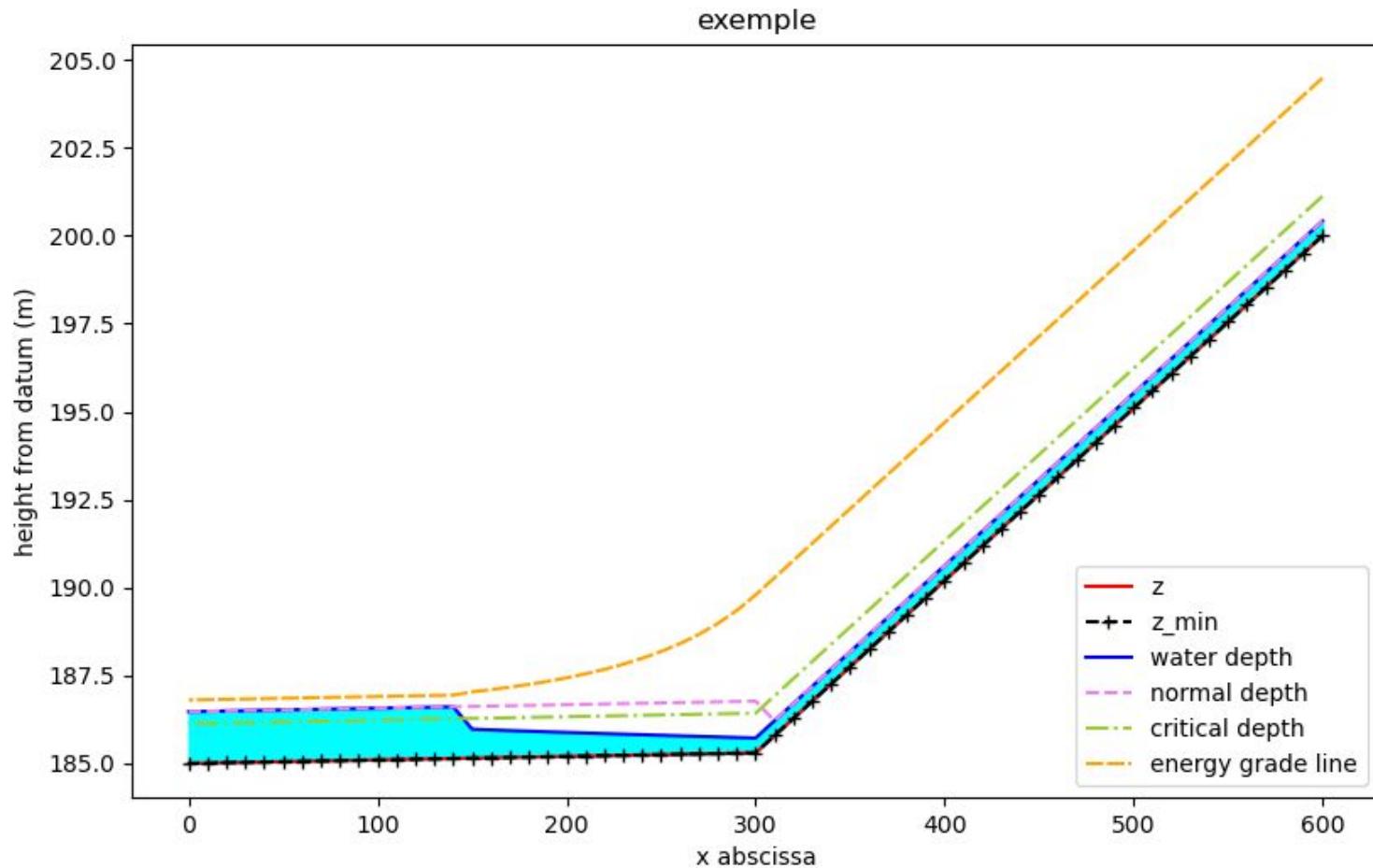


Illustration du centre gravité d'une section  
(Open channel flow - Chaudhry)

Exemple de ressaut hydraulique sur une expérience  
(tiré de <https://krcproject.groups.et.byu.net/>)

# Généralités : régimes et ressaut



*Illustration des hauteurs critique/normale et d'un ressaut ( $Q=30\text{m}^3/\text{s}$ )*



## **Généralités : loi de frottement**

**Écoulement graduellement varié ⇒**

Les pertes de charge dues aux frottements sont significatives et dominantes

Exemple : loi de Manning-Strickler (Ferguson en annexe)

$$V = \frac{1}{n} R_h^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}} = K_s R_h^{\frac{2}{3}} S_f^{\frac{1}{2}}$$



## Modèle : débit uniforme & régime critique

- Débit uniforme : en tout abscisse du profil  $Q = Q_{\text{amont}}$
- Régime critique : en tout point  $y = y_c$  ( $= f(b, Q)$ )  $\Rightarrow$  ne dépend pas de ce qui se passe en amont ou en aval)
- Section rectangulaire

*Seul modèle utilisé initialement par Evofond*

- + Calcul rapide, approximation raisonnable en régime torrentiel
- Pas de hauteur variable, pas de ressaut hydraulique



# Modèle : débit uniforme & loi de frottement

- Débit uniforme mais régime varié
- Loi de frottement
- Section rectangulaire

En dérivant la relation de définition de la charge :

$$H = z + y + \frac{V^2}{2g}$$

on obtient :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_f - S_0}{1 - Fr^2} = f(x, y)$$

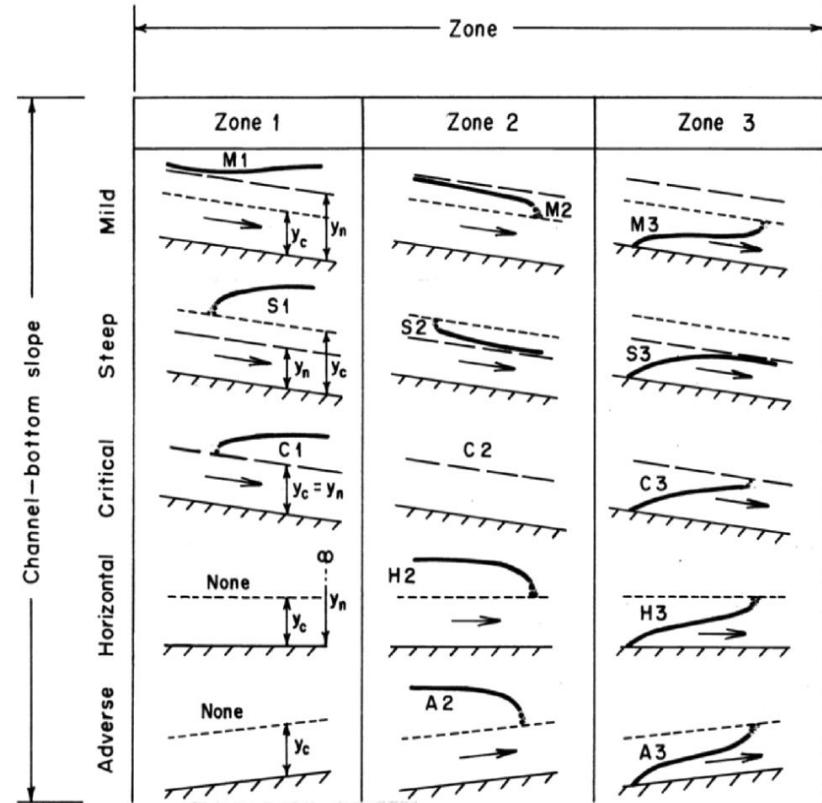


Fig. 5-3. Water surface profiles

Table des lignes d'eau selon la pente et le régime  
(Open channel flow - Chaudhry)



## 2- Modélisation



### 2.2 - Transport solide

## Lois de transport solide

= Lois permettant d'obtenir le débit solide en fonction de toutes les données hydraulique et de la granulométrie

exemples :

loi de Meunier (1989)

$$Q_s = 8.2 Q S_f^2$$

loi de Piton et Recking (2017)

$$q_{sv} = \frac{14\tau^{*2,5}}{1 + \left(\frac{\tau_m^*}{\tau^*}\right)^4} \sqrt{g(s-1)D_{84,tb}^3}$$

*Toutes les lois n'ont pas le même domaine de validité : chacune présente donc un intérêt.*



# Équation d'Exner

⇒ Équation déduite d'un bilan de masse :

$$\frac{\partial z}{\partial t} = - \frac{\partial q_b}{\partial x}$$

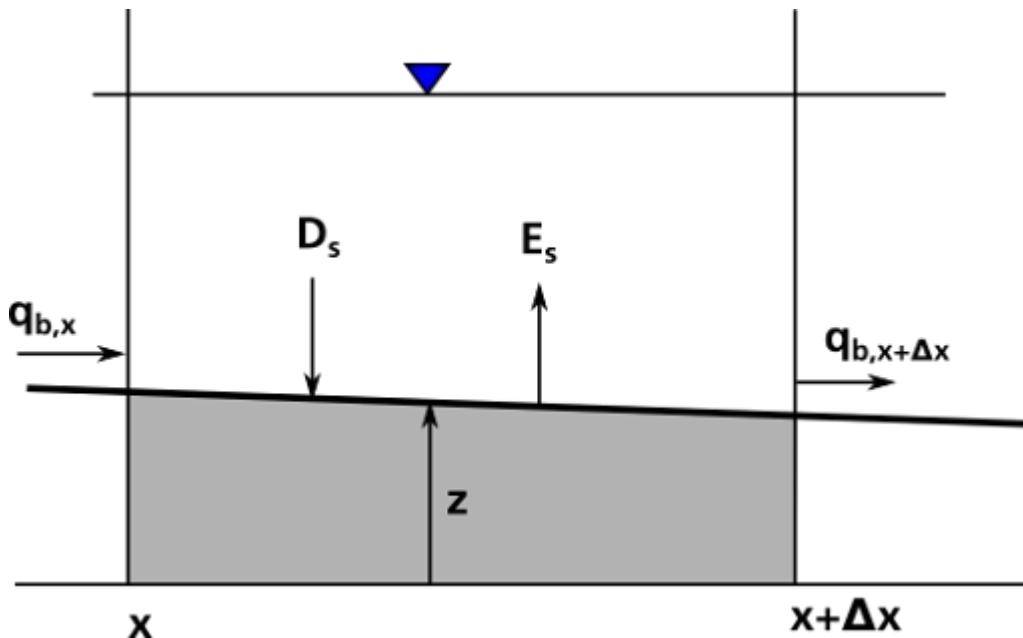
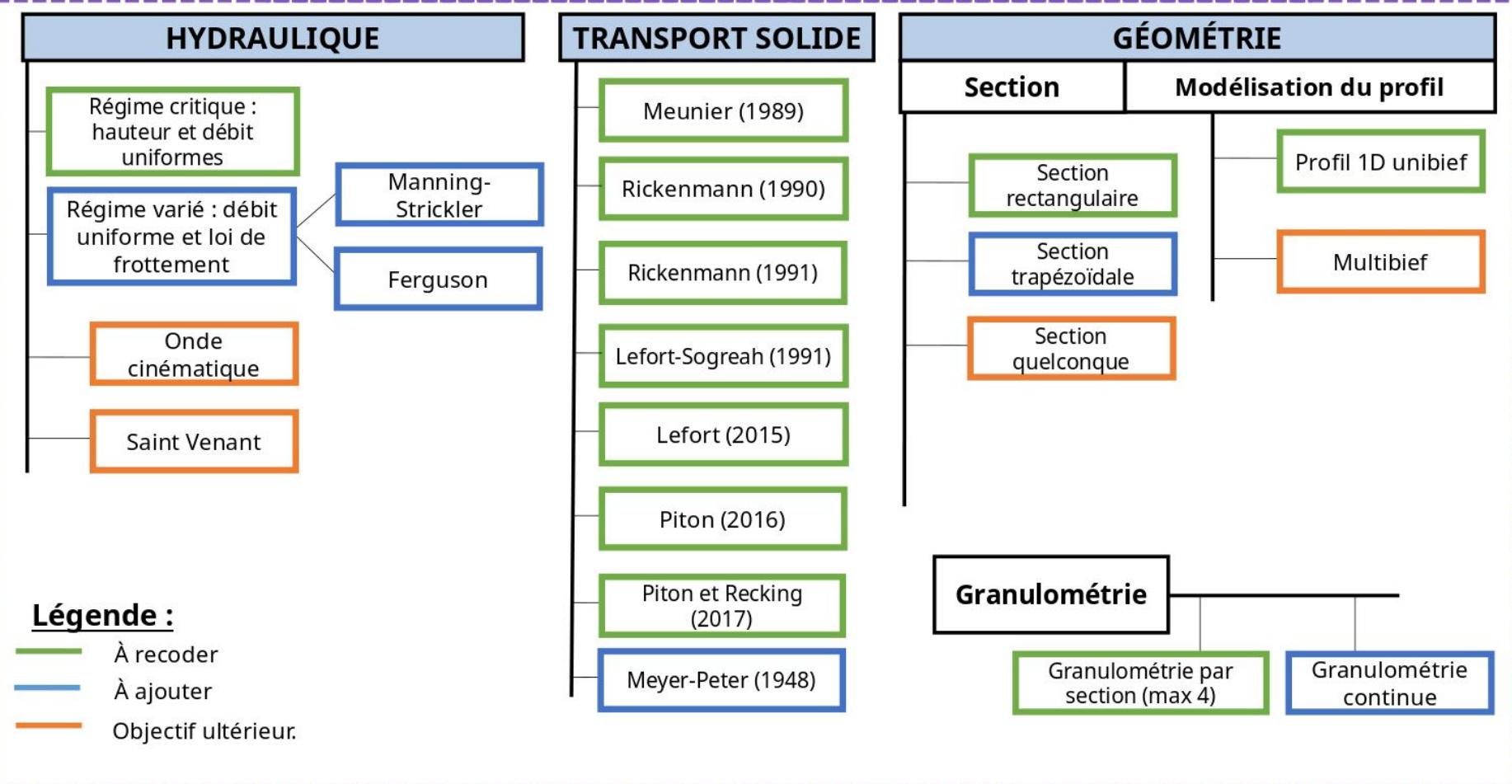


Schéma d'un bilan de volume

# Diagramme bilan de la partie modélisation

+ approche orientée objet et développement de la partie utilisateur

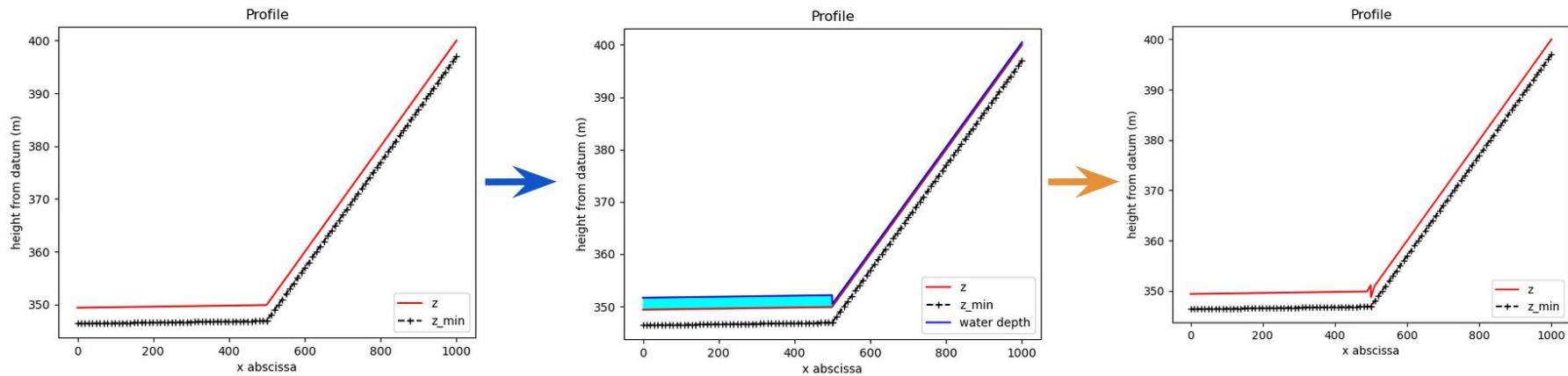
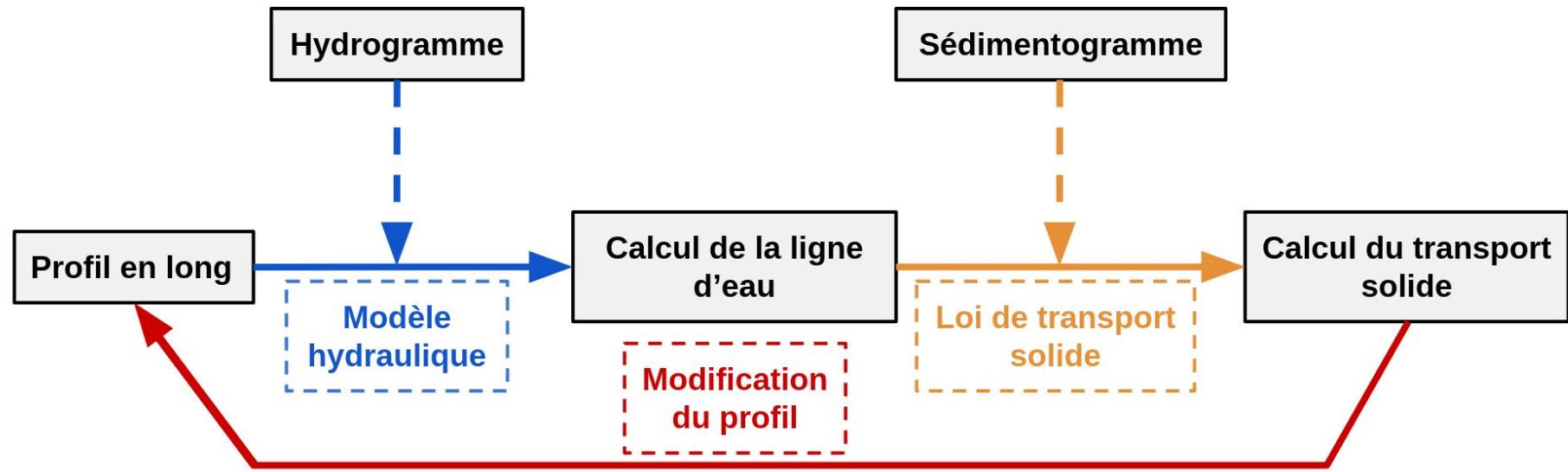


