



## GRENOBLE INP - ENSIMAG

ÉCOLE NATIONALE D'INFORMATIQUE ET DE MATHÉMATIQUES APPLIQUÉES DE  
GRENOBLE

### RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ÉTUDES EFFECTUÉ À L'OFFICE NATIONAL DES FORÊTS

---

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

---

Bacon Samuel  
3e année – Option MMIS

28 février 2022 – 28 août 2022

**Office National des Forêts**  
2 Avenue de Saint Mandé  
75012 Paris 12e arrondissement

#### Responsables de stage

Damien Kuss

Clément Roussel

#### Tuteur de l'école

Éric Blayo

**Coordonnées :**

<u>Étudiant :</u>	Samuel Bacon	samuel.bacon@grenoble-inp.org	06 76 63 47 48
<u>Tuteur enseignant :</u>	Éric Blayo	eric.blayo@univ-grenoble-alpes.fr	-
<u>Tuteur structure d'accueil :</u>	Damien Kuss	damien.kuss@onf.fr	06 24 97 31 76

**Remerciements**

Je tiens à remercier Éric Blayo, Damien Kuss, et Clément Roussel pour leur encadrement et tous leurs conseils tout au long de ce stage de fin d'études, j'ai eu beaucoup de chance de bénéficier de leur accompagnement.

Je suis également reconnaissant envers l'ensemble du service RTM de l'Isère pour leur bonne humeur au quotidien et les bons moments que nous avons partagés au cours des derniers mois. Merci en particulier à mes collègues stagiaires, Coline, Lucie et Mathieu, pour les rigolades et le soutien durant ce stage.

Enfin, merci à Solène, Kévin et mes parents pour leur amour et leur présence durant l'ensemble de mes études.

## Table des matières

<b>1 Résumé</b>	<b>4</b>
<b>2 Introduction</b>	<b>4</b>
2.1 Enjeux . . . . .	4
2.2 Contexte . . . . .	5
2.3 Objectifs . . . . .	7
<b>3 Étude bibliographique</b>	<b>8</b>
3.1 Bases d'hydraulique à surface libre . . . . .	8
3.1.1 Cadre, Notations et Généralités . . . . .	8
3.1.2 Type de régime et Ressaut hydraulique . . . . .	10
3.1.3 Débit uniforme - régime critique . . . . .	12
3.1.4 Débit uniforme - loi de frottement . . . . .	12
3.1.5 Autres modèles avancés . . . . .	13
3.2 Transport solide lors de crues torrentielles . . . . .	13
3.2.1 Lois de transport solide . . . . .	13
3.2.2 Equation d'Exner . . . . .	14
3.3 Modèles numériques d'évolution de fond de lit . . . . .	14
3.4 Présentation d'Evofond . . . . .	15
<b>4 Approche de la solution</b>	<b>17</b>
4.1 Résolution numérique pour l'hydraulique . . . . .	18
4.2 Ajout du transport solide . . . . .	20
4.3 Solution stable : condition de Courant-Friedrich-Lowy (CFL) . . . . .	22
4.4 Éléments d'architecture de la solution . . . . .	23
4.4.1 Approche orientée objet . . . . .	23
4.4.2 Utilisation d'Evofond . . . . .	23
<b>5 Résultats</b>	<b>26</b>
5.1 Validation de la partie hydraulique . . . . .	26
5.2 Évaluation de la solution complète . . . . .	28
5.2.1 Comparaison avec Evofond initial . . . . .	28
5.2.2 Comparaison régime critique - régime graduellement varié . . . . .	29
5.2.3 Étude sur le choix du nombre de Courant . . . . .	32
<b>6 Synthèse</b>	<b>37</b>
<b>7 Bilan personnel</b>	<b>38</b>
<b>8 Impact environnemental et sociétal</b>	<b>39</b>
<b>9 Bibliographie</b>	<b>40</b>

<b>10 Annexes</b>	<b>41</b>
10.1 Notations mathématiques . . . . .	41
10.2 Figures . . . . .	41

## 1 Résumé

Ce stage porte sur le développement d'un logiciel de calcul d'évolution altitudinale du fond de lit de cours d'eau lors de crues torrentielles.

On peut distinguer deux grandes parties constituant ce projet : une première partie de modélisation consistant à maîtriser l'hydraulique à surface libre et la physique du transport solide afin de modéliser le problème. Cette partie fait l'objet d'une étude bibliographique pour aborder les éléments décrivant ces phénomènes.

Dans un second temps, il faut implémenter une résolution numérique avec le langage Python, en partant d'une version pré-existante de l'outil comme base. Il y a une considération concernant l'architecture du nouvel outil, ainsi que pour la façon dont l'utilisateur échange avec celui-ci en entrée comme en sortie. Des résultats pour évaluer la qualité de la solution et comparer les différentes méthodes de résolution sont présentés. Sont également abordés les aspects de complexité et stabilité de la méthode de calcul.

**Mots clés :** Hydraulique à surface libre, Transport solide, Programmation orientée objet, Développement logiciel, Risques Naturels, Crues torrentielles.

## 2 Introduction

### 2.1 Enjeux

Les crues les plus intenses des cours d'eau de montagne (rivières torrentielles et torrents) sont très souvent associées à un transport solide sous forme de charriage beaucoup plus conséquent qu'en contexte fluvial. Cela se traduit par des modifications morphologiques brutales qui surviennent au cours de quelques minutes à quelques heures : aggradation du fond de lit pouvant atteindre plusieurs mètres, élargissement brutal de la bande active, déplacement du lit vif, ...

Le transport solide, et les évolutions morphologiques qui en sont la conséquence, concourent généralement aux dégâts observés au moins autant que le débit liquide lui-même, et la submersion qui est liée. Les exemples sont très nombreux, comme : les crues de la Vésubie et de la Roya dans les Alpes-Maritimes en octobre 2020, la crue du Bastan dans les Hautes-Pyrénées en juin 2013 ou encore les crues des torrents du Massif de Belledonne en août 2005 dans le département de l'Isère, ...

En contexte torrentiel, les interactions entre hydraulique et transport solide sont souvent tellement importantes qu'il n'est plus possible, comme en contexte fluvial, de considérer comme invariante la géométrie du lit et de dissocier l'étude hydraulique de l'étude du transport solide. Les évolutions morphologiques entraînent une modification de la géométrie du lit et des paramètres influençant l'hydraulique : pente du lit, largeur d'écoulement, rugosité... lesquels influencent à leur tour l'hydraulique... puis le transport solide.

À proximité des zones sources de matériaux, les évolutions systématiques du fond sont importantes et très souvent supérieures aux hauteurs d'eau. Il est donc primordial de pouvoir les quantifier. Pour répondre à cette problématique qui met en jeu des calculs complexes, le recours aux modèles numériques est un atout pour appuyer l'expertise. Cependant, dans ce domaine,

l'accessibilité à de tels modèles, validés sur des cas d'application concrets, reste limitée tant pour les services opérationnels ONF-RTM que pour l'ensemble des bureaux d'études.

De ce fait, l'étude du transport solide durant les crues est indispensable pour mieux comprendre, et donc agir ou prévenir face à ces risques. Ces études peuvent être mises en oeuvre au travers d'analyse croisée, entre approche historique (inventaire et analyse statistique des évènements passés), géomorphologique (étude liée au sol, comme l'érosion ou analyse du relief) et enfin hydraulique (étude de l'écoulement). Dans ce cadre, l'appui d'outils numériques est un atout nouveau qu'il est important de considérer. Ce stage a ainsi pour but de développer un outil de simulation de transport solide dans les cours d'eau, destiné aux hydrauliciens ou aux experts. Cet outil s'inscrit en milieu de processus d'analyse de risque naturel : il peut être utilisé après l'acquisition de données terrains (caractéristiques du cours d'eau, granulométrie...) et n'est pas une finalité puisque le modèle présenté nécessitera nécessairement des limites, tout comme en présente le calcul numérique employé. Il s'agit seulement d'un moyen alimentant la réflexion de l'expert pour l'analyse de l'aléa torrentiel.

Des exemples de photographies prises suite à des crues torrentielles sont donnés en figure 1 et en [annexe](#) afin de mieux visualiser l'ampleur que peut prendre ce type de risque.



FIGURE 1 – Photo prise suite à la crue du Domeynon à Domène (Isère) - 22/08/2008

## 2.2 Contexte

Créé par la loi du 23 décembre 1964, l'Office National des Forêts (ONF) est issu de l'éclatement de l'ancienne administration des Eaux et Forêts, fondée en 1291.

L'ONF est un établissement public national à caractère industriel et commercial, placé sous la tutelle du ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (MAA) ainsi que du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES), qui assure la gestion et l'équipement des forêts soumises au régime forestier. Il s'agit des forêts domaniales et communales, des établissements publics, mais également de certaines forêts de particuliers dont la gestion est confiée à l'ONF sous contrat.

Acteur majeur de la filière forêt-bois, l'Office National des Forêts rassemble plus de 9 000 professionnels. En métropole et en Outre-mer, l'ONF gère près de 11 millions d'hectares de forêts publiques appartenant à l'État et aux collectivités territoriales.

#### Gouvernance et mission :

Le conseil d'administration de l'ONF, composé de 30 membres, est présidé par Jean-Yves Caullet, et vice-présidé par Dominique Jarlier, président de la Fédération Nationale des Communes Forestières (FNCOFOR) et Philippe Siat, président de la Fédération nationale du bois. Le président et ses membres sont nommés par décret ou arrêté du Gouvernement. Le champ d'action de cette instance, qui se réunit trois fois par an, est défini par le Code forestier. La direction générale est située à Paris. L'Office National des Forêts est en charge de multiples missions :

- Valoriser la ressource en bois : L'ONF commercialise près de 35% des volumes de bois sur le marché français ;
- Agir pour l'environnement : Protéger la richesse écologique de ces milieux forestiers qui abritent près de 80% de la biodiversité terrestre ;
- Accueillir le public en forêt : 700 millions de visites annuelles dans les forêts françaises ;
- Prévenir les risques naturels : L'ONF assure plusieurs missions dans le domaine des risques naturels : restauration des terrains de montagne (RTM), défense des forêts contre les incendies, protection du littoral ;
- Proposer des prestations et services sur mesure.

Au sein de l'ONF, le service de Restauration des Terrains de Montagne (RTM) est un service spécialisé dans la prévention des risques naturels en montagne. Il met en œuvre, pour le MAA et le MTES, des missions d'intérêt général (MIG) sur l'ensemble de la chaîne de prévention des risques naturels (avalanches, mouvements de terrains, chutes de blocs, crues torrentielles) et intervient en période de crise comme expert auprès des préfectures et collectivités locales.

Ces principaux domaines d'activité sont :

- l'ingénierie-travaux,
- les études et expertises liées aux risques naturels,
- la connaissance et affichage des risques naturels,
- le conseil aux préfectures/services de l'État et aux collectivités territoriales.

L'agence RTM Alpes-du-Nord regroupe 36 personnes techniques dans 3 départements avec de nombreux échanges, une structure territoriale en services départementaux et des équipes spécialisées : les pôles expertises. Les personnels techniques du RTM bénéficient de l'appui des équipes de soutien de l'ONF (RH, compta, SIG, informatique...). En Isère, le RTM gère 113 divisions domaniales RTM représentant 19050 ha et qui regroupent 4370 ouvrages. Sur les 521 communes de l'Isère, 307 sont classées en zone montagne mais toutes peuvent être amenées à solliciter les équipes RTM. En études, maîtrise d'œuvre et assistance technique, le RTM 38 réalise entre 200 000 et 300 000 euros de chiffre d'affaires annuel.

## 2.3 Objectifs

Ce projet de fin d'études porte sur la réécriture et l'ajout de fonctionnalités de calcul hydraulique au logiciel **Evofond** conçu par les services RTM. Cet outil est utilisable au travers d'une interface Excel, pour la saisie des données d'entrée et la visualisation des résultats. Le cœur de calcul est programmé en Python, et c'est ce langage qui est utilisé pour poursuivre le développement. Le lien entre Python et Excel est fait grâce au module *xlwings*, mais l'interface Excel n'est pas destinée à être conservée par la suite. L'outil initial sera plus largement détaillé dans la partie [Présentation d'Evofond](#).

Evofond doit permettre à un hydraulicien de renseigner les caractéristiques du cours d'eau (longueur, largeur, granulométrie...) puis de simuler une crue afin d'observer le résultat sur le fond du lit, c'est-à-dire les phénomènes de dépôt de matériaux ainsi que les points où le fond a été creusé par exemple. La dynamique de crue peut aussi présenter un intérêt.

Ainsi cet outil est construit sur différentes composantes (géométrie, hydraulique, transport solide), qui seront abordées plus profondément dans la suite de ce rapport.

Les objectifs de mon travail sont donc multiples. Ils concernent essentiellement la partie simulation pure et le cœur de calcul de l'outil, la partie interface graphique étant dissociée pour être abordée à part. Dans cette optique, je devrais :

- comprendre les phénomènes hydrauliques mis en jeu,
- découvrir les outils liés au transport solide,
- m'approprier le fonctionnement actuel d'Evofond,
- définir les fonctionnalités ciblées et celles pouvant être ajoutées pour des versions futures,
- développer la nouvelle version de l'outil avec une approche orientée objet permettant d'ajouter facilement de nouvelles fonctionnalités,
- mettre en place une résolution numérique adaptée au modèle choisi,
- présenter des résultats pour évaluer la solution et comparer les différents modèles.

### 3 Étude bibliographique

La modélisation de l'évolution du fond de lit lors de crues torrentielles met en jeu deux thématiques qui interagissent : une partie hydraulique, dans laquelle on cherche à déterminer l'allure de la ligne d'eau et une partie solide dans laquelle on souhaite évaluer le transport des matériaux au sein de l'écoulement. Il est assez clair que chacune de ces parties constituent un problème en soit, il est donc pertinent de séparer l'approche bibliographique selon ces deux axes, en cherchant tout d'abord les méthodes de résolutions hydrauliques (3.1) puis les modélisations classiques de transport solide (3.2).

