

## Chapitre I : Généralités sur les écoulements à surface libre

### I-1- Introduction :

L'étude des écoulements naturels entre dans le cadre de l'hydraulique à surface libre. Ce qui différencie cette dernière de l'hydraulique en charge est la présence d'une surface libre c'est-à-dire une surface qui est en contact direct avec l'atmosphère. Ainsi le moteur de l'écoulement n'est pas le gradient de pression comme c'est le cas pour les écoulements à charge, mais tout simplement la gravité. On parle dans ce cas des écoulements gravitaires. Une caractéristique commune à ces écoulements est le fait que la profondeur d'eau est petite par rapport à largeur d'écoulement. La gamme des écoulements à surface libre et leurs applications comprend les rivières, les cours d'eau et les fleuves.

Les écoulements souterrains sont aussi de type gravitaire dans le cas de nappe non confinée. Cette famille peut être incluse dans la grande famille des écoulements à surface libre.

Dans notre présente étude, on fera référence toujours aux équations de Barre de Saint-Venant liées à l'écoulement graduellement varié.

### I-2- Les crues

#### I-2-1- Définition :

Une crue est un événement comprenant une ou plusieurs augmentations rapides et fortes du débit d'une rivière maintenant ce débit au-dessus d'un seuil donné. La crue est simple, si elle présente une seule pointe. Elle est dite complexe si elle présente plusieurs pointes comme montre (Figure I-1)

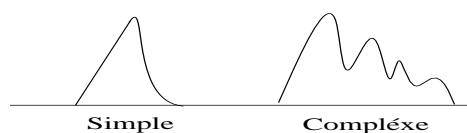


Figure I-1 : Crues simple et complexe

L'augmentation plus au moins brutale du débit dans un cours d'eau ou dans un réseau d'assainissement est due à une cause naturelle (précipitation, fonte de neige, etc.) ou non (rupture accidentelle ou vidange d'ouvrage de retenue, etc.) [1]

### **I-2-2- Caractéristique d'une crue :**

Une crue est caractérisée par son hydrogramme, courbe représentant les variations du débit en fonction du temps, et en particulier par son débit de pointe, sa durée, son volume, son temps de montée. On mesure généralement le risque d'apparition d'une crue donnée par la période de retour de l'une de ses variables caractéristiques (débit de pointe instantané, débit moyen sur une durée donnée, etc.).

### **I-2-3- Différents types de crue :**

Selon la rapidité d'évolution du phénomène, on distingue souvent les crues fluviales et les crues torrentielles, même si le passage d'un type de crue à l'autre n'a pas de limite nette.

#### **I-2-3-a- Les crues fluviales :**

Affectent des cours d'eau important, alimentés par des bassins de grande dimension. Elles sont dues à des précipitations abondantes et de longue durée. La montée des eaux est lente, la crue se prolonge parfois plusieurs jours après la fin des précipitations, les dégâts matériels causés par ce type de phénomène sont souvent considérables, en revanche la lenteur de la montée des eaux permet le plus souvent d'évacuer les personnes exposées et limite les risques d'entraînement et de noyade. [1]

#### **I-2-3-b- Les crues torrentielles :**

Peuvent apparaître sur n'importe quelle partie du réseau hydrographique (permanente ou non), et leurs conséquences peuvent devenir dommageables, même pour de tout petits bassins versants (quelques certaines, voire quelque dizaines d'hectares). Elles sont le plus souvent causées par des pluies convectives affectant parfois seulement une partie du bassin versant et sont caractérisées par une grande rapidité d'évolution. La montée des eaux est très brutale et ne laisse que très peu de temps pour alerter les riverains. Ce sont les crues de ce type qui sont les principales causes des mortalités par noyade. On parle également des crues rapides, des crues éclairs ou des crues subites. [1]

**I-2-3-c- Les crues nivales :**

Sont dues à la fonte de neige. Elles ne jouent généralement qu'un rôle mineur en hydrologie urbains dans les pays tempérés, il peut être utile de les prendre en compte dans les villes de montagne ou dans les pays froids. L'association d'une pluie et d'un redoux provoquant la fonte du manteau neigeux peut en effet provoquer des ruissellements importants, particulièrement si le sol a été rendu imperméable par le gel.

Il est à noter que d'autres causes sont susceptibles de provoquer également une montée rapide du niveau des eaux : rupture de digue, la chute de barrage,..., etc. Il s'agit alors d'événements accidentels dont la gestion peut également concerner les spécialistes d'hydrologie.

**I-3- Les canaux :**

On appelle canal un système de transport dans lequel l'eau s'écoule et dont la surface libre est soumise à la pression atmosphérique.