# 3- Solution



## 3.1 - Calcul de la ligne d'eau

# Processus de résolution (rappel)



# Discrétisation et méthode d'Euler

$x_0, x_1, \dots, x_n$  = abscisses des sections

rappel:  $\frac{dy}{dx} = \frac{S_f - S_0}{1 - Fr^2} = f(x, y)$

$$\begin{cases} y(x_0) = y_0 \text{ (condition limite)} \\ y_{i+1} = y_i + f(x_i, y_i)(x_{i+1} - x_i) \text{ (méthode d'Euler)} \end{cases}$$

⇒ Implémentation des méthodes **d'Euler**, **Euler améliorée** et **RK4**



## **Problèmes !**

- 1 -** Le terme au dénominateur ( $1 - Fr^2$ ) peut créer de fortes instabilités lors des changements de régime !
  
- 2 -** La direction dans laquelle est déduite la valeur suivante dépend du type de régime (torrentiel depuis l'amont et fluvial depuis l'aval).



# Problèmes !

**1 - Le terme au dénominateur ( $1 - Fr^2$ ) peut créer de fortes instabilités lors des changements de régime !**

⇒ **Travailler avec la charge**

**2 - La direction dans laquelle est déduite la valeur suivante dépend du type de régime (torrentiel depuis l'amont et fluvial depuis l'aval).**



# Problèmes !

**1 -** Le terme au dénominateur ( $1 - Fr^2$ ) peut créer de fortes instabilités lors des changements de régime !

⇒ **Travailler avec la charge**

**2 -** La direction dans laquelle est déduite la valeur suivante dépend du type de régime (torrentiel depuis l'amont et fluvial depuis l'aval).

⇒ **?..? Propagation du calcul adaptée au régime dans l'algorithme de résolution**



## Résolution de la charge

⇒ Basculement sur un calcul d'énergie, à partir duquel deux solutions sont possibles (torrentielle et fluviale) :

$$H_s = y + \frac{V^2}{2g} = H - z$$

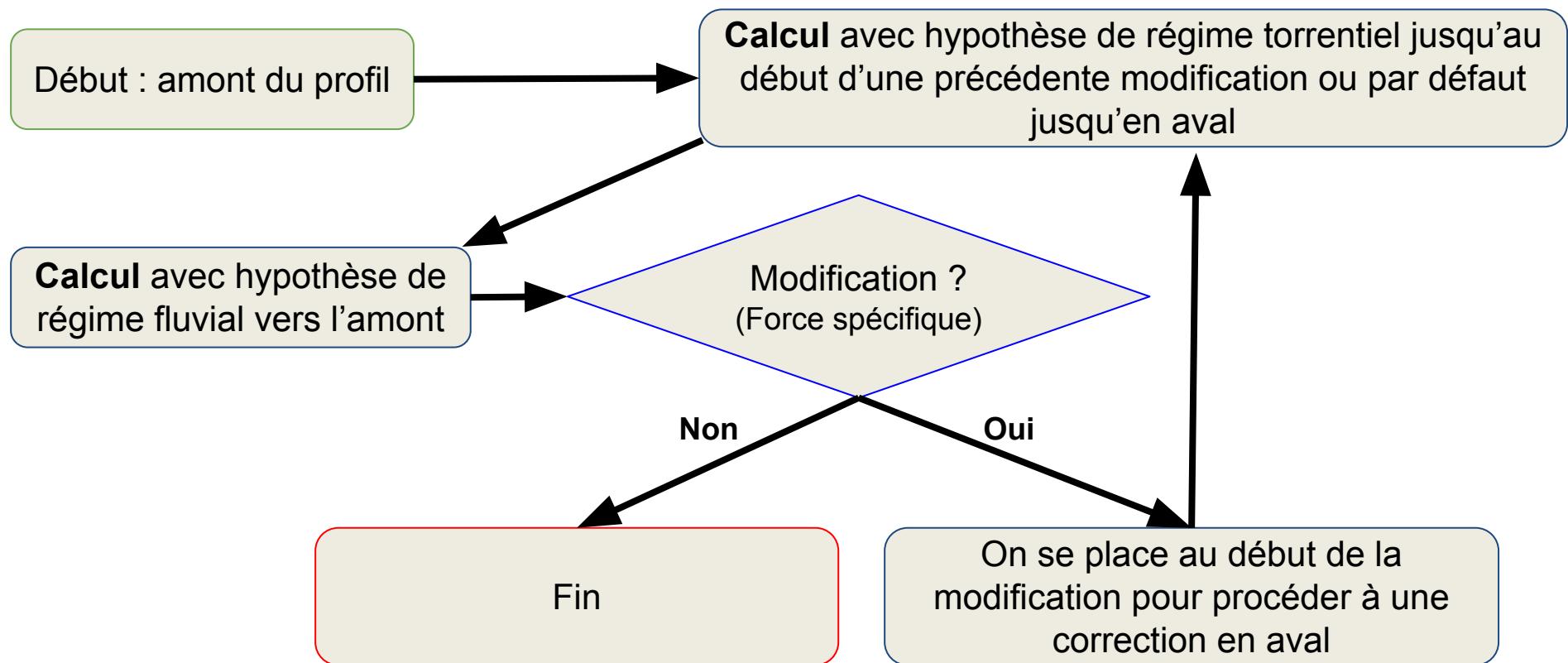
En dérivant cette relation :

$$\frac{dH_s}{dx} = S_f - S_0 = f(x, y)$$

- ⇒ Même méthode de résolution, en ayant limité les instabilités ! (1)
- ⇒ Mais on ne peut toujours pas résoudre cela avec un calcul unidirectionnel (2)



## Algorithme final : l'idée



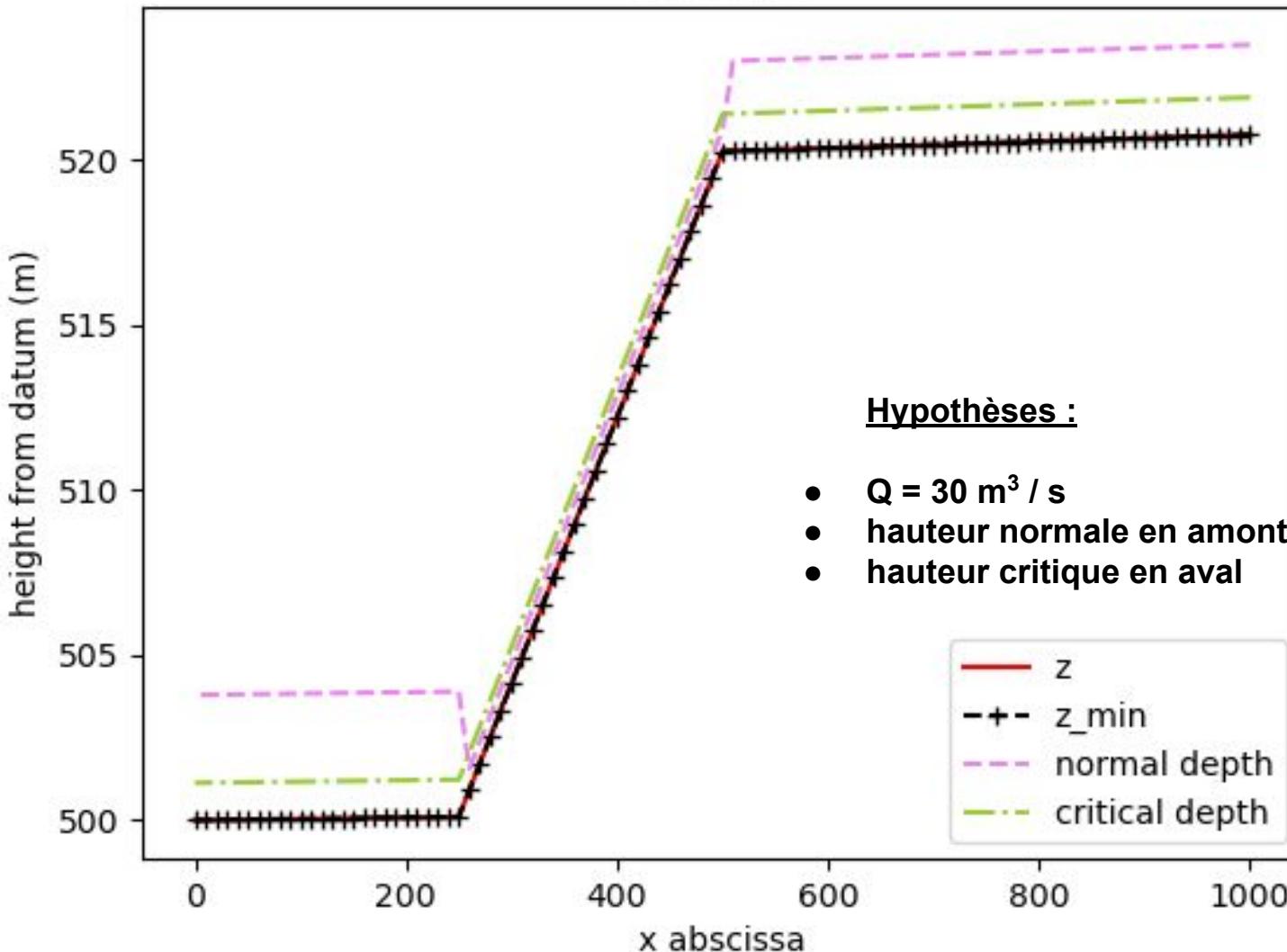
“calcul”  $\Rightarrow$  méthode d’Euler ou variante sur la charge

*Permet de tenir compte du sens de propagation imposé par le type de régime ! (2)*



