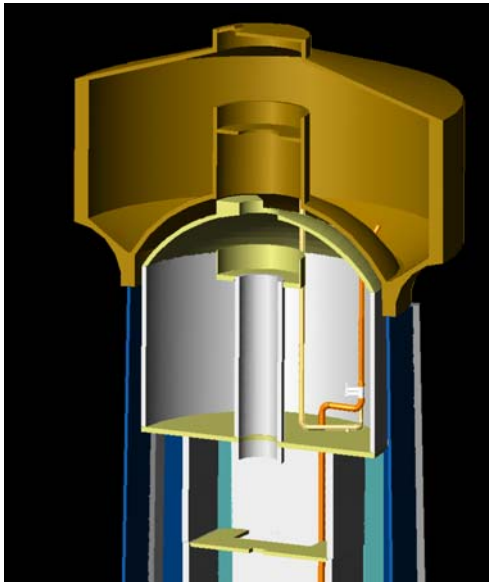


# HYDRAULIQUE AVANCEE



Double réservoir d'Erstein



Pompe du Polygone (CUS)



Seuil en rivière



Bassin de décantation

FORMATION INITIALE

## OBJECTIFS

---

L'objectif pédagogique de cette étude est la construction des outils nécessaires aux calculs de l'ensemble d'un système hydraulique regroupant les ouvrages les plus classiques en adduction d'eau potable (AEP), assainissement et rivière.

La finalité en termes d'acquis est de :

- Maîtriser les concepts hydrauliques,
- Développer les capacités à considérer les modèles adéquats pour les cas étudiés (approche 1, 2 ou 3D, modèle en régime permanent ou transitoire),
- Développer la capacité à écrire le modèle physique régissant les phénomènes hydrauliques en interaction,
- Développer la capacité à résoudre le problème continu par la mise en œuvre de techniques de discrétisations spatiale et temporelle (dans les domaines de l'AEP, l'assainissement, la rivière et le traitement des eaux).

## CONTENU

---

D'un point de vue général, les concepts hydrauliques mis en interaction recouvrent :

- L'hydraulique en charge :
  - Point de fonctionnement (perte de charges, pompes, réservoir ...),
  - Réseau maillé,
- L'hydraulique à surface libre :
  - Courbes de remous,
  - Ressaut,
  - Ouvrages (seuil, vanne, déversoir...)

## SUPPORT

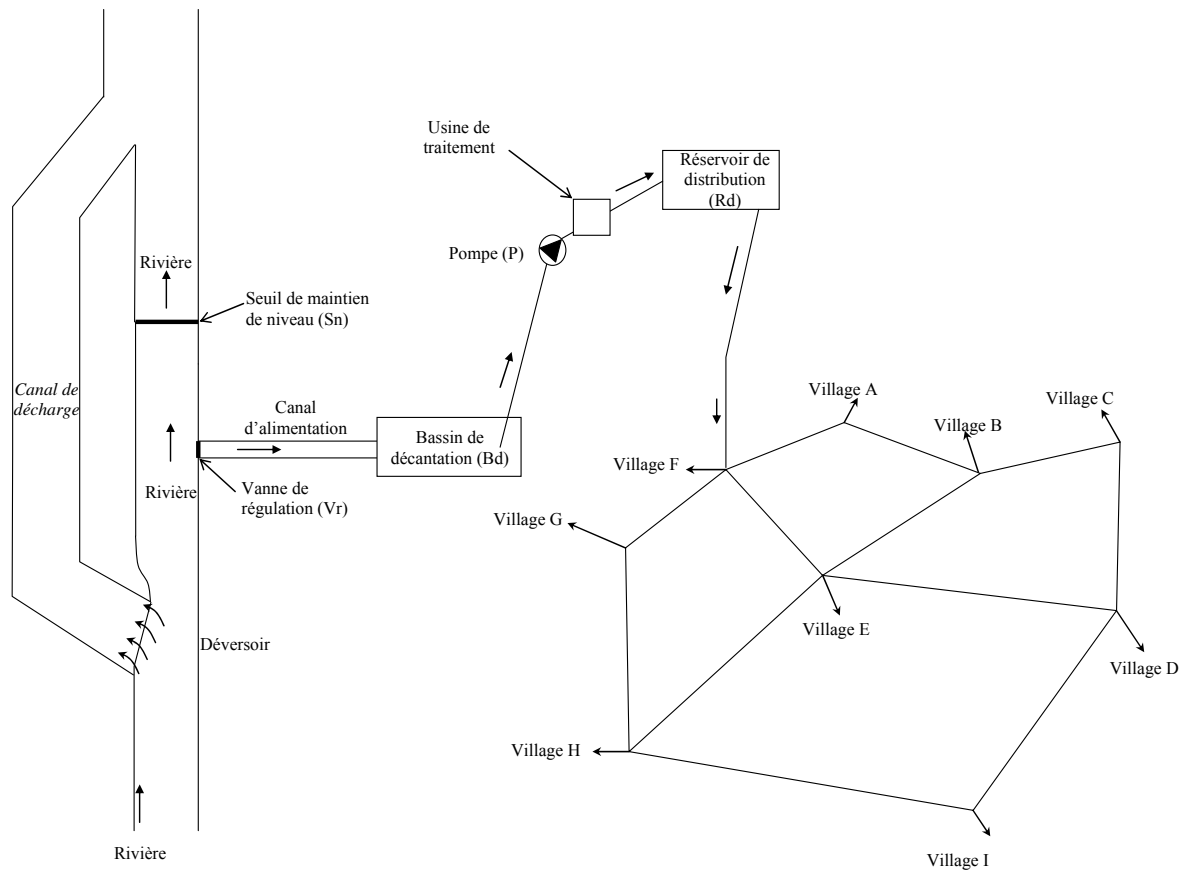
---

L'ensemble de la démarche décrite précédemment sera appliqué à un système hydraulique regroupant un réseau d'adduction d'eau potable dont la ressource en eau provient d'une rivière.

Le schéma suivant représente l'ensemble du système.

Une vanne de régulation ( $V_r$ ) permet de prélever de l'eau à la rivière et de remplir une fois par jour le bassin de décantation (Bd). Cette vanne ( $V_r$ ) fonctionne en tout ou rien, c'est-à-dire qu'elle s'efface complètement pendant le remplissage et se ferme entièrement dès que le bassin est plein.

Afin de maintenir un tirant d'eau suffisant dans la rivière au niveau de la vanne de régulation, un seuil de maintien du niveau d'eau a été construit à l'aval.



En cas de forte crue, un déversoir latéral a été réalisé à l'amont afin de limiter le niveau d'eau à l'aval.

