

Applications à la métrologie fluviale

Ludovic CASSAN, Olivier THUAL (CC BY-SA)
INP-ENSEEIH, Hydraulique Mécanique des Fluides

Toulouse Tech Formation Professionnelle, décembre 2014

Plan

- 1 Ecoulements turbulents en rivières
- 2 Mesure de débit
- 3 Ouvrage hydraulique
- 4 Courbe de tarage
- 5 Crue et aménagements

Document de référence utilisés pour ce cours

Ouvrage

- [1] "hydraulique et hydrologie", S. Bennis. Disponible sur scholarvox.
<http://univ-toulouse.scholarvox.com/reader/index/docid/88801575/page/1>
- [2] "Hydrodynamique de l'environnement", O. Thual, Éditions de l'École Polytechnique, 2010
- [3] Contrôle des débits réglementaires, ONEMA-IRSTEA, Guide technique Police de l'eau

Cours

- Hydraulique à surface libre, C. Suzanne, ENSEEIHT.
- Ondes dans les écoulements environnementaux, O. Thual
<http://thual.perso.enseeiht.fr/xsee/index.htm>

Pourquoi mesurer un débit ?

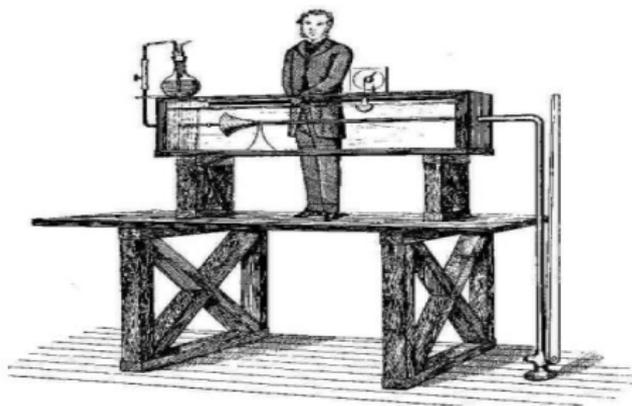
- Respect de la réglementation : débit minimum biologique (débit réservé, plancher...)
- Alerte de crues, utilisation de modèles
- Gestion d'étiage
- Qualité de l'eau, hydromorphologie

Pourquoi connaître les écoulements ?

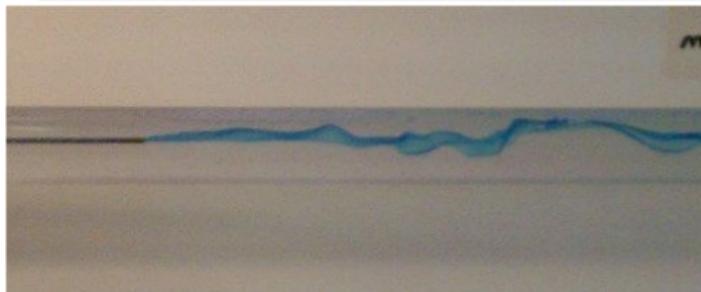
- Comprendre les bonnes pratiques de jaugeages
- S'adapter au cas particulier
- Interpréter les résultats

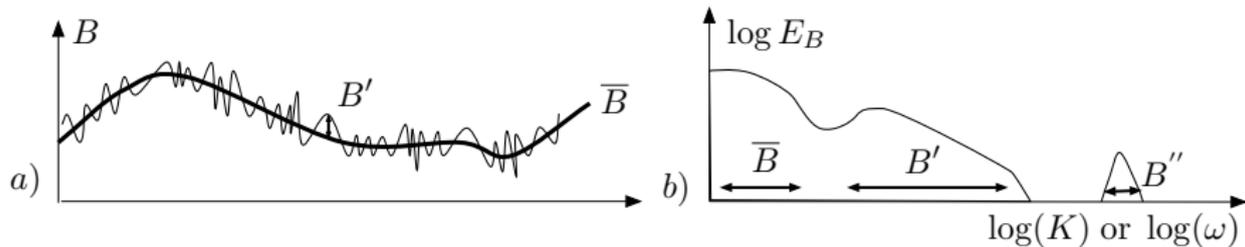
Plan

- 1 Ecoulements turbulents en rivières
 - Moyenne et fluctuations
 - Region externe
 - Frottement moyen
- 2 Mesure de débit
- 3 Ouvrage hydraulique
- 4 Courbe de tarage
- 5 Crue et aménagements

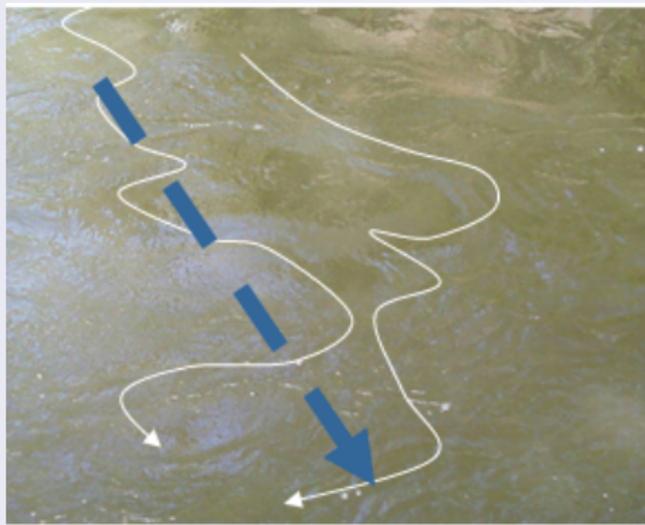


Expérience de Reynolds : $Re = UD/\nu$





$$B(\underline{x}, t) = \overline{B}(\underline{x}, t) + B'(\underline{x}, t)$$

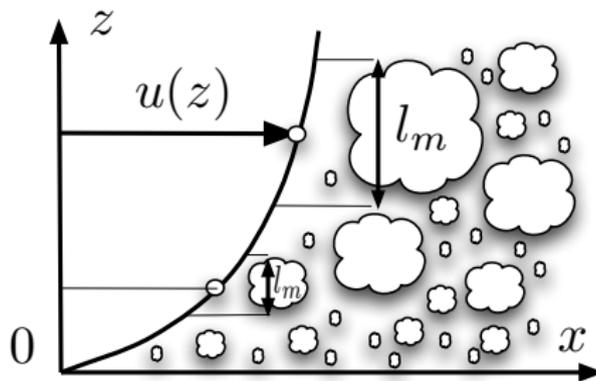


Pour un écoulement parallèle $\underline{\bar{U}} = \bar{u}(z) \underline{e}_x$:

$$\nu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \quad \text{et donc} \quad \overline{u'w'} = -\nu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$$

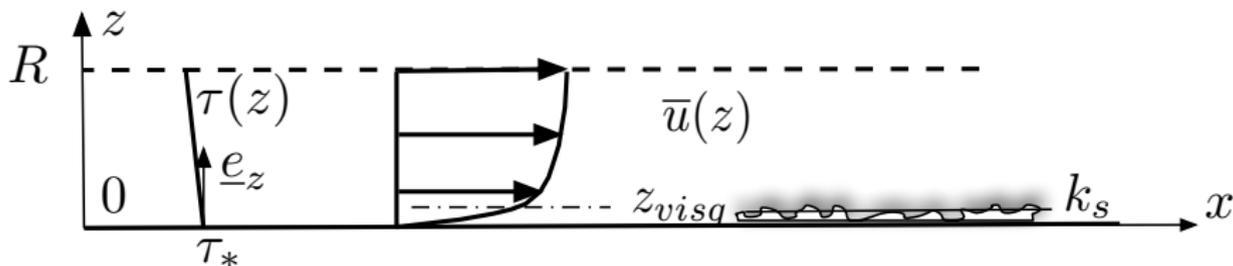
Longueur de mélange près d'un mur :

$$l_m = \kappa z \quad \text{avec} \quad \kappa = 0.41 \quad \text{constante de "Von Karman"}$$



Écoulement forcé par un gradient de pression constant G :

$$0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{u'w'} \right) \quad \text{et} \quad 0 = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} - g - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'w'})$$



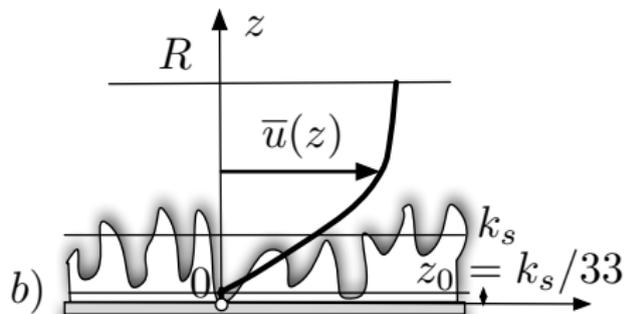
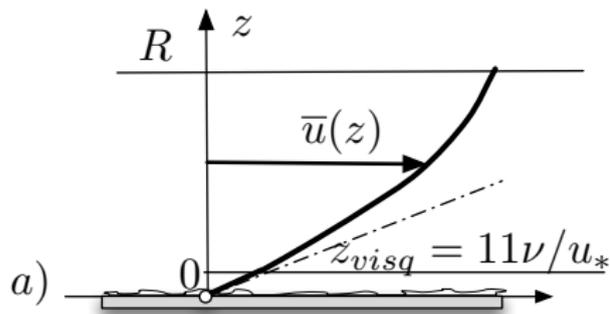
Contrainte tangentielle $\tau(z) = \rho \left(\nu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{u'w'} \right)$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = -G \quad \text{et} \quad \tau(z) = \tau_* - G z \sim \tau_* \quad \text{si} \quad R \ll \tau_*/G$$

$$\text{D'où} \quad \left(\nu + l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \right) \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = u_*^2 \quad \text{en définissant} \quad \tau_* = \rho u_*^2$$

Dans la couche où ν est négligeable :

$$\kappa^2 z^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = u_*^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{\delta} \right) + \zeta,$$