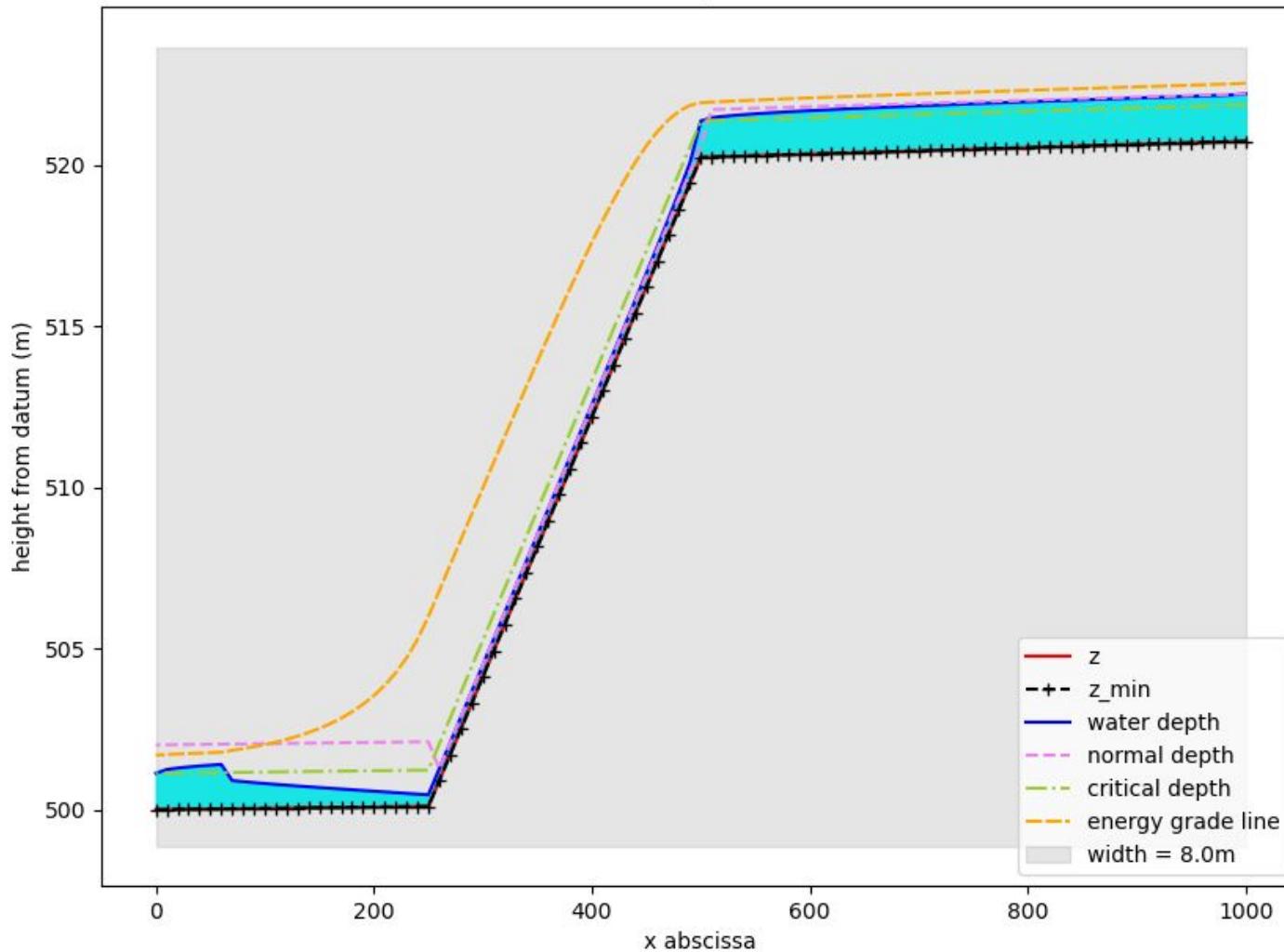
# Algorithme final : exemple

exemple



# Algorithme final : exemple

step 6

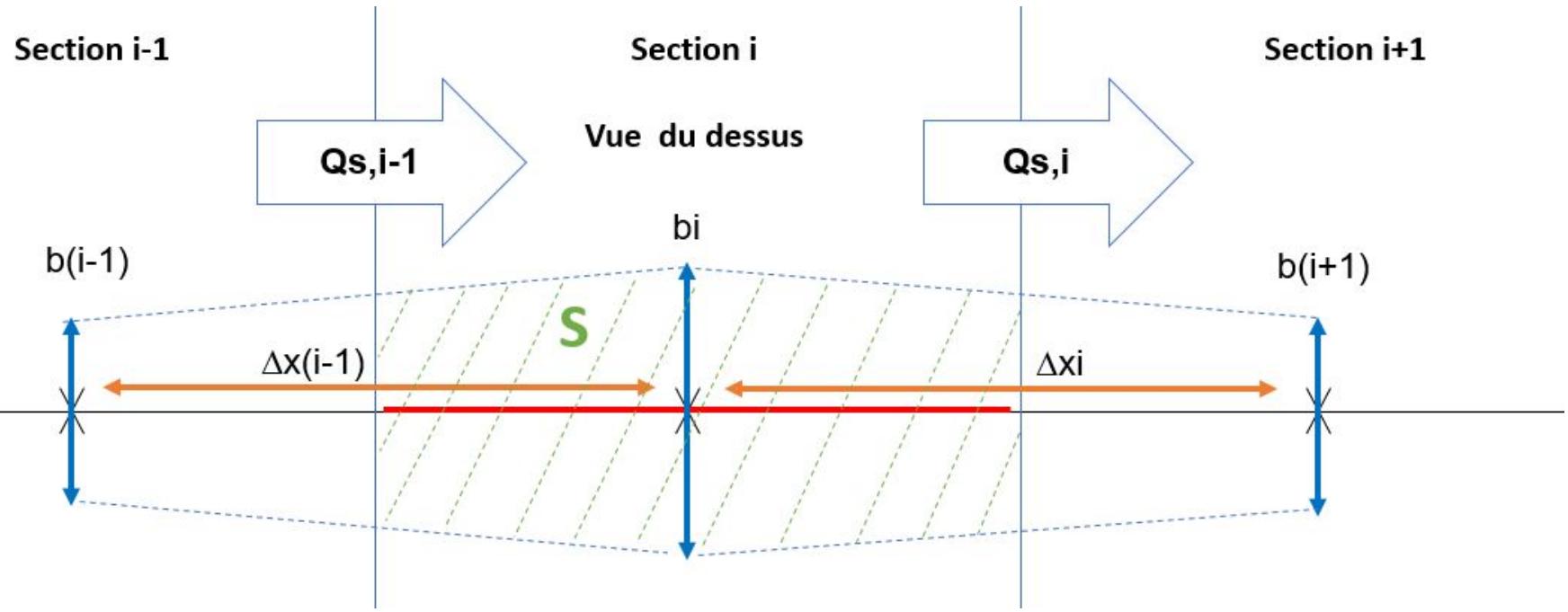


# 3- Solution



## 3.2 - Calcul du transport solide

# Bilan sur une section



$$\Rightarrow \frac{z_i(t + \Delta t) - z_i(t)}{\Delta t} = -\frac{Q_{s,i} - Q_{s,i-1}}{0.5[(0.75b_i + 0.25b_{i+1})dx_i + (0.75b_i + 0.25b_{i-1})dx_{i-1}]}$$

# Discrétisation temporelle et CFL

$$c = \frac{\Delta x}{v \Delta t}$$

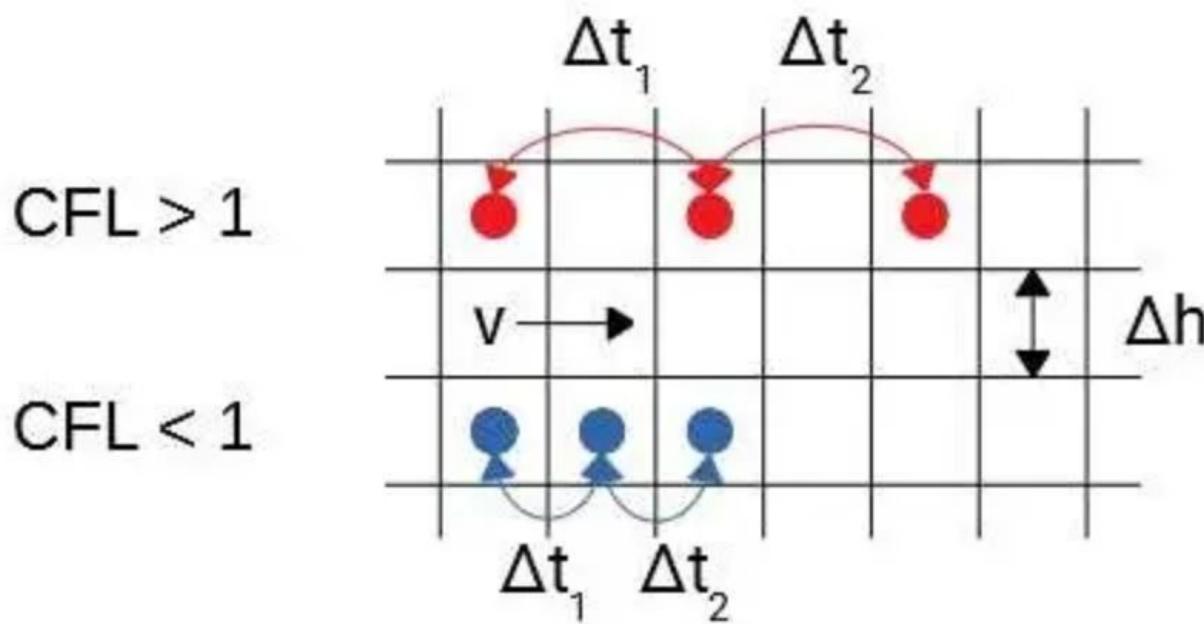


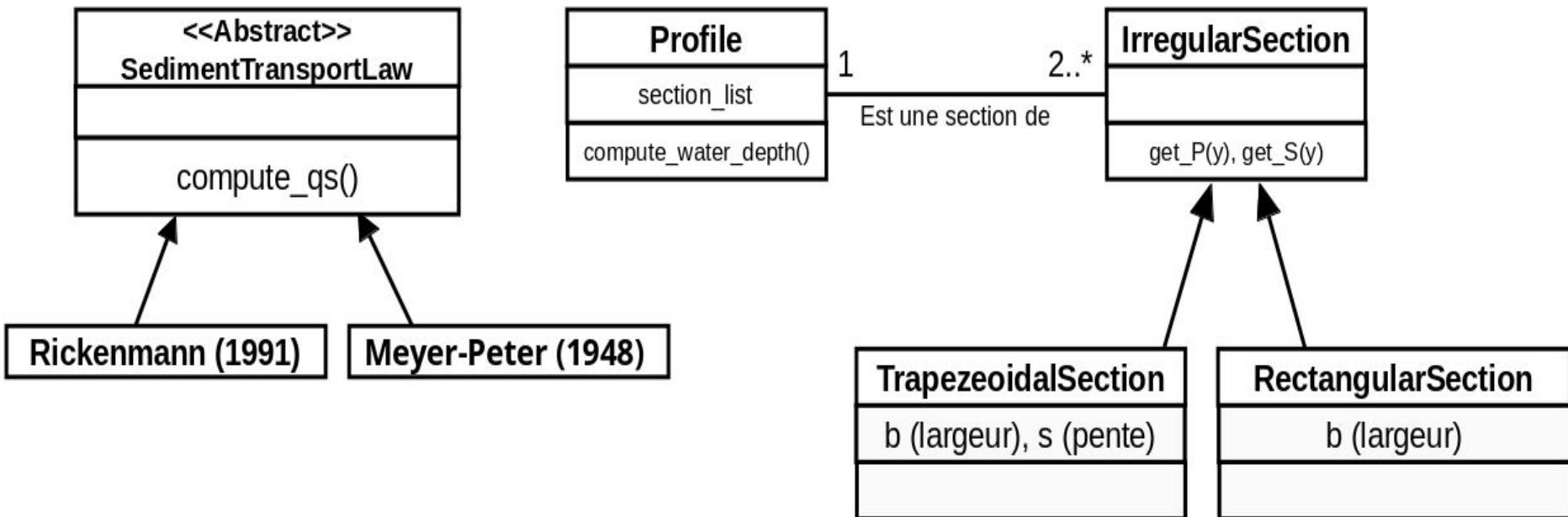
Schéma illustrant la condition CFL, tiré de [www.idealsimulations.com](http://www.idealsimulations.com)

# 3- Solution



## 3.3 - Architecture de l'outil

# Diagramme objet



# Utilisation d'Evofond

```

    evofond_v0
    > build
    > log
    < projects
        > excel_comp
        < manival
            > results
            { } granulometry_1.json
            { } manival_conf.json
            ≡ manival_simplified.txt
            ≡ manival.txt
        > test
        > src
    ⚡ evofond.py

```

```

1      "NAME": "excel_comp",
2      "SECTION": "rectangular",
3      "PROFILE_PATH": "./adverse_slope.txt",
4      "LAVABRE": true,
5      "DURATION": 43200.0,
6      "TM": 14400.0,
7      "QM": 30.0,
8      "QB": 10.0,
9      "ALPHA": 3,
10     "DT": 10.0,
11     "TRANSPORT_LAW": "Lefort2015",
12     "UPSTREAM_SLOPE": 10.0,
13     "UPSTREAM_WIDTH": 10.0,
14     "GRANULOMETRY_FILES": [
15         "granulometry_1.json"
16     ],
17     "INTERPOLATION": true,
18     "DX": 10.0,
19     "CRITICAL": true,
20     "FRICTION_LAW": null,
21     "UPSTREAM_CONDITION": "critical_depth",
22     "DOWNSTREAM_CONDITION": "critical_depth",
23     "SPEED_COEF": 1.0,
24     "BACKUP_TIME_STEP": 1800.0,
25     "PERF": false
26
27

```

```

[samuel@samuel-pc evofond_v0]$ ./evofond.py -h
usage: evofond.py [-h] [-v] [-q] [-l] [-d [DELETE]] [-c [COPY]] [-m [MODIFY]] [-r [RUN]] [--clear] [--hydrau [HYDRAU]]

Evofond executable. Project in progress...

options:
  -h, --help            show this help message and exit
  -v, --verbose          increase the amount of information printed during the execution and create a log file of the execution
  -q, --quickstart       help to start a new project
  -l, --list              list of existing projects
  -d [DELETE], --delete [DELETE]
                        delete a given project
  -c [COPY], --copy [COPY]
                        copy a given project
  -m [MODIFY], --modify [MODIFY]
                        modify a given project
  -r [RUN], --run [RUN]
                        run a given project
  --clear                remove all the existing log files
  --hydrau [HYDRAU]      hydraulic computation for a given water discharge

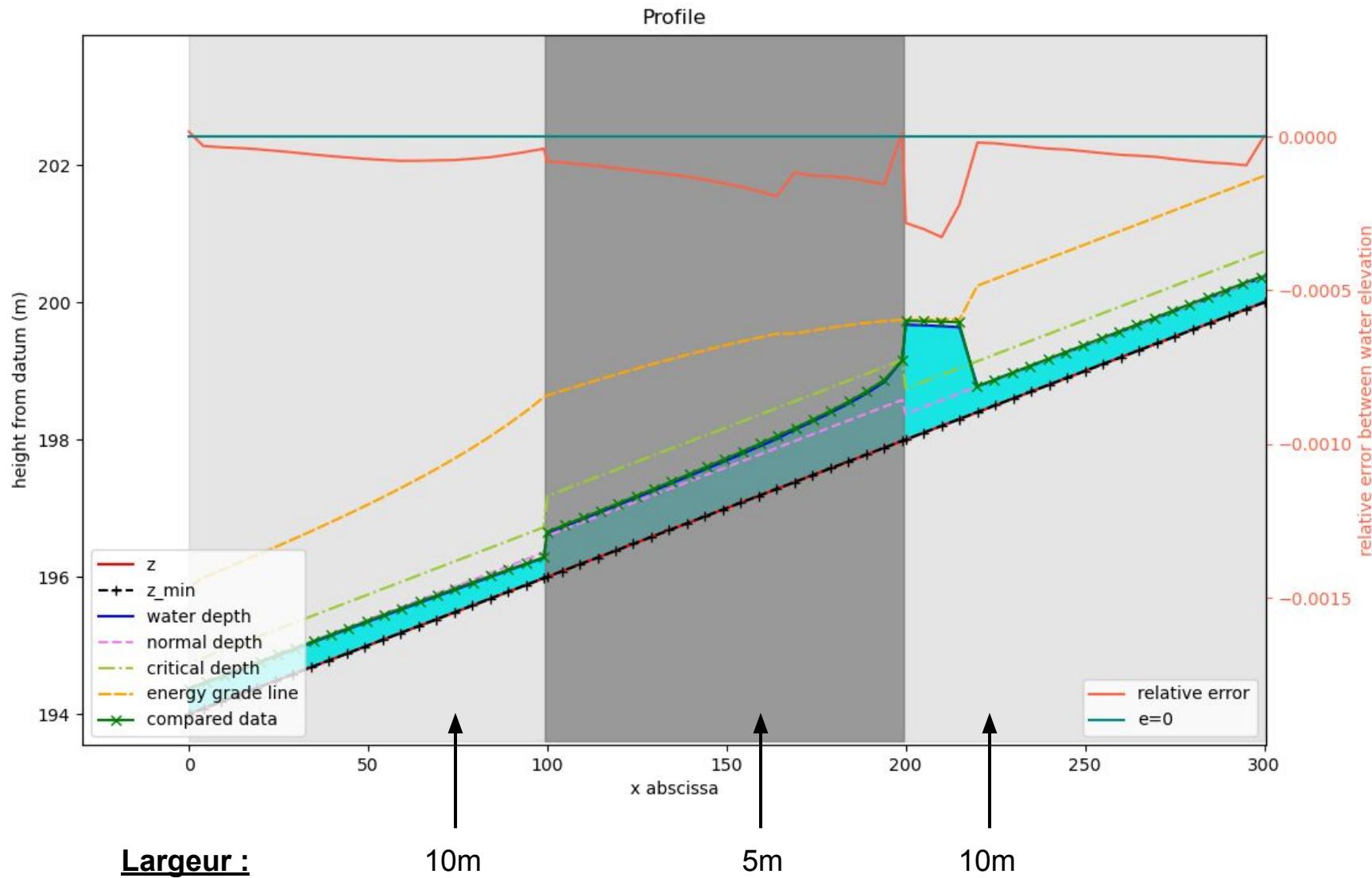
```