La vitesse de chute des particules en suspension dans le bassin (Bd) oblige l'exploitant à attendre 5 heures avant de pouvoir alimenter le réservoir de distribution (Rd) par l'intermédiaire de la pompe (P). On ne peut donc pas pomper pendant le remplissage du bassin (Bd).

Une usine de traitement permet de rendre l'eau potable entre le bassin de décantation (Bd) et le réservoir de distribution (Rd).

La distribution de l'eau potable se fait par l'intermédiaire du réservoir de distribution (Rd). Un réseau maillé sous pression permet d'alimenter l'ensemble des villages A, B, ..., I.

Cette étude se décompose en deux phases :

- Une partie *hydraulique en charge* constituée du bassin de décantation (Bd), de la pompe (P), du réservoir de distribution (Rd) et du réseau maillé.
- Une partie *hydraulique à surface libre* constituée d'un déversoir, de la vanne de régulation (Vr), du bassin de décantation (Bd) et du seuil de maintien de niveau (Sn).

## PARTIE HYDRAULIQUE EN CHARGE

### Objectifs :

Il est demandé :

- De réaliser un diagnostic hydraulique du réseau existant en déterminant :
  - ✓ Le temps de pompage.
  - ✓ L'évolution des pressions dans le temps sur 24 heures en chaque point du maillage représenté par les villages A, B, ..., I.
- De prévoir une amélioration du réseau en situation actuelle et future avec 20% d'augmentation du nombre d'abonnés.

### Contraintes de fonctionnement hydraulique du réseau :

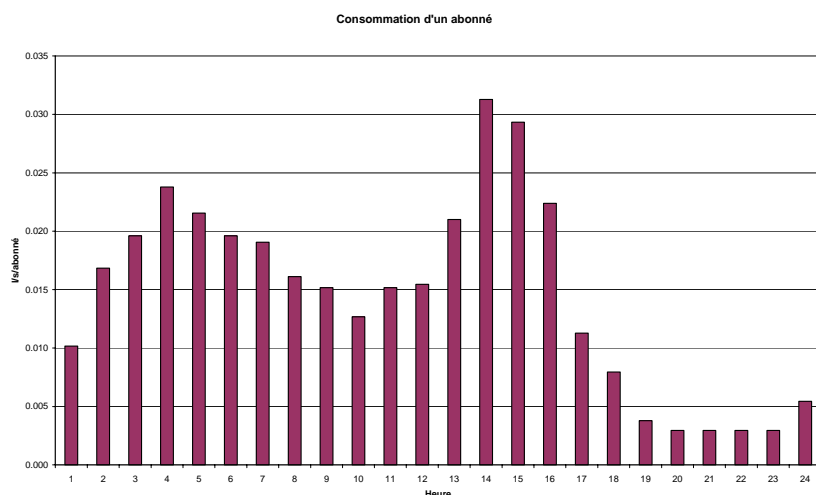
- Le réservoir de distribution doit être plein à 6 heures du matin.
- Il faut privilégier le pompage de nuit.
- Il faut réaliser un marnage du réservoir (Rd) en 24 heures.
- La pression minimale acceptée en chaque point du village (A, B, ..., I) est de 1,5 bars.

### Données complémentaires :

- ✓ Nombre d'abonnés par village :

abonnés A	abonnés B	abonnés C	abonnés D	abonnés E	abonnés F	abonnés G	abonnés H	abonnés I
400	600	700	500	300	700	600	400	200

- ✓ La courbe de consommation suivante représente la demande d'un abonné sur 24 heures (un abonné constitue plusieurs personnes).



temps	Q(l/s/abonné)
6	0.01017
7	0.01684
8	0.01962
9	0.02378
10	0.02156
11	0.01962
12	0.01906
13	0.01611
14	0.01517
15	0.01267
16	0.01517
17	0.01545
18	0.02100
19	0.03128
20	0.02934
21	0.02239
22	0.01128
23	0.00795
0	0.00378
1	0.00295
2	0.00295
3	0.00295
4	0.00295
5	0.00545

- ✓ Altitude de chaque point du maillage représenté par les villages A, B, ..., I :

Z(A) (m)	Z(B) (m)	Z(C) (m)	Z(D) (m)	Z(E) (m)	Z(F) (m)	Z(G) (m)	Z(H) (m)	Z(I) (m)
231.5	234.2	233.4	237.0	234.8	230.9	225.6	229.9	229.5

✓ Les caractéristiques hydrauliques et géométriques du réseau sont les suivantes :

Conduite	Bd-Rd	Rd-F	A-B	B-C	F-E	E-D	G-H	H-I	F-A	E-B	D-C	G-F	H-E	I-D
Diamètre (m)	0.6	0.5	0.15	0.25	0.3	0.25	0.15	0.125	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.125
Longueur (m)	3500	600	2000	2000	2000	5000	5000	5000	3000	3000	3000	4000	4000	4000
Rugosité (mm)	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

✓ La relation des pertes de charge linéaire que l'on utilisera est celle de Lechapt et Calmon :  $J \text{ (mCE)} = \text{Longueur} \cdot L \cdot Q^M / D^N$  où L, M et N sont des constantes pour une rugosité donnée.

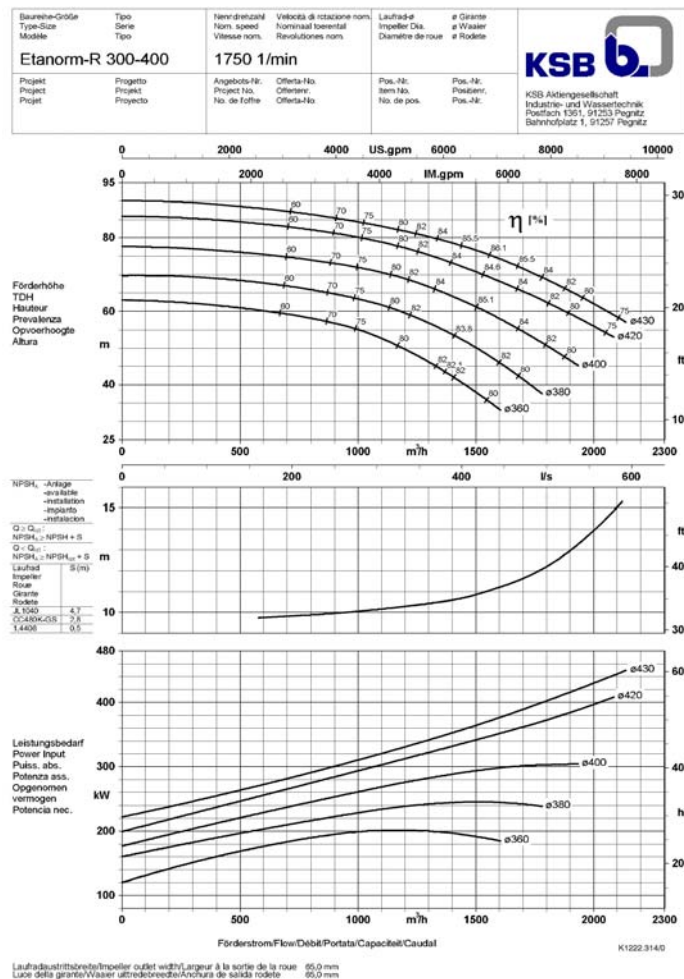
Longueur (m), débit : Q (m<sup>3</sup>/s) et diamètre : D (m)