Lisse ($\frac{u_* k_s}{\nu} < 5$) :

$$z_{visq} = 11 \nu / u_*$$

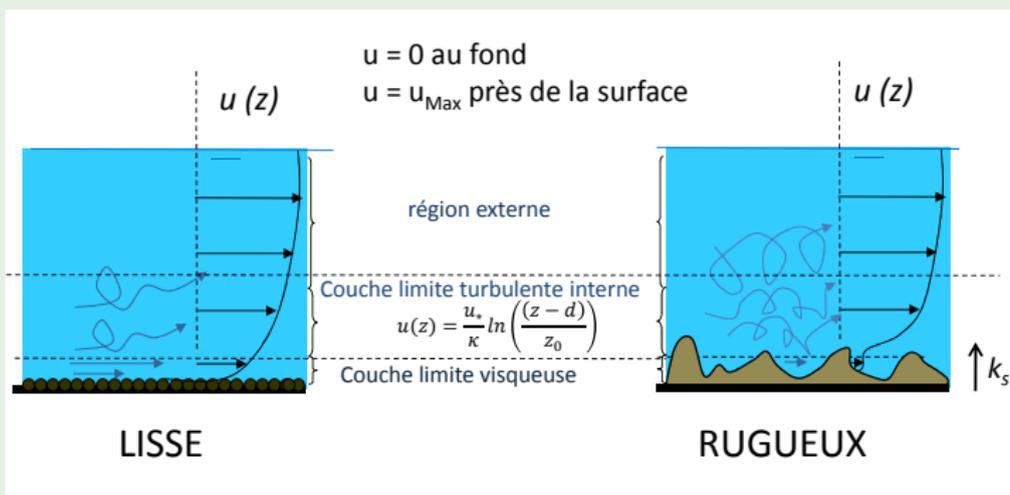
$$\frac{\bar{u}_{sth}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z u_*}{\nu} \right) + 5.2$$

Rugueux ($\frac{u_* k_s}{\nu} > 70$) :

$$z_0 = k_s/33$$

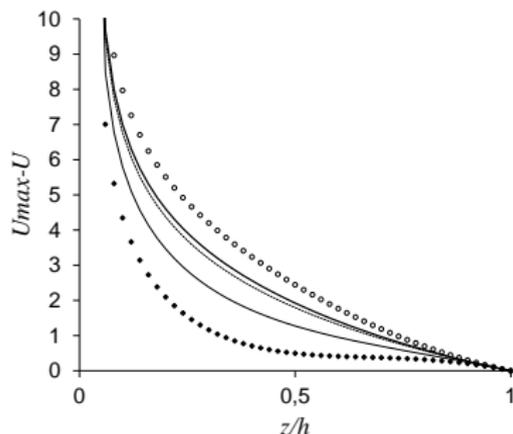
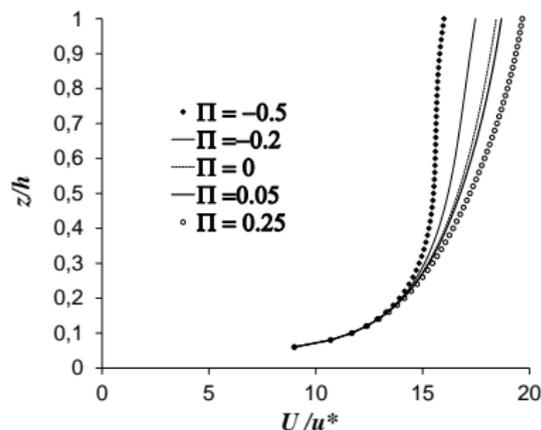
$$\frac{\bar{u}_{rgh}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s/33} \right) + 8.5$$

- Profil logarithmique jusqu'à $y/h \approx 0.3h$
- Indépendant de Fr et Re .



Loi déficitaire de Coles (1956)

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{\delta_{rgh}} \right) + \zeta_{rgh} + w(z)$$

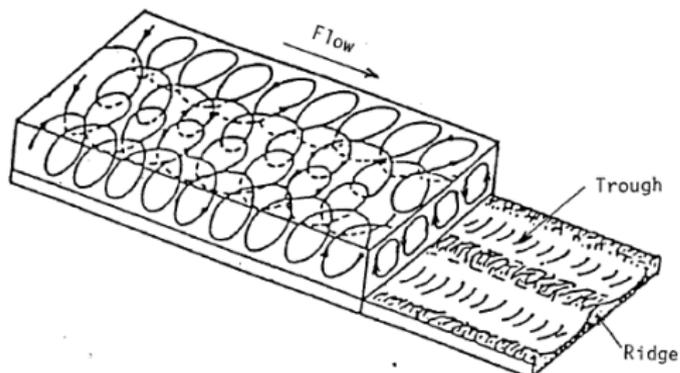
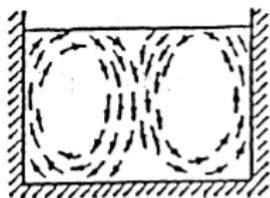


$$w(z) = \frac{2\pi}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi}{2} z \right)$$

$$\frac{\bar{u}_{max}}{u_*} - \frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{h} \right) + \zeta_{rgh} + w(z/h)$$

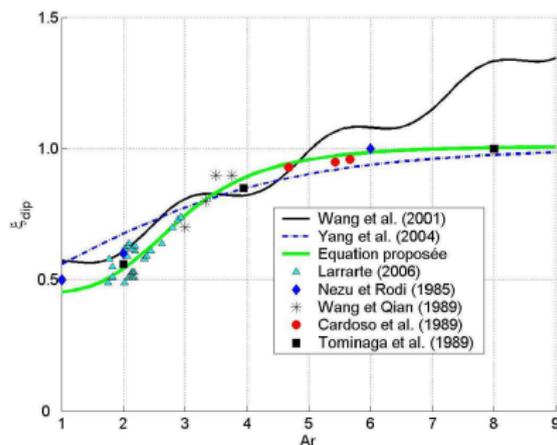
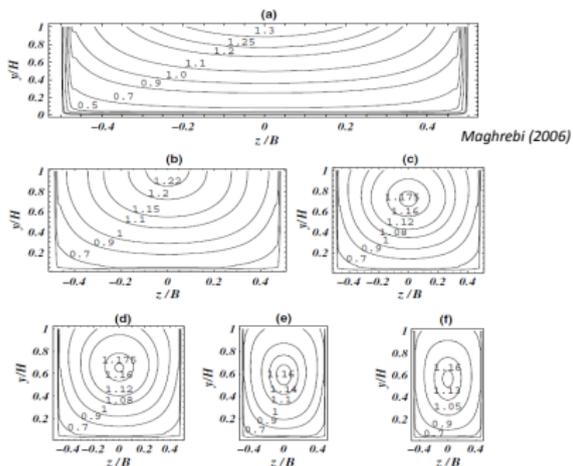
courants secondaires, équation de la vorticité

- Anisotropie de la turbulence
- Ecoulement sur rugosités inhomogènes
- Ecoulement dans des coudes



Dip phenomenon

Maximum des vitesses sous la surface libre, dépend des courants secondaires (et donc de $Ar = h/B$).

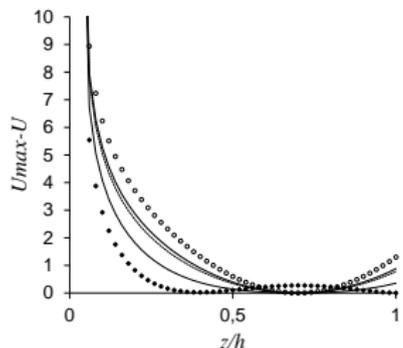
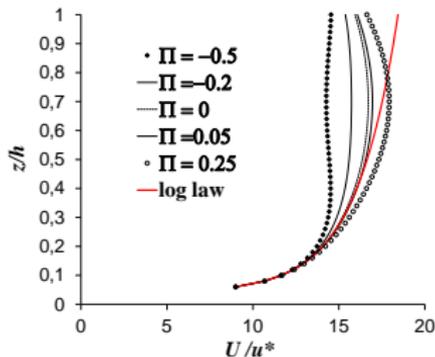


Modified Log-Wake Law (MLWL) : Guo, J. and Julien, P. (2008)

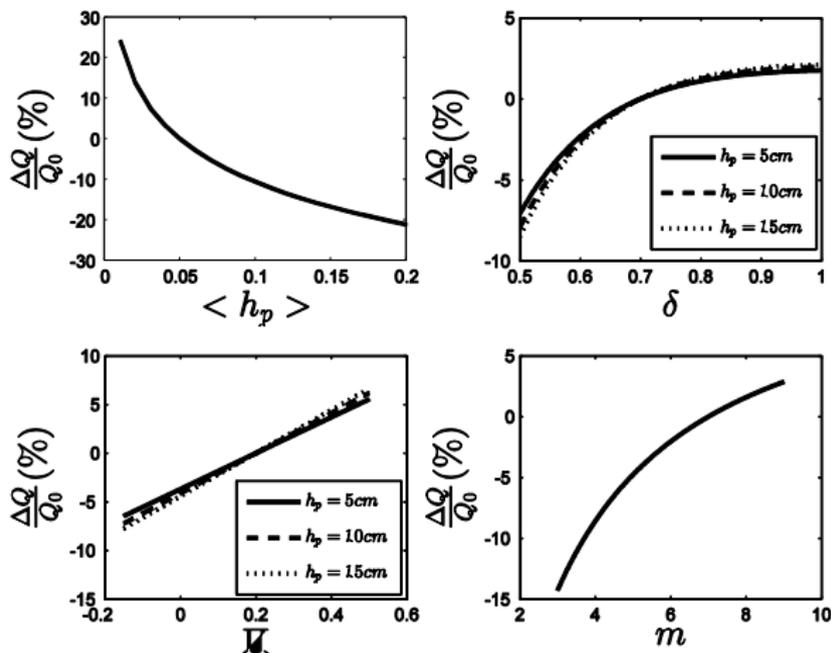
$$u = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) - \frac{1}{3} \frac{u^*}{\kappa} \left(\frac{z-d}{h_m-d} \right)^3 + \frac{2\Pi u^*}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi(z-d)}{2(h_m-d)} \right)$$

avec h_m position du maximum de vitesse.