#### 3.1 Bases d'hydraulique à surface libre

##### 3.1.1 Cadre, Notations et Généralités

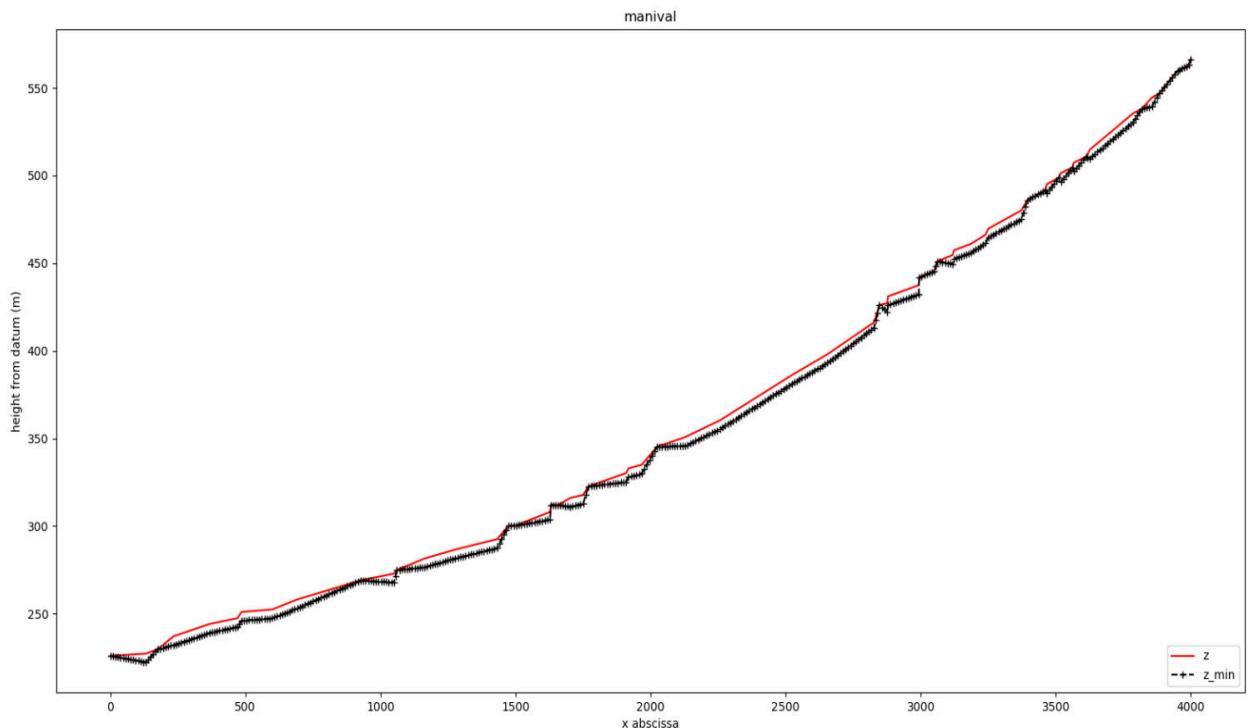


FIGURE 2 – Exemple de profil en long

Le problème auquel on s'intéresse est supposé unidimensionnel (1D). Le cours d'eau d'eau est décrit par différentes grandeurs, premièrement le profil en long donnant pour différentes abscisses  $x$  l'altitude du fond de lit  $z$  au droit de différentes sections hydrauliques (cf. Figure 2, courbe rouge). On prend la convention  $x$  croissant de l'aval vers l'amont. À noter que  $z$  n'est pas forcément croissante et peut même présenter des variations brusques. On considère aussi une altitude minimale  $z_{min}$  : il s'agit de l'altitude à laquelle le sol est inafouillable (c'est-à-dire qu'il n'est plus possible de creuser, cf. Figure 2 courbe noire). D'autre part, on a les caractéristiques géométriques de chaque section hydraulique : le type (rectangulaire, trapézoïdale, quelconque) et les paramètres associés (par exemple la largeur pour une section rectangulaire, cf. Figure 3).

Le problème à étudier est la réponse de ce système face à un débit liquide  $Q$  et solide  $Q_s$  en

amont. Cette donnée d'entrée est décrite par un hydrogramme<sup>1</sup> pour le débit liquide et par un sédimentogramme<sup>2</sup> pour le débit solide.

En résumé, le problème se pose ainsi : on connaît les caractéristiques du cours d'eau (profil en long et liste de sections en travers), étant donné un débit liquide, un débit solide et une durée, il faut déterminer l'état du cours d'eau à la fin de cet évènement. Il faut pour cela se plonger plus en détail dans l'hydraulique à surface libre, ces notions seront au cœur de la suite de ce rapport.

L'aspect hydraulique du problème est en fait une étude classique : déterminer la hauteur d'eau en fonction d'un débit, pour un profil donné est un cas d'étude classique, grandement abordé dans les ouvrages [2], [3] et [5], par exemple. En revanche, ce problème couplé au transport solide, qui implique donc une modification de la géométrie du cours d'eau en parallèle, complexifie la résolution. C'est pourquoi nous nous intéressons dans un premier temps à la résolution de la partie hydraulique.

Rentrions à présent dans la théorie physique et introduisons les notations utilisées dans la suite de ce rapport. Il est important de rappeler que l'objectif de ces explications est de permettre la compréhension du travail effectué par la suite, et même du travail de départ puisque ce n'était pas des notions que je connaissais. La tendance est donc à la synthèse et tout n'est pas abordé, les ouvrages indiqués en bibliographie peuvent être utilisés pour approfondir ces sujets. Parmi ces derniers j'ai notamment utilisé [2] qui traite la partie hydraulique de façon très complète et rigoureuse.

Pour une section en travers, c'est-à-dire une abscisse  $x$ , on définit les caractéristiques présentées dans la figure 3 :

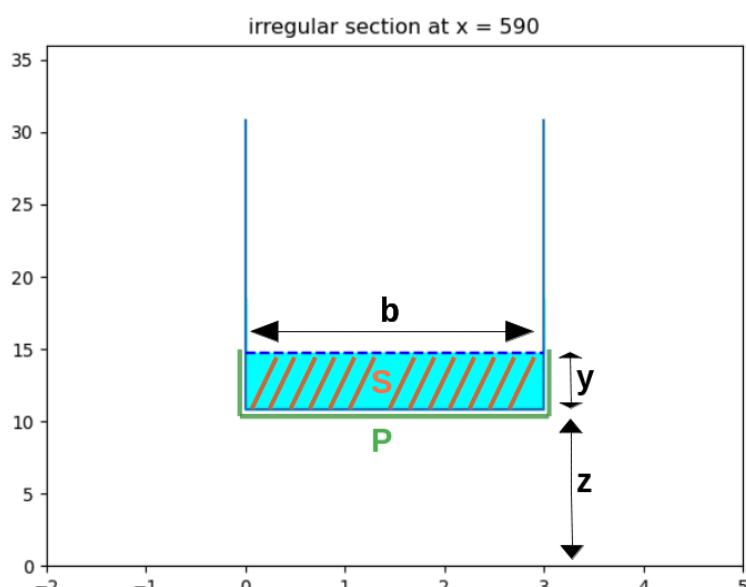


FIGURE 3 – Notations géométriques sur une section rectangulaire

1. Courbe du débit liquide en fonction du temps
2. Courbe du débit solide en fonction du temps

On a :  $b$  [m] la largeur de la ligne d'eau,  $S$  [ $m^2$ ] la superficie mouillée,  $P$  [m] le périmètre mouillé,  $y$  [m] la hauteur d'eau,  $z$  [m] la hauteur du fond de lit. En plus de cela on définit le rayon hydraulique  $R_h = \frac{S}{P}$  [m], longueur caractéristique de la section pour un écoulement donné. Enfin, on a  $S_0 = \frac{dz}{dx}$  [m/m] la pente du fond de lit.

Pour un débit liquide  $Q$  [ $m^3/s$ ], on a la relation  $Q = SV$  où  $V$  [m/s] est la vitesse moyenne d'écoulement sur la section. En hydraulique, comme en physique de manière générale, les considérations énergétiques sont importantes. C'est dans cette optique que l'on introduit la notion de charge, définie par  $H = z + y + \frac{V^2}{2g}$  [m] avec  $g$  la constante de pesanteur. Il s'agit d'une hauteur représentant l'énergie totale de l'écoulement (énergie potentielle + énergie cinétique). On définit également  $H_s = y + \frac{V^2}{2g}$  [m] la charge spécifique permettant de s'affranchir de l'altitude  $z$ . On note  $S_f$  la pente de la ligne d'énergie, c'est-à-dire  $S_f = \frac{dH}{dx}$ .

### 3.1.2 Type de régime et Ressaut hydraulique

En hydraulique, une grandeur appelée nombre de Froude présente une importance capitale. Il s'agit du rapport entre entre la vitesse de l'écoulement et la célérité des ondes. Ce nombre est défini par  $Fr = \frac{V}{\sqrt{gy}}$ . Ce nombre adimensionnel permet de qualifier le régime d'écoulement en 3 catégories :

- Torrentiel si  $Fr > 1$ , avec une faible hauteur d'eau et une forte vitesse. Dans ce régime, le fluide est « tiré » par les forces qui le meuvent (la gravité le plus souvent), sans que la masse de fluide en aval soit une gêne ;
- Fluvial si  $Fr < 1$ , avec une forte hauteur d'eau et une faible vitesse. Ce régime est « piloté par l'aval » : le comportement des particules en mouvement est contraint par celles qui les précédent ;
- Critique si  $Fr = 1$ .

Un point important à connaître concerne le ressaut hydraulique. Ce phénomène caractérise le passage de l'écoulement du régime torrentiel au régime fluvial, il s'agit d'une augmentation soudaine de la hauteur d'eau, associée à une diminution de la vitesse et une grande dissipation d'énergie. Connaître l'emplacement des ressauts hydrauliques est donc important pour étudier le transport solide.

Le régime critique permet de définir la hauteur d'eau critique  $y_c$  [m], hauteur pour laquelle  $Fr = 1$ . On définit enfin la hauteur normale  $y_n$  [m] qui est la hauteur d'eau dans un canal en régime permanent uniforme. Une hauteur normale au-dessus de la hauteur critique (pente faible) signifie que l'écoulement tend à être fluvial tandis qu'une hauteur normale inférieure à la hauteur critique (pente forte) signifie que l'écoulement tend à être torrentiel.

Pour une charge  $H$  donnée, il existe deux hauteurs d'eau permettant de l'obtenir, une pour chaque régime comme l'illustre la figure 4. Le choix entre les deux solutions est déterminé par

l'énergie spécifique :  $F_s = \bar{z}S + \frac{Q^2}{gS}$  avec  $\bar{z}$  la distance entre la ligne d'eau et le centre de gravité de la section mouillée (cf figure 28 en [annexe](#)).

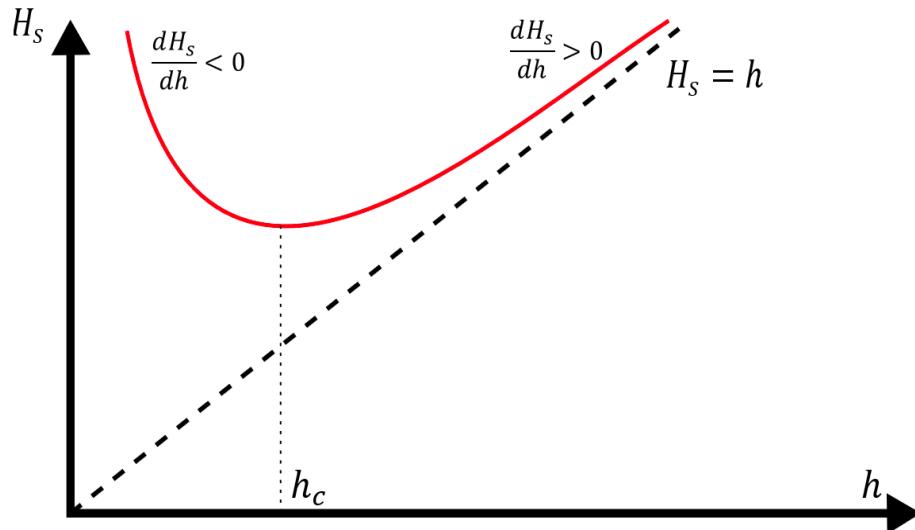


FIGURE 4 – Charge en fonction de la hauteur d'eau pour un débit donné.  $h$  désigne ici la hauteur d'eau ( $y$ )

Un résumé des notations est fourni en [annexe](#), et la figure 5 illustre sur un schéma une partie de celles-ci. On peut y observer un ressaut hydraulique vers l'abscisse  $x = 200$ . On voit aussi que pour les pentes faibles la hauteur normale (courbe rose) est au dessus de la hauteur critique (courbe verte) et que c'est l'inverse pour la pente forte.

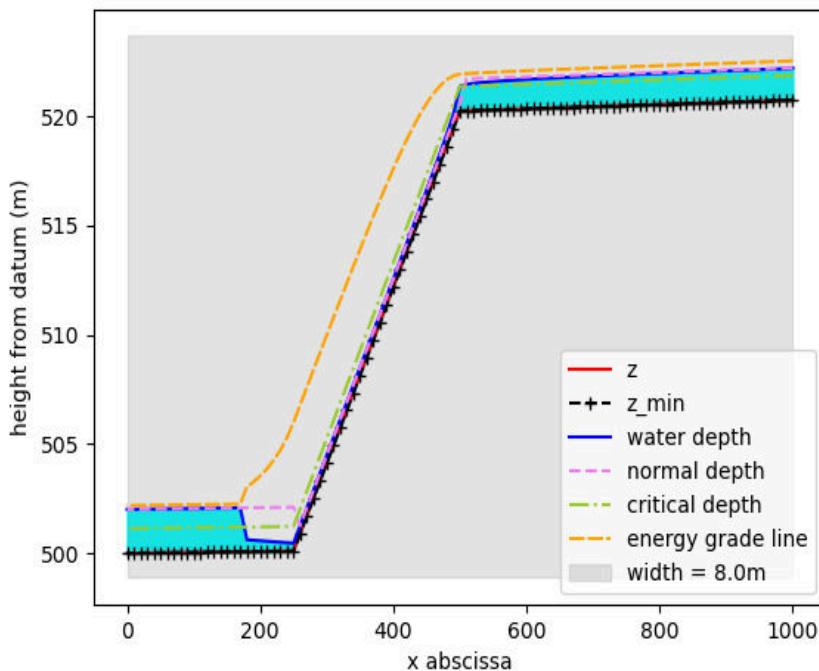


FIGURE 5 – Illustrations des grandeurs importantes sur un profil en long

Il est à présent possible d'aborder les différents modèles hydrauliques qui permettent de déterminer  $y$  pour  $Q$  fixé en amont.

### 3.1.3 Débit uniforme - régime critique

Dans ce modèle, on suppose que le débit est uniforme, c'est-à-dire que  $\forall x \quad Q(x) = Q$ . Il s'agit bien sûr d'une hypothèse assez forte mais qui simplifie grandement le problème. On suppose par ailleurs qu'en tout point l'écoulement est en régime critique, qui est le régime minimisant la charge. Cela signifie donc que  $Fr = 1$ . En cumulant ces deux hypothèses on a :

$$Fr = 1 \iff V^2 = gy \iff Q^2 = S^2 gy \quad (1)$$

Dès lors une question se pose : les grandeurs géométriques définies dans les parties précédentes telles que  $P$  et  $S$  varient grandement selon la forme de la section en travers, peut-on toujours facilement obtenir  $y$  en connaissant  $P$  ou  $S$ ? La conception d'Evofond se fera donc dans un premier temps sur des types de sections particulières, telles que la section rectangulaire ou trapézoïdale. Nous établirons par la suite les résultats pour des sections rectangulaires, qui ont

donc les propriétés suivantes :  $\begin{cases} S = by \\ P = b + 2y \end{cases}$

(1) devient donc :

$$Q^2 = b^2 gy^3 \iff y = \left(\frac{Q}{b\sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{3}}$$

Ainsi, pour un débit uniforme, en régime critique et des sections rectangulaires on connaît directement la hauteur d'eau, qui est la hauteur critique :

$$y = y_c = \left(\frac{Q}{b\sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{3}}$$

### 3.1.4 Débit uniforme - loi de frottement

Conservons l'hypothèse de débit uniforme, mais nous souhaitons nous affranchir de l'hypothèse de régime critique, qui peut être considérée comme trop peu réaliste. Il est alors possible d'ajouter une loi de frottement régissant l'écoulement. Il en existe plusieurs, mais elles peuvent toutes s'écrire sous la forme :

$$V = X \sqrt{R_h S_f}$$

avec :  $\begin{cases} X = C \text{ (coefficient de Chezy } [m^{\frac{1}{2}}/s]) \\ X = k R_h^{\frac{1}{6}} \text{ (k = coefficient de strickler } [m^{\frac{1}{3}}/s]) \\ X = \frac{1}{n} R_h^{\frac{1}{6}} \text{ (n = coefficient de manning } [s/m^{\frac{1}{3}}]) \\ X = \frac{\sqrt{8g}}{f} \text{ (f = coefficient de Darcy-Weisbach [adimensionnel])} \end{cases}$

Essayons à présent de déterminer une relation sur  $y$  nous permettant de calculer la hauteur d'eau. On sait que  $H = z + y + \frac{V^2}{2g}$ . Dérivons cette relation :

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{d}{dx} \frac{Q^2}{2gS^2}$$

On en déduit la relation suivante :

$$S_f = S_0 + \frac{dy}{dx} + \frac{Q^2}{2g} \frac{d}{dx} \frac{1}{S^2}$$

Or, en utilisant la formule de dérivée d'une composition :

$$\frac{d}{dx} \frac{1}{S^2} = \frac{d}{dx} \frac{1}{b^2 y^2} = \frac{-2}{b^2 y^3} \frac{dy}{dx}$$

En combinant tout ce qui précède, on obtient :

$$S_f = S_0 + \frac{dy}{dx} \left(1 - \frac{Q^2}{gb^2 y^3}\right) = S_0 + \frac{dy}{dx} \left(1 - Fr^2\right)$$

et finalement :

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

Le membre de droite n'étant qu'une fonction de la hauteur d'eau  $y$ , cette relation nous permet de calculer la ligne d'eau à l'aide de méthodes classiques telle que la méthode d'Euler. Nous reviendrons là-dessus dans la partie **Solution**. Les raisonnements présentés jusque là sont une synthèse d'une partie de l'ouvrage de Chaudhry [2].