L'étude hydraulique d'un canal se pose souvent aux ingénieurs sous la forme suivante :

Pour une pente longitudinale de fond, il faut évacuer un certain débit ; la forme et les dimensions du canal sont à déterminer. [2]

**I-3-1-Type des canaux :**

On distingue deux catégories de canaux :

**I-3-1-a- Les canaux naturels :**

Ce sont les cours d'eau qui existent naturellement sur (ou sous) terre, tels que les ruisselets, torrents, rivières, fleuves et estuaires.

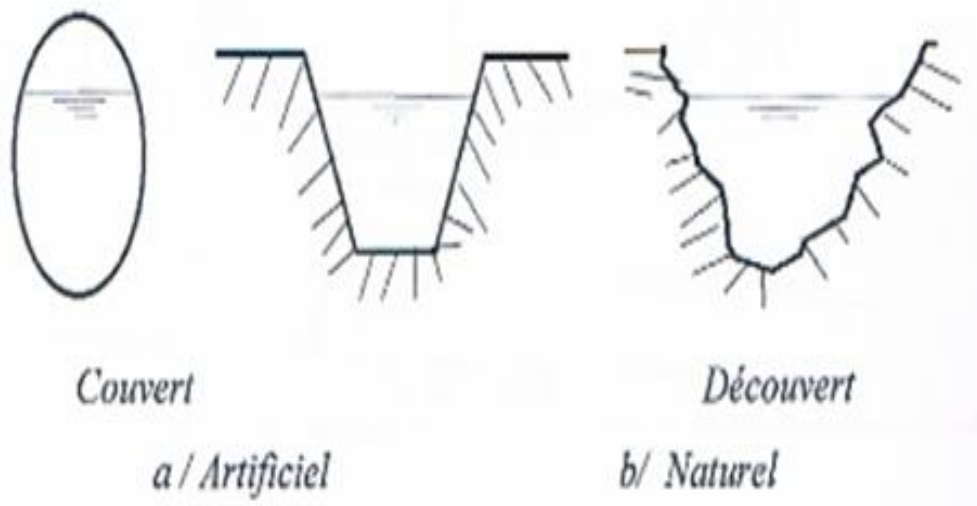
Les propriétés géométriques et hydrauliques des canaux naturels sont généralement assez irrégulières. L'application de la théorie hydraulique ne donne que des résultats approximatifs obtenus à partir d'hypothèses qui s'imposent. [2]

**I-3-1-b- Les canaux artificiels :**

Ce sont des cours d'eau réalisés par l'homme sur (ou sous) terre tels que : les canaux découverts construits au ras du sol (canaux de navigation, d'adduction et d'évacuation,

d'irrigation et drainage) ou les canaux couverts dans lesquels les liquides ne remplissent pas toute la section (tunnels hydraulique, aqueducs, drains, égouts).

Les propriétés hydrauliques des canaux artificiels sont généralement assez régulières. L'application de la théorie hydraulique donne souvent des résultats réalistes. [2]



**Figure I-2 : Types des canaux**

### **I-3-2- Les paramètres géométriques :**

Ces paramètres sont relatifs à une section du chenal dans un plan perpendiculaire à son axe dont la position est définie par une abscisse ( $x$ ). Les paramètres essentiels sont le tirant d'eau ( $y$ ) la section mouillée ( $S$ ), la largeur au miroir ( $L$ ) ou largeur de la section mouillée, le périmètre mouillé ( $P$ ).

Ils sont définis sur le schéma de la (Figure I-3). Bien noter que le périmètre mouillé est la longueur de paroi en contact avec l'eau (berges et fond), mais ne comporte pas le contact eau-atmosphère. [6]

La section (transversale) d'un canal est une section plane normale à la direction de l'écoulement. La section ou la surface mouillée,  $S$ , est la portion de la section occupée par le liquide.

Un canal dont la section ne varie pas et dont la pente longitudinale et la rugosité restent constantes, la hauteur d'eau peut cependant varier, est appelé canal prismatique ; sinon, on l'appelle canal non prismatique.

