



6.1 INTRODUCTION

La construction de ponceaux ou de toute autre structure hydraulique dans un cours d'eau amène une modification du régime d'écoulement en amont de la structure. Si l'écoulement dans la structure peut être rapidement modifié, l'écoulement en amont y est graduellement modifié sur une certaine distance pour redevenir uniforme si la distance est suffisamment grande. La profondeur d'écoulement est variable et la courbe représentant la profondeur d'écoulement est communément appelée "***courbe de remous***".

6.2 CONCEPTS DE BASE

La courbe de remous se calcule à partir de l'équation de l'énergie qui s'exprime en un point ::

$$E = z + y + \alpha \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad [6.1]$$

E = énergie (L)

z = élévation du fond du cours d'eau par rapport au niveau de référence (L)

y = profondeur d'eau (L)

V = vitesse moyenne d'écoulement (L/T)

α = coefficient de répartition des vitesses (1.0 - 1.3)

g = constante d'accélération gravitationnelle (L/T²)

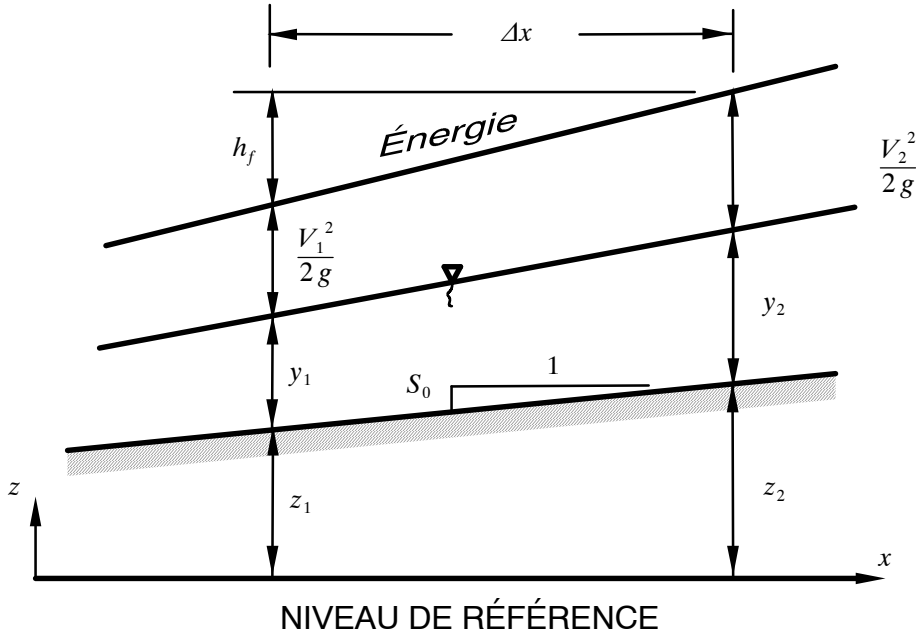


Figure 6.1 Répartition de l'énergie dans un écoulement graduellement modifié.

Lorsque la pente est faible, la variation d'énergie entre deux points peut s'exprimer sous forme de différence :

$$\frac{E_2 - E_1}{\Delta x} = \frac{z_2 - z_1}{\Delta x} + \frac{y_2 - y_1}{\Delta x} + \frac{1}{\Delta x} \frac{\alpha}{2g} (\bar{V}_2^2 - \bar{V}_1^2) \quad [6.2]$$

ou de dérivée :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dy}{dx} + \frac{d}{dx} \left(\alpha \frac{\bar{V}^2}{2g} \right) \quad [6.3]$$

La variation du niveau d'énergie est due à la perte de charge par friction h_f et correspond à la pente de la ligne d'énergie (S_f) :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{h_f}{\Delta x} = S_f \quad [6.4]$$

La variation de la cote z du fond du cours d'eau correspond à la pente du fond du cours d'eau (S_0) :

$$\frac{dz}{dx} = S_0 \quad [6.5]$$

Dans l'équation [6.3], la vitesse peut être exprimée en terme du débit Q et de la section d'écoulement $A(y)$ qui est fonction de la profondeur d'écoulement :

$$V = \frac{Q}{A(y)} \quad [6.6]$$

$$\frac{d V^2}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{Q^2}{A^2(y)} \right) = Q^2 \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{A^2(y)} \right) \quad [6.7]$$

$$\frac{d V^2}{dx} = Q^2 \left(\frac{-2}{A^3(y)} \right) \frac{dA(y)}{dy} \frac{dy}{dx} \quad [6.8]$$

$$\frac{d V^2}{dx} = - \frac{2 Q^2}{A^3(y)} \frac{dA(y)}{dy} \frac{dy}{dx} \quad [6.9]$$