### 3.1.5 Autres modèles avancés

Les deux précédents modèles seront ceux au centre de la suite de ce rapport, pour les parties implémentation de la solution et résultats. Néanmoins, ce travail bibliographique ne s'est pas arrêté à ces hypothèses, et il est intéressant de mentionner deux modèles supplémentaires.

Tout d'abord, l'hypothèse d'une onde cinématique peut remplacer celle du débit uniforme. Dans ce cas, le débit est une onde de propagation et une nouvelle équation différentielle s'ajoute au problème.

Enfin, on peut mentionner le modèle de Saint-Venant avec une équation de continuité et une équation dynamique :

$$\begin{cases} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial y}{\partial x} = gS(S_0 - S_f) \end{cases}$$

## 3.2 Transport solide lors de crues torrentielles

### 3.2.1 Lois de transport solide

Une fois la ligne d'eau connue et le débit donné, tous les paramètres hydrauliques peuvent être connus. De là il faut établir une loi de transport solide donnant le débit solide en un point en fonction de ces paramètres. Plusieurs lois ont été expérimentées, il n'est pas utile de toutes les donner en détail. On peut cependant expliquer qu'elles n'ont pas toutes le même domaine de validité et qu'en ce sens, chacune présente un intérêt. En plus des paramètres hydrauliques, ces lois dépendent aussi de la granulométrie du terrain, c'est-à-dire la distribution de la taille des sédiments. Présentons simplement un exemple : la loi *Rickenmann (1991)* :

$$\begin{cases} q_b = 1,5(q - q_c)S_f^{1,5} \\ q_c = 0,065(s - 1)^{1,67}g^{0,5}D_{50}^{1,5}S_f^{-1,12} \end{cases}$$

avec :

- Domaine de validité :  $0,04\% < S_0 < 20\%$
- $q_c$  = débit solide critique de mise en mouvement par unité de largeur [ $m^3/s/m$ ]
- $q_b$  = débit solide volumique par unité de largeur [ $m^3/s/m$ ]
- $q$  = débit liquide par unité de largeur [ $m^3/s/m$ ]
- $s$  = le rapport  $\frac{\rho_s}{\rho}$  avec  $\rho_s$  la masse volumique des sédiments et  $\rho$  celle de l'eau
- $D_{50}$  = diamètre médian des sédiments [m]

De multiples lois et plus d'explications sont disponibles dans le document [1]

### 3.2.2 Equation d'Exner

Pour l'ensemble des modèles, l'évolution du fond du lit est calculée au moyen de l'équation de conservation de la masse dite d'Exner qui est ajoutée au système d'équations du modèle hydraulique considéré :

$$\frac{\partial z}{\partial t} = -\frac{\partial q_b}{\partial x} \quad (3)$$

avec  $q_b$  le débit volumique par unité de largeur [ $m^2/s$ ], en faisant l'hypothèse d'une porosité nulle, ainsi que des taux de dépôt et d'érosion nuls également (ce qui est cohérent lorsqu'on considère qu'il y a pas d'apport solide depuis et vers l'extérieur). La figure 6 illustre ces grandeurs.

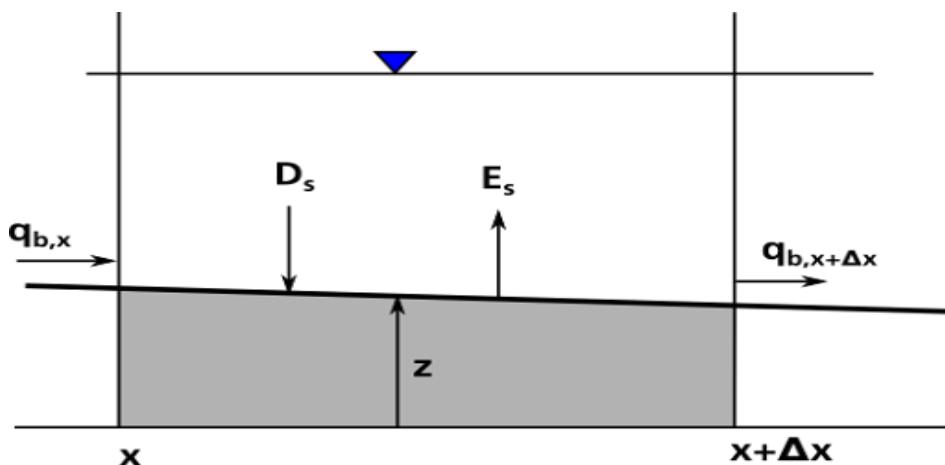


FIGURE 6 – Schéma d'un bilan de masse sur un lit de cours d'eau

### 3.3 Modèles numériques d'évolution de fond de lit

Des outils existent pour ce type de problème. Mais chacun présente des spécificités, d'autres peuvent être difficiles d'utilisation, ou encore pas assez adaptés au contexte torrentiel auquel est confronté le RTM.

Le tableau présenté en figure 7 présente quelques outils connus et détaille leurs caractéristiques respectives.

Nom	Développeur	Uni / Multi Biefs	Sections Compl. /Simpl.	Equations hydrauliques	Lois de frottement	Formules de transport solide	Transport partiel	Red. Ligne d'énergie	Seuils / pavage
SEDFLOW	WSL (Suisse)	M	S	DU, OC	FERG, MS	RICKc, WC, RECK	0	0	0
TOMSED	BOKU (Autriche)	M	C	OC	MS, RICK	RICK a,b,c	0	0	0
3ST-1D	IOWA university (USA)	U	?	BSV	BA, APF,...	SCHO	0	0	?
RUBARBE	INRAE (France)	M	C	BSV	MS, RECK,...	MPM, SJ, LEFb	?	N	0
LOGICCHAR	INRAE (France)	U	S	BSV	MS	MEU, LEFa, RICKa, RECK	N	N	0
EVOFOND	ONF/RTM (France)	U	S	DU	Fr=1	LEFb, RICKa,b, MEU, RECK	N	N	0
EFL	ONF/RTM (France)	M	S	DU	Fr=1	EFb, RICKa,b, MEU, RECK	N	N	0
BASEMENT	ETH Zurich (Suisse)	M	C	BSV	MS	MPM, PARK, WC, RICKb, SJ, Wu	0	N	0

Équations hydrauliques : RU = régime uniforme / OC = onde cinématique // BSV = modèle complet de Saint-Venant

Lois de frottement: MS = Manning-Strickler / FERG = Ferguson / RICK = Rickenmann / BA = Bathurst / APF = Aguirre-Pe et Fuentes / RECK = Recking

Formules de transport solide : RICK = Rickenmann a :1990 – b :1991 – c :2001 / WC = Wilcock et Crowe (2003) / RECK = Recking / SCHO = Schoklitch (1962) / MPM = Meyer-Peter et Müller (1948) / SJ = Smart et Jaeggi (1983) / PARK = Parker (1990) / LEF = Lefort a:1990 b:2015 / MEU = Meunier (1989) / W&P = Wong et Parker (2006) / Wu = Wu (2000)

FIGURE 7 – Caractéristiques de modèles d'évolution de fond de lit existants

L'objectif du développement de l'outil Evofond est de poursuivre l'amélioration d'un logiciel connu par les hydrauliciens du service, adapté au contexte torrentiel et enclin à être complexifié par le futur. Par exemple, la possibilité de modéliser des profils multibiefs n'est pas une priorité, tandis que rajouter des lois de frottement telles que Manning-Strickler ou Ferguson (plus adaptée en torrentiel) est important. L'idée finale est aussi de laisser à l'utilisateur le choix des hypothèses (par exemple régime critique ou loi de frottement) afin de simuler un même événement par différents modèles, le tout avec un seul outil.

La multiplicité des modèles et des fonctionnalités proposées justifie l'importance de reprendre le développement d'Evofond afin de faciliter l'ajout futur de ces propriétés.

### 3.4 Présentation d'Evofond

Une première version d'Evofond est actuellement utilisée. Cet outil implémente le modèle avec les hypothèses de débit uniforme et de régime critique. Il est utilisable avec une interface Excel pour la saisie des paramètres d'entrée et la visualisation des résultats. Une illustration est donnée en figure 8.

À gauche, l'onglet hydrogramme pour saisir l'évolution du débit liquide en amont au cours du temps. Il y a un onglet sédimentogramme similaire. L'utilisateur renseigne également la granulométrie et le profil dans les onglets respectifs et lance le calcul pour obtenir la figure sur l'image de droite.

L'hypothèse principale utilisée ici, à savoir prendre pour hauteur d'eau la hauteur critique, est une approximation acceptable en contexte torrentiel dans le domaine de rugosités intermédiaires.

En l'état, on peut établir quelques faiblesses de l'outil. Le lien entre le cœur de calcul Python et l'interface Excel est fait avec le module *xlwings*, l'utilisateur voulant installer Evofond doit

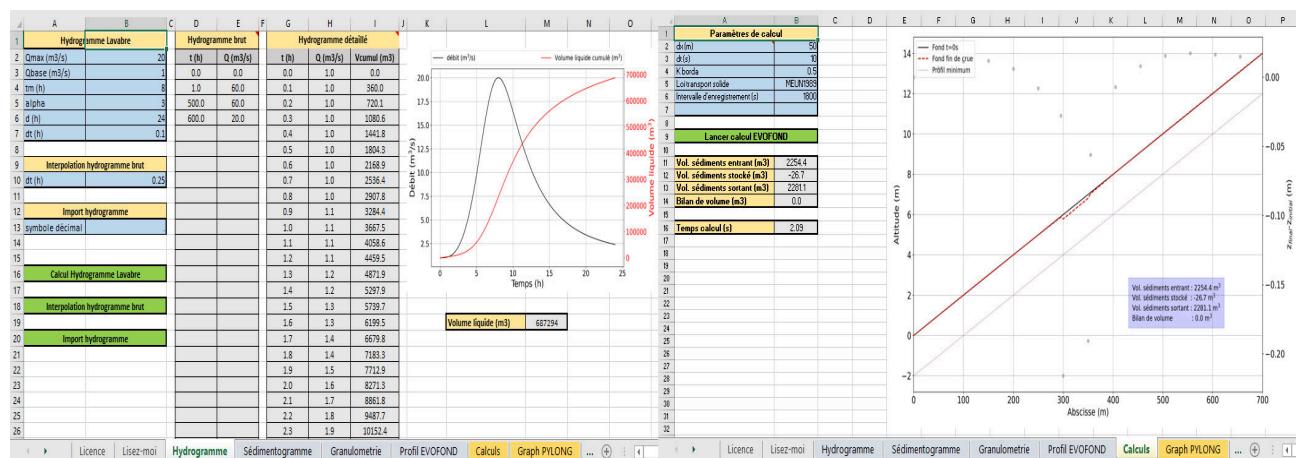


FIGURE 8 – Interface Evofond initiale

donc installer Python (et certaines librairies), ce module, et paramétriser Excel en conséquence. Bien qu'une notice explique cette démarche, elle n'est pas similaire à des installations classiques de logiciel, avec un exécutable et une interface propre à l'outil. De plus, le remplissage des champs sur les feuilles Excel et le lancement des calculs est assez lent.

## 4 Approche de la solution

L'approche bibliographique permet d'aboutir à un ensemble de briques de modélisation servant de base à l'approche suivie par la suite dans le développement d'Evofond. Tout cela est résumé dans la figure 9. On y retrouve en vert les éléments présents dans l'outil actuel, qu'il faut adapter pour les intégrer à la nouvelle architecture orientée objet. En bleu sont présentés les éléments purement nouveaux. Enfin, en orange, on a quelques éléments mentionnés qui ne sont pas inclus dans cette version d'Evofond. Cette partie traite donc de l'implémentation de la solution, les choix d'architecture et les aspects de résolution numérique.

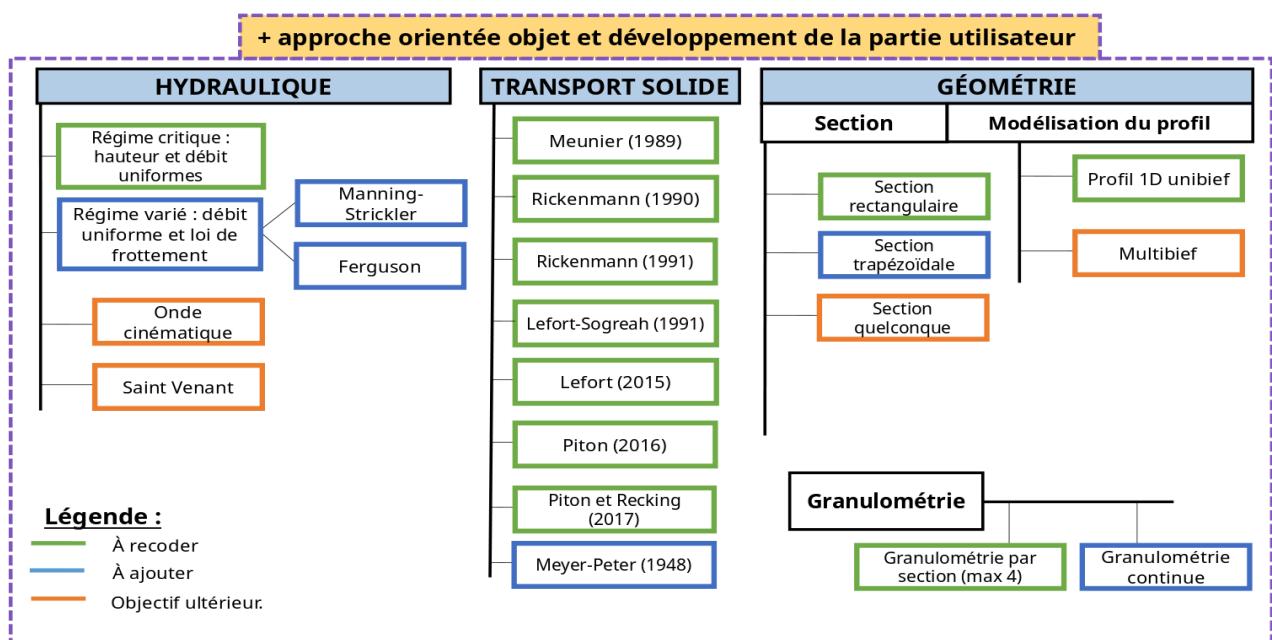


FIGURE 9 – Éléments de modélisation, diagramme bilan de l'étude bibliographique

Pour la partie calcul numérique de la solution (4.1 et 4.2), un découplage est toujours présent avec d'une part un calcul hydraulique, puis dans un second temps la simulation du transport solide. Cela peut être résumé dans le schéma de la figure 10.