Pour une rugosité de 0,1mm, on a :  $L=1,1 \cdot 10^{-3}$  ;  $M=1,89$  ;  $N=5,01$ .

Pour des valeurs de vitesse comprises en 0.4m/s et 2m/s cette formule conduit à des écarts relatifs inférieurs à 3% par rapport à la formule de Colebrook.

✓ La pompe utilisée est une KSB Etanorm-300-400R tournant à 1750 tr/min avec un diamètre de roue de Ø360.

La HMT de la pompe est représentée sur le graphique suivant :



Caractéristiques du bassin et du réservoir :

	Altitude	Surface
Bassin de décantation (Bd)	Plein : 205.0m Vide : 203.0m	3000 m <sup>2</sup>
Réservoir de distribution (Rd)	Plein : 260.0m Vide : 255.0m	800 m <sup>2</sup>

## PARTIE HYDRAULIQUE A SURFACE LIBRE

---

### Objectifs :

Il est demandé :

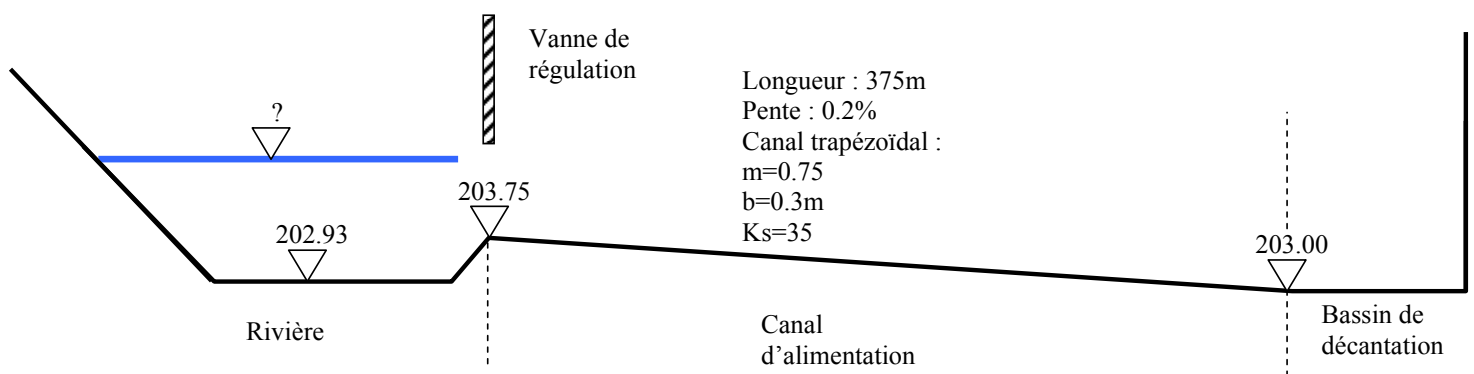
- De déterminer la courbe de fonctionnement du déversoir de crue quand le débit à l'amont du déversoir varie entre 5 et 330 m<sup>3</sup>/s.
- De déterminer le temps de remplissage du bassin de décantation quand le débit à l'amont du déversoir est de 173 m<sup>3</sup>/s.
- De dimensionner la fosse de dissipation du seuil de maintien du tirant d'eau quand le débit à l'amont du déversoir est de 173 m<sup>3</sup>/s.

Questions complémentaires :

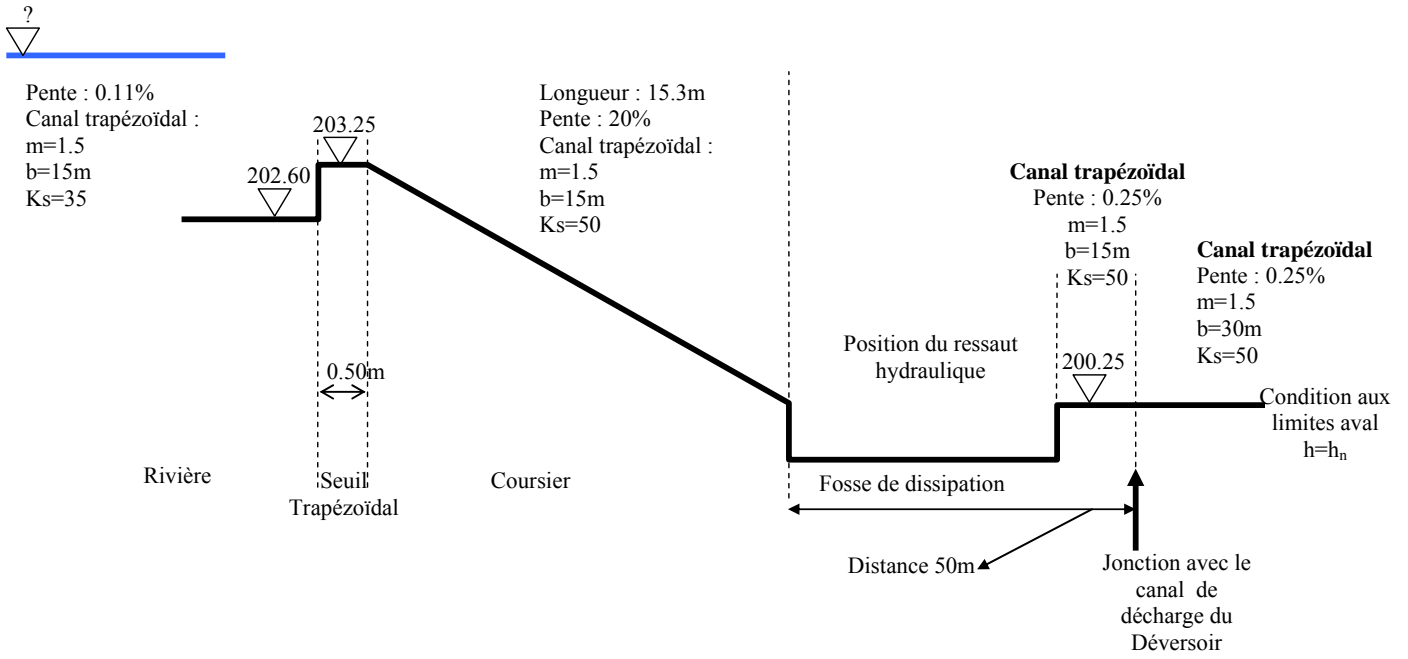
- Déterminer les temps de remplissage du bassin de décantation quand le débit à l'amont du déversoir varie entre 5 et 330 m<sup>3</sup>/s (on prendra 10 valeurs de débit).
- Vérifier la fosse de dissipation du seuil de maintien du tirant d'eau quand le débit à l'amont du déversoir varie entre 5 et 330 m<sup>3</sup>/s (on prendra 10 valeurs de débit).