# 4- Résultats

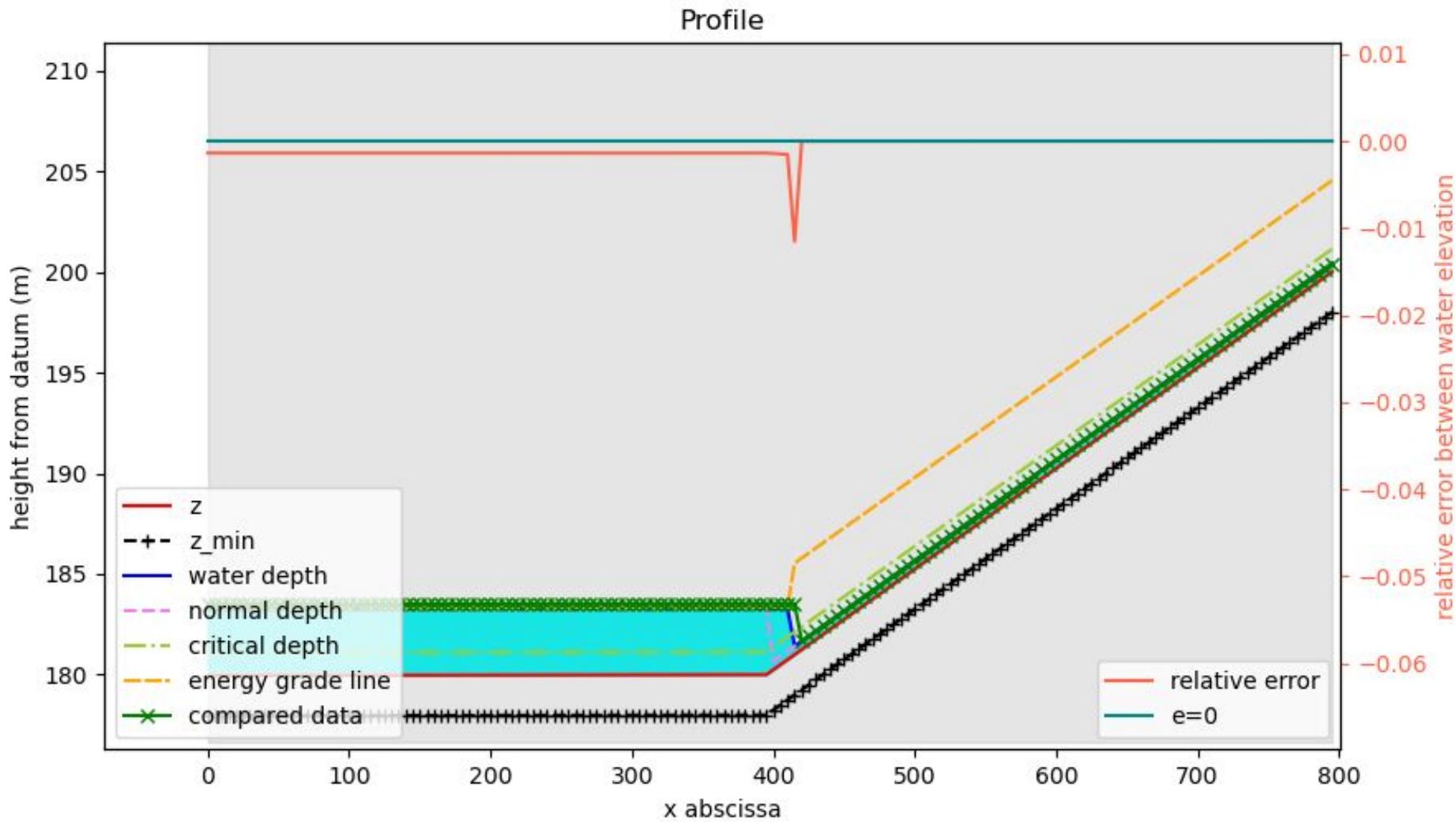


## 4.1 - Validation du calcul hydraulique

# Validation du calcul hydraulique



# Validation du calcul hydraulique

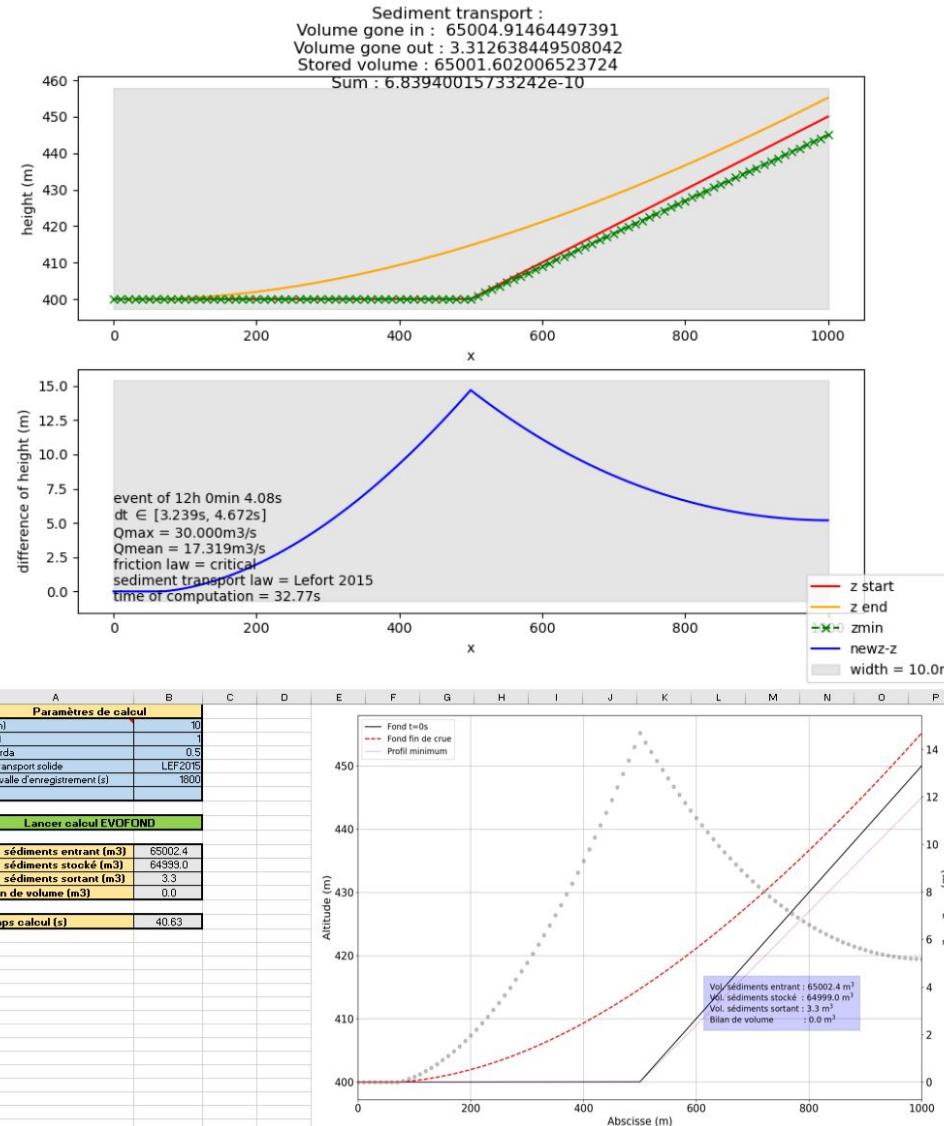


# 4- Résultats

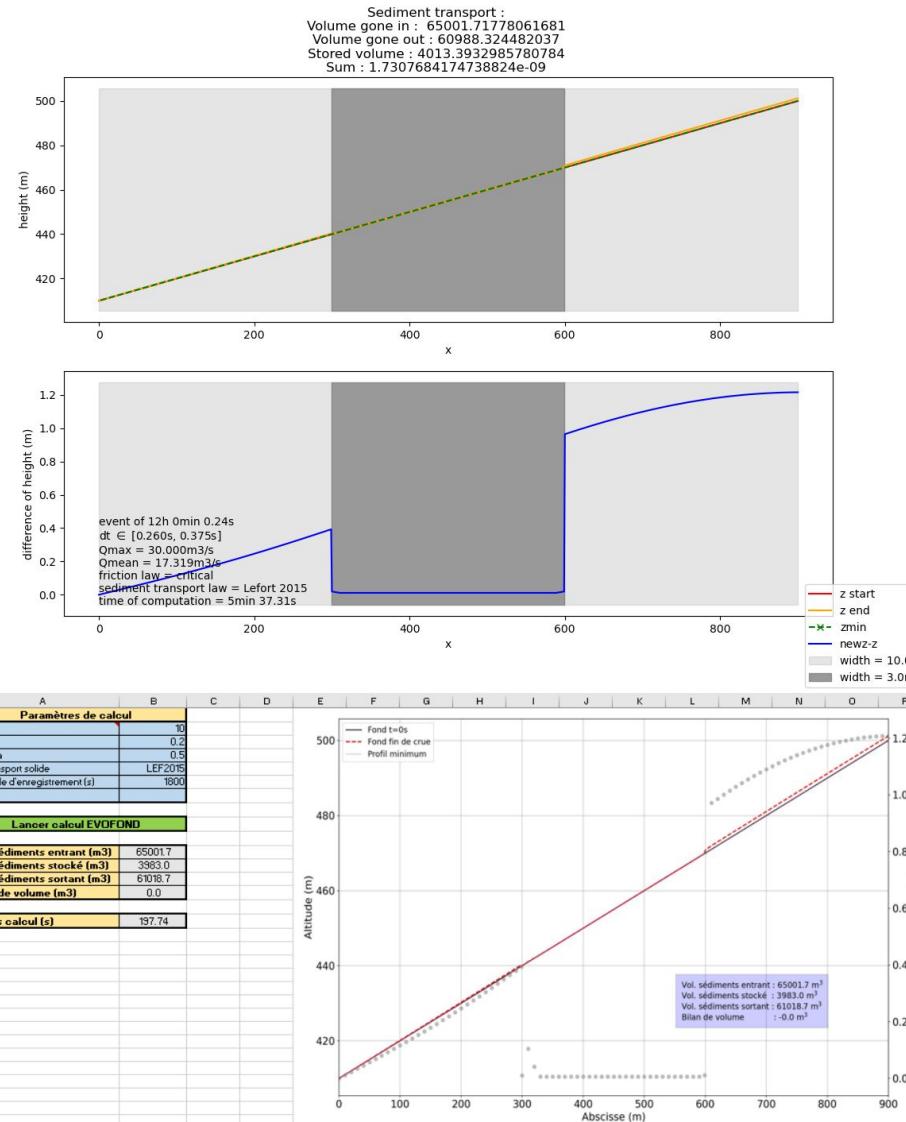


## 4.2 - Évaluation de la solution complète

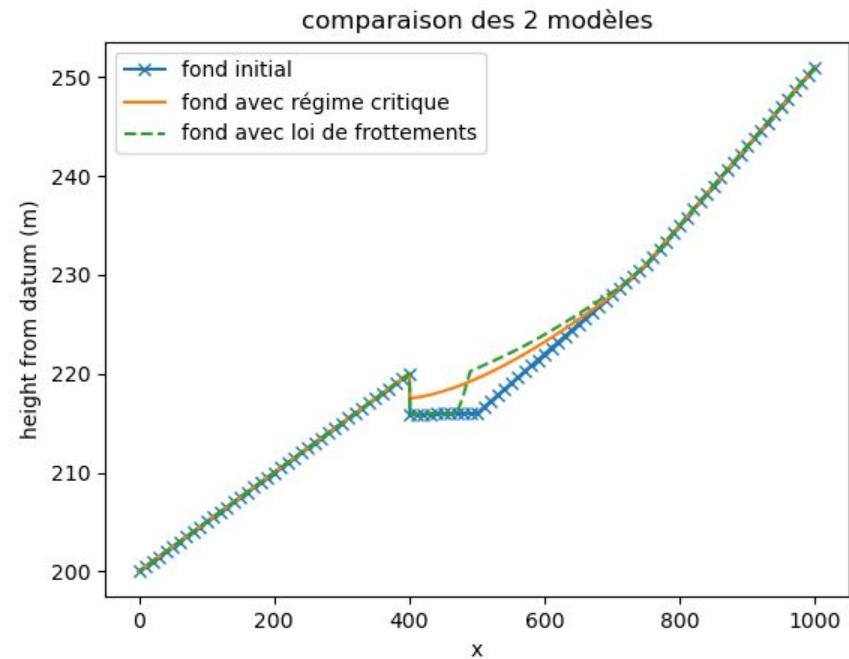
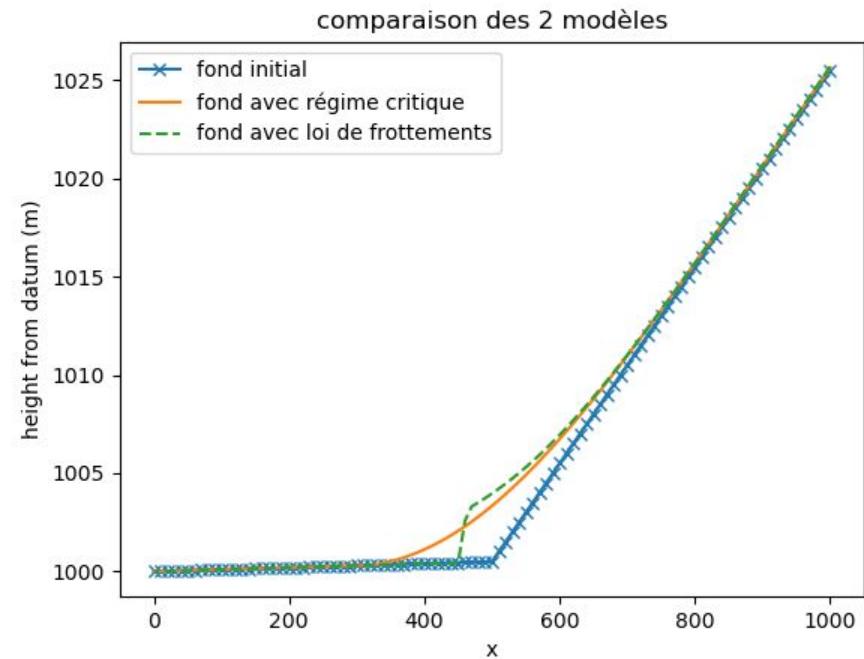
# Comparaison avec Evofond initial (1)



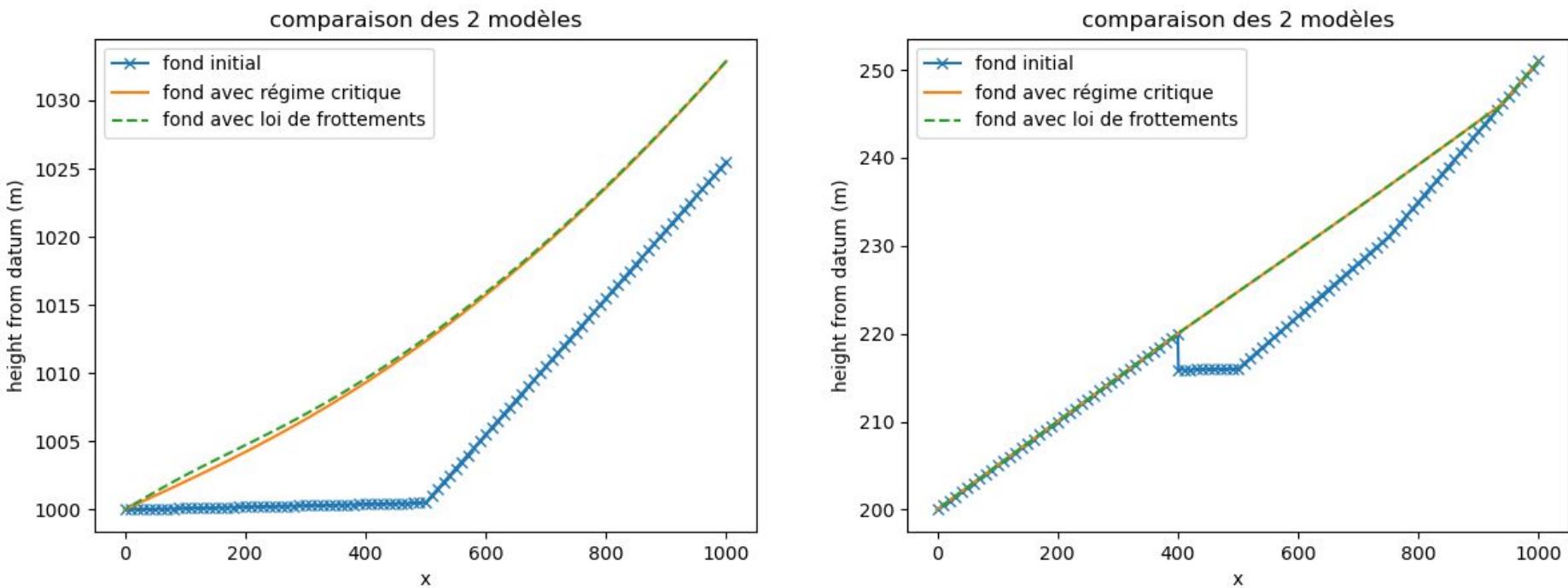
## Comparaison avec Evofond initial (2)



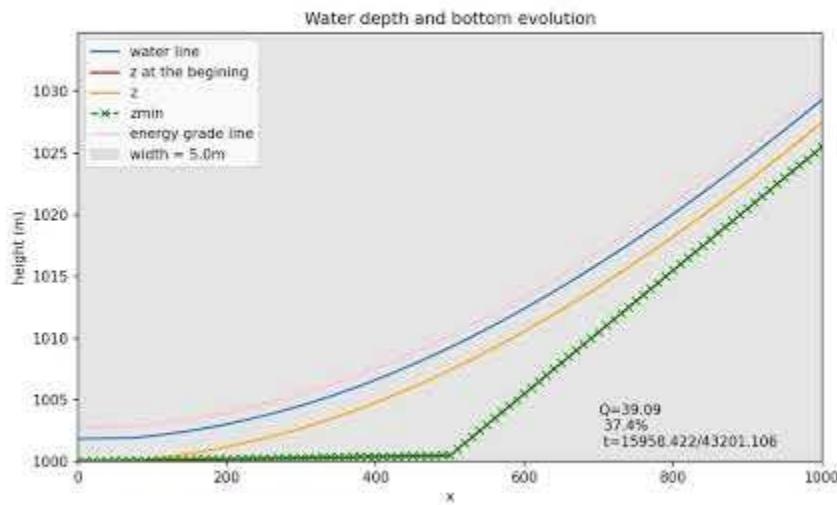
# Comparaison des modèles : état transitoire