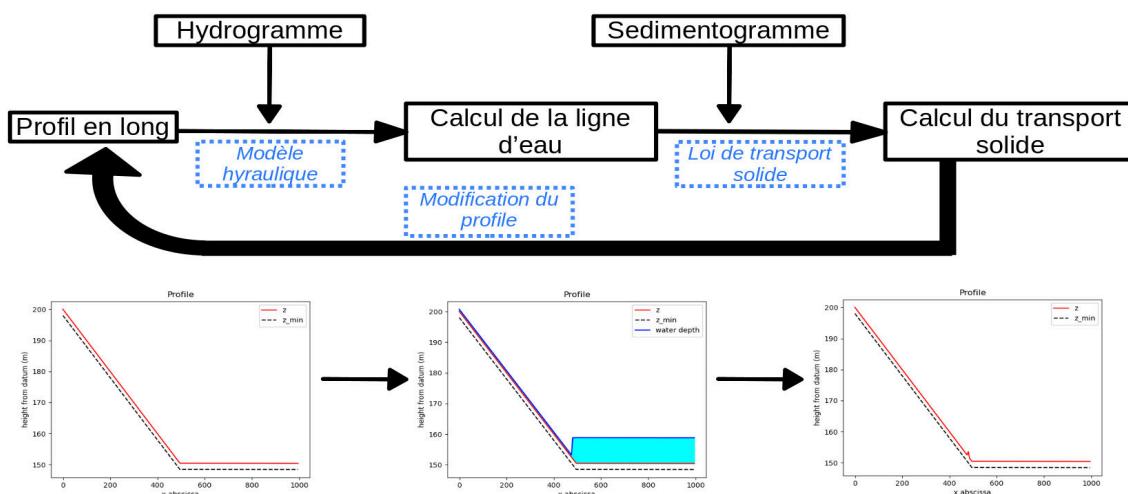


FIGURE 10 – Processus de résolution

## 4.1 Résolution numérique pour l'hydraulique

Introduisons d'abord la discréttisation spatiale du problème. Quel que soit le modèle choisi, on a une base commune : on considère  $x_0, x_1, \dots, x_n$  les abscisses des sections en travers définissant le profil en long. On utilisera ces indices pour noter les valeurs des grandeurs en ces abscisses, par exemple :  $y(x_i) = y_i$  pour la hauteur d'eau.

Concernant la partie hydraulique, l'ajout principal à l'outil Evofond est le calcul de la ligne d'eau à l'aide d'une loi de frottement (3.1.4). On s'intéresse donc à l'équation (2). La partie hydraulique consistant à déterminer  $y_0, \dots, y_n$ , l'équation (2) couplée à une condition limite constitue un problème classique que l'on peut résoudre à l'aide de la méthode d'Euler :

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

Ce qui est expliqué par la suite vaut aussi pour des méthodes de résolutions plus précises, telles qu'Euler amélioré (EA) et Runge-Kutta (RK4), qui s'écrivent pour leur part :

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

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

Cependant, ce cas d'étude présente des particularités notables. En effet, comme cela a été expliqué dans la partie 3.1.2, si le régime est torrentiel ou fluvial, la hauteur d'eau est déterminée respectivement d'amont vers aval ou d'aval vers amont. En plus de cela, il faut noter que dans l'expression de la pente  $f$  de l'équation (2), le terme au dénominateur  $1 - Fr^2$  tend vers 0 pour un régime critique. Les transitions entre fluvial et torrentiel peuvent donc être source d'instabilités numériques. De ce fait, il a donc été choisi de travailler par l'intermédiaire de l'énergie spécifique :  $H_s = y + \frac{V^2}{2g} = H - z$ . En effet, pour une énergie donnée, deux hauteurs d'eau sont acceptables : une en régime fluvial, l'autre en régime torrentiel. On a en dérivant :

$$\frac{dH_s}{dx} = S_f - S_0 = f(x, y) \quad (4)$$

Ce choix de travailler sur l'énergie plutôt que sur la hauteur d'eau directement a aussi été fait suite à des premiers essais dans lesquels la ligne d'eau calculée violait certaines propriétés fondamentales de la ligne d'énergie, notamment la décroissance de cette dernière.

Pour tenir compte du sens de calcul de la ligne d'eau selon le type de régime, il faut donc

considérer un algorithme plus élaboré qu'une simple propagation d'une condition limite à l'aide d'une méthode d'Euler (ou autre). Ainsi, l'idée est la suivante : on part d'une condition limite, par exemple la condition amont, et on effectue un calcul sous l'hypothèse d'un régime torrentiel jusqu'en aval. De là, on remonte en faisant l'hypothèse d'un régime fluvial et on compare en chaque point les forces spécifiques. Lorsque le régime fluvial prend le dessus, on poursuit jusqu'à ce que cela cesse. Une fois cette modification apportée, on rectifie le calcul en torrentiel en aval. On reproduit ce processus jusqu'à être revenu en amont. Une illustration de l'avancée de cet algorithme est présentée en figure 29 ([annexe](#)), et il est également décrit en pseudo-code plus formellement (l'objectif étant de décrire plus rigoureusement cet algorithme, certains éléments sont éludés).

```

1 def compute_depth(profile, Q):
2     y = [y_amont, y_critique, ..., y_critique, y_aval] // initialisation ligne d'
3         eau : conditions amont/aval et hauteur critique ailleurs
4     nb_section = profile.get_nb_section()
5     i = 0 // section amont
6     i_memory = nb_section-1
7     downstream_direction = true
8     while index_section > 0:
9         if downstream_direction: // vers l'aval
10             while i < nb_section: // on descend tout le profil
11                 section_current = profile.get_section(i)
12                 section_next = profile.get_section(i+1)
13                 H_next = f(section_current.get_x(), y[index_section])
14                 y_next = get_y_from_H_torrentiel(H_next)
15                 if section_next.get_Fs(y_next) > section_next.get_Fs(y[i+1]): // plus grande force specifique
16                     y[i+1] = y_next // correction torrentielle
17                     i += 1
18                     downstream_direction = false
19             else: // vers l'amont
20                 i = i_memory // on reprend au point le plus haut vu en fluvial
21                 update = false
22                 while index_current > 0: // on remonte
23                     section_current = profile.get_section(i)
24                     section_next = profile.get_section(i-1)
25                     H_next = f(section_current.get_x(), y[i])
26                     y_next = get_y_from_H_fluvial(H_next)
27                     if section_next.get_Fs(y_next) > section_next.get_Fs(y[i+1]): // plus grande force specifique
28                         update = true
29                         y[i-1] = y_next
30                     else if update: // fin du regime fluviale : on va corriger les sections en aval
31                         downstream_direction = true
32                         i_memory = i
33                         break // on stoppe la remontee
34                         i -= 1
35     return y

```

## 4.2 Ajout du transport solide

Une fois la ligne d'eau construite on peut connaître toutes les grandeurs hydrauliques, utiles au calcul du débit solide.

Cela permet donc de calculer le débit solide  $Q_s$  (ou de façon équivalente  $q_b$  en connaissant la largeur entre deux sections) à l'aide d'une loi de transport solide. On peut donc schématiser là situation à cette étape par le schéma donné en figure 11.

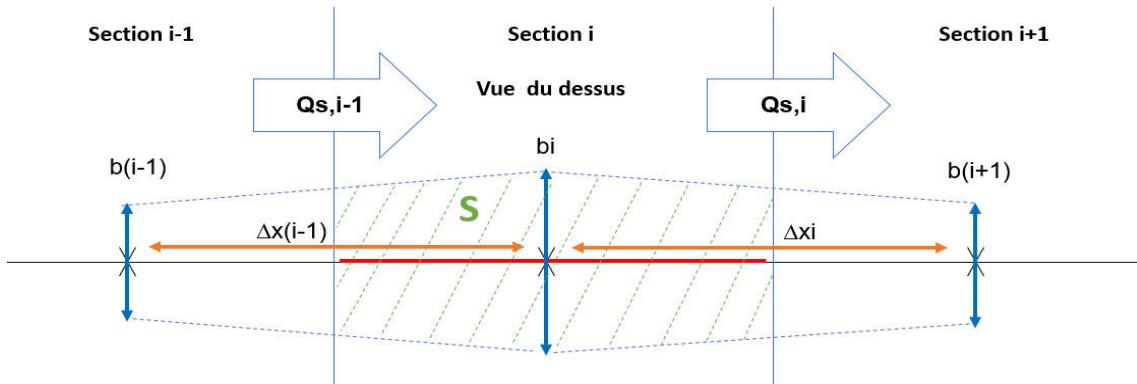


FIGURE 11 – Schéma pour le calcul de l'évolution d'altitude

En reprenant le principe de l'[équation d'Exner \(3\)](#) et en discrétilisant pour l'implémentation numérique on a :

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

À la différence de la partie hydraulique, il y a dans cette étape de la simulation une notion de durée : un pas de temps  $\Delta t$  est introduit, désignant le temps d'une itération de calcul. Ainsi, on peut déterminer la variation de l'altitude du fond pour chaque section, durant ce pas de temps. Il faut cependant rester vigilant sur un point : s'assurer que la nouvelle altitude  $z_i(t + \Delta t)$  ne soit pas inférieure à l'altitude minimale pour cette section ( $z_{min,i}$ ). Cela revient à vérifier que le débit sortant de la section ne dépasse pas un débit maximal, c'est-à-dire :

$$Q_{s,i} \leq Q_{smax,i} = Q_{s,i-1} - \frac{[(0.75b_i + 0.25b_{i+1})dx_i + (0.75b_i + 0.25b_{i-1})dx_{i-1}](z_{min,i} - z_i)}{2\Delta t}$$

De ce fait, lorsque le débit théorique dépasse ce débit maximal, on se retrouve dans le cas d'une section ne possédant plus aucun sédiment disponible, avec une altitude égale à l'altitude minimale.

Avec la question du transport solide vient une question très importante : la façon dont se dépose le volume solide, ou la façon dont est creusée la section en travers. Il s'agit là d'une question délicate, prenons l'exemple d'une section trapézoïdale (figure 12).

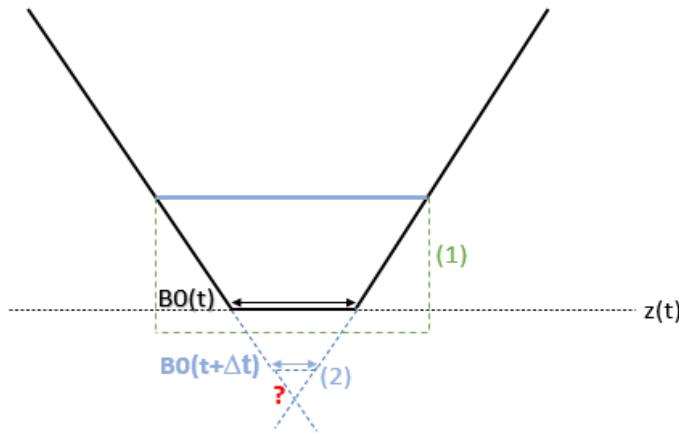


FIGURE 12 – Comment creuser une section trapézoïdale ?

En hydraulique, il est fréquent de proposer pour la modélisation différents types de section (rectangulaire, trapézoïdale, circulaire...). Cela est d'autant plus intéressant que les équations peuvent s'en retrouver simplifiées. Pour Evofond, le temps de calcul est une problématique importante, il faut donc être vigilant à cet aspect du projet.

La section trapézoïdale est relativement simple et étend la section rectangulaire, qui demeure la section de base d'Evofond. Bien que cette section puisse être utilisée dans la résolution hydraulique du calcul, un problème subsiste pour la partie transport solide : lorsque les débits solides ont été calculés, comment déterminer la nouvelle section ?

Une première idée (1) est de creuser naturellement sous la ligne d'eau, de façon à ce que le volume enlevé corresponde au volume  $(Q_{s,in} - Q_{s,out})\Delta t$  (le problème est similaire dans le cas d'un dépôt). Dans ce cas, le problème est que la section n'est dès lors plus trapézoïdale, et on est ramenés à un calcul sur section quelconque (définie par une liste de points) qui s'avère complexe également. En effet, pour une section quelconque, déterminer la manière dont se dépose les sédiments (ou sont creusés) n'a rien d'évident, et même dans le cas d'un choix arbitraire, par exemple : on creuse proportionnellement à la vitesse de l'eau au dessus (figure 13), alors les calculs pour déterminer la nouvelle forme de section peuvent limiter le critère important de complexité puisque cette procédure intervient pour chaque section du profil, à chaque pas de temps.

Une seconde idée (2), consistant à conserver la forme trapézoïdale de la section pose une nouvelle question : que faire lorsque la largeur de la base du trapèze  $B_0$  atteint 0 ?

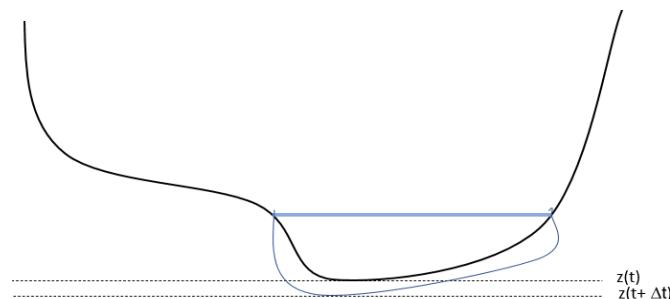


FIGURE 13 – Comment creuser une section quelconque ?

Ainsi, toutes ces problématiques ont été mises de côté pour la première version d'Evofond, qui reste centrée sur un modèle de section rectangulaire, avec un creusement / dépôt uniquement sur le fond permettant l'invariance de la largeur de la section et facilitant le calcul du transport sédimentaire. Les sections trapézoïdales ont tout de même été implémentées dans le code, et peuvent être utilisées pour un calcul hydraulique.

### 4.3 Solution stable : condition de Courant-Friedrich-Lowy (CFL)

Un point très important sur lequel se base la simulation effectuée par Evofond est le choix des pas de discréétisation, de l'espace et du temps. En effet, différents axes de réflexion rentrent en jeu. Tout d'abord, la précision de la simulation : plus l'utilisateur pourra utiliser un faible pas de temps ( $\Delta t$ ) et d'espace ( $\Delta x$ ), plus il pourra obtenir un résultat détaillé. D'autre part, plus  $\Delta t$  est faible plus le nombre d'itérations de calcul sera important pour simuler une même durée d'évènement. De la même façon, plus  $\Delta x$  est faible plus le temps de calcul risque d'augmenter pour chaque itération. Enfin, pour obtenir une solution correcte et stable il faut impérativement que le choix de  $\Delta t$  dépende de  $\Delta x$ . Intuitivement, si deux sections sont très proches ( $\Delta x$  faible) et que l'eau s'écoule rapidement, il faut un niveau de détail temporel faible ( $\Delta t$  faible) qui permette d'éviter qu'une particule solide "saute" une section (figure 14).

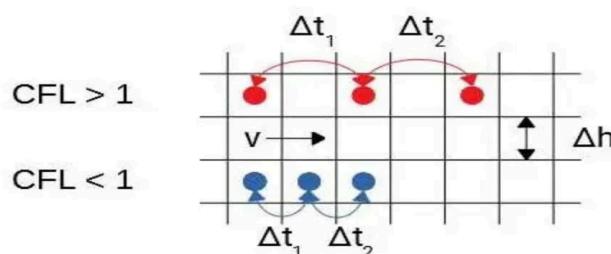


FIGURE 14 – Illustration du nombre de Courant-Friedrich-Lowy (CFL)  
(source : [www.idealsimulations.com](http://www.idealsimulations.com))

Plus formellement, cette condition, dite de Courant-Friedrich-Lowy (CFL), est exprimée grâce au nombre de courant :

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

On a stabilité si  $c < 1$ , c'est-à-dire si le pas d'espace  $\Delta x$  est plus faible en toute section que la distance parcourue par une particule à cette section durant  $\Delta t$  secondes. À noter que dans le cas d'Evofond, la discréétisation spatiale n'est pas nécessairement régulière, cette condition s'écrit donc plutôt :

$$\forall 0 \leq i \leq n \quad \Delta x_i < v_i \Delta t$$

Ainsi, pour assurer la stabilité dans le cas d'Evofond, on regarde toutes les sections pour connaître la plus restrictive, en prenant :

$$\Delta t = \min_{0 \leq i \leq n} \left( \frac{\Delta x_i}{v_i} \right)$$

Introduisons à présent un nouveau problème rencontré concernant cette condition de stabilité. Cette condition concerne les particules **solides**, et non liquide. La partie hydraulique est faite à chaque pas de temps sans notion de durée. Or, la vitesse  $v_i$  est connue pour l'eau, mais très difficile à déterminer pour les sédiments. En effet, on connaît le débit ( $m^3.s^{-1}$ ) mais pour en déduire la vitesse il nous faut connaître la section dans laquelle sont transportés les solides. Or, cela n'est pas facilement connu, et peut varier selon beaucoup de paramètres (granulométrie, vitesse d'écoulement, pente par exemple). De plus, il n'est pas possible de choisir la stratégie "pire des cas", car cette section peut tendre vers  $0\ m^2$  ce qui engendrerait une vitesse tendant vers l'infini et par conséquent un pas de temps tendant vers 0.