### Contraintes hydraulique et géométriques du réseau :

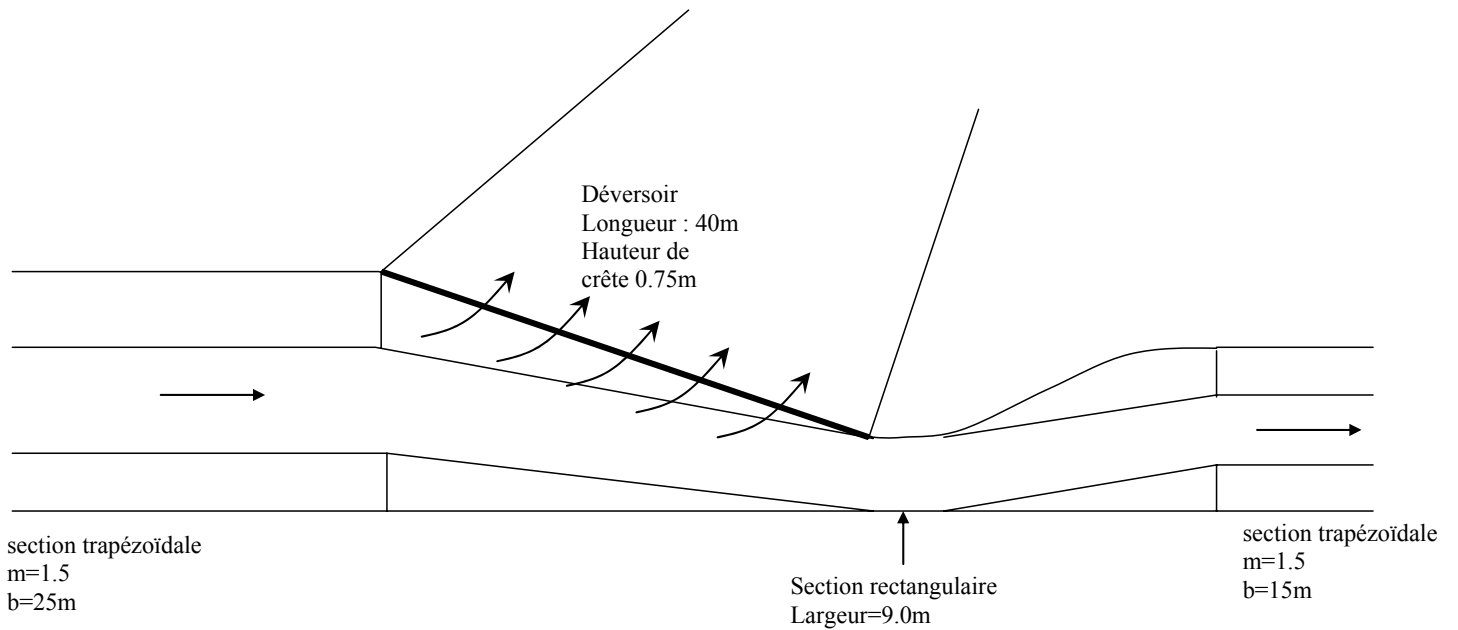
- ✓ En cas de crue, le déversoir situé à l'amont permet d'écrêter le débit de la rivière au niveau de notre prélèvement en déversant dans un canal de décharge.
- ✓ Le débit et le niveau d'eau dans la rivière sont suffisamment importants pour ne pas être perturbés par l'alimentation du bassin de décantation.



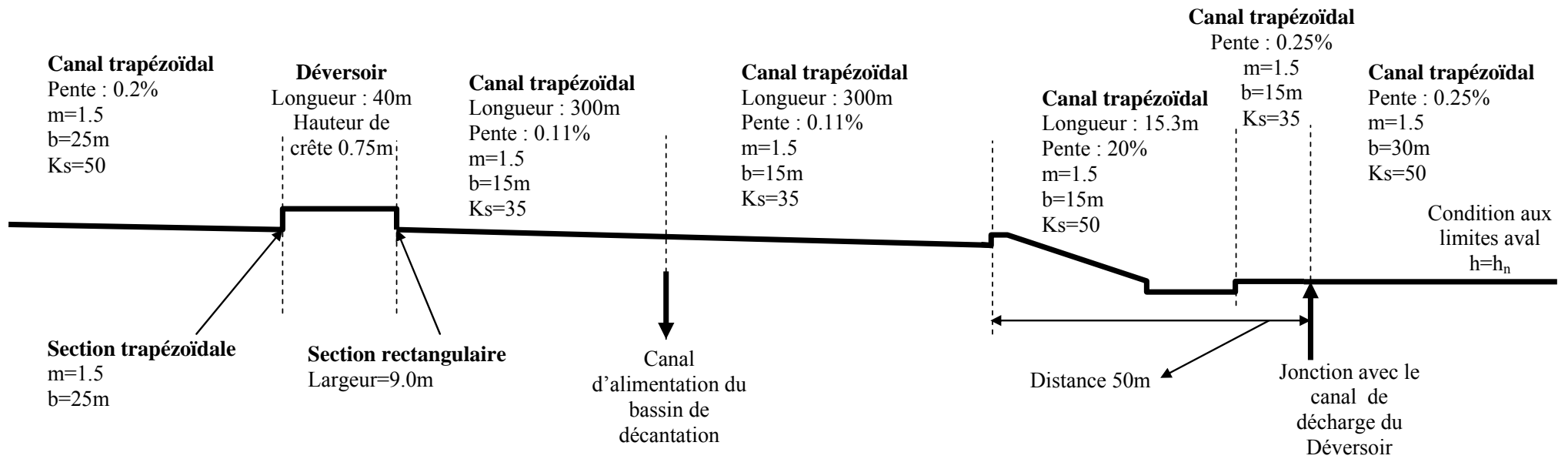
*Profil en long du canal d'alimentation*