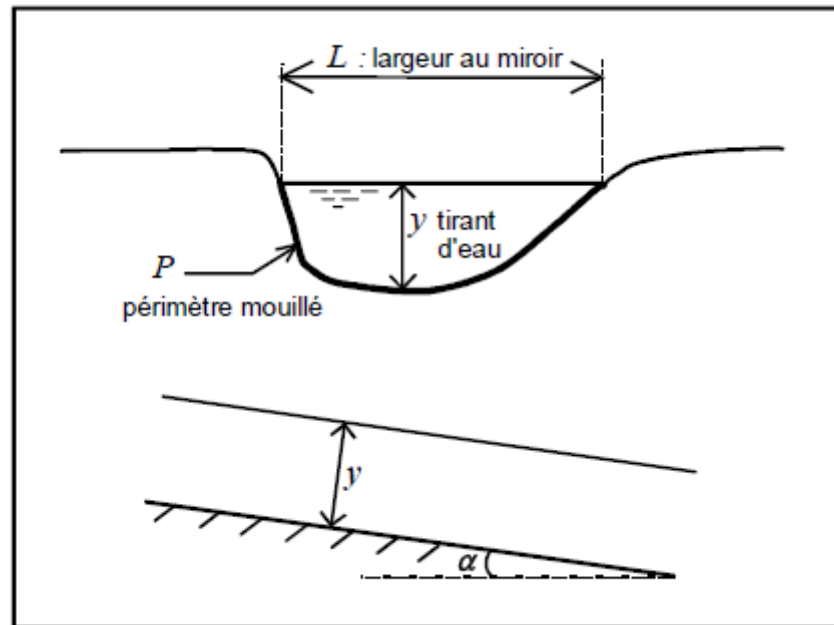


Figure I-3 : tirant d'eau, largeur au miroir et section mouillée

Le rayon hydraulique est le rapport entre section mouillée et périmètre mouillé,  $R = S/P$ .

Pour un canal rectangulaire,  $R = \frac{L \cdot y}{1 + 2 \cdot y}$ . Pour un canal infiniment large,  $R = y$ .

La pente du chenal est la pente de son fond, mesurée tout le long de son axe, et comptée positivement si le chenal est descendant. Elle est notée  $i$  ( $i = \sin \alpha$ ). Si  $z$  désigne la cote du fond, alors  $i = -dz/dx$ .

Il ne faut pas se laisser abuser par l'appellation « paramètres géométriques ». Tous les paramètres  $L$ ,  $y$ ,  $S$ ,  $P$ ,  $R$  dépendent du débit et ne sont donc pas des constantes géométriques.

Seule la pente ( $i$ ) est une constante géométrique (c'est à dire indépendante du débit, mais certes, pas forcément de l'abscisse). [6]

### I-3-3- Les paramètres hydrauliques :

#### I-3-3-1- Masse volumique :

La masse volumique de l'eau est notée  $\rho_w$  et vaut  $1000 \text{ kg/m}^3$  dans le cas de l'eau sans matières en suspension. [7]

**I-3-3-2- Poids volumique :**

Le poids volumique de l'eau est noté  $\gamma_w = g \cdot \rho_w$ , et vaut  $9,81 \text{ kN/m}^3$  pour de l'eau sans matières en suspension.  $g$  désigne l'accélération de la pesanteur et vaut  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

**I-3-3-3- Débit :**

Le débit ( $Q$ ) est le volume d'eau qui traverse une section perpendiculaire à l'axe du chenal par unité de temps. [7]

**I-3-3-4- Vitesse en un point de l'écoulement :**

Par définition, la vitesse ( $v$ ) en un point de l'écoulement est celle de la particule qui passe en ce point au moment considéré. [7]

**I-3-3-5- Vitesse moyenne :**

La vitesse moyenne est par définition  $V = Q/S$ , c'est-à-dire  $V = \frac{\iint v \cdot ds}{S}$ ,  $ds$  désignant un élément de surface ( $S = \iint ds$ ). [7]

**I-3-3-6- Ligne de courant :**

Une ligne de courant est une courbe tangente en chacun de ses points  $P$  à la vectrice vitesse en ce point.

En écoulement non permanent, la vitesse  $v$  au point  $P$  évolue dans le temps ; les lignes de courant se déforment donc avec le temps. En écoulement permanent, les lignes de courant ne se déforment pas et constituent des trajectoires de particules d'eau. Le profil de la surface libre est une ligne de courant particulière. [7]

**I-3-3-7- Tube de courant :**

Un tube de courant est le volume délimité par les lignes de courant qui s'appuient sur un contour fermé

**I-3-3-8- Pression hydrostatique en un point :**

Dans un liquide au repos,  $z + \frac{p}{\gamma_w}$  est constant.  $p$  désigne la pression appliquée à une facette

passant par le point considéré et ne dépend pas de l'orientation de cette facette. Elle s'exprime en Pascal (symbole Pa ou N/m<sup>2</sup>). Dans ce qui suit,  $p$  désignera la pression relative (autrement dit, en surface d'un liquide  $p = 0$ ). A une profondeur  $h$  sous la surface libre,  $p = h \cdot \gamma_w$  [7]

### I-3-3-9- Charge hydraulique en un point d'un liquide en mouvement :

Par définition, la charge hydraulique en un point  $P$  d'une ligne de courant est la valeur  $H_p = z_p + \frac{p}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g}$  où  $z_p$  est la cote du point,  $p$  la pression en ce point,  $v$  la vitesse au point  $P$ . Si  $\Delta z$  désigne la différence d'altitude entre le point  $P$  et la surface libre, la pression (relative) en  $P$  est

$p = \gamma_w \cdot \Delta z$  (Figure 1-4). Si  $y_p$  désigne la distance du point  $P$  à la surface et si  $\alpha$  désigne l'angle du fond avec l'horizontale,  $y_p = \Delta z / \cos \alpha$ .