# Comparaison des modèles : état d'équilibre



# Comparaison des modèles : dynamique

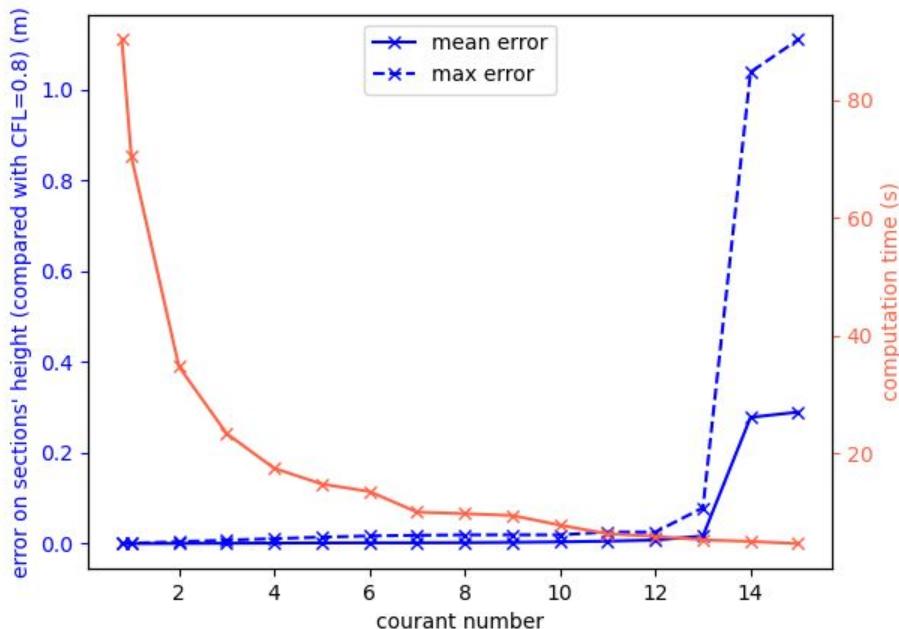


Dynamique régime critique

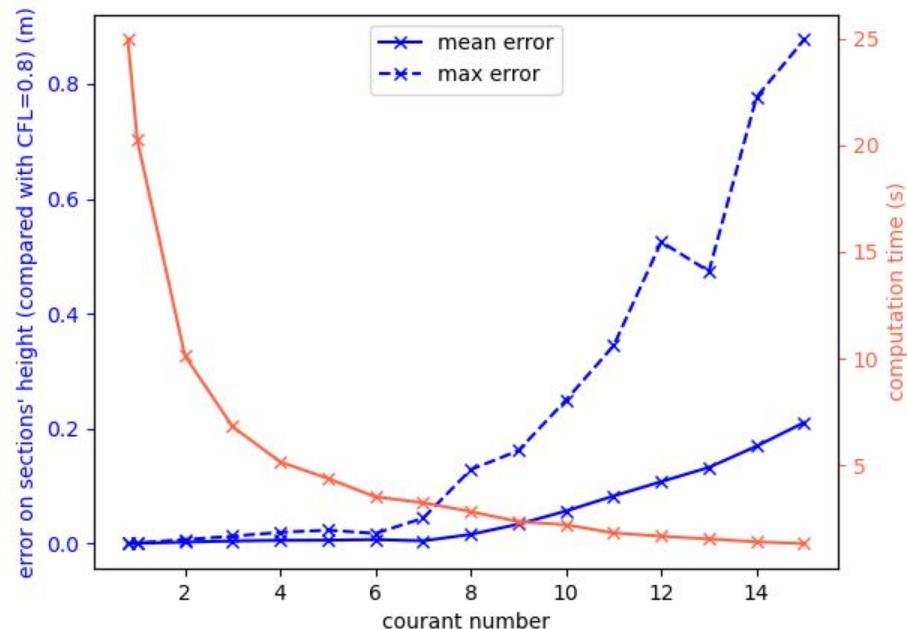
Dynamique loi de frottement

# Retour sur le nombre de Courant

Étude sur le choix du nombre de Courant (stabilité/rapidité)



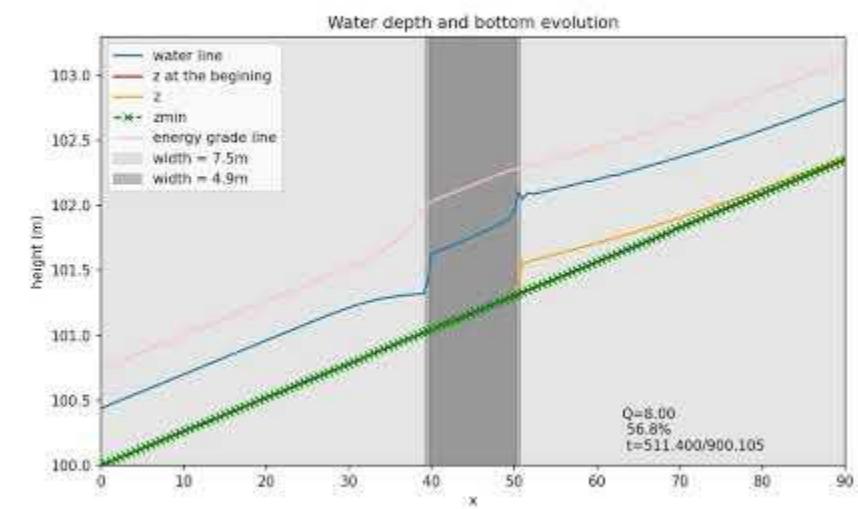
Étude sur le choix du nombre de Courant (stabilité/rapidité)



# 5- Conclusion



# introduction - modélisation - solution - résultats - conclusion



# Annexes



**Merci de votre attention**

**Loi de frottement de Ferguson :**

$$S_f = \frac{\left(1 + 0.15 \frac{R_h}{d84}^{5/3}\right) V^2}{\left(2.5 \frac{R_h}{d84}\right)^2 g R_h}$$



**Piton et Recking 2017 :**

$$q_{sv} = \frac{14\tau^{*2,5}}{1 + \left(\frac{\tau_m^*}{\tau^*}\right)^4} \sqrt{g(s-1)D_{84,tb}^3}$$

$$\tau^* = \frac{0.015q^{2p}D_{84,bs}^{1-3p}S_f^{1-p}}{p^{2,5}g^p(s-1)D_{84,tb}} \quad \tau_m^* = 1,5S_f^{0,75}$$

$$q^* = \frac{q}{\sqrt{gS_f D_{84,bs}^3}}$$

$$p = 0,24 \text{ si } q^* < 100 \text{ sinon } p = 0,31$$



**Méthodes numériques :**

$$(EA) : \forall 0 \leq i \leq n-1 \begin{cases} s_1 = f(x_i, y_i) \\ s_2 = f(x_{i+1}, y_i + s_1(x_{i+1} - x_i)) \\ y_{i+1} = y_i + 0.5(s_1 + s_2)(x_{i+1} - x_i) \end{cases}$$

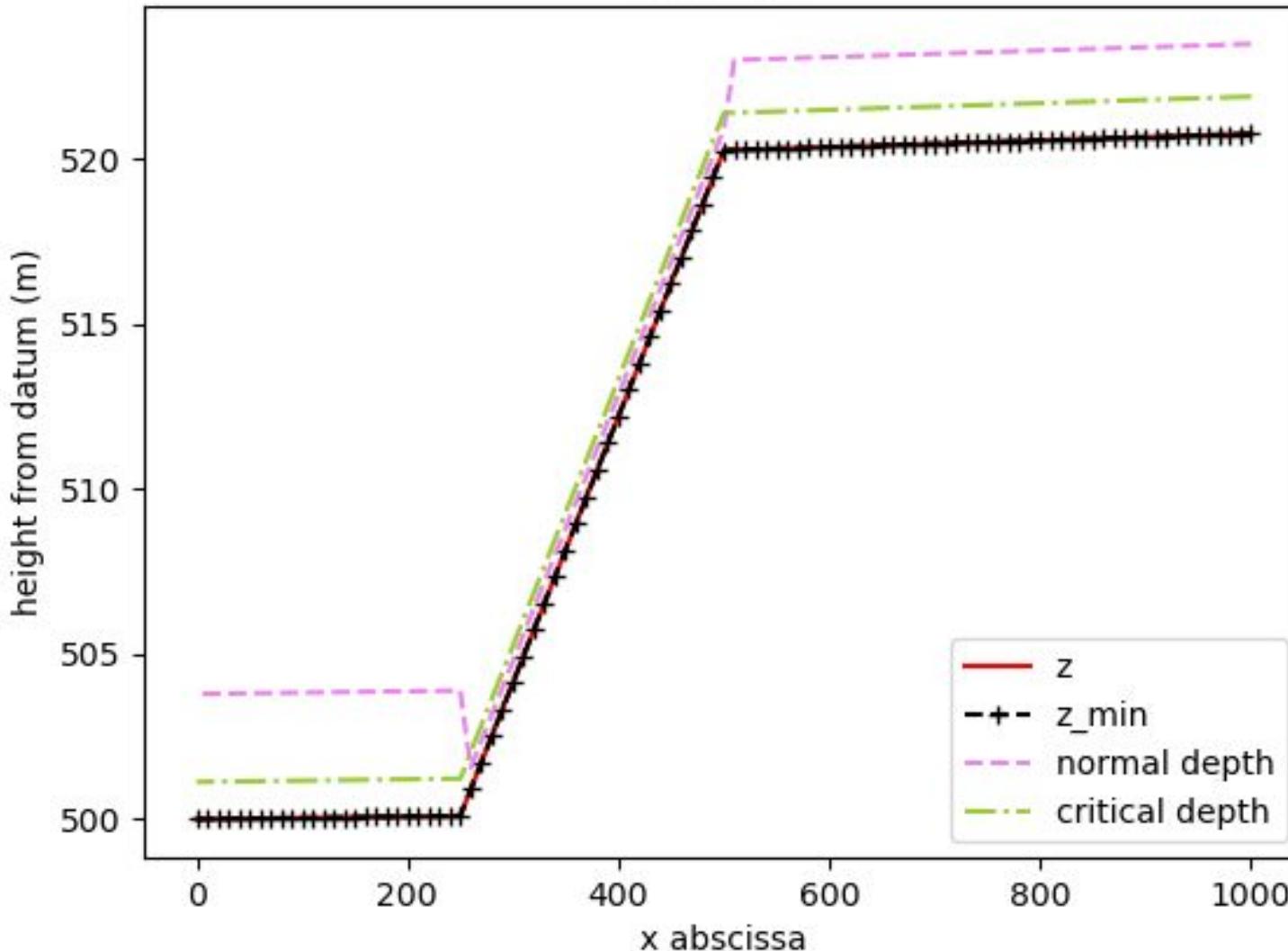
$$(RK4) : \forall 0 \leq i \leq n-1 \begin{cases} s_1 = f(x_i, y_i) \\ s_2 = f(0.5(x_i + x_{i+1}), y_i + 0.5 * s_1 * (x_{i+1} - x_i)) \\ s_3 = f(0.5(x_i + x_{i+1}), y_i + 0.5 * s_2 * (x_{i+1} - x_i)) \\ s_4 = f(x_{i+1}, y_i + s_3 * (x_{i+1} - x_i)) \\ y_{i+1} = y_i + \frac{1}{6}(s_1 + 2s_2 + 2s_3 + s_4)(x_{i+1} - x_i) \end{cases}$$



- $Q = 30 \text{ m}^3 / \text{s}$
- hauteur normale en amont
- hauteur critique en aval