Pour répondre à ce problème il a été choisi de se servir du fait suivant : les solides étant transportés dans l'eau, leur vitesse est majorée par la vitesse hydraulique, connue. L'inconvénient de ce choix est que  $c < 1$  assure la stabilité mais d'autre part  $c \geq 1$  n'est pas nécessairement instable. Le choix de la valeur de  $c$  est donc laissé libre afin de permettre un calcul accéléré. Une étude concernant le choix de cette constante de stabilité est proposée dans quelques exemples dans la partie [Résultats](#).

Pour résumer, dans Evofond, une fois que la partie hydraulique est effectuée, on regarde pour chaque section le rapport  $\frac{\Delta x_i}{c v_i}$ , avec  $c$  le nombre de Courant fixé par l'utilisateur, et on choisit  $\Delta t$  égal au minimum trouvé (section la plus contraignante). On répète ce processus tant que la durée totale de l'évènement n'est pas atteinte.

## 4.4 Éléments d'architecture de la solution

### 4.4.1 Approche orientée objet

Comme expliqué dans la partie [3.1.1](#), avant de considérer les modèles de résolution hydraulique puis solide, on peut discerner des objets qui sont la base sur laquelle sont construits tous les différents modèles, à savoir le profil du cours d'eau.

Ce profil en long peut être considéré comme une liste chaînée de sections en travers (figure 30 en [annexe](#)). Concernant les sections en travers, on peut considérer qu'elles sont complètement irrégulières, ou au contraire on peut se donner une géométrie, telle que rectangulaire ou trapézoïdale. Dans les deux cas, ces sections ont tout de même des éléments communs (abscisse, altitude, par exemple). Ceci peut donc être traduit par la relation d'héritage. De la même façon toutes les lois de transport solide ont pour but de calculer un débit solide et on peut donc utiliser cette relation pour mutualiser certains traitements. Cela nous donne donc une ébauche de diagramme objet (figure 15, listes d'attributs et méthodes non exhaustives).

### 4.4.2 Utilisation d'Evofond

Même si l'essentiel du travail de ce projet de fin d'études concerne le cœur de calcul et l'ajout de fonctionnalités, laissant pour plus tard la création d'une interface graphique complète, une partie du travail reste de permettre la bonne utilisation du nouvel outil.

Pour cet objectif, Evofond sera utilisable en ligne de commande (module argparse) avec des

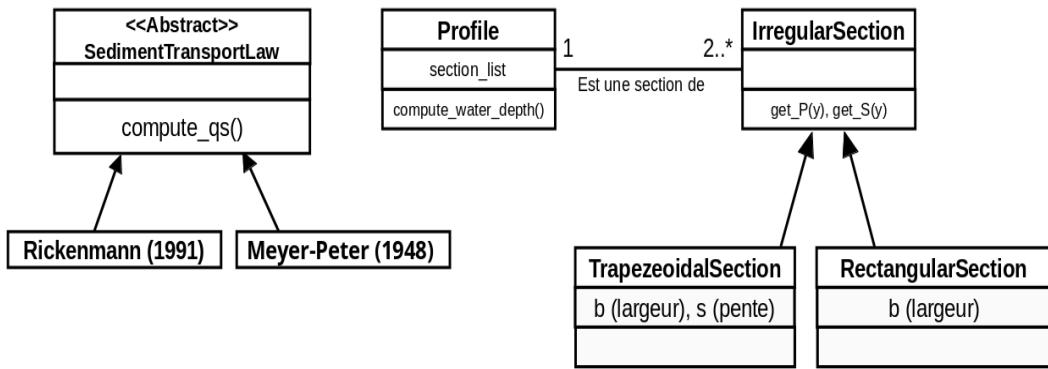


FIGURE 15 – Diagramme objet pour la base du problème

fichiers de configuration pour rentrer les paramètres de simulation (module json) et des données d’entrée et résultats renseignés à l’aide de fichiers textes. Tout cela est codé avec Python tout comme la partie calcul mais l’utilisateur utilise un simple exécutable.

La figure 16 donne un exemple de l’arborescence détaillée du point de vue utilisateur (gauche), un exemple de fichier de configuration (droite) et le menu d’aide de l’executable Evofond (en bas).

```

evofond_v0
├── build
├── log
└── projects
    ├── excel_comp
    │   └── results
    │       ├── granulometry_1.json
    │       └── manival_conf.json
    ├── manival
    │   ├── results
    │   │   ├── manival_simplified.txt
    │   │   └── manival.txt
    │   └── test
    ├── test
    └── src
        └── evofond.py

```

```

[{"NAME": "excel_comp", "SECTION": "rectangular", "PROFILE_PATH": "./adverse_slope.txt", "LAVABRE": true, "DURATION": 43200.0, "TM": 14400.0, "QM": 30.0, "QB": 10.0, "ALPHA": 3, "DT": 10.0, "TRANSPORT_LAW": "Lefort2015", "UPSTREAM_SLOPE": 10.0, "UPSTREAM_WIDTH": 10.0, "GRANULOMETRY_FILES": ["granulometry_1.json"], "INTERPOLATION": true, "DX": 10.0, "CRITICAL": true, "FRICTION_LAW": null, "UPSTREAM_CONDITION": "critical_depth", "DOWNSTREAM_CONDITION": "critical_depth", "SPEED_COEF": 1.0, "BACKUP_TIME_STEP": 1800.0, "PERF": false}

```

```

[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

```

FIGURE 16 – Arborescence classique pour l’outil Evofond, avec un fichier de configuration et le message d’aide de l’outil

Cet environnement couplé à un document d’aide utilisateur permet de créer et exécuter rapidement des projets, et de modifier facilement la plupart des paramètres. Les résultats sont enregistrés dans le répertoire *results*. Chaque exécution crée un nouveau répertoire (le nom est la date exacte de l’exécution) dans lequel sont enregistrés les résultats sous deux formes : des fi-

chiers textes et des données numpy. Cela permet pour ceux connaissant Python de traiter toutes les données de l'évènement, tandis que les fichiers texte enregistrent l'état du profil tous les  $x$  pas d'enregistrement, où  $x$  est un paramètre donné par l'utilisateur. Il doit ensuite procéder par interpolation pour avoir des données entre chaque pas enregistré. Chaque fichier texte correspond à un instant de l'évènement et on retrouve dedans la liste des abscisses des sections du profil avec pour chacune la hauteur d'eau, l'altitude du fond, la charge. Au delà de ces données, les utilisateurs sont souvent amenés à chercher les maximums de certaines grandeurs lors de l'évènement, c'est pourquoi on renseigne aussi 3 fichiers : hauteur\_max.txt, altitude\_max.txt, charge\_max.txt, avec dans chacun la liste des abscisses des sections avec la hauteur/altitude/-charge maximum et l'instant auquel elle est atteinte.

## 5 Résultats

Cette partie s'intéresse dans un premier temps au calcul de la ligne d'eau puis à diverses évaluations de la solution complète.

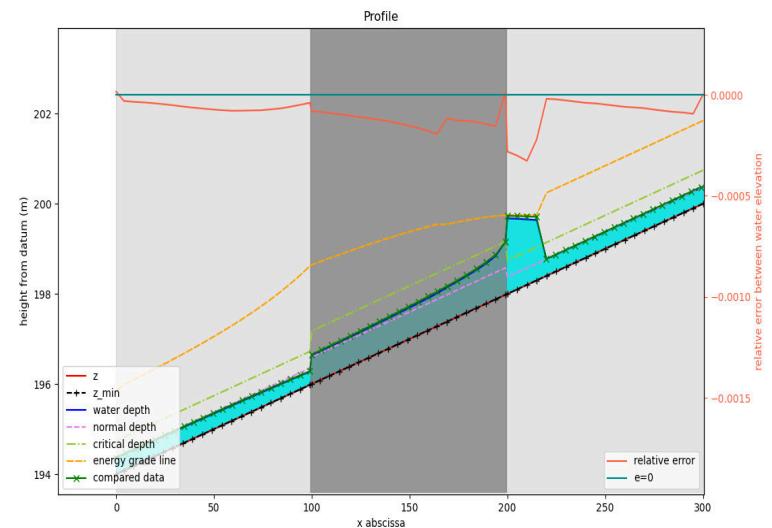
### 5.1 Validation de la partie hydraulique

Dans la méthode de résolution implémentée dans Evofond, la partie hydraulique fournit le socle sur lequel s'appuie le transport solide. De ce fait, une première étape de validation de cette résolution a été effectuée, grâce au logiciel de calcul hydraulique HEC-RAS [4].

Exemple 1 : changement de largeur sur forte pente

- pente = 2%
- largeurs = 10m - 5m - 10m

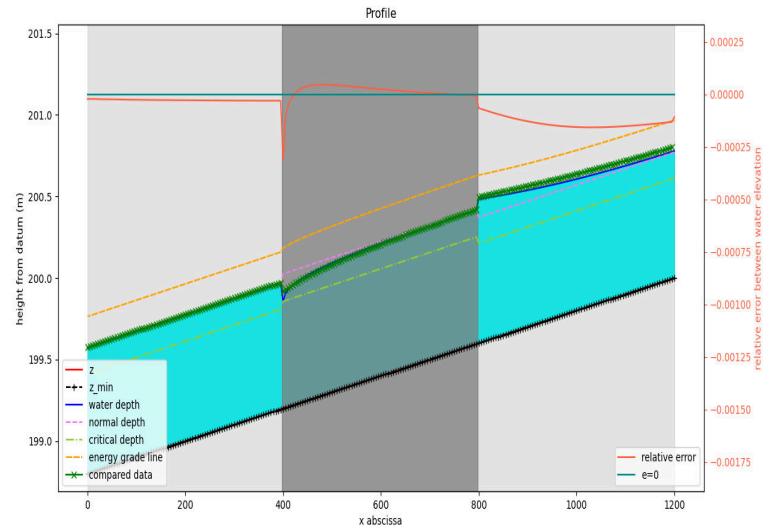
→ Erreur relative de l'ordre de 0,0001. les lignes d'eau d'Evofond et d'HEC-RAS sont quasi confondues, les ressauts sont situés à la même abscisse et de même amplitude.



Exemple 2 : changement de largeur sur faible pente

- pente = 0.1%
- largeurs = 20m - 18m - 20m

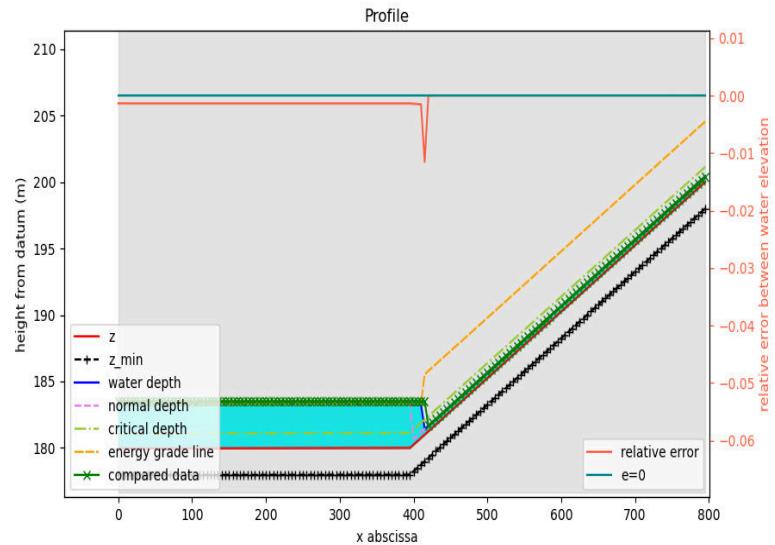
→ Erreur relative de l'ordre de 0,0001. les lignes d'eau d'Evofond et d'HEC-RAS sont quasi confondues, les ressauts sont situés à la même abscisse et de même amplitude.



Exemple 3 : rupture de pente

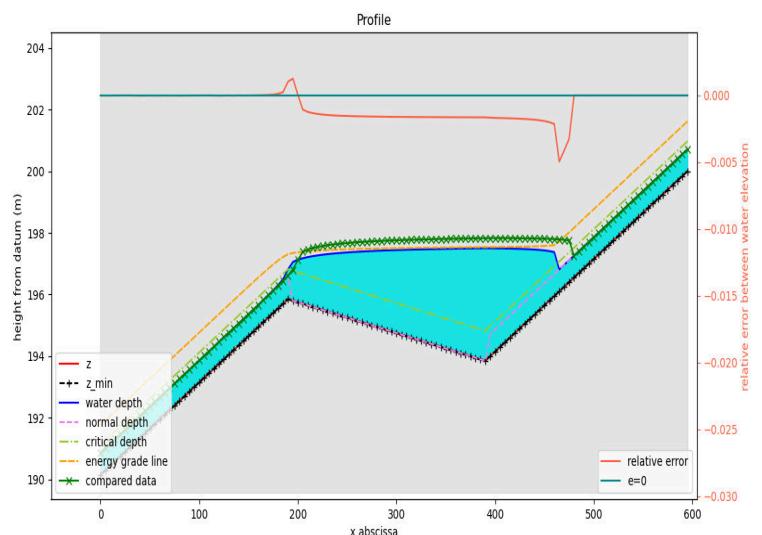
- pente amont = 5%
- pente avale = 0.01%

→ Position du ressaut légèrement différente (5m d'écart) et erreur relative de l'ordre de 0,001 par ailleurs.

Exemple 4 : contre pente

- pente descendante = 3%
- pente ascendante = -1%

→ ressaut HEC-RAS légèrement en amont (10m) et erreur relative de l'ordre de 0,001 par ailleurs.



Cet échantillon d'exemple ne représente qu'une partie des nombreux profils tests utilisés pour valider la résolution hydraulique. Globalement les résultats nous amènent à la même conclusion : cette méthode est efficace et fiable.

Au delà de ces analyses quantitatives, les attentes qualitatives sont aussi retrouvées avec la présence des ressauts hydrauliques pour les changements de régimes (typiquement l'exemple de rupture de pente).

Les quelques différences avec les résultats HEC-RAS peuvent aussi s'expliquer, même si elles sont plus que négligeables. En se plongeant dans la notice du logiciel [4], on constate plusieurs choses notables, notamment que HEC-RAS utilise les pertes de charge singulières lors de changement de géométrie. Dans Evofond, d'une maille à la suivante, la charge est calculée par :  $H_{i+1} = H_i + (x_{i+1} - x_i) * S_{f,i}$  (pour une méthode d'Euler basique). Ceci est une bonne approximation lorsque l'énergie ne varie pas brusquement, ce qui peut être le cas lorsque la géométrie est fortement variable, comme pour une contraction soudaine. De ce fait, il est légitime de rajouter un terme de perte de charge singulière :  $H_{i+1} = H_i + (x_{i+1} - x_i) * S_{f,i} - K \frac{|V_{i+1}^2 - V_i^2|}{2g}$ , K

étant un coefficient de Borda, dépendant de l'ampleur de la variation géométrique. Cette ajout au modèle n'est pas considéré pour la première version d'Evofond.