Donc  $P = \gamma_w \cdot y_p / \cos \alpha$ . Dans les problèmes courants de rivières ou de canaux, la pente est très faible (quelques ‰ à quelques %) et  $\cos \alpha \approx 1$ .

D'où :  $p = \gamma_w \cdot y_p$ , comme pour un problème hydrostatique. Donc, en hydraulique à surface libre et pour une pente faible, la charge en un point vaut aussi :  $H_p = z_p + y_p + v^2/2g$ .

Jusqu'à un angle de 8°, c'est à dire une pente de 14%, l'erreur due à cette approximation n'est que de 1%. [7]

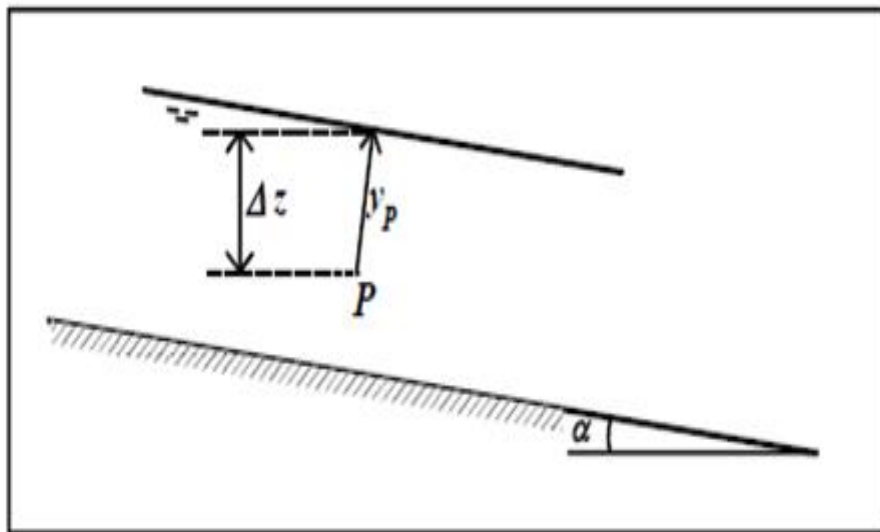


Figure I-4 : pression en un point  $p = \gamma_w \cdot \Delta z$

**I-3-3-10- Charge moyenne dans une section :**

En intégrant  $H_p = z_p + y_p + v^2/2g$ . Dans une section, il vient :  $H = z_f + y + \beta v^2/2g$ , où  $z_f$  désigne la côte du fond et  $y$  le tirant d'eau pour la section. Le coefficient  $\beta$  vaut 1 si la répartition des vitesses dans la section est uniforme. Sa formulation est :  $\beta = \frac{\iint v^3 ds}{v^3 \cdot S}$ . Enrivière,  $\beta$  est généralement compris entre 1 et 1,2. Par la suite, c'est cette charge moyenne que nous utiliserons.

**I-3-3-11- Ligne piézométrique :**

C'est par définition le lieu de  $z_p + \frac{p}{\gamma_w}$  lorsque  $P$  décrit une ligne de courant. Or l'éloignement de  $P$  à la surface libre mesuré verticalement est  $\frac{p}{\cos \alpha \cdot \gamma_w}$ . Si la pente est faible, cet éloignement est pratiquement égal à  $\frac{p}{\gamma_w}$  (Figure I-5). [7]

La ligne piézométrique coïncide avec la surface libre dans un écoulement à surface libre à faible pente.