*Profil en long du seuil de maintien du niveau d'eau*



*Vue de dessus du déversoir*



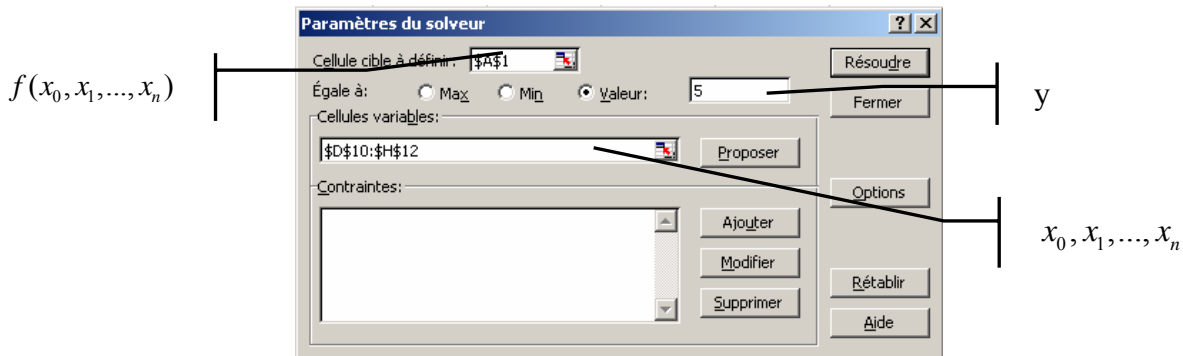
*Profil en long du déversoir au seuil de maintien du niveau d'eau*



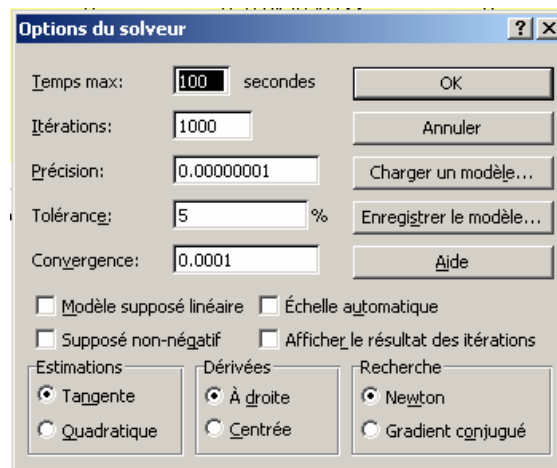
## ANNEXE 1 : TUTORIAL SOLVER

- Présentation succincte du solveur

Le solveur permet de résoudre une équation de type  $f(x_0, x_1, \dots, x_n) = y$  de manière itérative en jouant sur les  $n$  paramètres  $x_0, x_1, \dots, x_n$  correspondant à  $n$  cases de la feuille de calcul.



Options de calculs :



- Syntaxe sous VB

Il est possible de piloter le solveur depuis VBA sous Excel afin de pouvoir mener des calculs itératifs en boucle en modifiant les paramètres de la fonction  $f$ .

Pour piloter le solveur depuis VB, il faut d'abord disposer du solveur sous Excel. Si vous ne l'avez pas : Outils > Macro complémentaire et cocher solveur. Il faut ensuite activer la toolbox du solveur dans l'environnement Excel : Outils > Références puis cocher 'solveur.xls'.

Voici un exemple de code pilotant le solveur :

```
SolverOk SetCell:="$AF$15", MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", ByChange:="$S$12:$AF$12"  
SolverOptions MaxTime:=500, Iterations:=10000, Precision:=0.00000001  
SolverSolve userFinish:=True
```

- ✓ **SetCell** désigne les coordonnées de la cellule  $f(x_0, x_1, \dots, x_n)$ , c'est l'équivalent de la 'Cellule cible à définir'.
- ✓ **MaxMinVal** peut prendre trois valeurs correspondant aux trois options de 'Egale à :':
  - **MaxMinVal:=1** on cherche le maximum de la fonction f
  - **MaxMinVal:=2** on cherche le minimum de la fonction f
  - **MaxMinVal:=3** résout  $f(x_0, x_1, \dots, x_n) = y$ , on fixe y en codant **ValueOf :=y**
- ✓ **ByChange** désigne les coordonnées des cellules de la fonction (soient  $x_0, x_1, \dots, x_n$ ), c'est l'équivalent de 'Cellules variables'.
- ✓ **SolverSolve** lance le solveur
- ✓ **UserFinish** peut prendre 2 valeurs
  - **True** donne le résultat sans afficher la boîte de dialogue
  - **False** donne le résultat et affiche la boîte de dialogue