Après substitution et en considérant $\alpha = 1.0$, l'équation [6.3] s'écrit :

$$S_f = S_o + \frac{dy}{dx} - \frac{Q^2}{g A^3(y)} \frac{dA(y)}{dy} \frac{dy}{dx} \quad [6.10]$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{S_f - S_o}{1 - \frac{Q^2}{g A^3(y)} \frac{dA(y)}{dy}} \quad [6.11]$$

Cette dernière équation est l'équation générale qui permet de déterminer la courbe de remous.

6.3 FRICTION

En considérant que la friction est uniquement fonction de la vitesse moyenne dans la section et que l'écoulement peut être considéré comme uniforme dans cette section infinité décimale, la perte d'énergie par friction peut être estimée par n'importe laquelle des équations de l'écoulement uniforme. En utilisant l'équation de Manning :

$$V = \frac{1}{n} R h^{2/3} S_f^{1/2} \quad [6.12]$$

$$S_f = \frac{V^2 n^2}{R_h^{4/3}} = \frac{Q^2 n^2}{A^2(y) R_h^{4/3}} \quad [6.13]$$

L'équation [6.11] s'écrit alors :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{Q^2 n^2}{A^2(y) R_h^{4/3}} - S_o}{1 - \frac{Q^2}{g A^3(y)} \frac{dA(y)}{dy}} \quad [6.14]$$

6.4 CANAL TRAPÉZOÏDAL

Dans le cas du canal trapézoïdal, qui est le cas le plus fréquent, les paramètres suivants peuvent être définis :

$$A(y) = (b + z y) y = b y + z y^2 \quad [6.15]$$

$$P(y) = b + 2 y \sqrt{1 + z^2} \quad [6.16]$$

$$R_h = \frac{A(y)}{P(y)} = \frac{(b + z y) y}{b + 2 y \sqrt{1 + z^2}} \quad [6.17]$$

$$S_f = f_1(y) = \frac{Q^2 n^2}{A^2(y) R_h^{4/3}} = \frac{Q^2 n^2 (b + 2 y \sqrt{1 + z^2})^{4/3}}{[(b + z y) y]^{10/3}} \quad [6.18]$$

$$\frac{dA(y)}{dy} = b + 2 z y \quad [6.19]$$

$$f_2(y) = \frac{Q^2}{g A^3(y)} \frac{dA(y)}{dy} = \frac{Q^2 (b + 2 z y)}{[(b + z y) y]^3} \quad [6.20]$$

Après substitution, l'équation [6.14] s'écrit :

$$\frac{dy}{dx} = \frac{f_1(y) - S_o}{1 - f_2(y)} \quad [6.21]$$

6.5 CALCUL DE LA COURBE DE REMOUS

À partir de l'équation d'Euler explicite, la courbe de remous peut être calculée par différences finies en connaissant la profondeur d'eau en une section de référence.

$$y_{x+\Delta x} = y_x + \Delta x \left. \frac{dy}{dx} \right|_x \quad [6.22]$$

$$y_{x+\Delta x} = y_x + \Delta x \left[\frac{f_1(y_x) - S_o}{1 - f_2(y_x)} \right] \quad [6.23]$$

Pour améliorer la prédiction, une correction est effectuée en utilisant la méthode de Crank-Nicholson modifiée :

$$y'_{x+\Delta x} = y_x + \Delta x \left[\alpha \left. \frac{dy}{dx} \right|_x + (1 - \alpha) \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x+\Delta x} \right] \quad [6.24]$$

Lorsque $\alpha = 0,5$,

$$y'_{x+\Delta x} = y_x + \Delta x \left[\frac{\frac{f_1(y_x) + f_1(y_x + \Delta x)}{2} - S_o}{1 - \frac{f_2(y_x) + f_2(y_x + \Delta x)}{2}} \right] \quad [6.25]$$

Dans le cas des écoulements en régime fluvial, la courbe de remous est calculée de l'aval vers l'amont. Lorsque l'écoulement est torrentiel, la courbe de remous est calculée de l'amont vers l'aval.