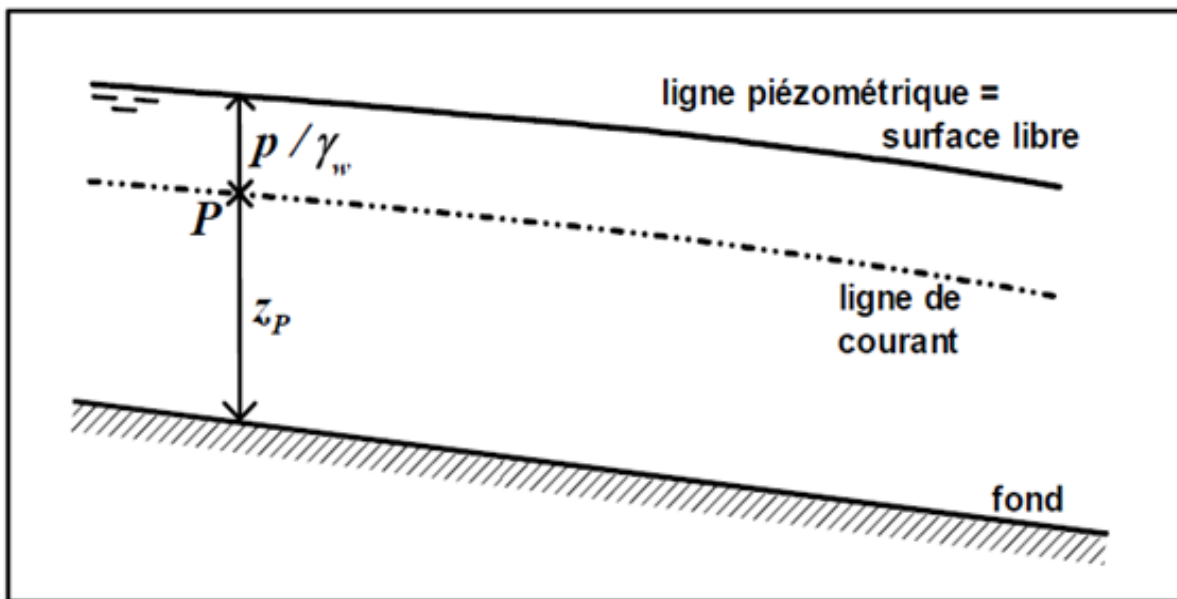


Figure I-5 : Ligne piézométrique

**I-4- Types d'écoulements :**

On peut définir les écoulements suivants la variabilité des caractéristiques hydrauliques tels que le tirant d'eau et la vitesse en fonction du temps et de l'espace. [3]



### I-4-1- Variabilité dans le temps

Le mouvement est permanent (ou stationnaire) si les vitesses  $U$  et la profondeur  $h$  restent invariables dans le temps en grandeur et en direction. Le mouvement est non permanent dans le cas contraire.

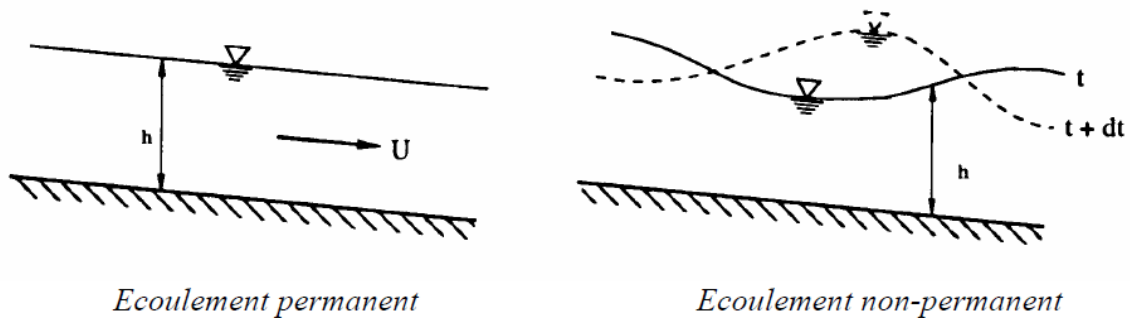


Figure I-6 : Schéma des écoulements permanent et non permanent

Au sens strict, l'écoulement dans les canaux est rarement permanent. Néanmoins les variations temporelles sont, dans certains cas, suffisamment lentes pour que l'écoulement puisse être considéré comme une succession de régime permanent. On peut alors définir ainsi le régime quasi-permanent (Figure I-6). [3]

### I-4-2- Variabilité dans l'espace :

Le mouvement est uniforme si les paramètres caractérisant l'écoulement restent invariables dans les diverses sections du canal. La ligne de la pente du fond est donc parallèle à la ligne de la surface libre.

Le mouvement est non-uniforme ou varié si les paramètres caractérisant l'écoulement changent d'une section à l'autre. La pente de la surface libre diffère de celle du fond.

Un écoulement non-uniforme peut être accéléré ou décéléré suivant que la vitesse croît ou décroît dans le sens du mouvement.

Lorsque le mouvement est graduellement varié, la profondeur ainsi que les autres paramètres varient lentement d'une section à l'autre.

Lorsque le mouvement est rapidement varié, les paramètres caractérisant l'écoulement changent brusquement, parfois avec des discontinuités. Cela se manifeste en général au voisinage d'une singularité, telle qu'un seuil, un rétrécissement, un ressaut hydraulique ou une chute brusque. [3]

**I-4-3- Ecoulement permanent :**

L'écoulement de liquide est dit permanent lorsque les propriétés du fluide et les caractéristiques hydrauliques de celui-ci restent invariables dans le temps, c'est à dire :

$$\frac{\partial U}{\partial t} = 0, \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

U : vitesse d'écoulement.

P : la pression.

$\rho$  : masse volumique.

**I-4-5- Ecoulement non permanent :**

L'écoulement du liquide est dit non permanent si la vitesse et la pression varient dans le temps (t) en un point donné de l'espace (x) rempli de liquide en mouvement, les vitesses et les pressions en écoulement non permanent sont les fonctions de quatre variables indépendantes à savoir : coordonnées (x, y, z) du point examiné et le temps (t). [4]

**I-4-6- Ecoulement uniforme :**

Un écoulement est dit uniforme lorsque la vitesse du fluide à un instant donné, à une même direction et une même intensité en tous points de ce fluide  $\frac{\partial U}{\partial x} \neq 0$ .