- Maximum sous la surface
- Dérivée nulle à h_m



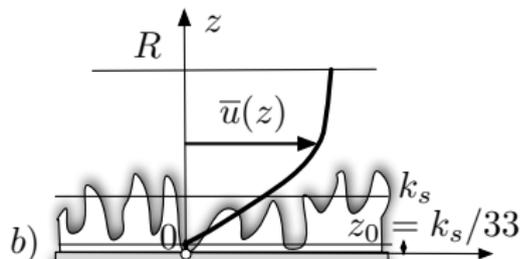
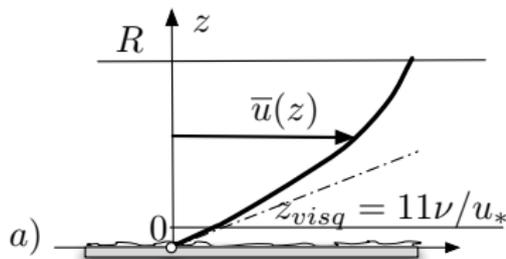
Sensibilité du débit aux paramètres



Moyenne sur la couche logarithmique (V) :

$$\frac{\bar{u}}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{\delta}\right) + \zeta \quad \text{et} \quad z_{visq} \sim 0 \quad \text{ou} \quad z_0 \sim 0$$

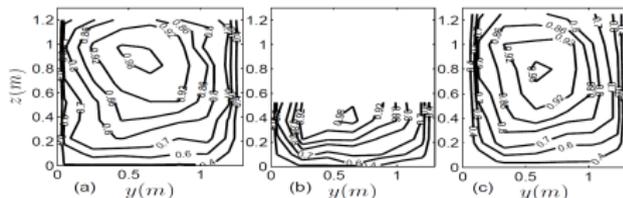
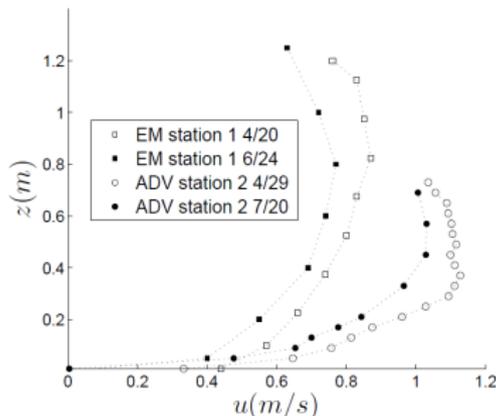
$$\Rightarrow \quad \frac{V}{u_*} = \frac{1}{R} \int_0^R \frac{\bar{u}}{u_*} dz = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{R}{\delta}\right) + \zeta - \frac{1}{\kappa}$$

Définition du coefficient de frottement λ :

$$\frac{V}{u_*} = \sqrt{\frac{8}{\lambda}} \quad \Leftrightarrow \quad \tau_* = \rho u_*^2 = \frac{1}{8} \lambda \rho V^2$$

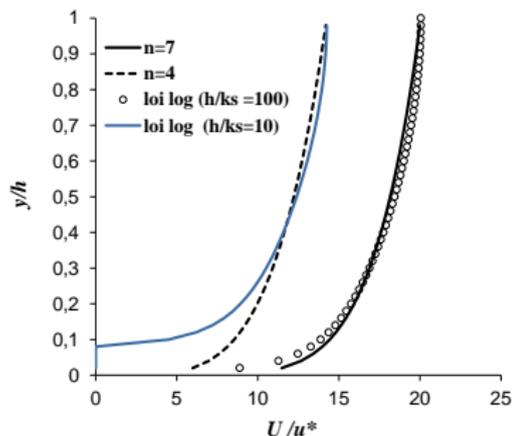
Influence de la rugosité

- Augmentation de la longueur de mélange et du gradient de vitesse.
- Déplacement de la hauteur de vitesse nulle.
- Evolution dans le temps



Profil exponentiel

- Utile quand une vitesse est mesurée
- Un seul paramètre
- Intégration plus facile
- Rugosité influence la valeur de n

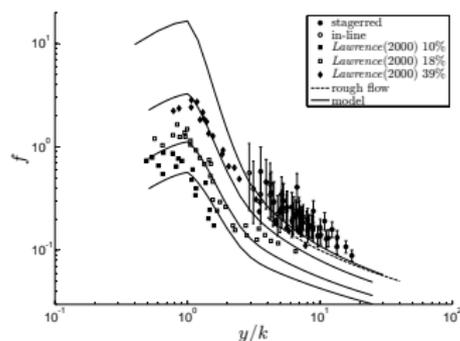
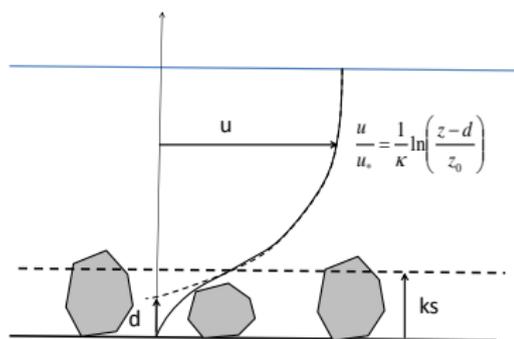


$$V = V_{max} \left(\frac{z}{h} \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)}$$

$$V = V_{moy} \left(\frac{1}{n} + 1 \right) \left(\frac{z}{h} \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)}$$

Faible submersion

- $f = \lambda$ dépend de la concentration en obstacles car z_0 et d peuvent alors varier.
- La vitesse à l'intérieur des rugosités n'est pas forcément nulle.
- Le profil de vitesse peut s'éloigner de l'hypothèse logarithmique



Utilisation de formules empiriques

Coefficient de non uniformité

Calcul

Coefficient de Bousinessq (qdm)

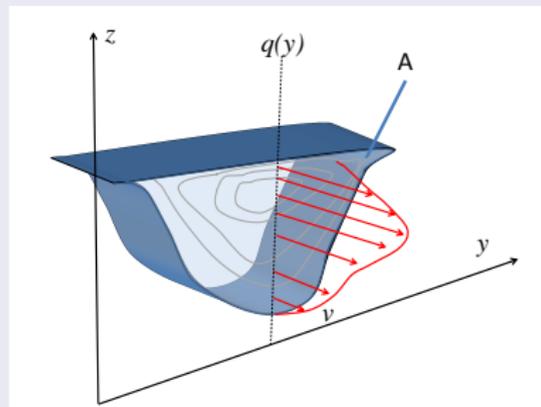
$$\beta = \frac{1}{V^2 A} \int_A v^2 dA$$

$$1 < \beta < 1,15$$

Coefficient de Coriolis (énergie)

$$\alpha = \frac{1}{V^3 A} \int_A v^3 dA$$

$$1 < \alpha < 1,25$$



Plan

- 1 Ecoulements turbulents en rivières
- 2 **Mesure de débit**
 - Mesure capacitive
 - Mesure par exploration du champs de vitesse
 - Dispositifs fixes
- 3 Ouvrage hydraulique
- 4 Courbe de tarage
- 5 Crue et aménagements

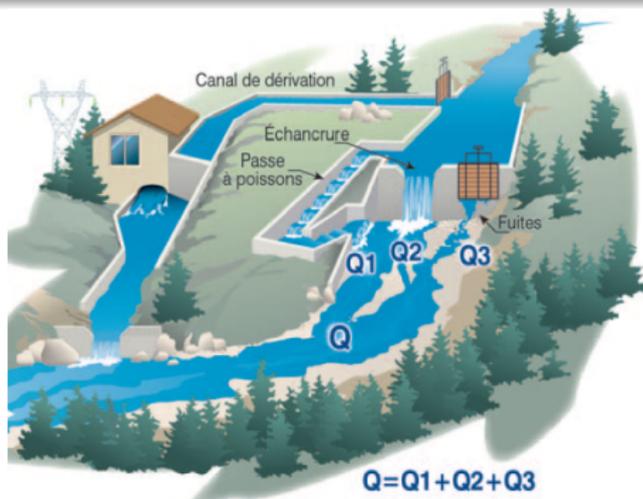
Généralités

Document de référence ONEMA-IRSTEA (source illustration)

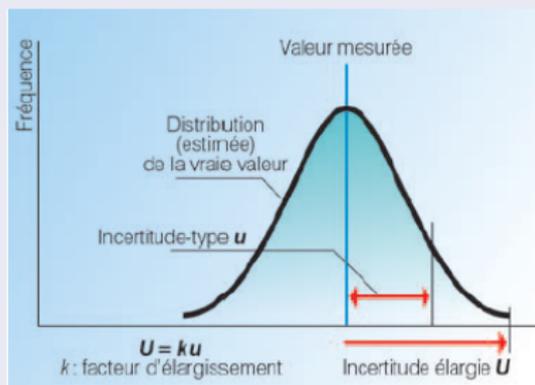
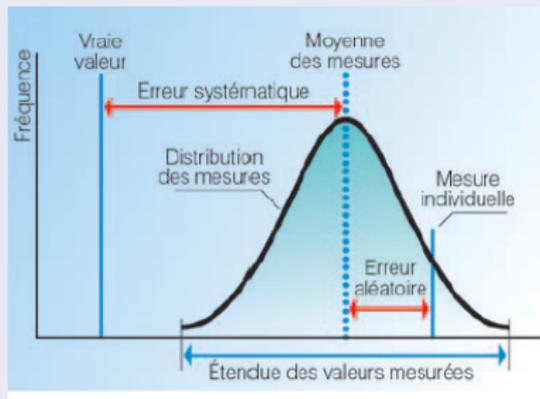


Contrôle des débits réglementaires

Application de l'article L. 214-18
du Code de l'environnement



Incertitude



$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$u_Q^2 = u_{Q1}^2 + u_{Q2}^2 + u_{Q3}^2$$

$$Q = CLh^{1,5}$$

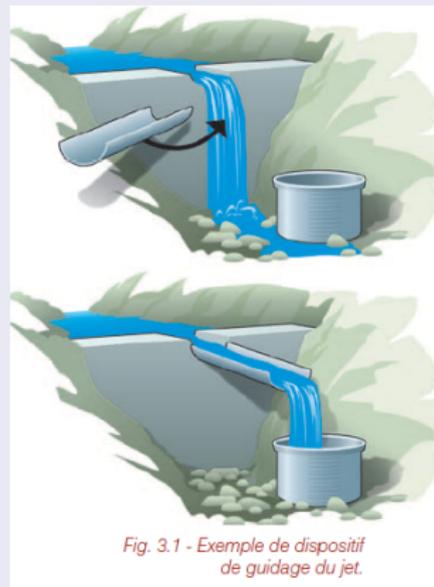
$$u_Q^2 = (u'_C)^2 + (u'_L)^2 + 1.5^2(u'_h)^2$$

Empotage

$$Q = \frac{Vol}{T}$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta Vol}{Vol} + \frac{\Delta T}{T}$$