## 5.2 Évaluation de la solution complète

### 5.2.1 Comparaison avec Evofond initial

Dans ce nouveau développement d'Evofond, il y a eu le développement d'un nouveau modèle (3.1.4), pour simuler les ressauts hydrauliques lors de changements de régime, mais une partie importante du travail a aussi été de laisser la possibilité d'utiliser le modèle existant de régime critique (3.1.3). L'idée de cette partie est donc de comparer le même modèle mais avec la nouvelle implémentation par rapport à l'ancienne (interface Excel). On veut notamment s'assurer que les résultats sont identiques et les temps de calculs comparables.

Présentons deux exemples de résultats, en figure 17, le premier est un profil "contraction" : il y a une largeur plus faible au milieu du profil (3m contre 10m en amont et en aval). Le second est un profil "rupture de pente" avec un passage de 10% à 0.01%.

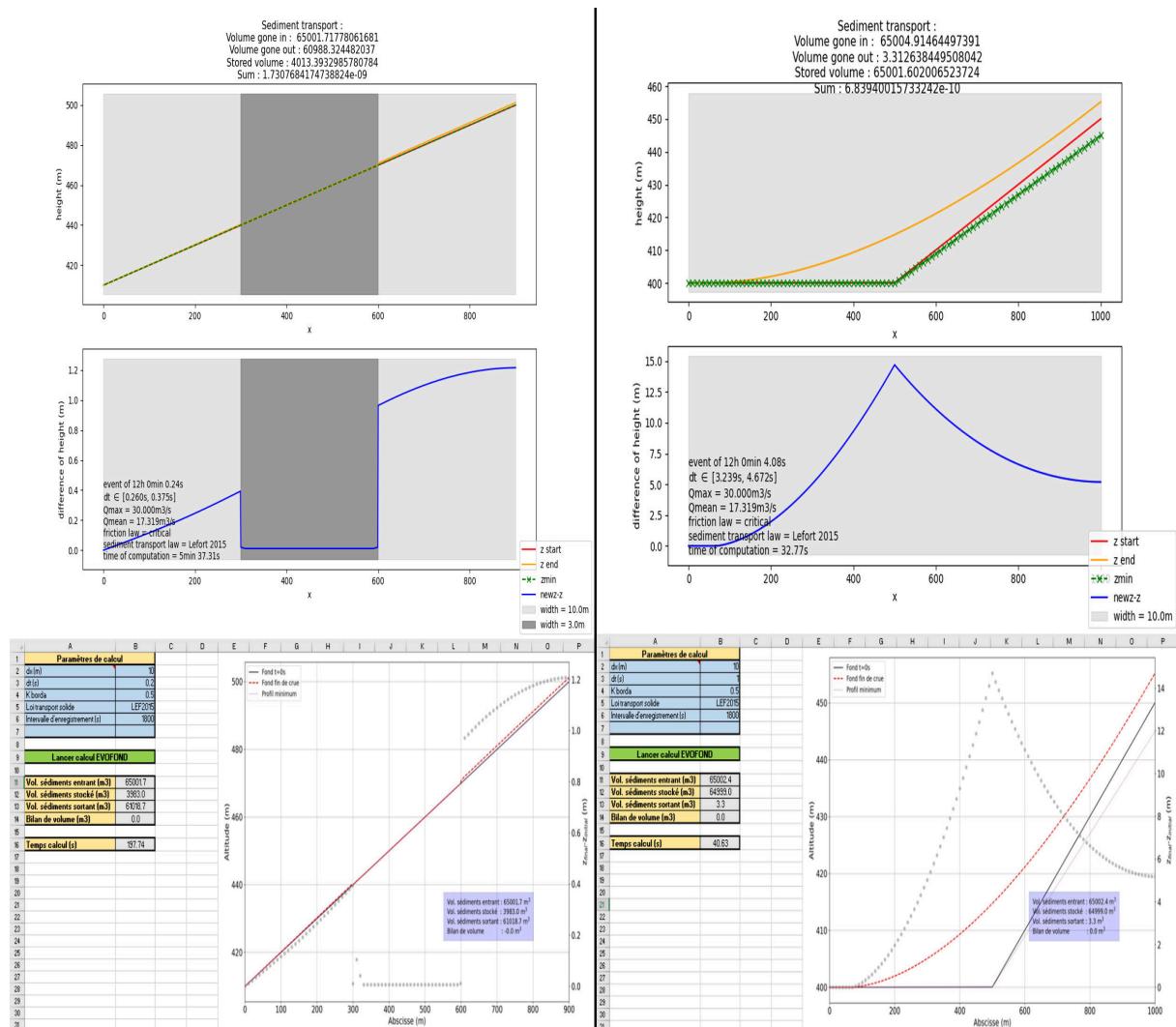


FIGURE 17 – Comparaison avec Evofond version Excel (contraction à gauche et rupture de pente à droite)

Ces résultats sont très rassurants : les volumes entrant / stocké / sortant coïncident tous et l'allure des courbes de différence de hauteur sont identiques (cf courbe bleu en haut et nuage de point gris en bas). Qu'il y ait du volume sédimentaire disponible dans le profil (droite) ou non (gauche) ne change rien par ailleurs. La seule différence notable concerne le temps de calcul. En effet, dans la nouvelle version d'Evofond, le pas de temps est choisi automatiquement pour satisfaire le choix d'un nombre de Courant donné, tandis que dans la version initiale Excel c'est l'utilisateur qui choisit le pas de temps. Ainsi, on peut constater une différence de temps de calcul : dans les exemples présentés la contraction a été calculée en un peu plus de 5min contre 3min pour Evofond Excel, tandis que la rupture de pente a été calculée en 30s contre 40s. Il faut relativiser cela avec différents éléments complémentaires. Tout d'abord, dans l'outil Excel l'hydrogramme, le sédimentogramme et le profil sont construits de façon anticipée et ces calculs ne sont donc pas inclus alors qu'ils sont compris dans le temps donné par la nouvelle version d'Evofond. Par ailleurs, la conception orientée objet apporte de nombreux avantages, notamment celui de pouvoir recevoir de nouvelles fonctionnalités rapidement ou encore la lisibilité du code, mais peut difficilement rivaliser avec la simplicité des calculs vectoriels de la première version de l'outil. Enfin, on peut ajouter un dernier élément, subjectif mais qui demeure important : dans la version initiale de l'outil, les bugs/lags liés à la connexion Python/Excel rendent l'expérience d'utilisation bien moins agréable que ce qui est fait en ligne de commande mais surtout à ce qui sera proposé dans le futur avec une interface graphique adaptée pour l'outil.

### 5.2.2 Comparaison régime critique - régime graduellement varié

Le but de cette section est d'identifier les différences entre le modèle régime critique et le modèle loi de frottement, et dans quelle mesure elles peuvent être importantes.

Ces résultats sont d'autant plus importants que le modèle avec loi de frottement présente des temps de calcul nettement supérieurs à ceux du régime critique, il faut donc savoir ce qu'on gagne lorsque c'est ce modèle qui est envisagé.

On s'intéresse dans cette partie à différents exemples et différents axes de réflexion : à savoir la différence à l'état final et la différence sur la dynamique. Dans le premier cas, il s'agit de savoir si les modèles amènent au même profil final avec un profil initial et une crue identique. Dans le second on veut savoir si la propagation des sédiments est identique.

Présentons deux exemples. Dans le premier cas, il s'agit d'une rupture de pente (0.1% - 5%, figure 18 à gauche). Dans le second (figure 18 à droite), le profil présente un creux, comparable à une plage de dépôt (structure visant à laisser transiter l'eau des crues torrentielles mais à retenir une partie des éléments charriés par le cours d'eau de montagne). On s'intéresse à un événement relativement court : une augmentation linéaire du débit de  $5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  à  $40 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  sur une heure. On remarque que la simulation n'a pas été suffisamment longue pour que les profils atteignent un état d'équilibre. De ce fait, les états finaux sont nettement différents et traduisent une dynamique de dépôt différente. On voit d'ailleurs un front de dépôt net dans le cas du modèle avec loi de frottement, cela coïncide avec des observations expérimentales, dont une illustration est donnée en figure 19.

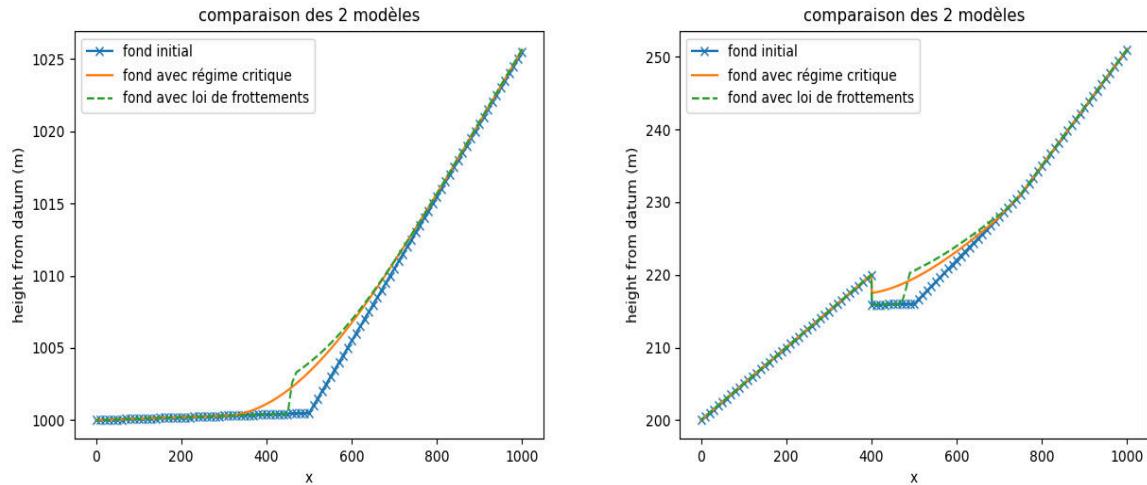


FIGURE 18 – Comparaison des modèles sur deux exemples

Dans l'optique d'approfondir cette différence, des animations des simulations complètes ont été produites. Deux exemple sont donnés dans les liens suivants :

[Simulation complète - régime critique \(lien YouTube\)](#)

[Simulation complète - loi de frottements \(lien YouTube\)](#)

Ces simulations confirment ce que les états finaux laissent apparaître : l'ajout d'une loi de frottement permet l'apparition d'un front de dépôt, associé à un ressaut hydraulique. Ce ressaut se déplace à mesure que les sédiments se déposent et les sédiments se déposent en fonction de la position du ressaut. Dans le cas de l'hypothèse de régime critique le dépôt s'effectue plus uniformément sur le profil.



FIGURE 19 – Observation d'un front de dépôt, dans le cas d'une contraction  
(Image tirée de la vidéo : [Expérience Charriage \[lien YouTube\]](#))

Lorsqu'on s'intéresse à une simulation plus longue, par exemple une crue d'une durée de 12h avec un débit de pointe de  $40 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  atteint au bout de 4h, les conclusions sont différentes. Ces résultats sont présentés dans la figure 20. Dans ce cas, un état d'équilibre apparaît (pente amont égale à la pente d'apport), et les différences entre les modèles ne sont quasiment plus visibles.

Concernant les temps de calcul, le modèle du régime critique est bien plus rapide : une dizaine de secondes contre 2 minutes pour la calcul avec une loi de frottement (exemple de la rupture de pente). Cela est confirmé par l'étude faite dans la partie suivante.

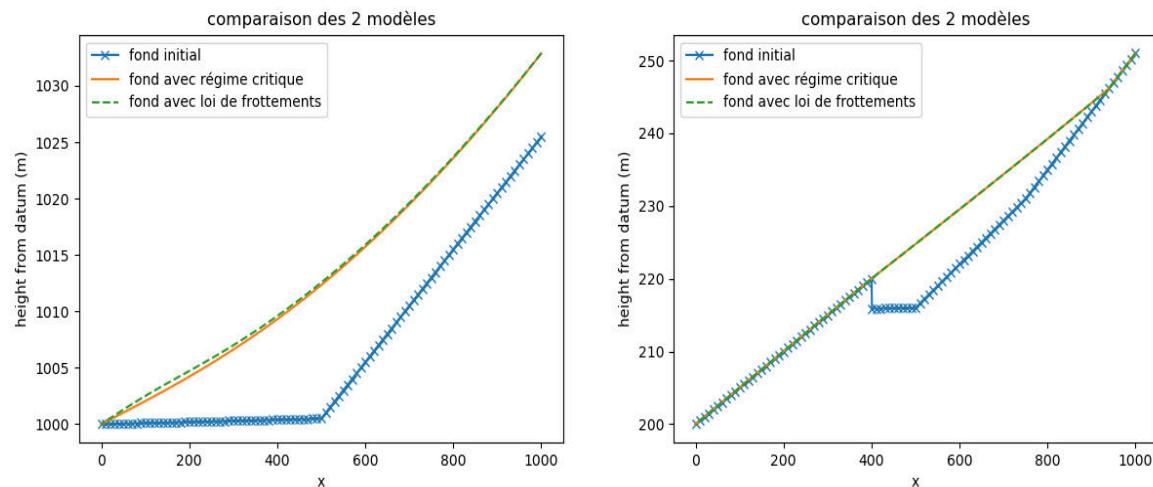


FIGURE 20 – Comparaison des modèles pour un évènement plus long (12h)

Pour conclure, cet échantillon d'exemple montre que l'hypothèse de régime critique est une hypothèse plus qu'acceptable pour les simulations de crues torrentielles. Néanmoins, les modèles plus élaborés, comme celui avec une loi de frottement rajoute de l'information, notamment sur la façon dont l'état final est atteint. Ce modèle est utile partout où la dynamique de dépôt est guidée par la présence d'une transition d'écoulement torrentiel - fluvial, c'est-à-dire avec présence d'un ressaut hydraulique, notamment : transition pente forte à pente faible et contraction brusque. Lorsque la crue est courte ou lorsque l'utilisateur s'intéresse à des états transitoires, l'ajout de cette fonctionnalité de calcul présente un grand intérêt. Elle permet de visualiser l'avancée de fronts de dépôts. Pour des crues longues, le profil tend vers une pente d'équilibre égale à la pente représentative des apports solides amont renseignée par l'utilisateur. Dans ce cas, une modélisation en régime critique ou avec une loi de frottement donnent des résultats finaux d'évolution de fond de lit comparables. L'utilisation du nouveau modèle est cependant bien moins efficace en temps de calcul. Ainsi, une bonne méthode d'utilisation d'Evofond peut-être d'utiliser le régime critique en première approximation et de se servir des lois de frottement lorsque la précision et la dynamique de crue sont de mise.

### 5.2.3 Étude sur le choix du nombre de Courant

Comme discuté dans la partie 4.3, le choix du pas de temps  $\Delta t$  est basé sur le fait que la vitesse des sédiments est inférieure à la vitesse de l'eau. De cette façon, pour un nombre de courant  $c < 1$  la stabilité est assurée, mais la vitesse de calcul n'est pas optimale puisqu'un nombre de courant  $c \geq 1$  n'implique pas nécessairement un résultat instable/faux. L'objectif de cette partie est donc de donner des pistes concernant le choix du nombre de courant afin d'avoir un compromis vitesse/stabilité.