## Algorithme final

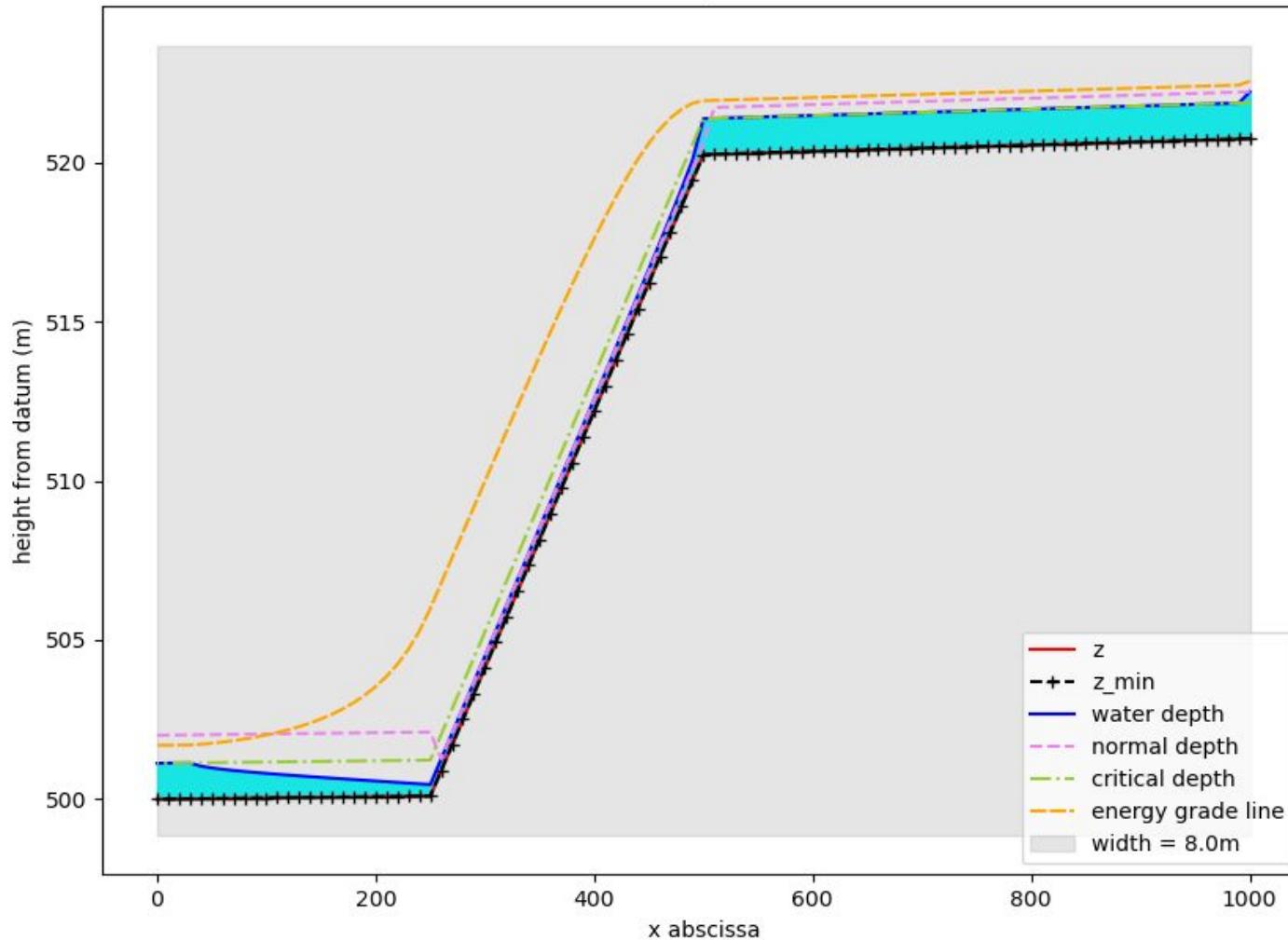
exemple



# Algorithme final (1)

hypothèse : régime torrentiel

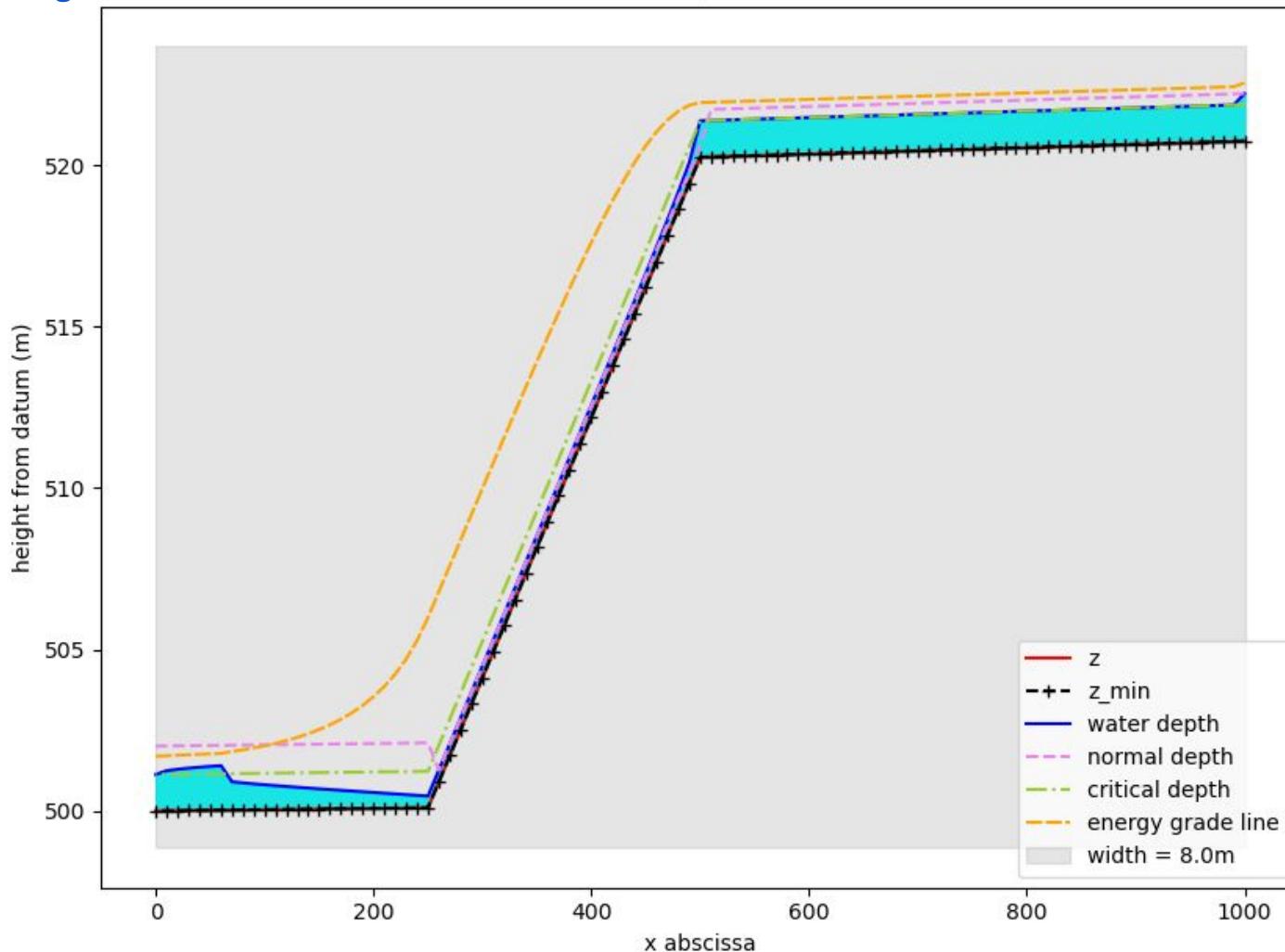
step 1



# Algorithme final (2)

hypothèse : régime fluvial

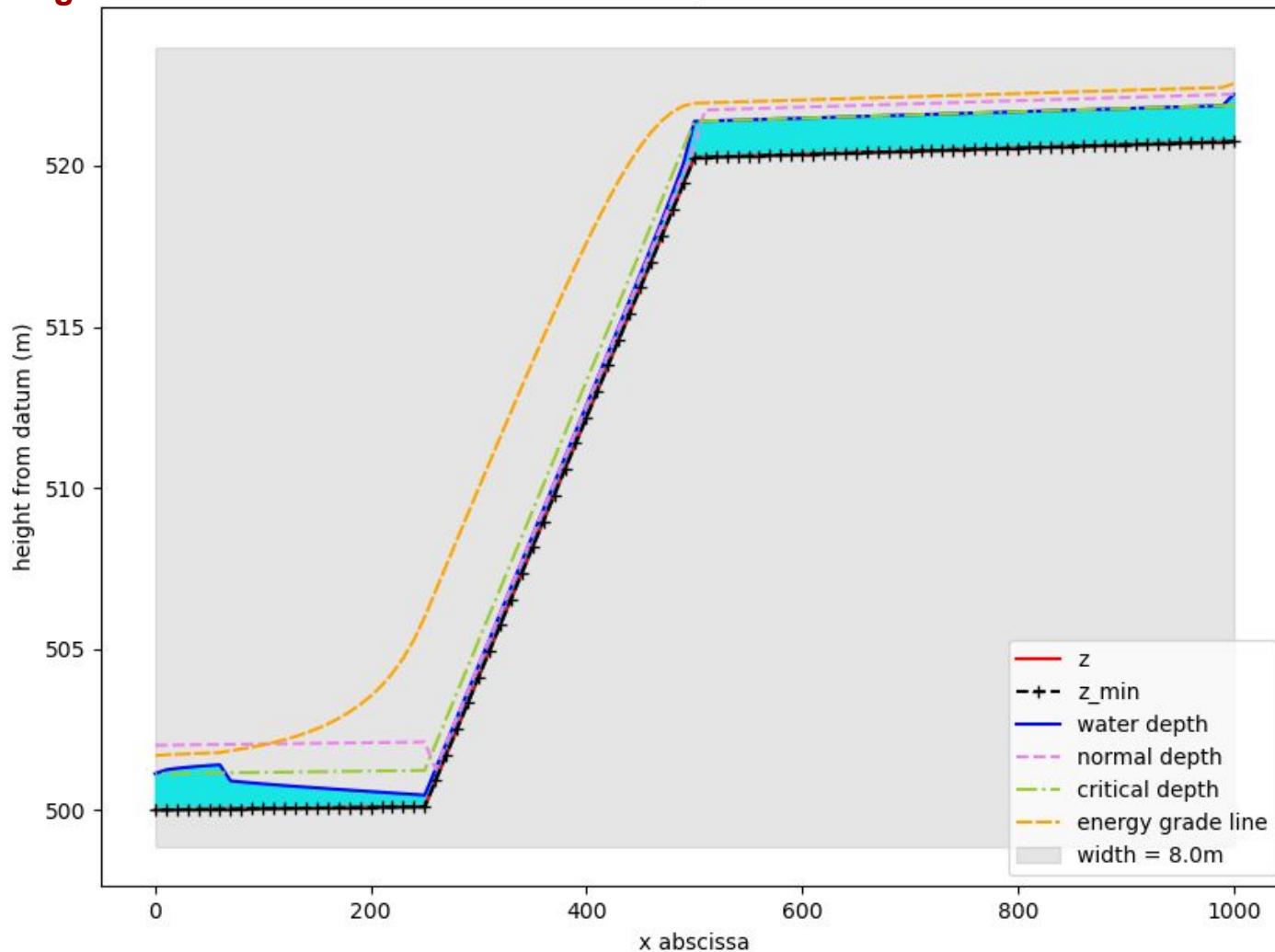
step 2



# Algorithme final (3)

hypothèse : régime torrentiel

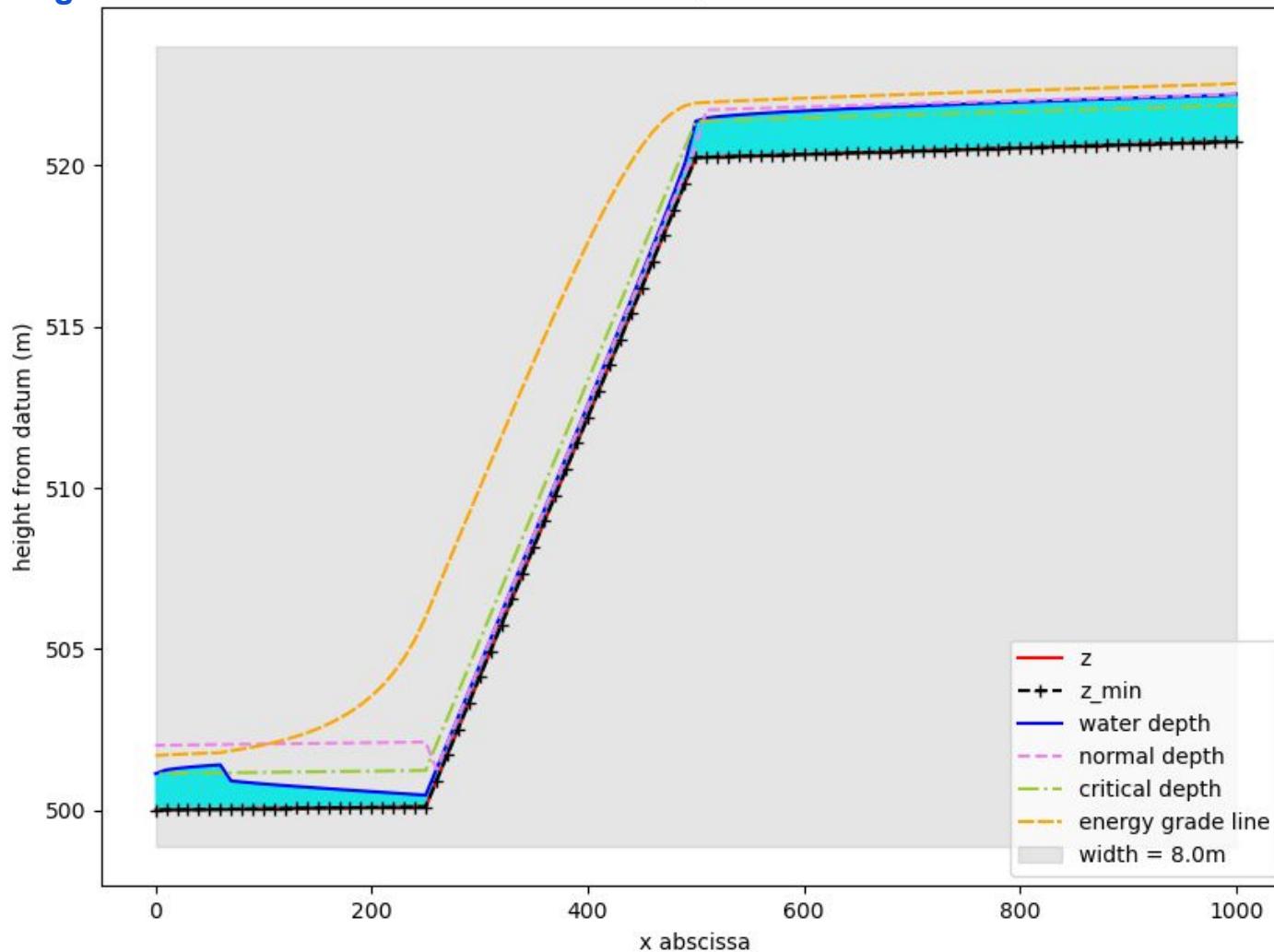
step 3



# Algorithme final (4)

hypothèse : régime fluvial

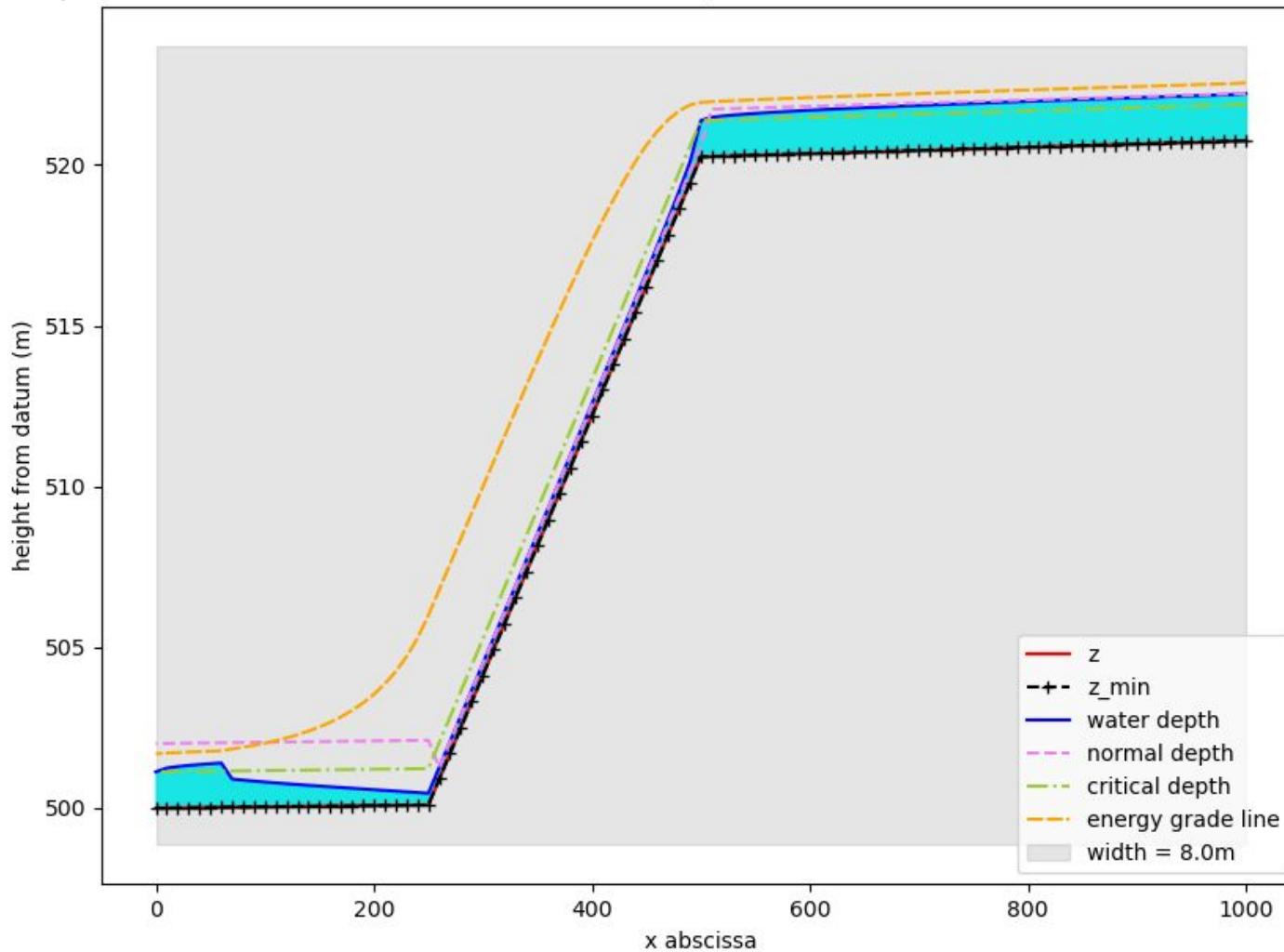
step 4



# Algorithme final (5)

hypothèse : régime torrentiel

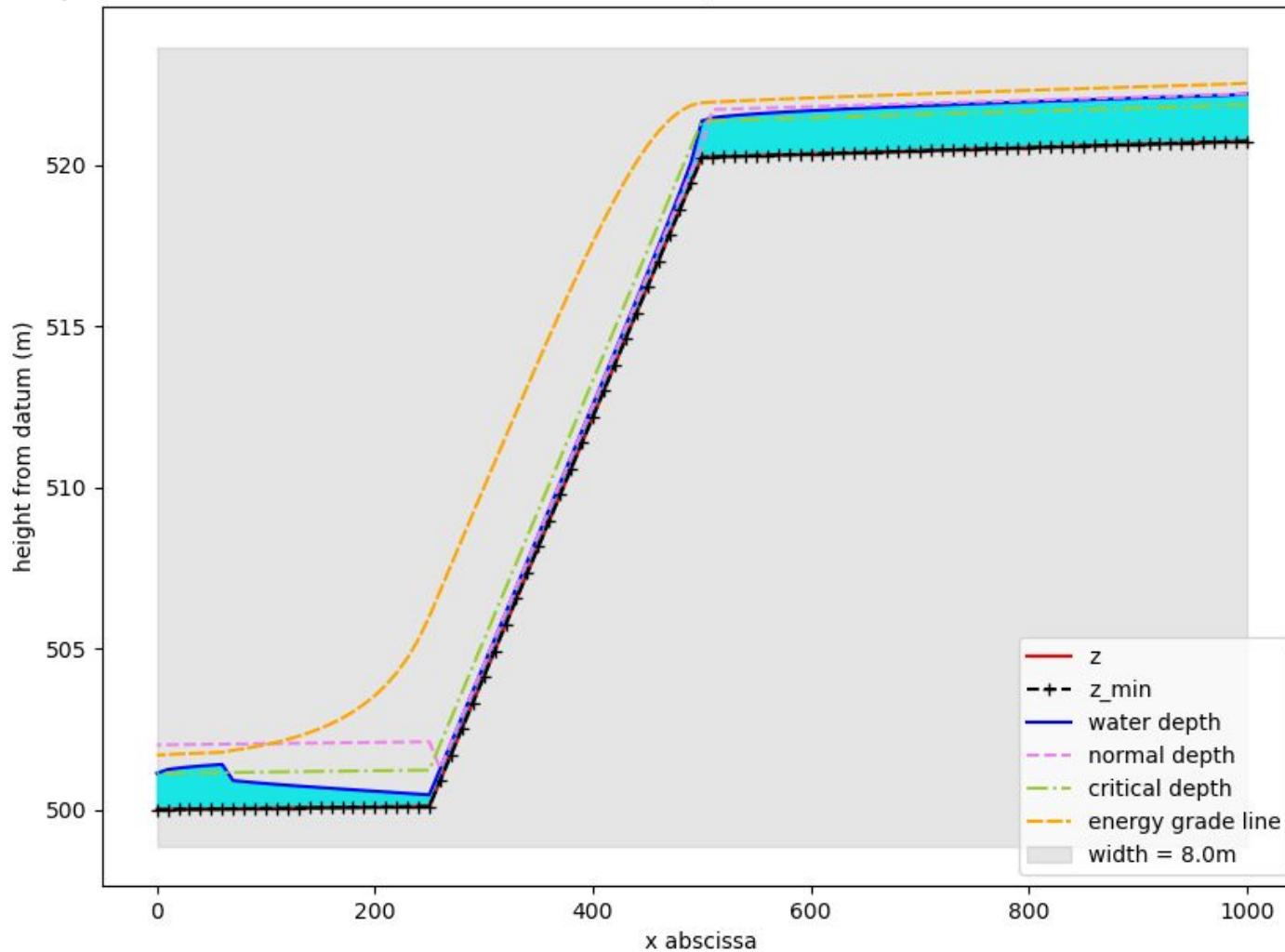
step 5



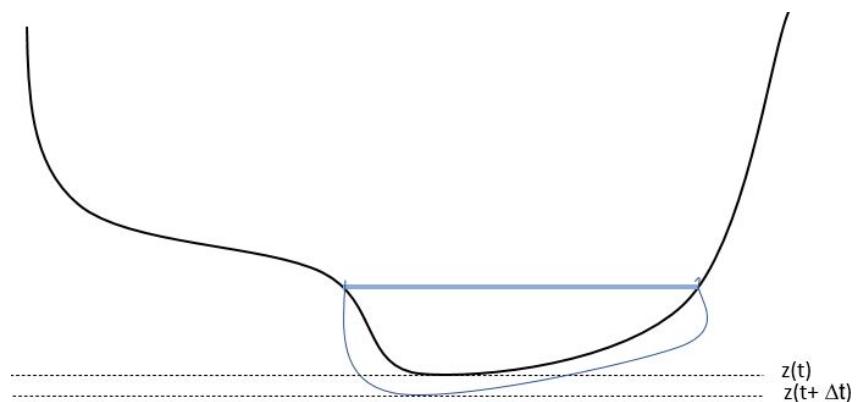
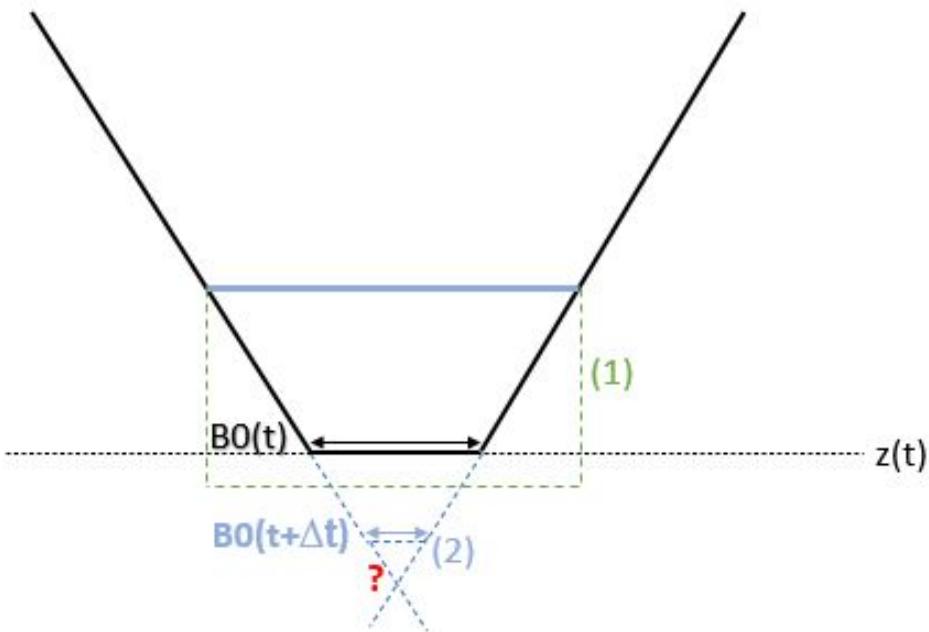
# Algorithme final (6)