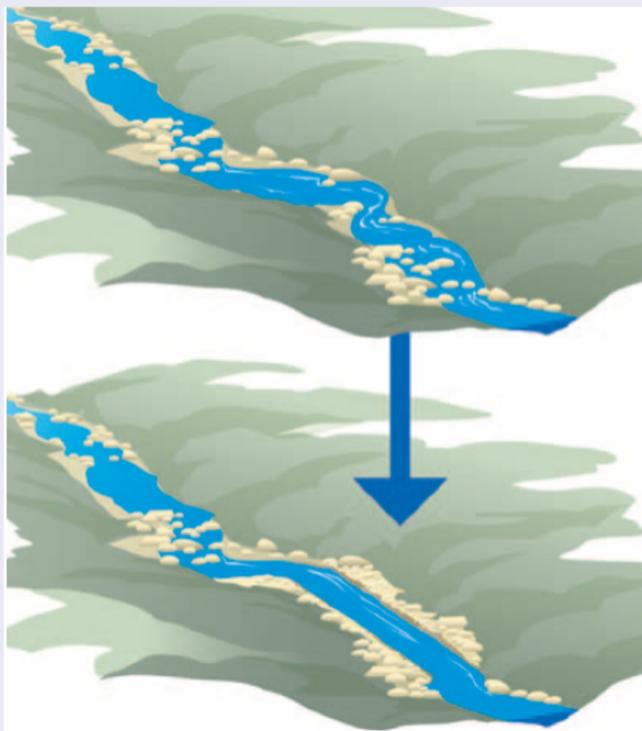
- On mesure un volume de remplissage V pendant une durée T .
- Le débit doit rester constant.
- L'incertitude est plus faible quand le V et T sont grands.



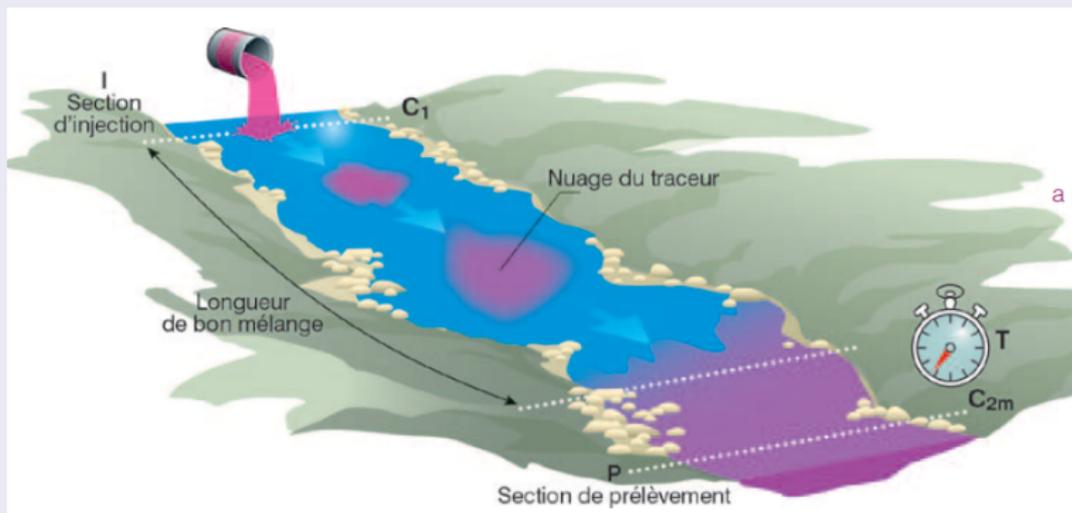
Précautions générales

Choix du site

- Portion la plus homogène possible
- Vitesses dans l'axe uniquement
- Pas de changement de section.
- Attention aux singularités du fond.



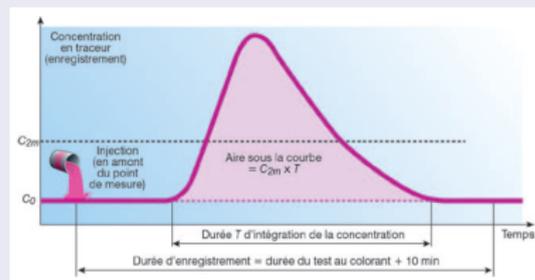
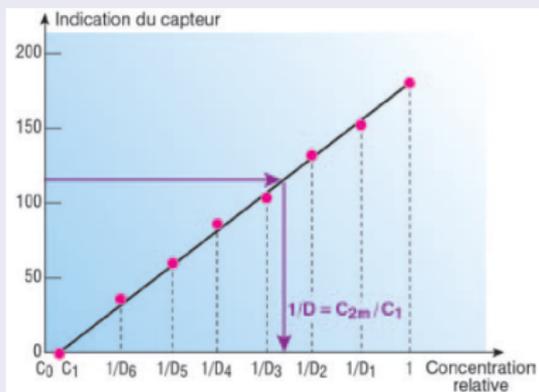
Dilution



- Mélange parfait
- Traceur coloré : rhodamine, Fluorescéine
- Solutions salées : suivi de la conductivité

Dilution

$$C_{injection} Q_{injection} = C_{prelevement} Q$$



Intégration du champs de vitesse

Principe

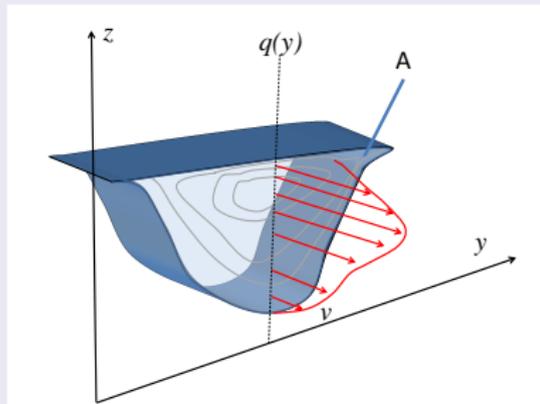
$$Q = \int_A v dA$$

Intégration verticale (débit unitaire)

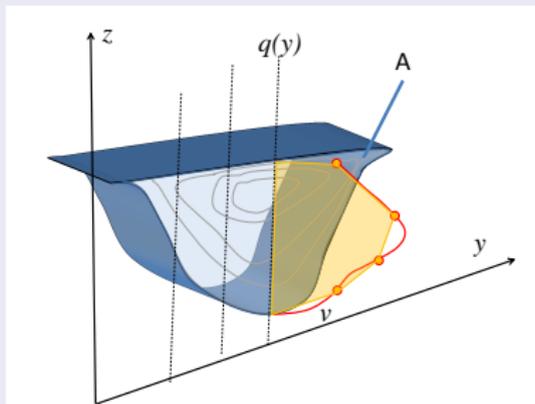
$$q(y) = \int_z v(y, z) dz$$

Puis intégration horizontale des différents débits unitaires ;

$$Q = \int_y q(y) dy$$

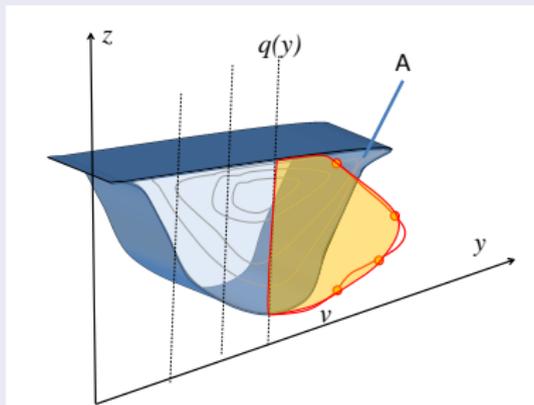


Intégration par trapèze



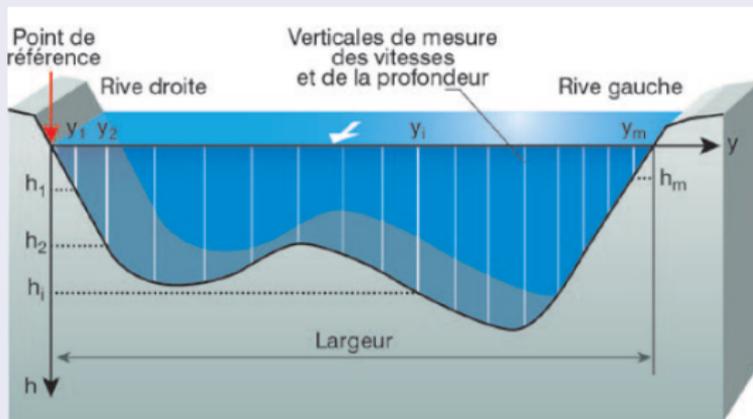
- Sous-estimation du débit avec peu de points.
- Rapide, sans hypothèses

Intégration par lissage



- Prise en compte des effets de bords
- Interpolation : loi puissance (ou exponentielle)

Précautions

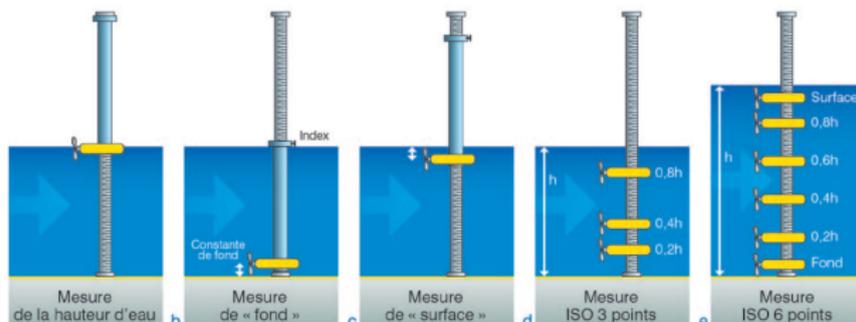


Nombre de points

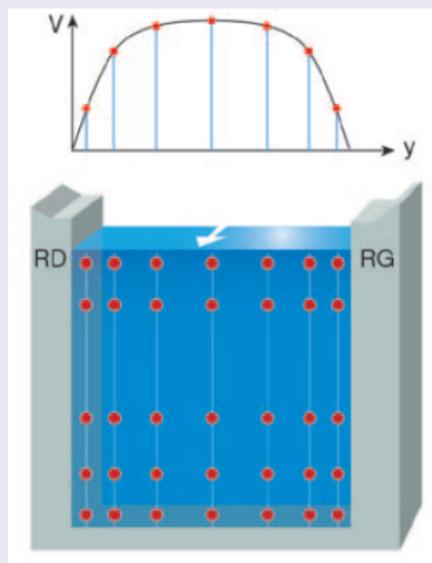
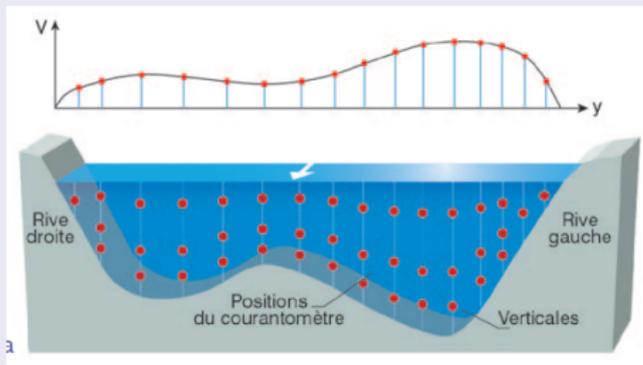
- Distributions verticales assez bien connus (4 ou 6 points)
- Distributions horizontales hétérogènes (10 à 20 verticales)- 10 à 15 % du débit total
- Norme ISO 748, 5168, 3455, 1088