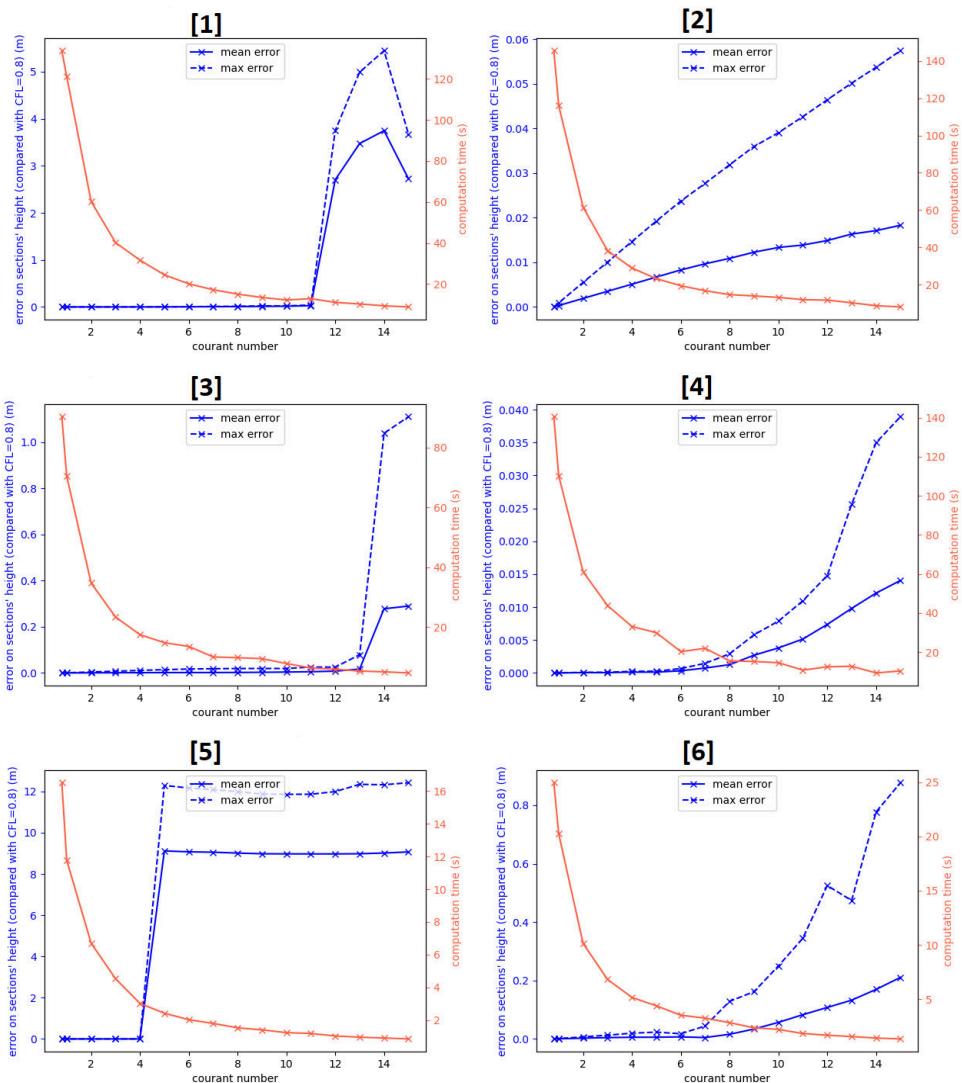


FIGURE 21 – Étude sur le choix du nombre de Courant (modèle régime critique)

Pour un profil donné, simulons le même évènement avec des nombres de Courant différents. On fait au moins un essai avec  $c < 1$  afin d'avoir un exemple de référence assurément stable. Tous les autres essais sont comparés à celui-ci (on s'intéresse à la différence moyenne et maximale d'altitude finale sur l'ensemble des sections). Sur la figure 21 sont présentés 6 cas distincts, pour lesquels un même évènement (durée 5h) a été simulé avec l'hypothèse de régime critique. En rouge on retrouve les observations liées au temps de calcul et en bleu celles utilisées pour estimer la qualité de la solution. En abscisse on a le nombre de Courant  $c$ , chaque test a été fait pour

$c$  variant de 1 à 15, chacun de ces tests est comparé au cas de référence  $c = 0.8$ . Avant toute conclusion on voit déjà l'importance de faire attention au choix de cette constante : le temps de calcul décroît très rapidement (environ divisé par 5 pour  $c \simeq 4$ ). Concernant la qualité de la simulation, la grandeur utilisée permet de s'assurer que l'on obtient un profil final proche du cas de référence, en mesurant l'écart moyen d'altitude sur l'ensemble des sections. L'écart maximal permet également de vérifier que la moyenne ne cache pas une erreur ponctuelle importante. On observe, comme attendu, que ces grandeurs croissent quand  $c$  augmente. Dans la plupart des cas, l'augmentation est soudaine, explosant à partir d'un nombre de Courant seuil. Cet échantillon de test confirme les conclusions faites sur un ensemble de cas encore plus important :  $c \simeq 4$  est un compromis souvent très intéressant, assurant toujours un résultat semblable au cas de référence mais avec un temps de calcul très accéléré. Les quelques cas discutables, comme le cas [2] de la figure 21 présentent souvent des ordres de grandeur d'erreur négligeables (dans cet exemple environ 5mm d'erreur moyenne et une erreur maximale d'1cm seulement, on peut considérer une erreur comme négligeable lorsqu'elle n'est pas au delà d'une dizaine de centimètres).

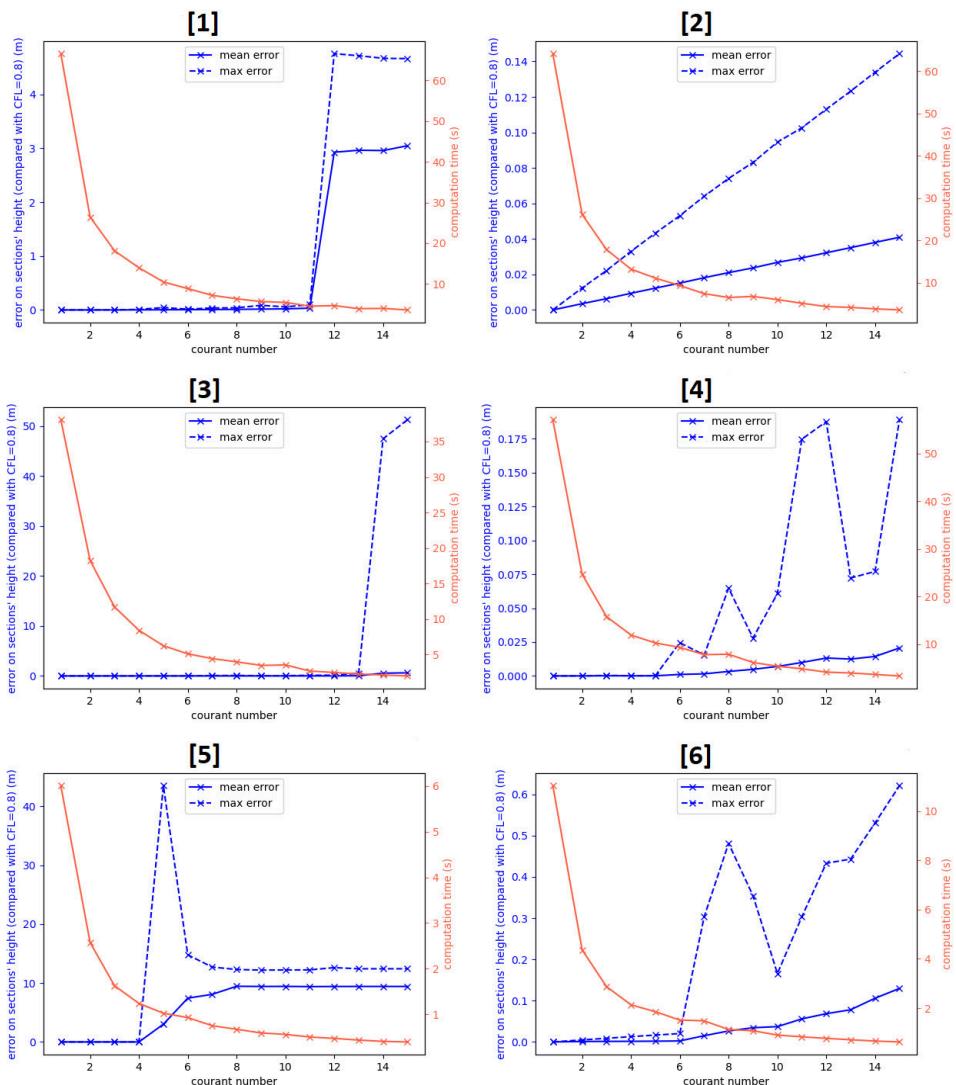


FIGURE 22 – Étude sur le choix du nombre de Courant pour le pic de crue (modèle régime critique)

Dans les exemples étudiés ici, on compare l'état final d'un évènement, mais les études hydrauliques s'intéressent très souvent à un moment particulier : le pic de crue. Il s'agit d'un moment critique, durant lequel il faut également d'assurer de la précision de la simulation. De ce fait, la même expérience a été reconduite en comparant cette fois les profils au pic de crue (figure 22).

On voit, comme attendu, que l'erreur mesurée est nettement supérieure à celle enregistrée en fin de crue. En revanche, cette augmentation n'intervient que pour les nombres de Courant qui était déjà catalogué comme inadaptés (typiquement  $c > 4$ ). Ce choix demeure donc toujours adapté car il conserve la qualité de la solution au pic de crue.

Une étude semblable a été menée pour le modèle avec loi de frottement. Les résultats sont présentés dans les figures 23 et 24.

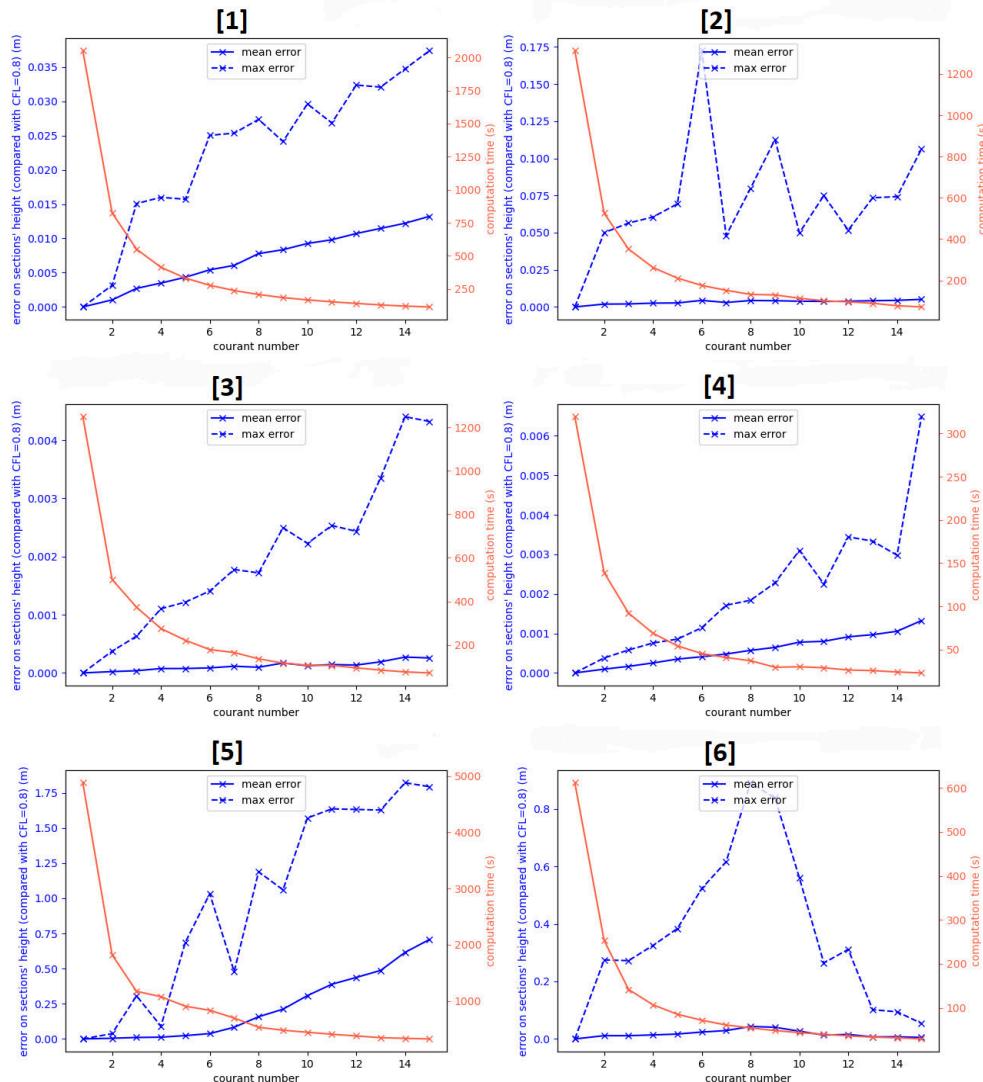


FIGURE 23 – Étude sur le choix du nombre de Courant (modèle loi de frottement)

L'erreur moyenne demeure croissante, mais l'erreur maximale est parfois un peu plus chao-

tique. Cela s'explique qualitativement lorsqu'on observe les simulations complètes. Dès lors que des instabilités apparaissent, l'état final peut présenter des erreurs d'ampleur assez aléatoire, ce qui explique certaines oscillations pour cette grandeur.

Dans le cas du modèle avec loi de frottement il est difficile de distinguer un nombre de Courant "seuil", cependant l'ordre de grandeur donné précédemment ( $c \simeq 4$ ) n'atteint jamais des erreurs d'ordre trop important. Dans les exemples présentés, le cas le plus critique est l'exemple [5] pour lequel on atteint presque l'ordre de grandeur de 1m pour les nombres de Courant les plus élevés, cependant pour  $c \leq 4$  l'erreur moyenne demeure négligeable.

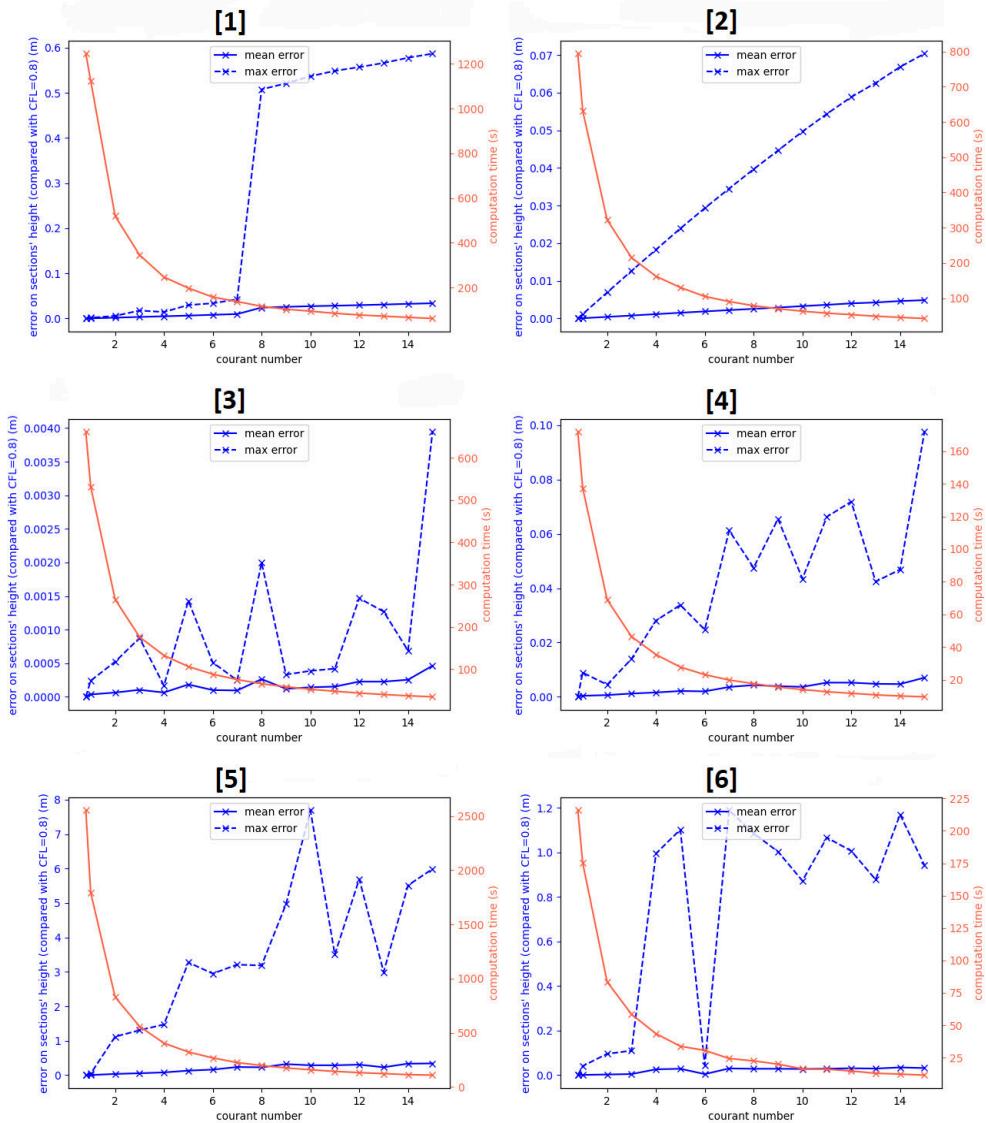


FIGURE 24 – Étude sur le choix du nombre de Courant pour le pic de crue (modèle loi de frottement)

Avant de synthétiser les résultats obtenus pour cette partie, précisons quelques éléments concernant ces observations. Tout d'abord, davantage d'exemples ont été menés pour parvenir à ces conclusions et seule une partie est présentée. L'évènement simulé est une crue de 5h, avec un pic de crue à 2h, avec un débit maximal de  $40 \text{ m}^3.s^{-1}$  et un débit de base de  $20 \text{ m}^3.s^{-1}$ .