Tout l'intérêt ici est d'utiliser le solveur dans une boucle :

```

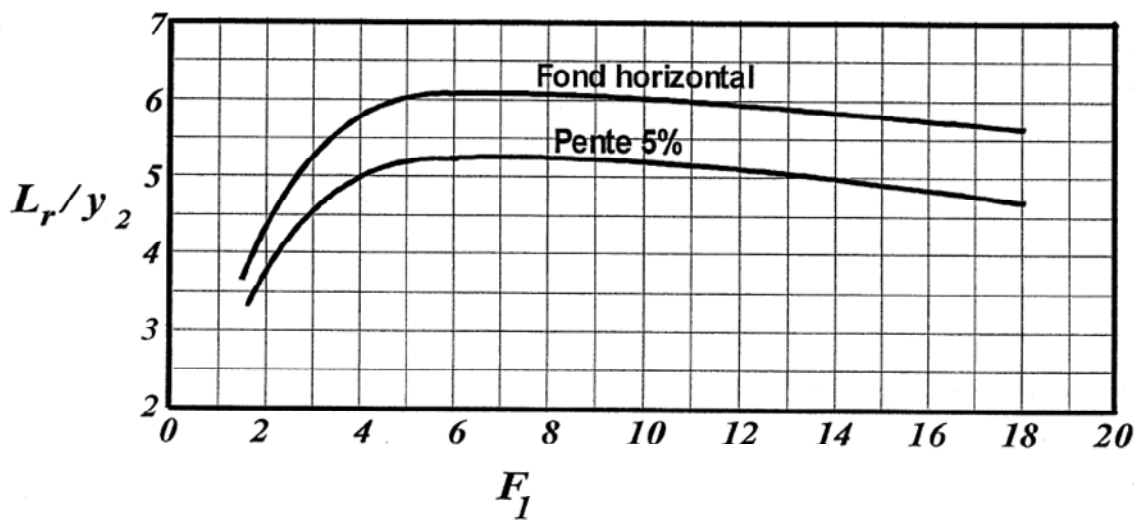
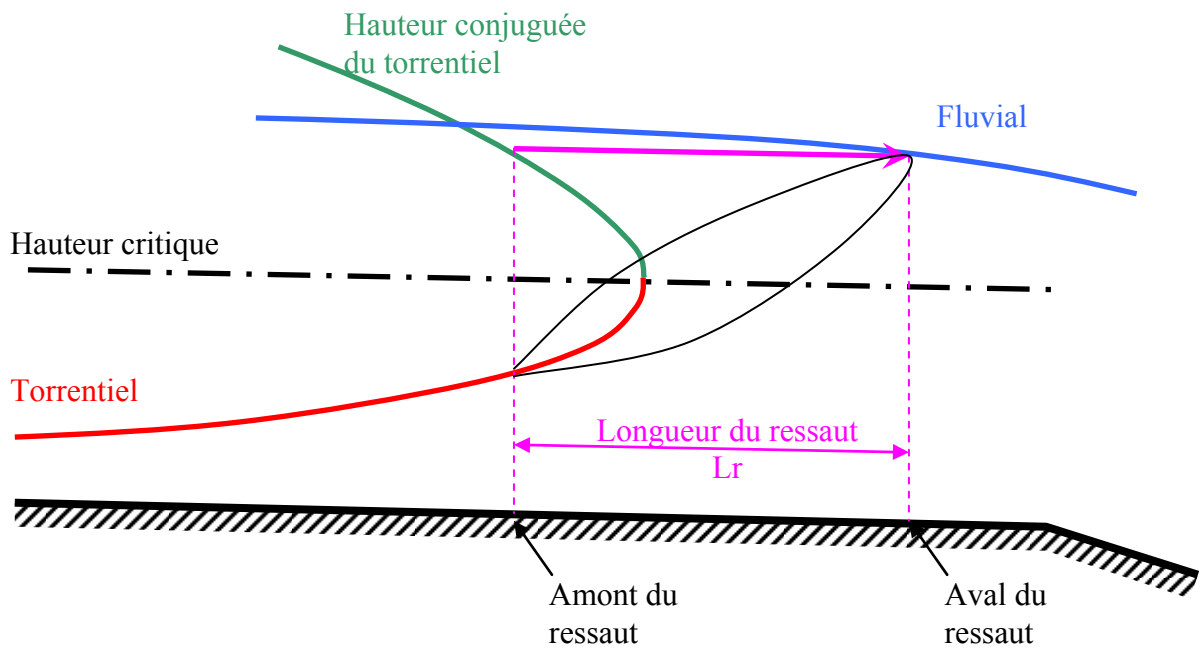
For i=1 to N
  SolverOk SetCell:=Feuill1.cells(i,3), MaxMinVal:=3, ValueOf:="0", _
  ByChange:="A12"
  SolverOptions MaxTime:=500, Iterations:=10000, Precision:=0.00000001
  SolverSolve userFinish:=True

  Feuill1.cells(i,4).value = Feuill1.cells(12,1).value
Next i

```

Ici on résout  $f(x_0) = y$  pour plusieurs y et on stocke les  $x_0$  dans la colonne C.

## ANNEXE 2 : POSITION FINE DU RESSAUT HYDRAULIQUE

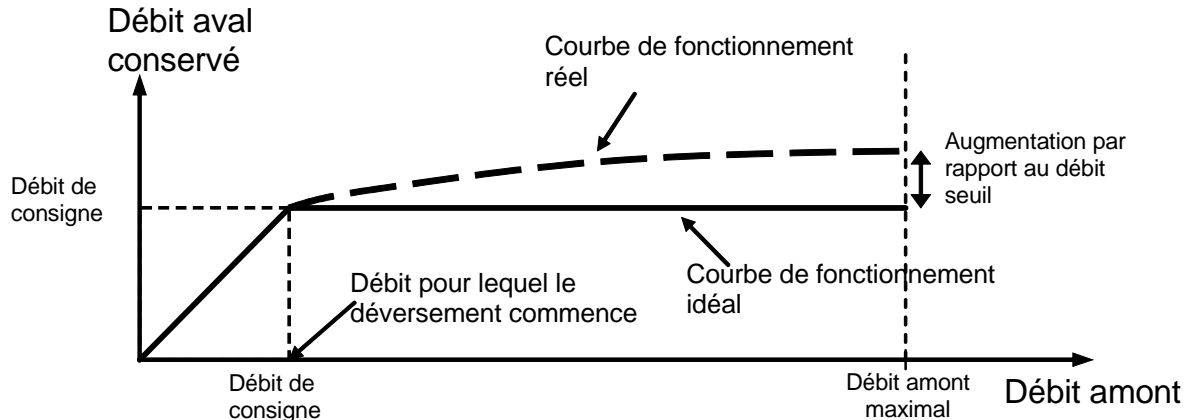


La longueur du ressaut hydraulique peut être approchée par la relation :

$$L_r = 7 \cdot (h_1 - h_2)$$

## ANNEXE 3 : COURBE DE FONCTIONNEMENT D'UN DEVERSOIR

Le comportement hydraulique d'un déversoir peut être caractérisé par la courbe de fonctionnement représentée à la figure suivante. Cette courbe permet d'apprécier et de quantifier le rôle hydraulique d'un déversoir.



Principe de fonctionnement hydraulique du déversoir d'orage

Le débit de consigne (ou seuil) est le débit amont à partir duquel l'ouvrage commence à déverser. Il peut donc représenter, par exemple, le débit maximum admissible à l'aval du réseau.

La courbe de fonctionnement idéal représente le cas de régulation « parfait » dans lequel quel que soit le débit amont supérieur au débit de consigne, le débit conservé est égal au débit de consigne. Un déversoir performant aura tendance à approcher de cette courbe.

La courbe de fonctionnement réel représentée à la figure précédente nous montre qu'à partir du moment où le débit amont dépasse le débit de consigne, le débit aval va continuer à augmenter.

La caractérisation hydraulique d'un déversoir va donc se faire en calculant :

- le débit de consigne,
- l'augmentation du débit aval par rapport au débit de consigne et ce pour un débit amont maximal.