Méthodes standards

- Méthode à un point. La vitesse moyenne est supposée proche de la vitesse à $z = 0.4h$ (profil log).
- Méthode à 2 points. Mesure à $0.2 h$ et $0.8 h$.
- Méthode à 3 points. Mesure à $0.2 h$, $0.6 h$ et $0.8 h$.
 $q = 0.25h(V_{0.2h} + 2V_{0.6h} + V_{0.8h})$
- Méthode à 5 points. Mesure à $0.2 h$, $0.6 h$, $0.8 h$, au fond et la surface.
 $q = 0.1h(V_f + 3V_{0.2h} + 3u_{0.6h} + 2V_{0.8h} + V_{surface})$



Cas pratiques



Vitesse au fond

$$V_f = (2k_f - 1) \cdot V_{pf}$$

Cas pratiques

Intégration latérale

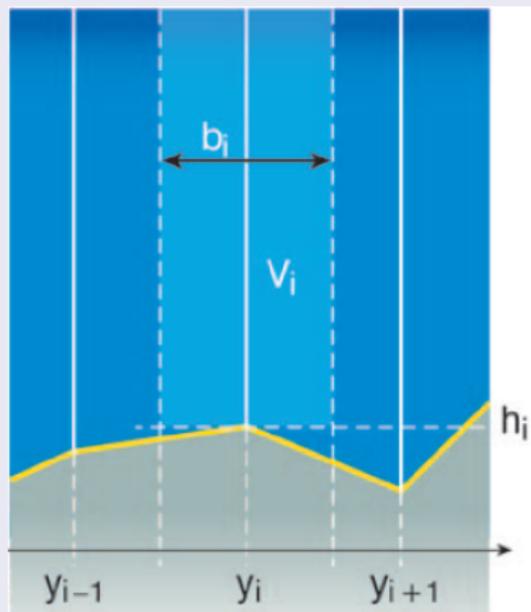


Fig. 4.9a - Méthodes de mesure du débit selon la section médiane.

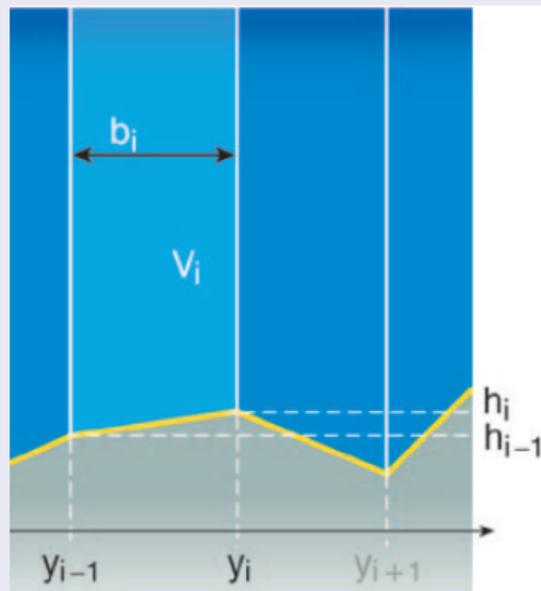
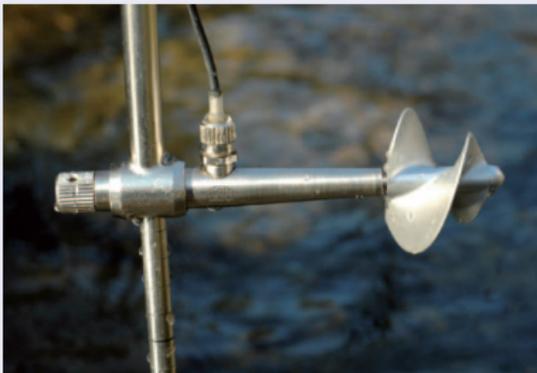


Fig. 4.9b - Méthodes de mesure du débit selon la section moyenne.

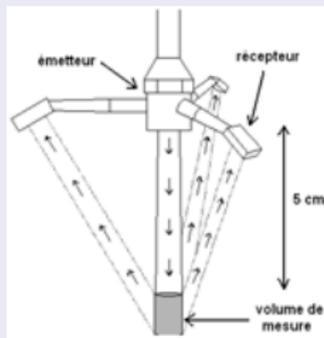
Appareils de mesure



- Moulinet à étalonner régulièrement
- Entretien lorsqu'il y a des pièces mobiles
- Gamme de vitesses

Appareils de mesure

Principe : Appareil acoustique doppler



- Particules nécessaires
- Emetteur et recepteur séparé, tous les deux dans l'eau
- $V < 2 \text{ m/s}$
- Fréquence d'échantillonnage 10 - 50 Hz

Appareils de mesure

Appareil acoustique doppler



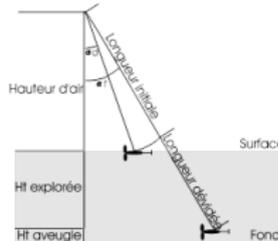
- 2 composantes
- Calcul direct du débit et de l'incertitude
- Problèmes en présence de bulles

Jaugeage depuis un pont



Cas particulier de l'intégration avec traînée

Calcul de la hauteur explorée



Soient :

H_a : Hauteur d'air

H_d : Longueur dévidée

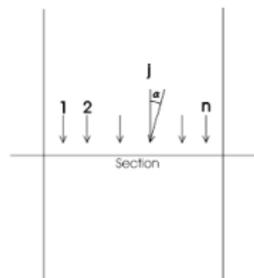
H_e : Hauteur explorée

α_d : angle début

α_f : angle fin

$$H_e = (H_d + H_a / \cos \alpha_d) * \cos \alpha_f - H_a$$

Cas particulier de la dérive - Correction appliquée au P.U.



Considérons la j^{ème} verticale :

Soit α l'angle formé par la perpendiculaire à la section de mesure et la vitesse

on a

$$PU(J) = PU_v(J) * \cos \alpha$$

Incertitude

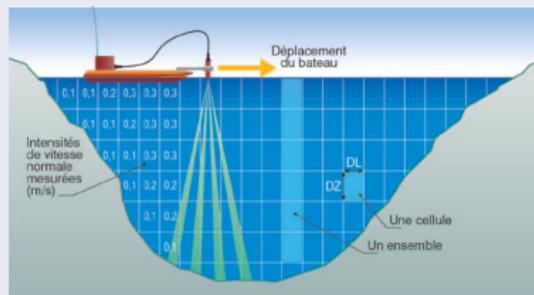
$$u'_{Q^2} = u'_{s^2} + u'_{m^2} + \frac{1}{m} \left[u'_{b^2} + u'_{h^2} + u'_{p^2} + \frac{1}{n} (u'_{c^2} + u'_{e^2}) \right]$$

avec les composantes d'incertitude suivantes :

- u'_s : incertitude due aux erreurs systématiques (étalonnage) du courantomètre, et des instruments de mesure des largeurs et des profondeurs ;
- u'_m : incertitude due au nombre limité m de verticales (erreur d'intégration des profondeurs et vitesses sur la largeur) ;
- u'_b : incertitude due à la mesure des largeurs entre verticales ;
- u'_h : incertitude due à la mesure des tirants d'eau sur les verticales ;
- u'_p : incertitude due au nombre de points limité sur la verticale (erreur d'intégration des vitesses sur la hauteur d'eau) ;
- u'_c : incertitude due aux erreurs aléatoires du courantomètre ;
- u'_e : incertitude due au temps limité d'exposition du courantomètre (moyenne des fluctuations de vitesse).

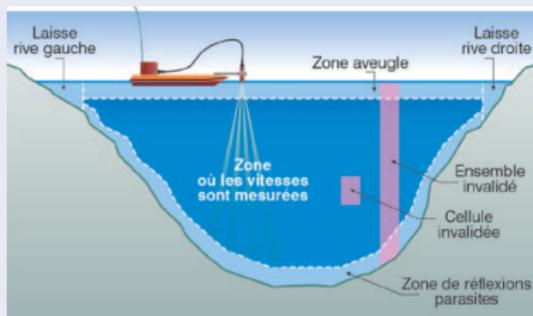
u'_s	$u'_s = 1 \%$				
u'_m	5 verticales	10 verticales	15 verticales	20 verticales	
	$u'_m = 7,5 \%$	$u'_m = 4,5 \%$	$u'_m = 3 \%$	$u'_m = 2,5 \%$	
u'_b	$u'_b = 0,5 \%$				
u'_h	$u'_h = 0,5 \%$				
u'_p	1 point	2 points	3 points	5 points	
	$u'_p = 7,5 \%$	$u'_p = 3,5 \%$	$u'_p = 3 \%$	$u'_p = 2,5 \%$	
u'_c	$V = 0,03 \text{ m/s}$	$V = 0,10 \text{ m/s}$	$V = 0,15 \text{ m/s}$	$V = 0,25 \text{ m/s}$	$V \geq 0,50 \text{ m/s}$
	$u'_c = 10 \%$	$u'_c = 2,5 \%$	$u'_c = 1,25 \%$	$u'_c = 1 \%$	$u'_c = 0,5 \%$
	<i>Voir spécifications techniques ou rapport d'étalonnage du courantomètre</i>				
u'_e	<i>Voir spécifications techniques ou rapport d'étalonnage du courantomètre</i>				