D'autres évènements ont été testés, en rallongeant la durée et déplaçant le pic de crue, sans que cela ne change fondamentalement la dynamique observée dans les figures présentées. Enfin, la loi de transport solide utilisée ne semble pas avoir d'influence sur le choix optimal du nombre de Courant.

Ainsi, prendre un nombre de Courant  $c$  supérieur à 1 permet de réduire très significativement le temps de calcul des simulations permettant de se ramener à des temps raisonnable (passage de plusieurs dizaine de minutes à seulement quelques minutes voire quelques secondes, selon le type de modèle utilisé). Prendre  $c \simeq 3$  ou 4 semble toujours assurer un résultat semblable à  $c < 1$ .

## 6 Synthèse

Ainsi, le développement de l'outil Evofond a été repris afin d'offrir plus de possibilités de modélisation aux utilisateurs et de restructurer ce qui existait déjà dans l'outil.

Un tour d'horizon des possibles ajouts à Evofond a été effectué suite à une étude bibliographique, avec une sélection des fonctionnalités prioritaires pour cette phase de développement de l'outil.

Il est désormais possible de modéliser une crue avec des apports solides par un modèle utilisant l'hypothèse d'un régime critique, ou bien avec un modèle mobilisant une loi de frottement et permettant de considérer le phénomène de ressaut hydraulique.

La nouvelle structure d'Evofond est basée sur une programmation orientée objet, faisant apparaître la plupart des blocs du modèle (profil, sections, lois de transport solide, granulométrie...) et facilitant l'intégration de futures fonctionnalités.

La résolution numérique du modèle choisi passe par une discréétisation et l'utilisation de la méthode d'Euler (ou variantes) dans le cas de l'utilisation d'une loi de frottement. Ce schéma numérique introduit une problématique de stabilité liée au choix des pas de discréétisation. Une étude sur le choix du nombre de Courant a été effectuée pour illustrer les enjeux et donner des pistes pour le choix de ce paramètre.

Il y a également eu un travail sur la gestion des interactions avec l'utilisateur, en entrée comme en sortie. En l'état, Evofond est utilisable en ligne de commande, avec un document d'aide pour l'installation et l'utilisation. Le format des données en sortie a aussi été pensé pour laisser le plus de possibilités pour l'utilisateur (format texte pour un traitement quelconque ou format NumPy pour un traitement avec Python).

Une analyse de cette nouvelle solution a été menée, en s'intéressant à divers aspects de l'outil. D'une part, la partie purement hydraulique a été validée à l'aide logiciel HEC-RAS, d'autre part les simulations incluant le transport solide ont été comparées à la précédente version de l'outil afin de vérifier la cohérence des résultats. Enfin, le nouveau modèle, avec loi de frottement, a été analysé par rapport au modèle avec hypothèse de régime critique. La prise en compte du ressaut hydraulique apporte une grande information, surtout lorsque le système n'atteint pas un état d'équilibre. Cette méthode donne donc une meilleure précision pour l'étude de régimes transitoires, et pour des profil où le changement de régime est central, comme des ruptures de pente ou des contractions (ou élargissements).

Enfin, des pistes de nouvelles fonctionnalités ont été listées pour les futures améliorations d'Evofond, on peut par exemple citer l'hypothèse d'onde de propagation pour le débit liquide, ou encore les pertes de charge singulières. À cela s'ajoute une partie de développement d'interface graphique pour l'outil.

## 7 Bilan personnel

Je me suis grandement épanoui lors de ce stage, ce projet rassemble une proportion mathématiques / informatique qui est un équilibre très plaisant. J'ai également beaucoup appris concernant la théorie physique et ces phases d'apprentissage ont aussi été très stimulantes. Il a parfois été délicat de ne pas avoir de point de référence côté "simulation numérique" au sein de l'ONF, toutefois j'ai pu discuter de cet aspect avec des personnes extérieures et ça a aussi été une façon d'apprendre en autonomie.

L'échange avec mes encadrants étant très facile, je n'ai pas eu de longues phases de blocage, et mes journées types dépendent de ce qui a été planifié ensemble lors de la réunion de gestion de projet hebdomadaire. J'ai également eu de multiples réunions de comité de pilotage incluant plus de personnes que simplement mes encadrants et moi, ce qui a permis d'apporter un oeil extérieur aux résultats et à ce qui est souhaitable pour l'outil.

Je considère également comme une chance la possibilité qui m'a été donnée de me rendre sur le terrain à plusieurs reprises pour avoir une meilleure idée du champ d'application d'EvoFond, ainsi que des enjeux. C'est d'ailleurs à l'une de ces occasions que j'ai pu constater les dégâts sur la gare du funiculaire de Saint-Hilaire-du-Touvet.

Je conclurai en disant que les tâches qu'on me demande sont celles auxquelles je m'attends et qui font que le métier d'ingénieur m'attire : innover, améliorer des outils avec un retour fréquent sur les attentes des utilisateurs, mais aussi découvrir des champs d'applications qui m'étaient inconnus auparavant (l'hydraulique pour ce projet, ou le domaine ferroviaire lors de mon stage de deuxième année).

## 8 Impact environnemental et sociétal

Travailler à l'Office National des Forêts donne encore plus de sens à ce stage. Il est évident que la mission de l'ONF est aussi de protéger la biodiversité des risques existants et à venir. En ce sens, développer un outil au sein de cet organisme participe à remplir aussi cette mission. De nombreuses actions et décisions sont prises par l'ONF au service de l'environnement, quelques chiffres clés à ce sujet sont donnés en figure 25.



FIGURE 25 – Infographie sur le développement durable par l'ONF

Au niveau de ce stage en lui même la consommation énergétique peut être divisée en deux parties : le développement de l'outil, qui se résume à la consommation d'un ordinateur, et les quelques déplacements sur le terrain, qui ont systématiquement été en covoiturage ou en bus, dans des lieux proches (systématiquement moins de 30 minutes de trajet, hormis un trajet en bus dans l'Ain).

Du point de vue sociétal, le produit fini de ce projet de fin d'études servira à la protection des foyers proches de zones à risques, ou de lieux publics utiles à tous, et c'est d'ailleurs la motivation première de cet outil.

## 9 Bibliographie

### Références

- [1] ALAIN RECKING. *BedloadWeb : Equations et concepts pour le calcul du transport solide en rivières*. Sept. 2020.
- [2] M Hanif CHAUDHRY et al. *Open-channel flow*. T. 523. Springer, 2008.
- [3] Walter Hans GRAF et Mustafa Siddik ALTINAKAR. *Hydraulique fluviale : écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*. T. 16. PPUR presses polytechniques, 2000.
- [4] US ARMY CORPS OF ENGINEERS. *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual*. Mai 2021.
- [5] José VASQUEZ. “Hydraulique à surface libre”. École Nationale du Génie de l’Eau et de l’Environnement de Strasbourg.

## 10 Annexes

### 10.1 Notations mathématiques

- $x$  : abscisse curviligne
- $Fr$  : Nombre de Froude
- $y_n$  : Hauteur normale
- $y_c$  : Hauteur critique
- $y$  : Hauteur d'eau
- $z$  : Altitude
- $H$  : Charge totale
- $H_s$  : Charge spécifique
- $F_s$  : Force spécifique
- $Q$  : Débit liquide
- $Q_s$  : Débit solide
- $S$  : Superficie de la section mouillée
- $P$  : Périmètre de la section mouillée
- $R_h$  : Rayon hydraulique
- $b$  : Largeur de la ligne d'eau
- $S_0$  : Pente du fond du lit
- $S_f$  : Pente de la ligne d'énergie

### 10.2 Figures



FIGURE 26 – Photo de la gare du funiculaire de Monfort suite aux crues de Décembre 2021



FIGURE 27 – Photo prise lors de la crue Alex (Alpes Maritimes) - 10/2020

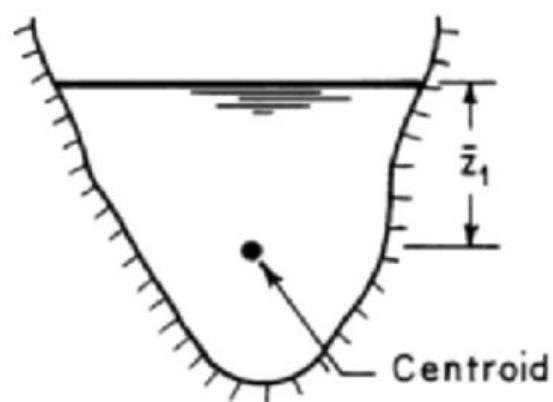


FIGURE 28 – Illustration du centre de gravité de la section mouillée  $\bar{z}$  (tirée de [2])

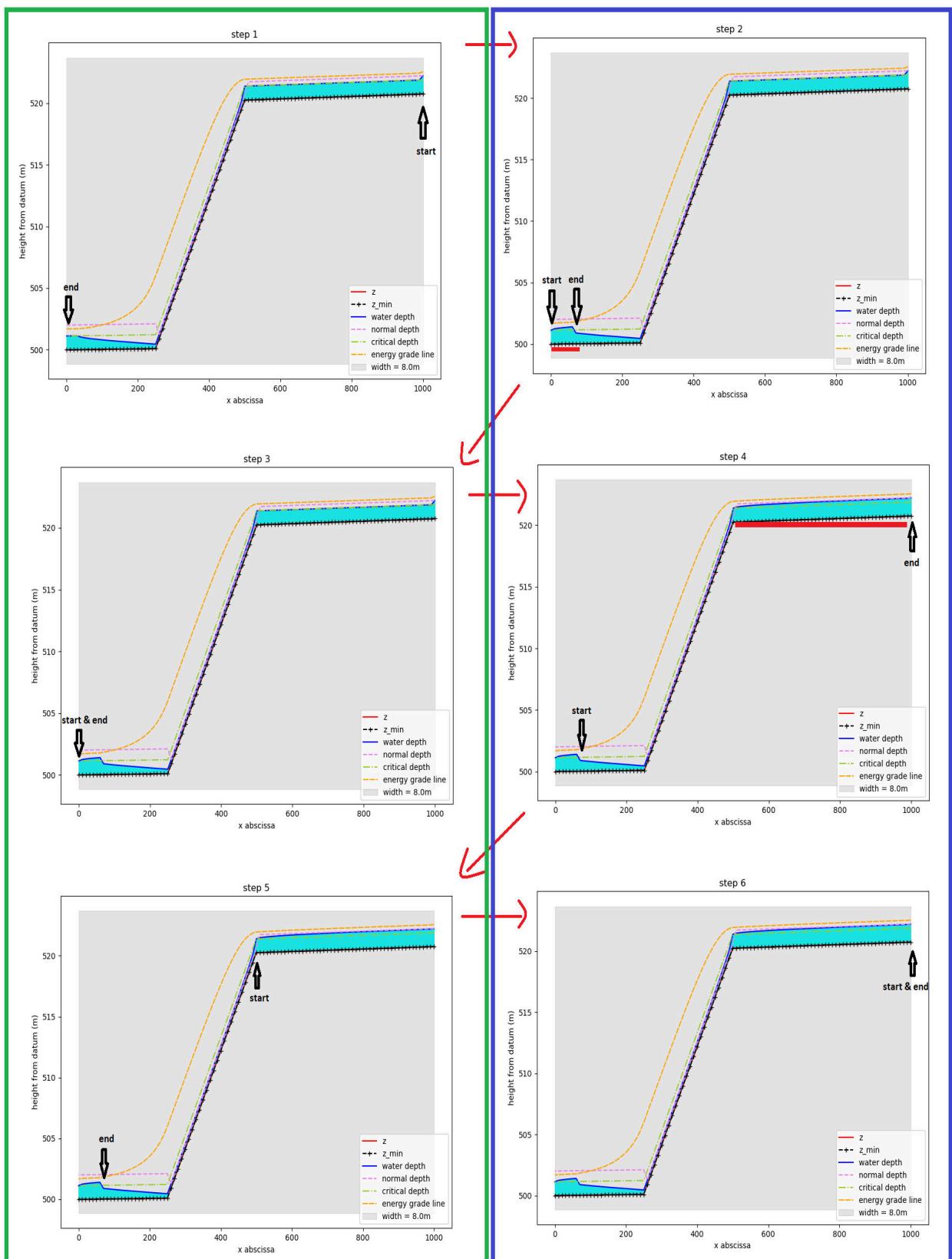


FIGURE 29 – Exemple de construction de la ligne d'eau étape par étape

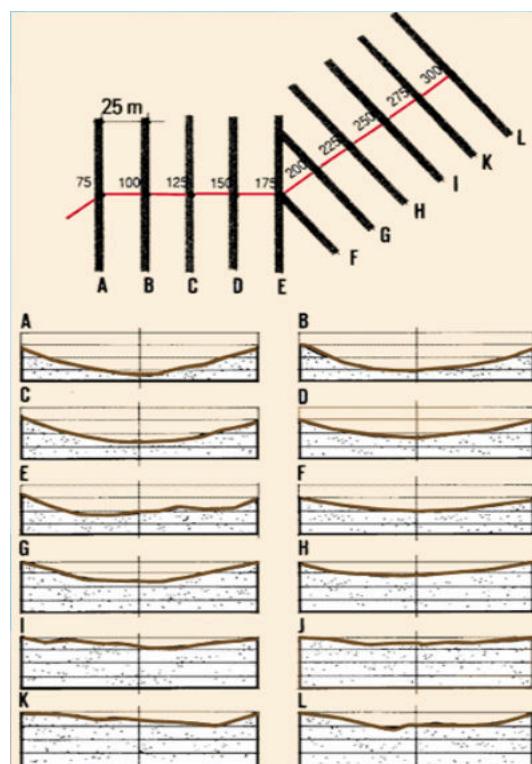


FIGURE 30 – Profil en long avec relevé de sections en travers  
(source : [www.fao.org](http://www.fao.org))