Cette augmentation de débit peut plus facilement être caractérisée par le pourcentage d'augmentation du débit aval maximal conservé par rapport au débit de consigne, c'est-à-dire :

$$\% \text{ d'augmentation du débit maximal aval} = \frac{\text{Débit aval conservé} - \text{Débit de consigne}}{\text{Débit de consigne}} \%$$

## ANNEXE 4 : CALCUL DES COURBES DE REMOUS

---

Les courbes de remous sont obtenues à partir du calcul du tirant d'eau issu des équations de Barre de St Venant que nous n'allons pas redémontrer ici (cf. chapitre 3 et annexe 8 du cours d'HSL).

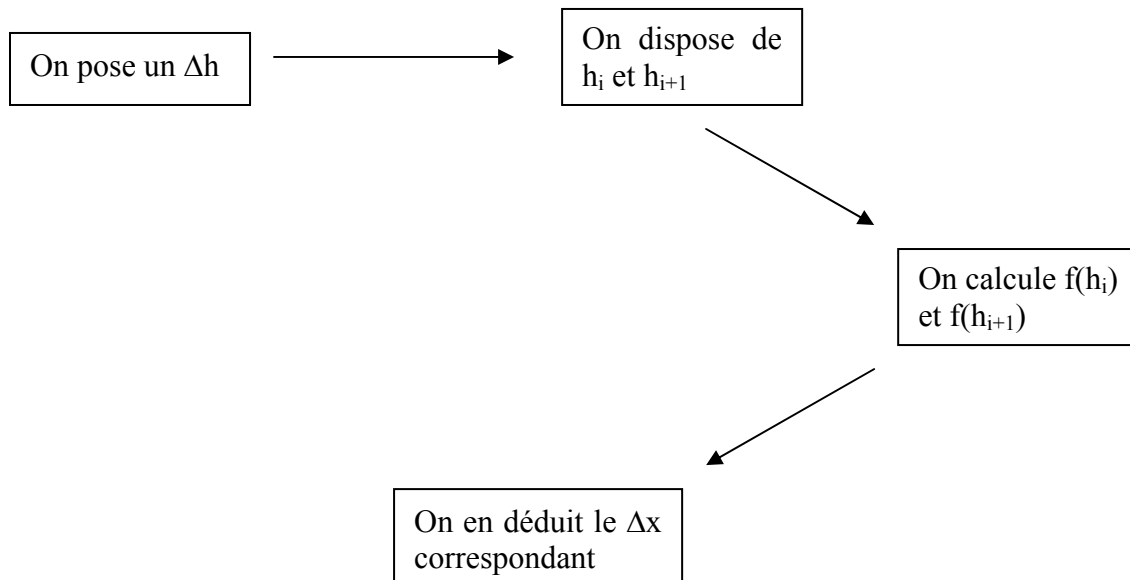
$$\frac{dh}{dx} = \frac{I - \frac{Q^2}{K_s^2 S^2 R_h^{4/3}}}{1 - \frac{Q^2 B}{g S^3}} \quad \text{d'où l'on a}$$

$$\int_x^{x+\Delta x} dx = \int_h^{h+\Delta h} \frac{1 - \frac{Q^2 B}{g S^3}}{I - \frac{Q^2}{K_s^2 S^2 R_h^{4/3}}} dh = \int_h^{h+\Delta h} f(h) dh$$

Ainsi cette équation, qui paraît de prime abord compliquée, présente l'intérêt d'être à variable séparable. En fixant un pas de calcul  $\Delta h$ , on calcule à chaque itération la variation  $\Delta x$  correspondante ( $\Delta h$ ) en intégrant le membre de droite. On utilise pour ce faire une méthode simple des trapèzes.

$$\int_{h_i}^{h_i+\Delta h} f(h) dh = \int_{h_i}^{h_{i+1}} f(h) dh \approx \frac{1}{2} [f(h_i) + f(h_{i+1})] \cdot \Delta h = \Delta x$$

RESUME :



Ainsi le  $\Delta h$  est le même à chaque itération à l'opposé du  $\Delta x$  qui varie à chacune d'elle.

## ANNEXE 5 : MODELISATION DU DEVERSOIR

Un déversoir est caractérisé d'un point de vue hydraulique par une charge spécifique constante :

$$H = H_0 = \frac{Q^2}{2gS^2} + h = C_{ste} \quad \frac{dH}{dx} = 0 \quad \text{soit} \quad \frac{d}{dx} \left( \frac{Q^2}{2gS^2} + h \right) = 0$$

$$\frac{2Q \frac{dQ}{dx} S^2 - 2S \frac{dS}{dx} Q^2}{2gS^4} + \frac{dh}{dx} = \frac{Q}{gS^2} \frac{dQ}{dx} - \frac{Q^2}{gS^3} \frac{dS}{dx} + \frac{dh}{dx} = 0$$

$$S(x) = b(x)h + m(x)h^2$$

$$\text{avec} \quad b(x) = b_0 + \alpha x \quad \alpha < 0$$

$$m(x) = m_0 + \beta x \quad \beta < 0$$

$$\text{avec} : \quad \frac{dS}{dx} = \frac{\partial S}{\partial h} \frac{dh}{dx} + \frac{\partial S}{\partial x}$$

$$\frac{\partial S}{\partial h} = 2h(m_0 + \beta x) + (b_0 + \alpha x)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x} = \alpha h + \beta h^2$$

$$\frac{Q}{gS^2} Q' - \frac{Q^2}{gS^3} \left( \alpha h + \beta h^2 + (2h(m_0 + \beta x) + b_0 + \alpha x) \frac{dh}{dx} \right) + \frac{dh}{dx} = 0$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\frac{Q^2}{gS^3} (\alpha h + \beta h^2) - \frac{QQ'}{gS^2}}{1 - (2hm(x) + b(x)) \frac{Q^2}{gS^3}} = \frac{2 \frac{(H_0 - h)}{S} (\alpha h + \beta h^2) - \frac{Q'}{gS} \sqrt{2g(H_0 - h)}}{1 - (2hm(x) + b(x)) 2 \frac{(H_0 - h)}{S}}$$

On utilise une loi de type  $Q = f((h-w)^{3/2})$  et on ajoute des coefficients permettant de prendre en compte l'effet de la vitesse latérale et de sa direction ( $\omega_u$ ), ainsi que l'effet de l'entonnement du déversoir ( $\omega_\phi$ ).

$$Q' = -\frac{dQ}{dx} = -0.6n^* \cdot \sqrt{g} (h-w)^{3/2} \times c_w \times \omega_u \times \omega_\phi$$