Profileur Acoustique à Effet Doppler (ADCP)



- Flotteur horizontal, direction constante
- Déplacement lent et régulier
- Couplage GPS
- 4 transects minimum

Profileur Acoustique à Effet Doppler (ADCP)



- Extrapolation près des bords
- Mesures invalides
- $Q_{mesure} / Q_{total} > 70 \%$
- Eviter bulles, tourbillons, métaux

Profileur Acoustique à Effet Doppler (ADCP)

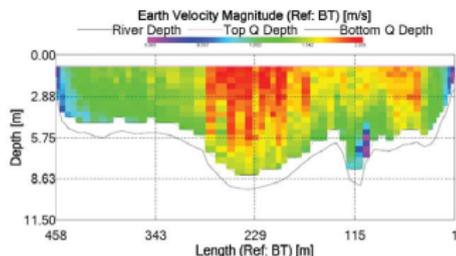
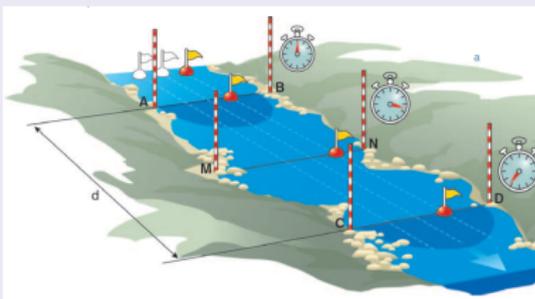
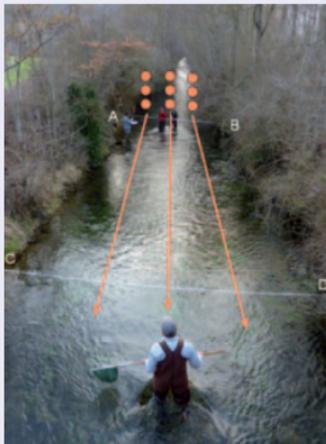


Fig. 11 : Profil (moyenné sur 3 ensembles) de vitesses à Roquemaure (Echelle de vitesses de 0 à 2m/s) ADCP Broad Band 600kHz: (données CNR)



Flotteur

vitesse de surface



- 3 mesures pour une moyenne
- Eviter zone de piègagement près des berges
- Mesure des profondeurs, Distances à la rive

Flotteur

calcul valeur moyenne

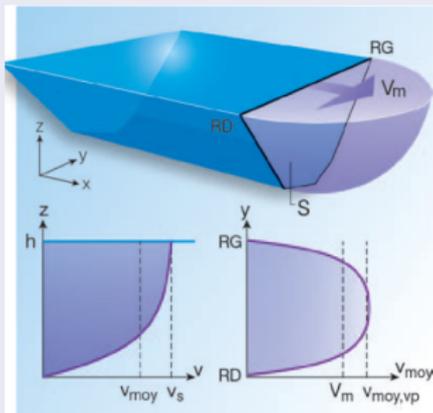


Fig. 6.2 - Description schématique des coefficients de surface α_s et coefficient de bord α_b .

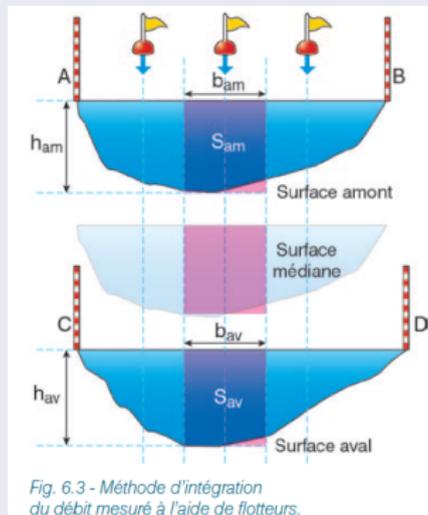


Fig. 6.3 - Méthode d'intégration du débit mesuré à l'aide de flotteurs.

$$V_{moy} = \alpha_s V_{surface}$$

$$0,8 < \alpha_s < 0,9$$

$$C_i = V_{moy,i} / \sqrt{h_i}$$

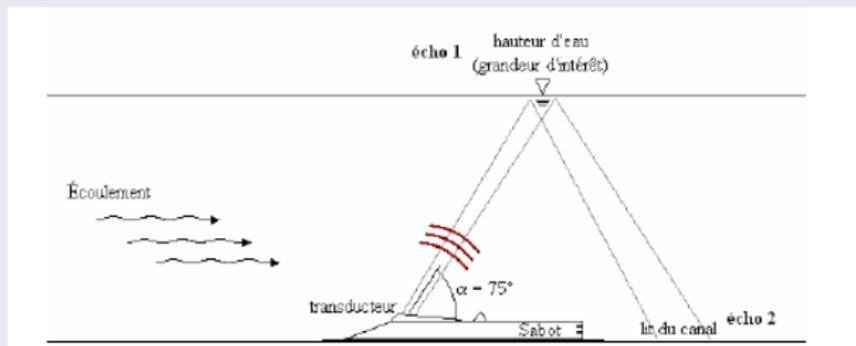
$$V_m = C_{moy,i} \sqrt{Surface / Largeur}$$

Seuil jaugeur

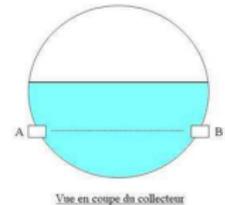
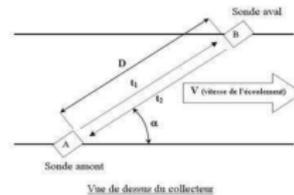


- Passage régime critique
- Canal horizontal
- Mesure hauteur d'eau
- Passage sédiments
- Portatif possible
- Eviter ennoïement

Sabot



Corde de vitesse



t_1 : temps de parcours de l'onde ultrasonore de A vers B

t_2 : temps de parcours de l'onde ultrasonore de B vers A

$$V = \frac{D}{2 \cdot \cos \alpha} \cdot \frac{t_2 - t_1}{t_2 \cdot t_1}$$

- Distribution latérale
- Portion rectiligne
- Aligement/vérification débit/ précision 15 %

Incertitude

Tabl. B.1 - Comparaison
des méthodes de contrôle
des débits.

	Méthode par capacité	Exploration du champ des vitesses (déploiement à pied)			Méthode par dilution	Méthode hydraulique
		Courantomètre	Profileur	Flotteur		
Nombre minimal d'opérateurs ¹	2	2	2	2	2	1
Durée de mise en œuvre sur le terrain [min]	15	60	30	30	60	10
Durée de dépouillement des mesures [min]	5	30	15	20	30	10
Degré de technicité	★	★★	★★★	★★	★★★	★★
Gamme de débit mesurable [m ³ /s]	0 → 0,02	0,01 → 100	0,2 → 100	0,01 → 100	0,01 → 100	0,01 → 1000
Incertitude relative [%]	5 - 10	7 - 15	5 - 10	10 - 50	3 - 10	5 - 40
Ordre de grandeur de l'investissement [€]	100	10 000	30 000	200	5 000	100

Plan

1 Ecoulements turbulents en rivières

2 Mesure de débit

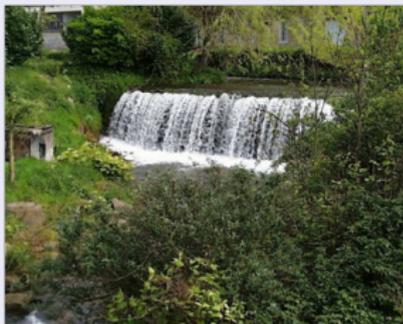
3 Ouvrage hydraulique

- Seuil et déversoir
- Vanne de fond
- Passes à poissons

4 Courbe de tarage

5 Crue et aménagements

Pour le prélèvement



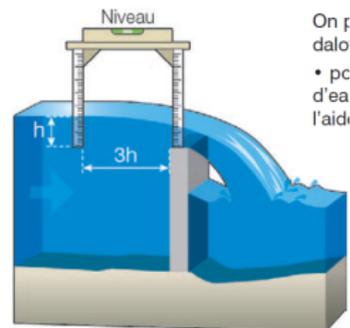
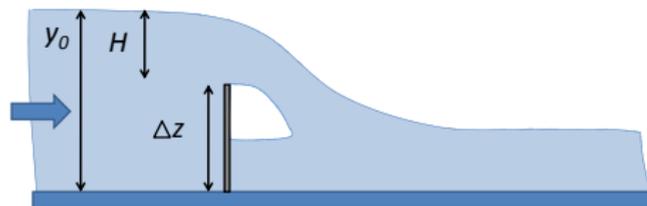
Pour la régulation



Pour la mesure de débits



Seuil mince



Seuil dénoyé : sans perte de charge et E_{cin} négligée

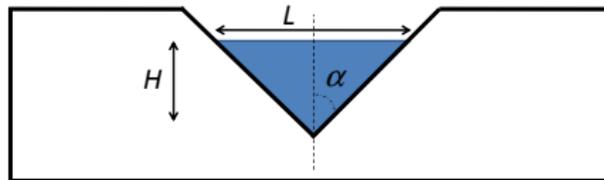
$$Q = \frac{2}{3} L \sqrt{2g} H^{3/2}$$

$$Q = \mu L \sqrt{2g} H^{3/2} \quad \text{avec} \quad \mu \approx 0.4$$

Formule de Bazin

$$\mu = \frac{2}{3} \left(0.6034 + \frac{1}{1050y_0 - 3} + 0.08 \frac{y_0}{\Delta z} \right)$$

Seuil triangulaire



$$Q = \mu \frac{8}{15} \tan(\alpha) \sqrt{2g} H^{5/2}$$

Pour $\alpha = 90^\circ$

$$Q = 1.4 H^{5/2}$$

Formule de Gourley :

$$Q = 1.32 \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) H^{2.47}$$

Seuil mince

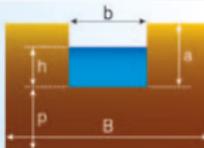
résumé

Section rectangulaire

$$Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$$

avec $C = C'_1 = 0,40 + C_2 \frac{h}{p}$

Limites d'application $h/p \leq 2,5$; $b \geq 0,15$ m
 $h \geq 0,03$ m ; $p \geq 0,10$ m