**I-4-7- Ecoulement non uniforme :**

Un écoulement est dit non uniforme si la vitesse du fluide varie d'une section à l'autre c'est-à-dire  $\frac{\partial U}{\partial x} \neq 0$ . [4]

**I-4-8- Ecoulement transitoire :**

On appelle régime transitoire, un phénomène qui se manifeste entre deux régimes stationnaires, autrement dit c'est un écoulement varié, où les paramètres hydrauliques changent :

$$\frac{\partial U}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial P}{\partial t} \neq 0, \frac{\partial P}{\partial X} \neq 0, \frac{\partial U}{\partial X} \neq 0$$

Il peut se produire soit dans un canal à ciel ouvert, soit dans une conduite à écoulement en charge par accroissement ou décroissement du débit.

L'écoulement du liquide s'appelle non permanent si la vitesse et la pression varient dans le temps ( $t$ ) en point donné de l'espace rempli de liquide en mouvement.

Les vitesses et les pressions en mouvement non permanent sont les fonctions de quatre variables indépendantes : coordonnées  $x, y, z$  du point examiné et le temps ( $t$ ).

On distingue un écoulement non permanent en charge et à surface libre, un écoulement non permanent unidimensionnel, bidimensionnel et tridimensionnel.

Un exemple de l'écoulement non permanent unidimensionnel en charge du liquide est un écoulement non permanent apparaissant par suite de la variation du régime de service des dispositifs régulateurs installés sur les tuyauteries. [4]

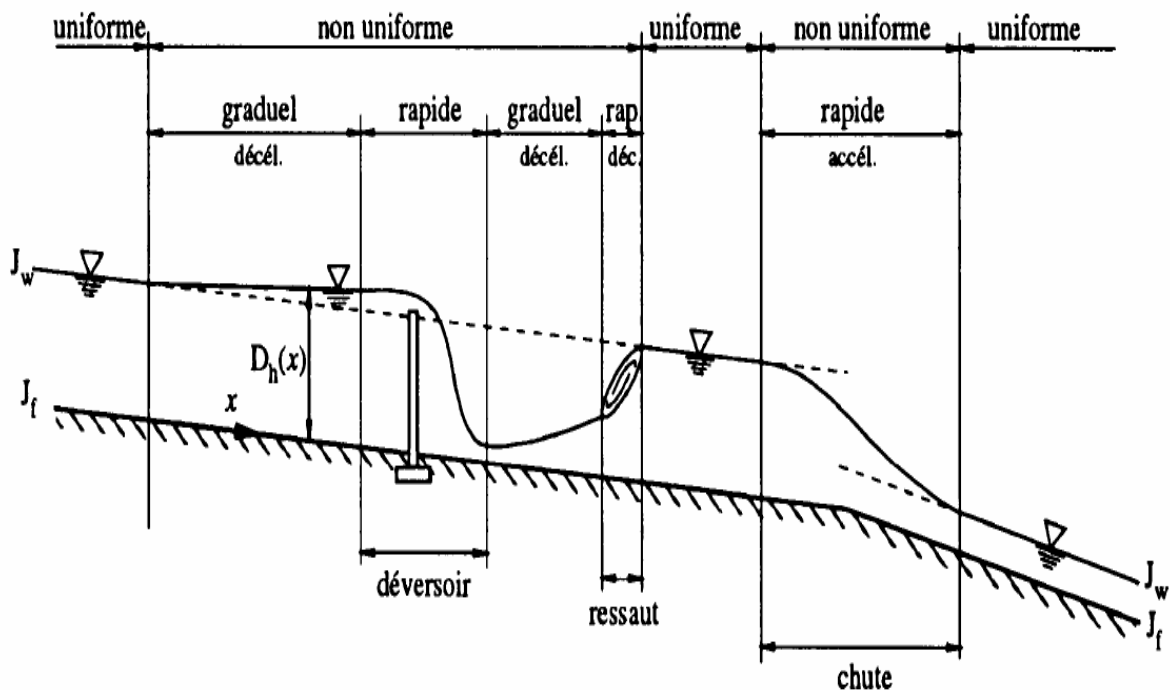


Figure I-7 : schéma représente les différents régimes

#### I-4-9- Ecoulement avec ondes :

##### I-4-9-a- Célérité d'onde

La célérité d'onde est la vitesse de l'onde par rapport au niveau normal du liquide dans le canal. Considérons un canal rectangulaire de profondeur uniforme avec une pression constante à la surface libre et des amplitudes faible. Considérons que la surface libre est soumise à un déplacement périodique au cours du temps à une onde bidimensionnelle et progressive soit dans

la direction  $x^+$  (sens positif de l'écoulement), soit dans la direction  $x^-$  (sens négatif de l'écoulement). C'est la célérité d'onde de forte amplitude :

$$C^2 = g.D_h \quad (\text{Canal rempli d'eau au repos}). [5]$$

Selon l'expression précédente de  $C$ , la célérité peut avoir deux valeurs égales en valeurs absolues. Cela indique tout simplement que la propagation de l'onde peut s'effectuer dans deux directions opposées  $x^+$  et  $x^-$ .