$n^*$  : nombre de crêtes déversantes

$c_w$  : 1.0 crête mince et 0.8 crête épaisse

$h$  : tirant d'eau

$w$  : hauteur de crête

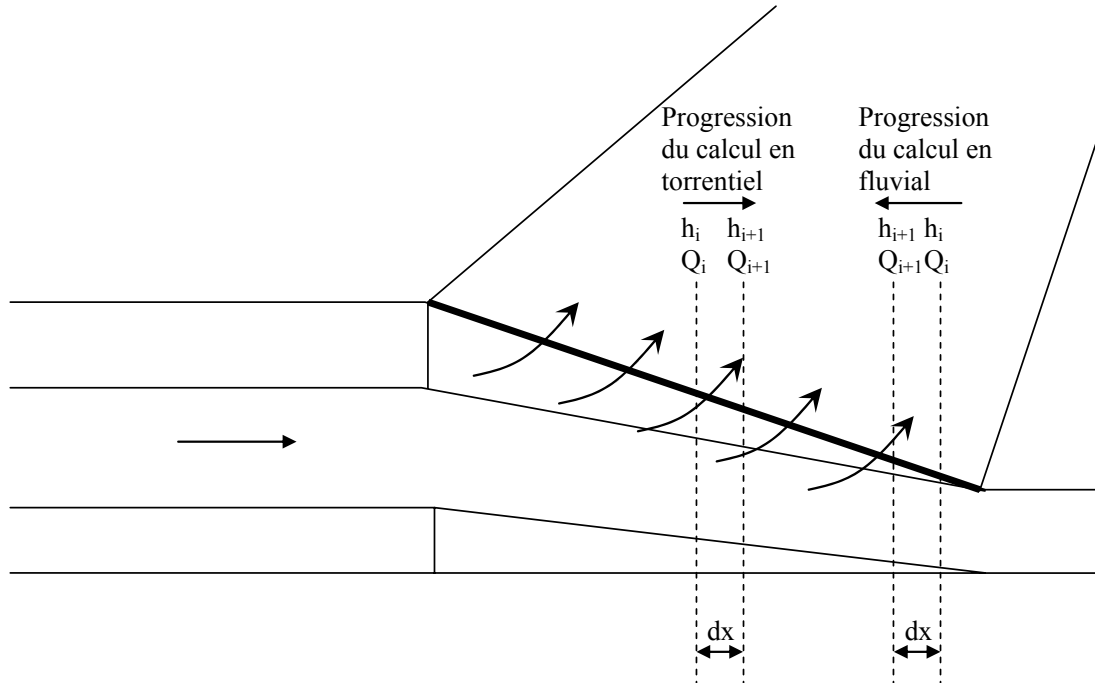
$\theta$  : angle d'entonnement

$$\boxed{\frac{dQ}{dx} = -0.6n^* c_w \sqrt{g} (h-w)^{3/2} \times \sqrt{\frac{H_0 - w}{3H_0 - 2h - w}} \times \left[ 1 - \tan(\theta) \left( \frac{3(H_0 - h)}{h - w} \right)^{1/2} \right]}$$

Par rapport à une formule classique, on trouve des valeurs du débit déversé plus fortes grâce à la prise en compte des effets de la vitesse latérale et de l'entonnement.

## ANNEXE 6 : RUNGE-KUTTA CLASSIQUE D'ORDRE DEUX ET QUATRE

Cette méthode est basée sur la méthode des différences finies. Nous discrétisons le canal selon son axe d'écoulement comme illustré sur le dessin.



Il s'agit de pouvoir calculer les variables  $Q$  et  $h$  à chaque nœud de notre maillage en fonction des valeurs de ces variables aux nœuds précédents.

Soit  $(h_{i+1}, Q_{i+1}) = f((h_i, Q_i))$

Il est possible d'utiliser un schéma basique de type explicite d'Euler progressif :

$$Q_{i+1} = Q_i + \Delta x \cdot g(h_i)$$

$$h_{i+1} = h_i + \Delta x \cdot f(x_i, h_i, Q_i)$$

Pour améliorer le calcul (diminuer la diffusion), on peut utiliser la méthode de Runge et Kutta en se basant sur les développements limités d'ordre 2 et 4. Ainsi l'erreur commise lors de l'utilisation de la méthode est de l'ordre de  $O(\Delta x^2)$  et  $O(\Delta x^4)$ .

Nous avons obtenu précédemment deux équations de la forme  $h' = f(x, h, Q)$  et  $Q' = g(h)$  que nous allons résoudre en écrivant Runge et Kutta d'ordre 2 :

$$h_{i+1} = h_i + \frac{\Delta x}{2} (k_{1,h} + k_{2,h})$$

avec

$$k_{1,h} = f(x_i, h_i, Q_i)$$

$$k_{2,h} = f(x_i + \Delta x, h_i + \Delta x \cdot k_{1,h}, Q_i + \Delta x \cdot k_{1,Q})$$

$$Q_{i+1} = Q_i + \frac{\Delta x}{2} (k_{1,Q} + k_{2,Q})$$

avec

$$k_{1,Q} = g(h_i)$$

$$k_{2,Q} = g(h_i + \Delta x \cdot k_{1,h})$$

Runge et Kutta d'ordre 4 s'écrit :

$$h_{i+1} = h_i + \frac{\Delta x}{6} (k_{1,h} + 2k_{2,h} + 2k_{3,h} + k_{4,h})$$

avec

$$k_{1,h} = f(x_i, h_i, Q_i)$$

$$k_{2,h} = f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, h_i + \frac{\Delta x}{2} k_{1,h}, Q_i + \frac{\Delta x}{2} k_{1,Q}\right)$$

$$k_{3,h} = f\left(x_i + \frac{\Delta x}{2}, h_i + \frac{\Delta x}{2} k_{2,h}, Q_i + \frac{\Delta x}{2} k_{2,Q}\right)$$

$$k_{4,h} = f(x_i + \Delta x, h_i + \Delta x k_{3,h}, Q_i + \Delta x k_{3,Q})$$

$$Q_{i+1} = Q_i + \frac{\Delta x}{6} (k_{1,Q} + 2k_{2,Q} + 2k_{3,Q} + k_{4,Q})$$

avec

$$k_{1,Q} = g(h_i)$$

$$k_{2,Q} = g\left(h_i + \frac{\Delta x}{2} k_{1,h}\right)$$

$$k_{3,Q} = g\left(h_i + \frac{\Delta x}{2} k_{2,h}\right)$$

$$k_{4,Q} = g(h_i + \Delta x k_{3,h})$$

On remarque que cette méthode est récursive  $k_{i+1} = f(k_1, k_2, \dots, k_i)$ , c'est pourquoi elle est fastidieuse à mettre en œuvre à la main mais très aisée à coder notamment sous Excel.