hypothèse : régime fluvial

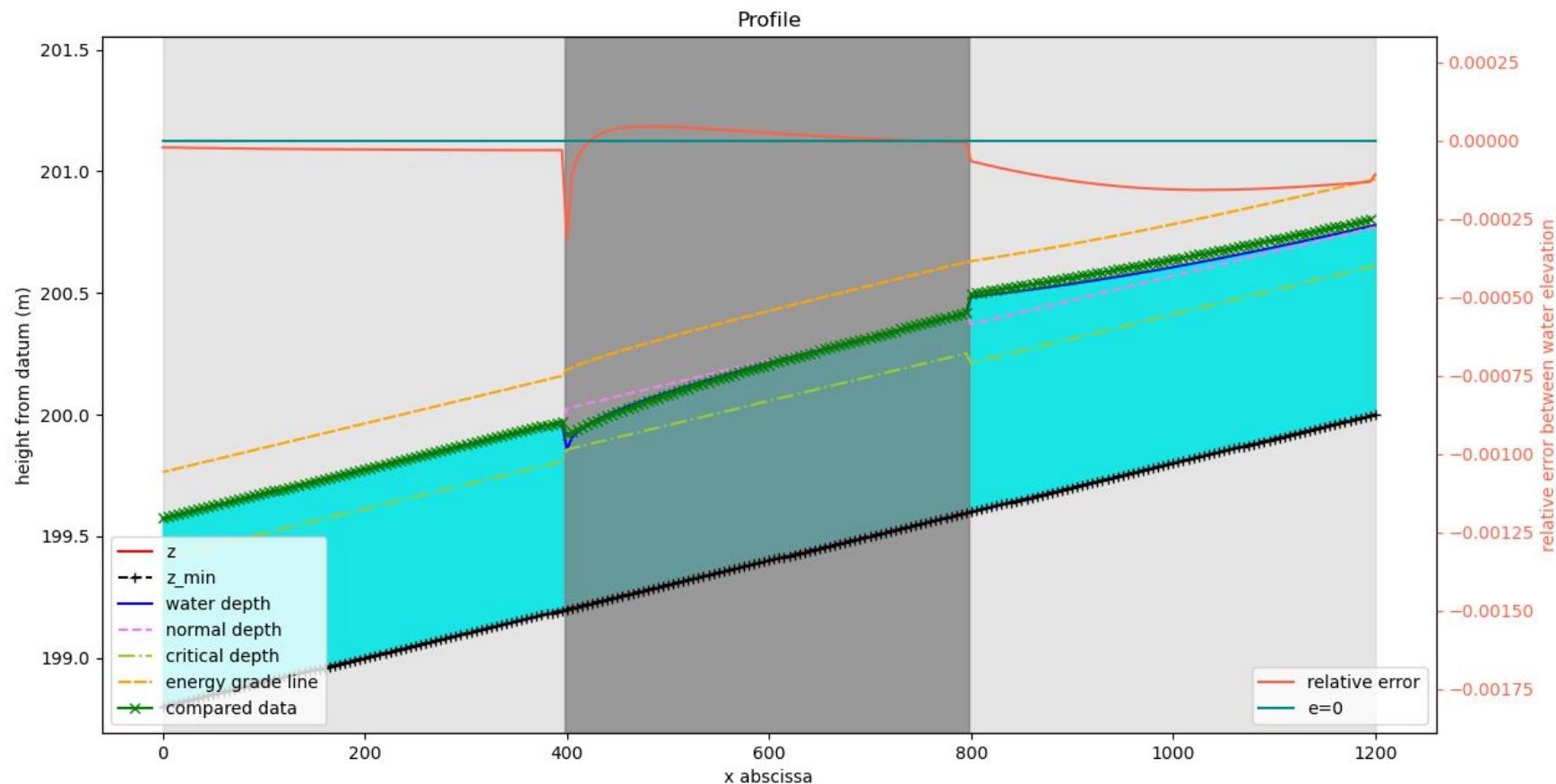
step 6



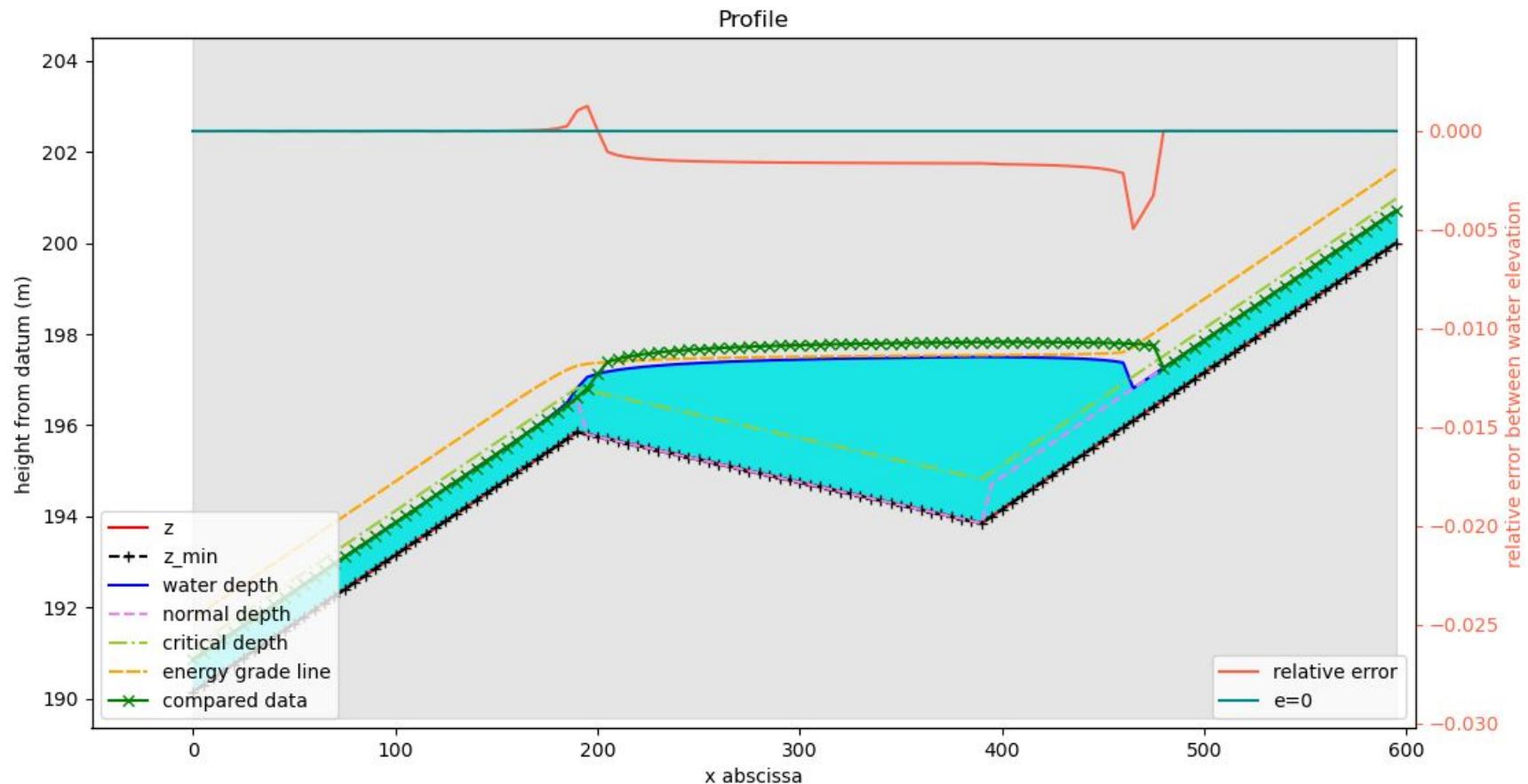
## Comment creuser les sections



## Autres résultats validation hydraulique :

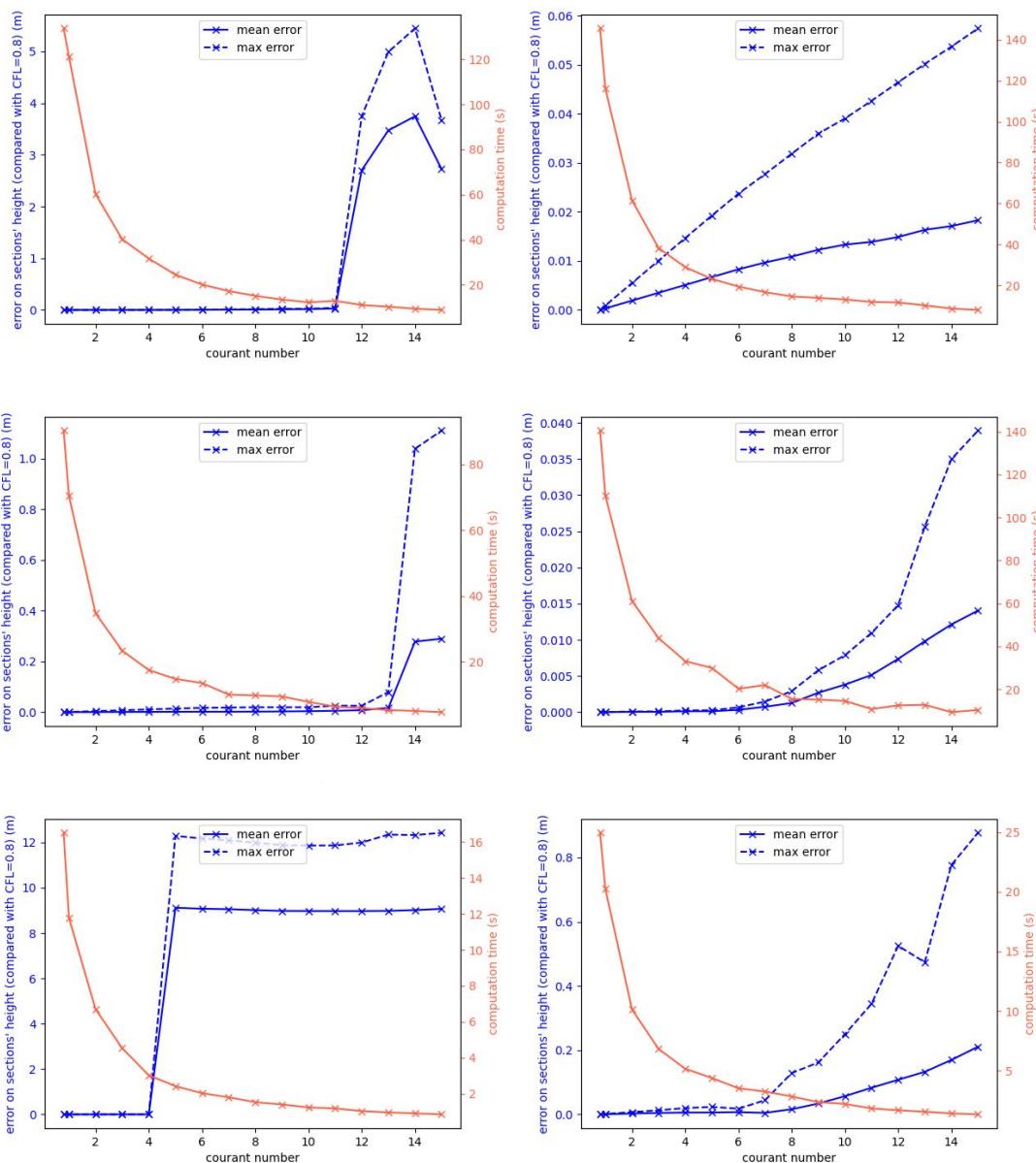


## Autres résultats validation hydraulique :



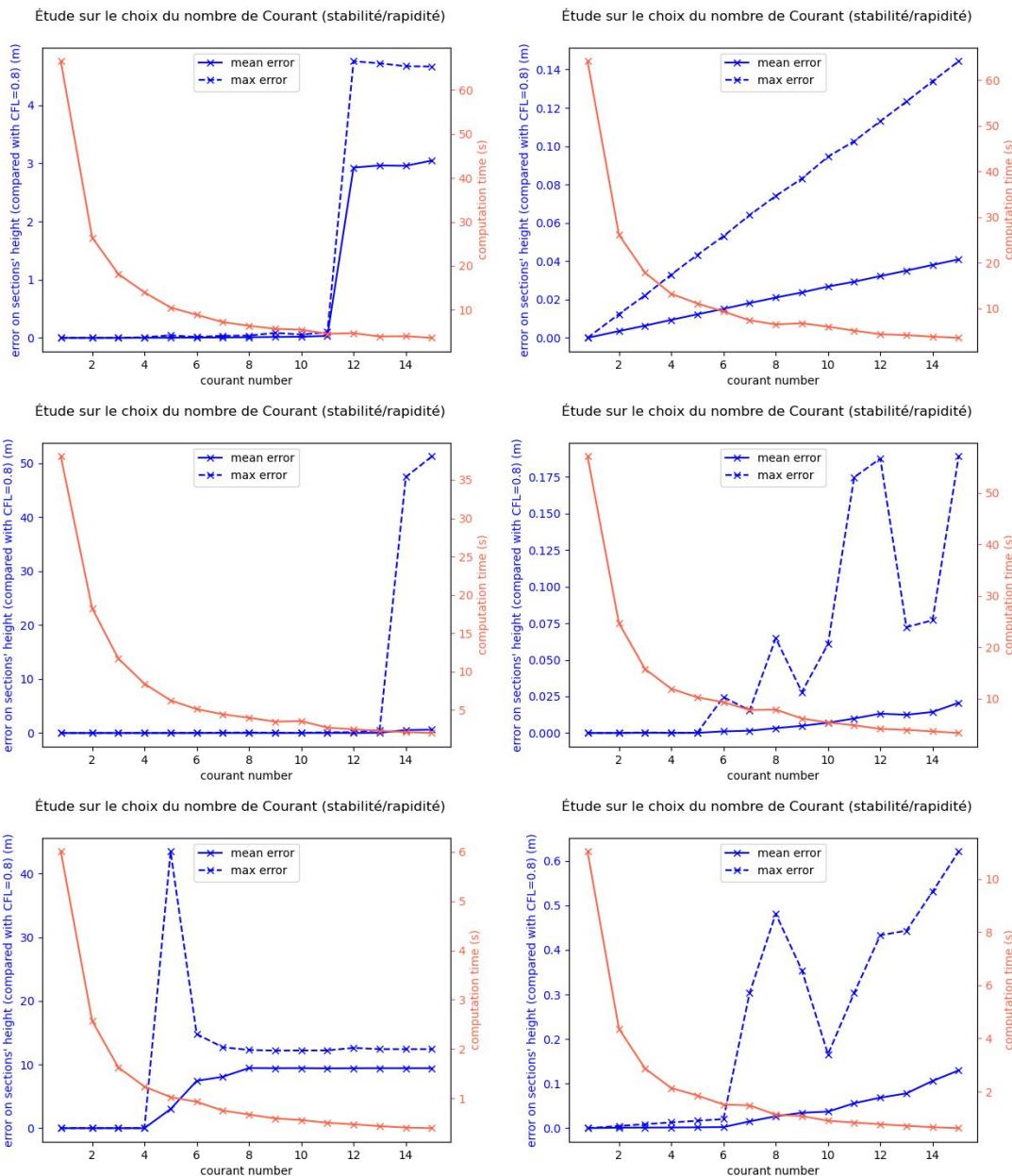
## Étude CFL :

### critique fin de crue



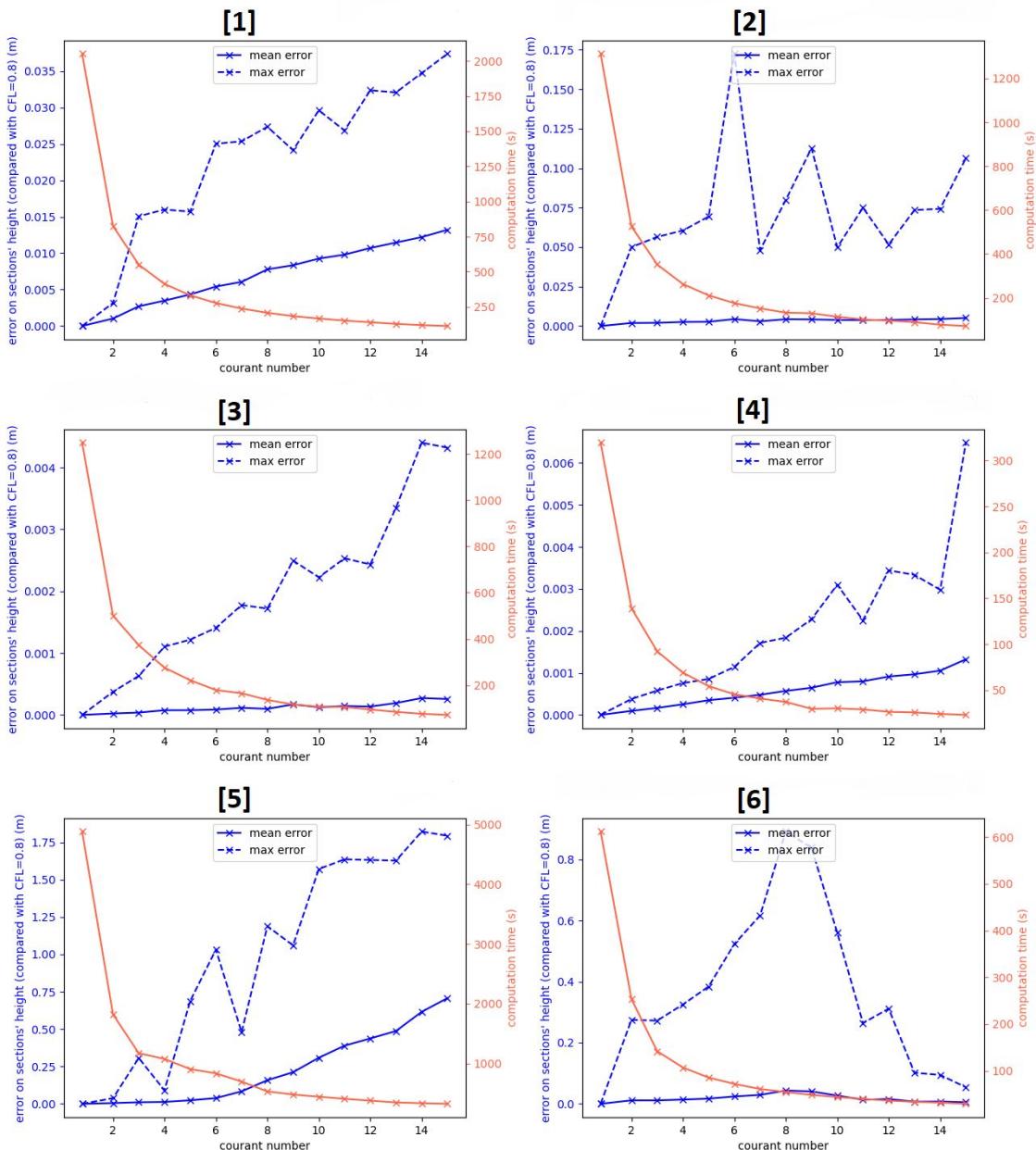