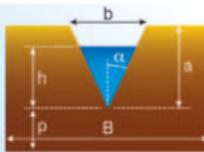


Section triangulaire isocèle

$$Q = C \sqrt{2g} \tan \alpha h^{2,5}$$

avec $C = C'_2 = 0,31$

Limites d'application $10 \leq \alpha \leq 50$ degrés
 $h/p \leq 0,35$; $h \geq 0,06$ m
 $0,10 \leq p/b \leq 1,5$; $p \geq 0,09$ m

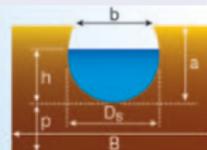


Section circulaire

$$Q = C \sqrt{2g} D_s^{2,5}$$

avec $C = C_C$

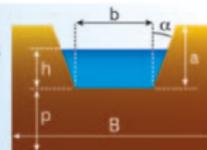
Limites d'application $0,1 \leq D_s \leq 1$ m ; $B > 2D$
 $p > 0,1$ m ; $p \geq D_s / 2$
 $0,1 \leq h/D_s \leq 1$; $h > 0,03$ m



Section trapézoïdale

$$Q = C'_1 \sqrt{2g} b h^{1,5} + C'_2 \sqrt{2g} \tan \alpha h^{2,5}$$

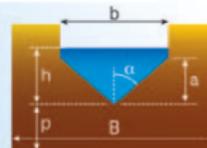
Limites d'application $h/p \leq 2,5$; $b \geq 0,15$ m
 $h \geq 0,03$ m ; $p \geq 0,10$ m



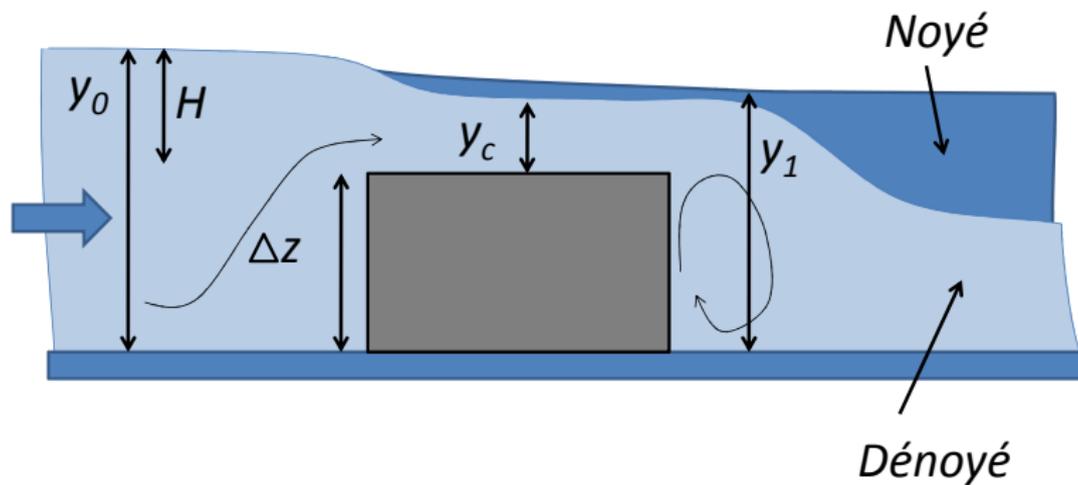
Section triangulaire isocèle tronquée

$$Q = C'_2 \sqrt{2g} \tan \alpha \times [h^{2,5} - (h - a)^{2,5}]$$

Limites d'application $10 \leq \alpha \leq 50$ degrés
 $h/p \leq 0,35$; $h \geq 0,06$ m
 $0,10 \leq p/b \leq 1,5$; $p \geq 0,09$ m



Seuil épais



Seuil épais

Seuil dénoyé : passage par la hauteur critique

$$F_r = 1 \iff \frac{Q^2 L}{g A^3} = 1 \iff \frac{Q^2}{g L^2 y_c^3} = 1$$

$$E_c = y_c + \frac{Q^2}{2 g L^2 y_c^2} = \frac{3}{2} y_c$$

$$Q = \frac{2}{3\sqrt{3}} L \sqrt{2g} E_c^{3/2}$$

On suppose $E_0 = y_0$

$$Q = \mu L \sqrt{2g} (y_0 - \Delta z)^{3/2}$$

$$Q = \mu L \sqrt{2g} H^{3/2} \quad \text{avec} \quad \mu \approx 0.4$$

Seuil épais

Seuil noyé : pas de perte de charge

$$H_0 = H_1 = y_1 + \frac{V_1^2}{2g}$$

$$V_1 = \sqrt{2g(H_0 - y_1)}$$

$$Q = V_1 L (y_1 - \Delta z) = C_v L (y_1 - \Delta z) \sqrt{2g(y_0 - y_1)} \quad \text{avec} \quad C_v \approx 1$$

Seuil noyé : formule avec correction

$$Q = 1.7 C_q L H^{3/2} \quad \text{avec} \quad C_q = \frac{0.65}{1 + \frac{H}{\Delta z}} \approx 0.4$$

transition dénoyé-noyé : $y_1 - \Delta z = y_c$

$$y_1 - \Delta z = \frac{2}{3} (y_0 - \Delta z)$$

Seuil épais

résumé

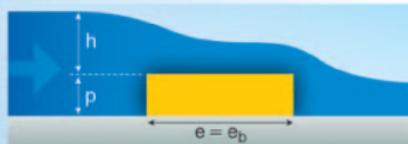
Crête plane à arêtes vives

Profil longitudinal rectangulaire

$$Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$$

$$C = 0,385 A_1$$

(cf. tabl. 8.2)



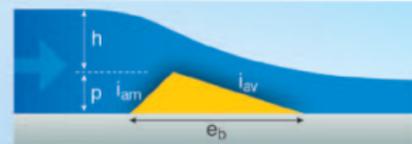
Crête inclinée vers l'amont et l'aval

Profil longitudinal de forme triangulaire

$$Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$$

$$C = A_2$$

(cf. tabl. 8.3)



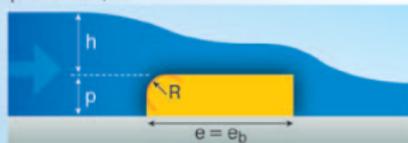
Crête plane de forme arrondie à l'amont

Rayon de la courbure R supérieur à 0,1h

$$Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$$

$$C = 0,424 A_1$$

(cf. tabl. 8.2)



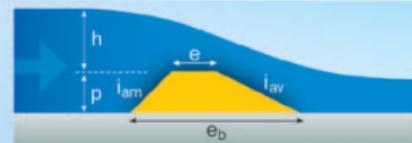
Crête plane avec bords inclinés

Profil longitudinal de forme trapézoïdal

$$Q = C \sqrt{2g} b h^{1,5}$$

$$C = A_3$$

(cf. tabl. 8.4)



Vanne

Régulation de débits et de hauteur d'eau



A glissière



Hydro-mécanique
(flotteur)



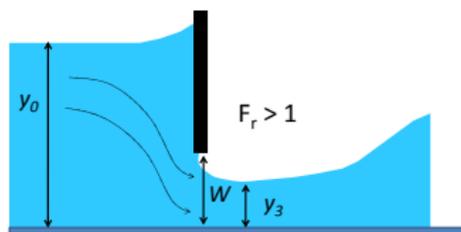
Radiale

Loi d'ouvrage : relation hauteur-débit

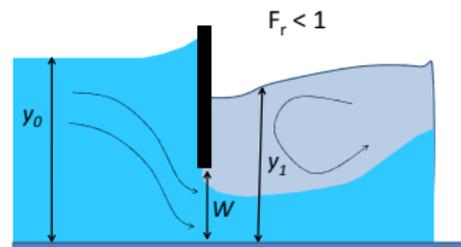
$$Q = AV = A\sqrt{2gy_0}$$

On introduit un coefficient de débit qui dépend de l'ouvrage

$$Q = L W C_d \sqrt{2gy_0}$$



vanne dénoyée



vanne noyée

A partir de la conservation de la charge

Dénoyé

$$Q = C_d L W \sqrt{2 g y_0}$$

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + C_c \frac{W}{y_0}}}$$

$$C_c = \frac{y_3}{W}$$

Noyé

$$Q = C_d L W \sqrt{2 g y_0}$$

$$C_d = C_c \frac{\sqrt{1 - \frac{y_1}{y_0}}}{\sqrt{1 - C_c^2 \frac{W^2}{y_0^2}}}$$

si $W/h_0 \ll 1$

$$\rightarrow Q = C_c L W \sqrt{2 g (y_0 - y_1)}$$

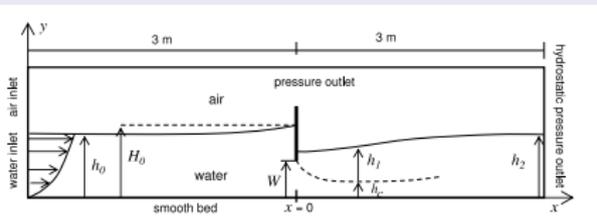
Valeurs classiques

$$C_d \approx C_c \approx 0.6$$

Si noyé et W/h_0 grand $\implies C_d \approx 0.8$

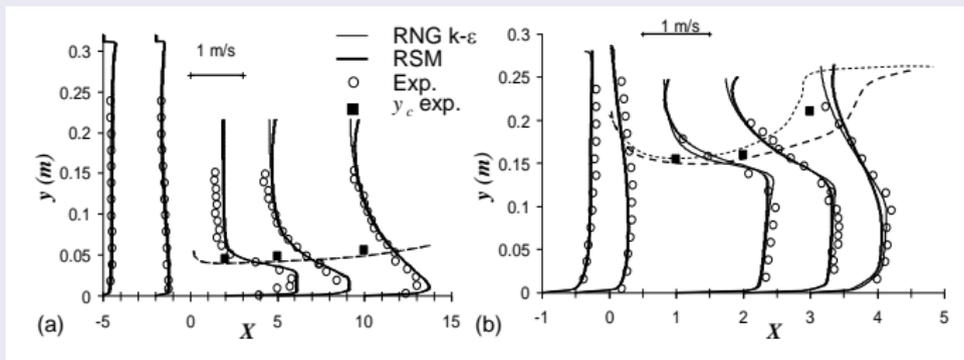
Ecoulement sous vanne

Vanne noyée



- mesure de h_2 , h_2/h_1 ?
- Grande ouverture, C_c ?