6.6 EXEMPLE DE COURBE DE REMOUS

La figure 6.2 présente les différentes courbes de remous et les vitesses à l'amont de la crête du déversoir d'un seuil dissipateur d'énergie en fonction du type de déversoir (rectangulaire, trapézoïdal, sans restriction - seuil épais) installé au-dessus de la crête. L'utilisation d'un seuil sans restriction amène une augmentation de la vitesse d'écoulement à l'approche de la crête du seuil, vitesse qui dépasse la vitesse maximale. Le chapitre traitant des seuils dissipateurs d'énergie reprendra plus en détail les choix d'aménagement.

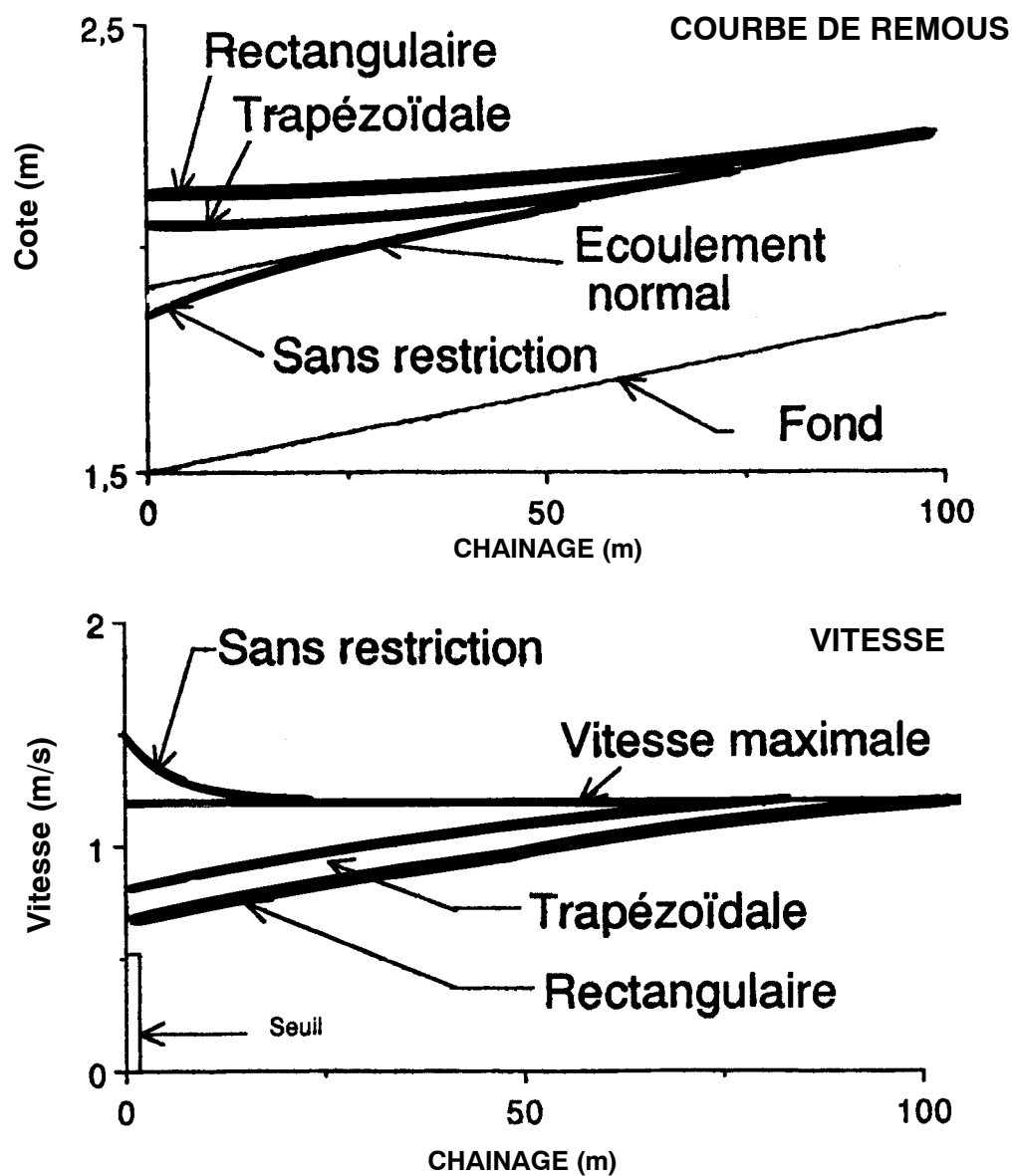


Figure 6.2 Courbes de remous et vitesses à l'amont de la crête d'un seuil dissipateur d'énergie en fonction du type de déversoir utilisé (rectangulaire, trapézoïdal, sans restriction - seuil épais).