# Étude CFL :

## critique pic de crue



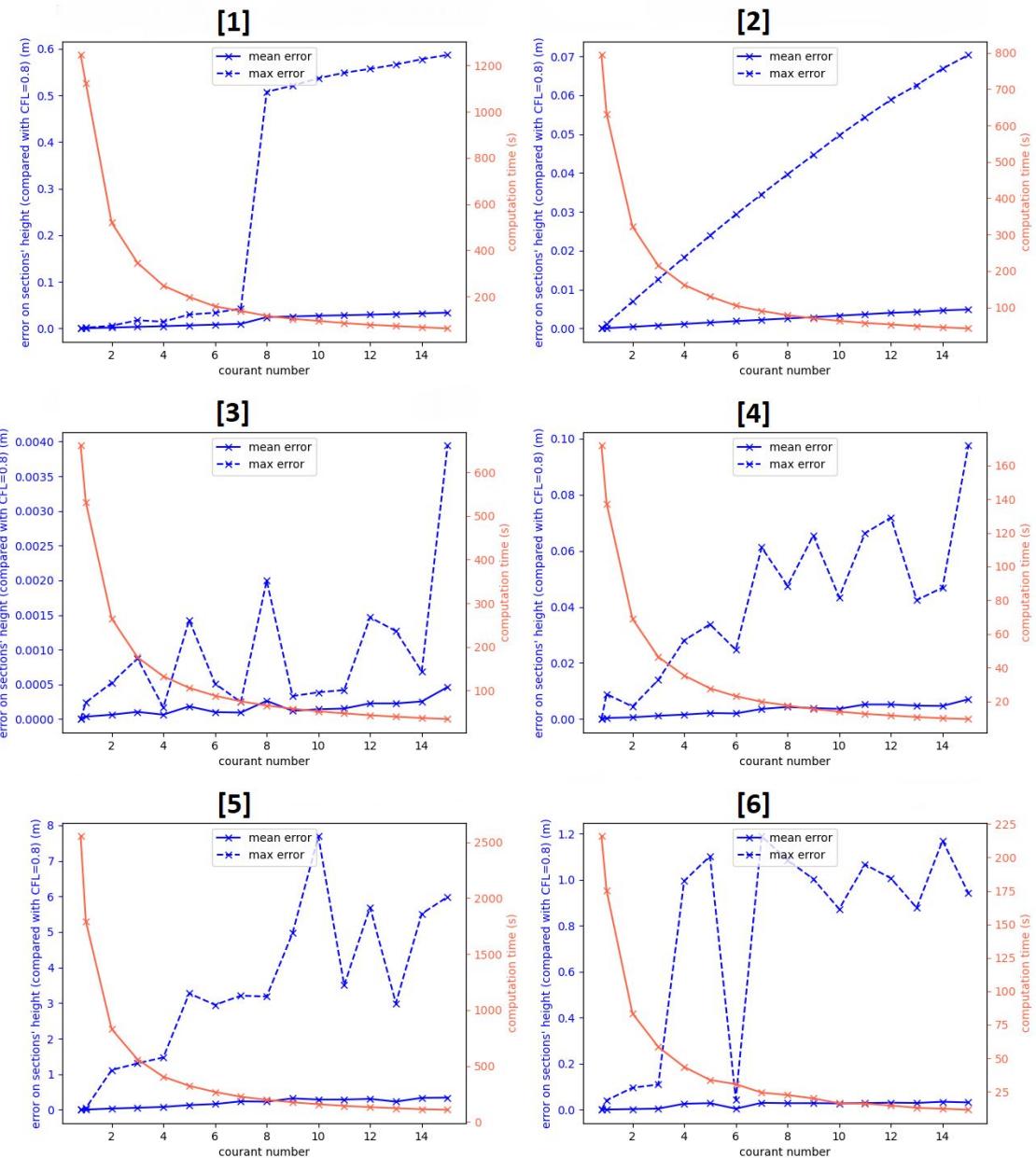
## Étude CFL :

### frottement fin de crue

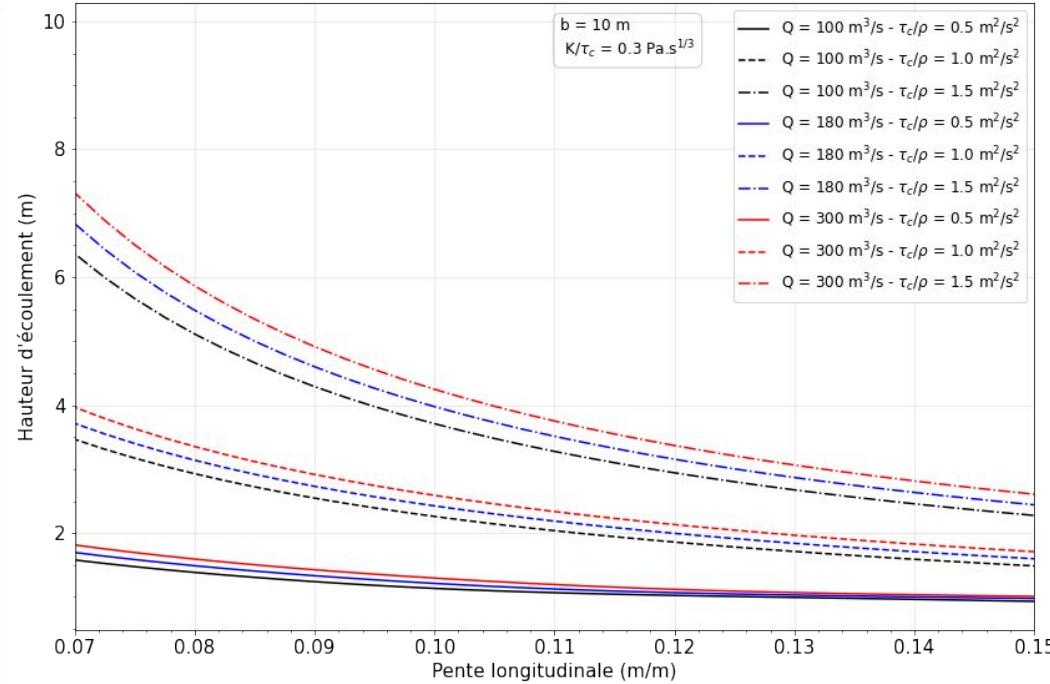
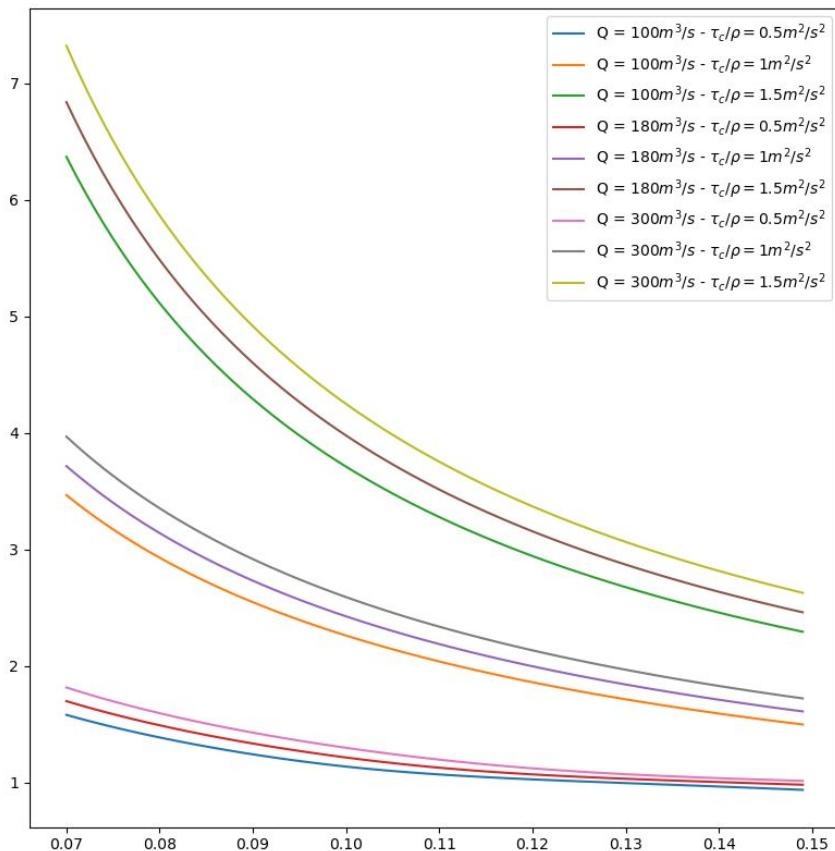


## Étude CFL :

### frottement pic de crue



## Laves torrentielles



Liens vidéos :

<https://youtu.be/3BfWUP2F4Go>

<https://youtu.be/rxxel-chiXo>

<https://youtu.be/WA-ArR2VEmM>