La relation  $C^2 = g.D_h$  reste valable dans le cas où l'eau serait en mouvement ; ou on observe la superposition de l'onde au courant de l'écoulement. Par conséquent, la célérité générée par cette superposition est donnée par :

$$C_w = V + C$$

Appelée célérité absolu. Elle représente la vitesse par rapport au fond du canal ; elle a deux valeurs :

$$C' = V + \sqrt{g.D_h}$$

$$C'' = V - \sqrt{g.D_h}$$

$V$  : la vitesse d'écoulement dans le canal.

### **I-5- Régime fluvial ou torrentiel :**

#### **I-5-1- Le phénomène physique :**

Supposons un canal à section constante, à pente constante et avec une hauteur  $h$  et un débit constant  $Q$ . On crée une perturbation grâce à une vanne que l'on ferme et que l'on ouvre très rapidement (Figure I-8). [8]

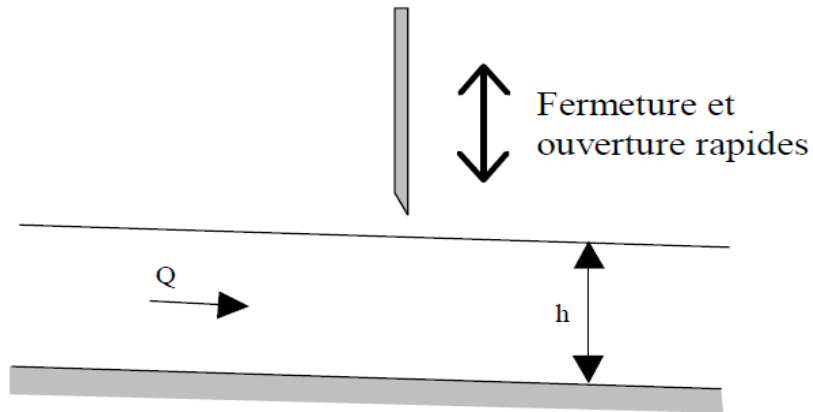


Figure I-8 : Schéma de fermeture et ouverture rapides de vanne

Au niveau de la surface libre, il se crée deux ondes (ondes de gravité). L'une se propage toujours vers l'aval et l'autre se propage vers l'amont si la vitesse dans le canal est inférieure à la vitesse de l'onde de gravité ; elle s'oriente vers l'aval dans le cas contraire.

#### I-5-2- Régime fluvial ( $V < C$ ) :

L'onde avec la célérité  $C''$  se propage vers l'aval et l'onde  $C'_w$  se propage vers l'amont. [8]

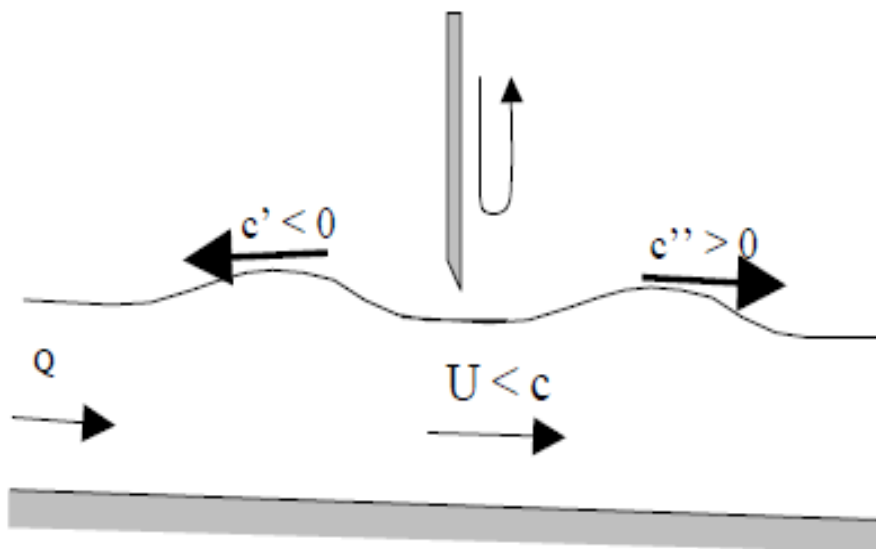


Figure I-9 : Représentation schématisque des deux valeurs de l'onde (le cas fluvial)

#### I-5-3- Régime torrentiel ( $V > C$ ) :

Les deux ondes se propagent vers l'aval.