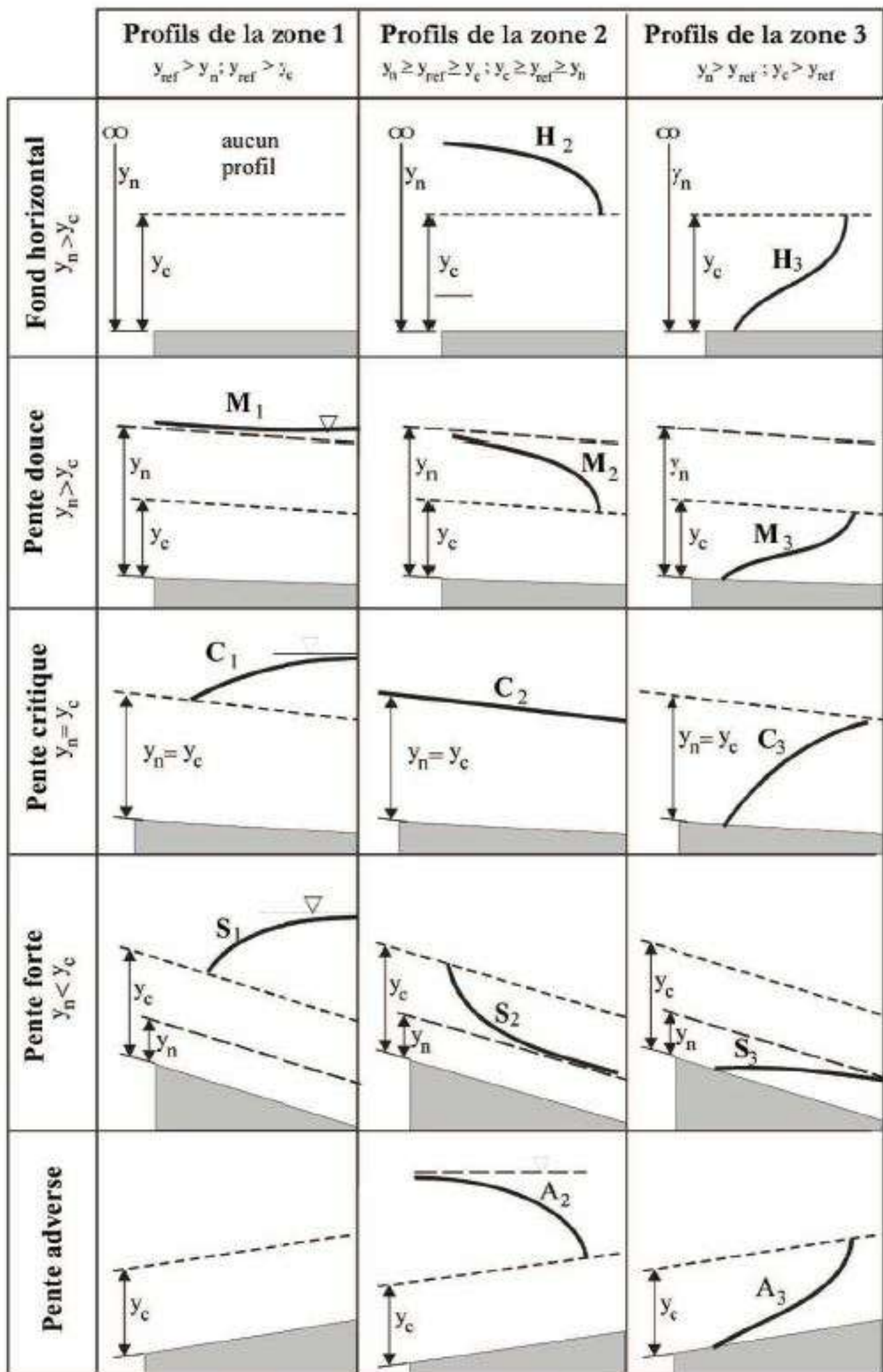


Fig. 5.26 Formes de la surface libre (y_{ref} = profondeur de référence)