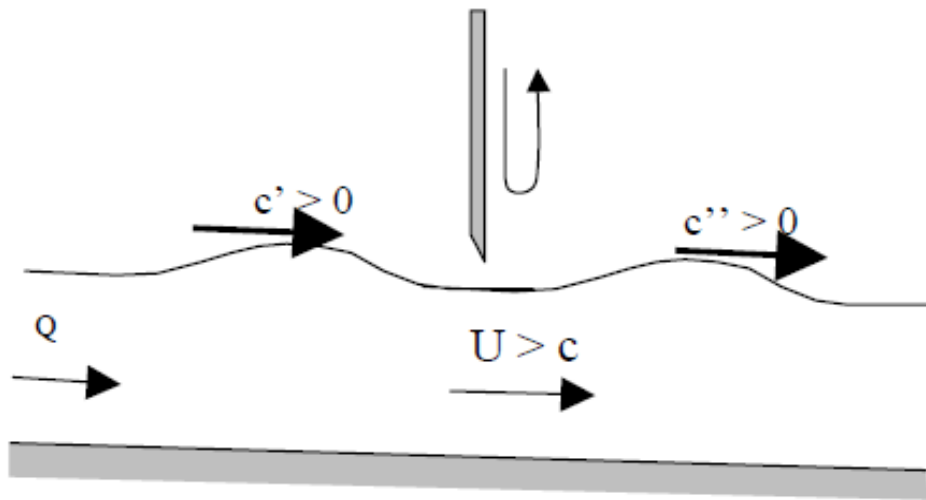


Figure I-10 : représentation schématiques des deux valeurs de l'onde (le cas torrentiel)

#### I-5-4- Régime critique ( $V=C$ ) :

L'onde avec la célérité  $C'_w$  se propage vers l'aval et l'onde avec la célérité  $C''_w$  reste stationnaire. [8]

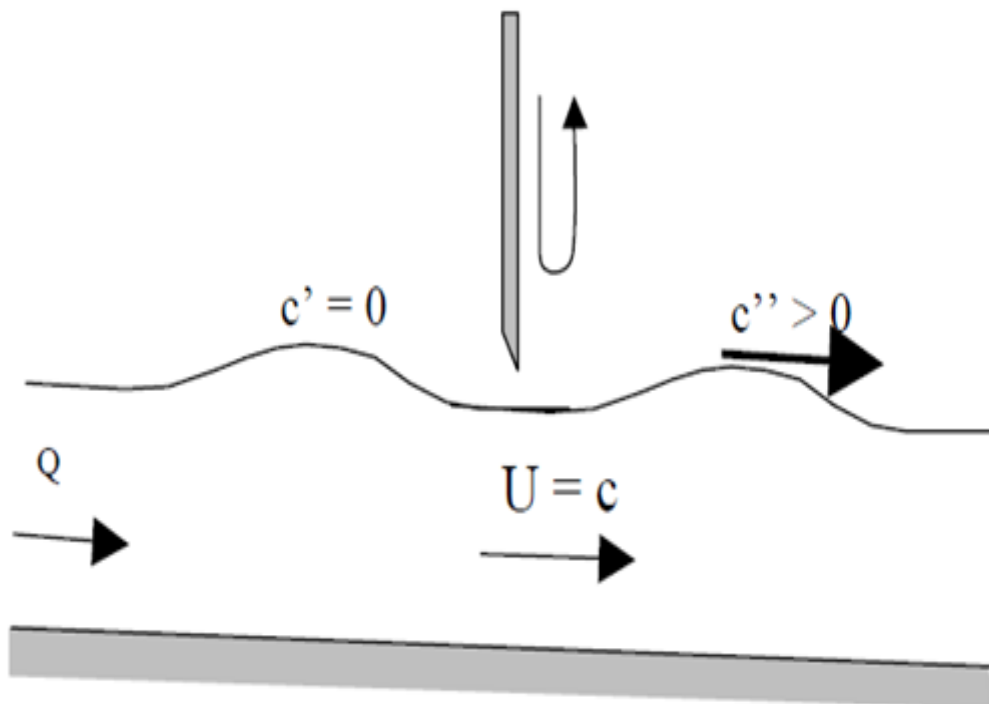


Figure I-11 : représentation schématiques des deux valeurs de l'onde (le cas critique)

$U$  : vitesse de l'écoulement.

$C$  : célérité des ondes.

$C'$  : vitesse de l'onde amont.

$C''$  : vitesse de l'onde aval.

$Q$  : débit d'eau.

$h$  : profondeur d'eau.

**I-6- Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les différents types d'écoulements à surface libre, ainsi quels paramètres hydrauliques qui caractérisent chaque régime d'écoulement. Nous avons donné une idée générale sur la distribution des vitesses dans un canal naturel. et le deuxième chapitre l'équation de Saint Venant.