Mesure vitesse

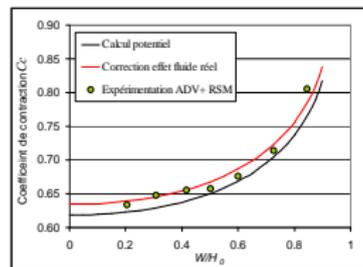
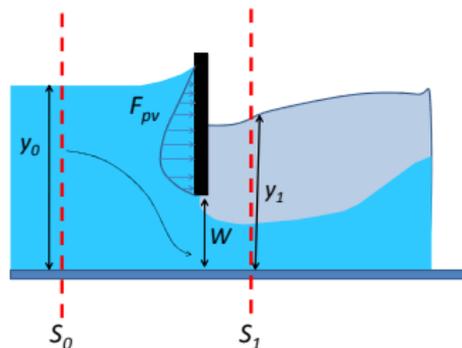


Force sur la vanne

Bilan de quantité de mouvement

$$F_{pv} = \mathcal{I}(q, y_0) - \mathcal{I}(q, y_1)$$

$$\mathcal{I}(q, y) = \frac{g}{y} \left(y_c^3 + \frac{1}{2} y^3 \right)$$



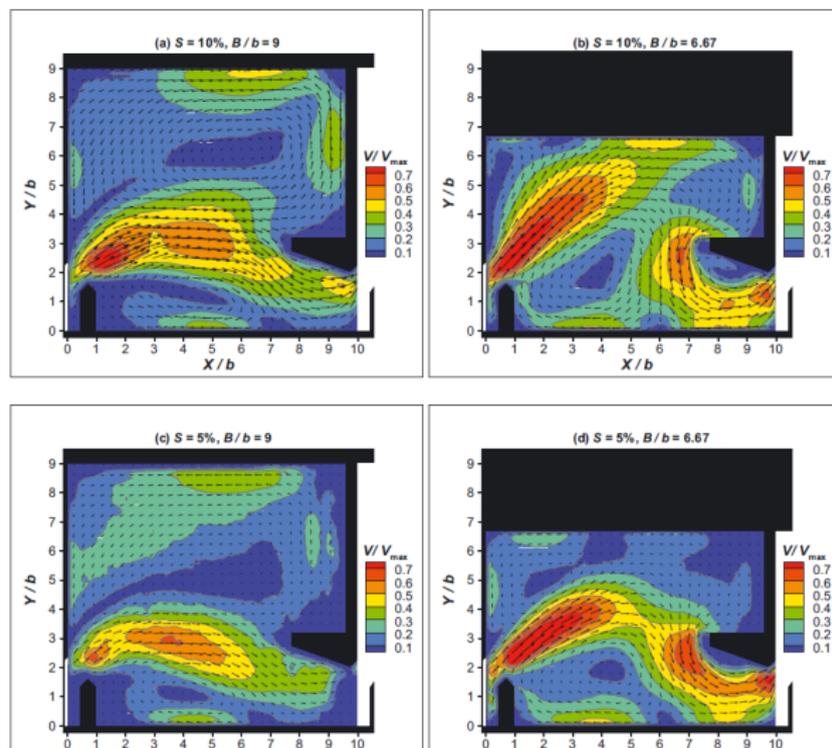
Passes à bassins (techniques)



- Restaurer la continuité écologique
- Débit d'attrait suffisant (% du débit réservé)
- Loi d'ouvrage pour le calcul du débit.

Passes à bassins (techniques)

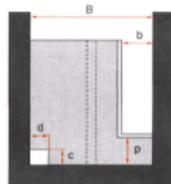
courantologie



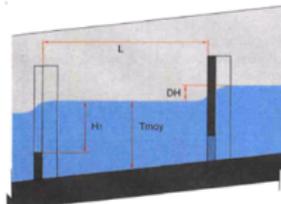
Passes à bassins (techniques)

débit échancre (Cassiopée)

Paramètre fixé	Valeurs recommandées	Valeur sélectionnée
DH Hauteur de chute entre deux bassins	0,15 - 0,25 m	0,22 m
Pv Puissance dissipée volumique	<150 W/m ³	150 W/m³
Q Débit dans la passe	> 0,15 m ³ /s	0,15 m³/s
b Largeur de l'échancre	> 0,2 m	0,2 m
c*d Surface de l'orifice	0,04 m ²	0,04 m²
Cd Coefficient de débit		
-Orifice noyé	de 0,65 à 0,85	0,75
-Echancre	0,4 en général	0,4



Coupe perpendiculaire à l'axe du bassin, au niveau d'une cloison



Coupe transversale dans l'axe du bassin

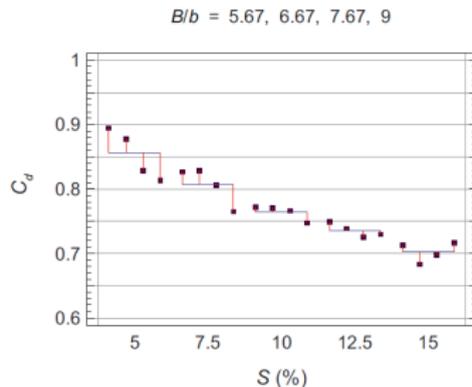
Paramètre à calculer	Formule	Valeur
V Volume du bassin	$Pv = \frac{\rho * g * Q * DH}{V} \Rightarrow V = \frac{\rho * g * Q * DH}{Pv}$	2,16 m ³
L Longueur bassin	$\frac{L}{b} = 8 \text{ à } 10$	1,60 à 2,00 m choix : 2,00m
B Largeur bassin	$\frac{B}{b} = 4 \text{ à } 6$	0,80 à 1,20 m choix : 1,10 m
Tmoy Profondeur moyenne	$V = L * B * Tmoy \Rightarrow Tmoy = \frac{V}{L * B}$	0,98 m

Paramètre à calculer	Formule	Valeur
Q1 Débit dans l'orifice noyé	$Q1 = Cd * c * d * \sqrt{2 * g * DH}$	0,062 m ³ /s
Q2 Débit à travers l'échancre	$Q2 = Q - Q1$	0,088 m ³ /s
H1 Charge sur l'échancre	$Q2 = Cd * b * \sqrt{2 * g * H1^{1,5}} \Rightarrow H1 = \left(\frac{Q2}{Cd * b * \sqrt{2 * g}} \right)^{2/3}$	0,39 m

Passes à bassins (techniques)

débit fente (Cassiopée)

$$Q = C_d b (Z_b - Z_s) \sqrt{2g\Delta H} = C_d b (H_b + 0.5LS) \sqrt{2gLS}$$



Passes à macro-rugosités (naturelles)

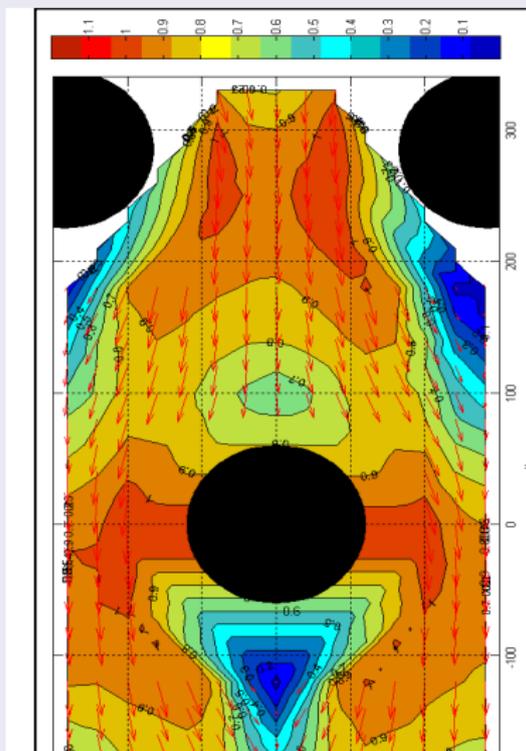
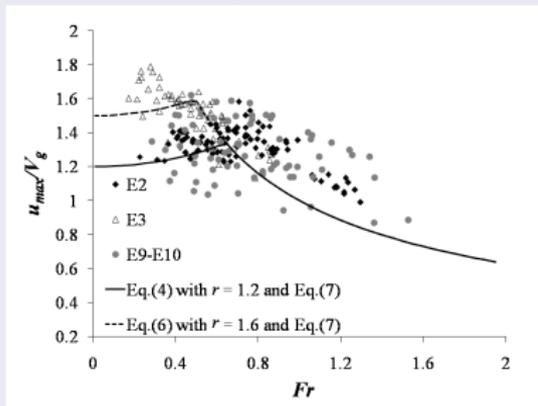


- Conditions de vitesse variées (espèces)
- Débit d'attrait important
- Entretien facilité.

Passes à macro-rugosités (naturelles)

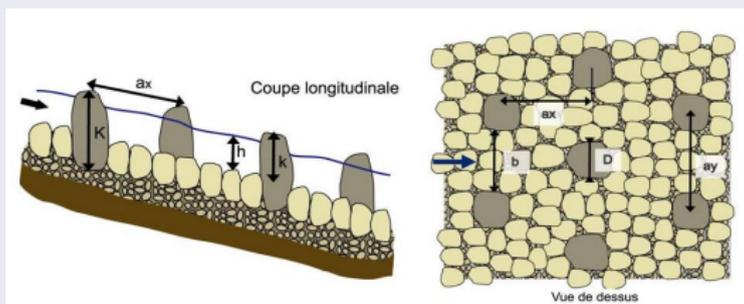
courantologie

V_g = vitesse moyenne entre bloc



Passes à macro-rugosités (naturelles)

Dimension



Relation hauteur-débit

Paramètre à calculer	Formule	Valeur	Contraintes à respecter
D Largeur face à l'écoulement des blocs	$v_{Dmax}^2 = \frac{v_{max}}{\sqrt{g \cdot D}} - 3,35 \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^{0,27} \cdot f^{0,53}$ $\rightarrow D = \left(\frac{v_{max}}{3,35 \cdot g^{0,5} + h^{0,27} \cdot f^{0,53}}\right)^{1/0,22}$	0,20 m	en général : D entre 0,30 et 0,60 m
C Concentration des blocs	$C = \frac{D^2}{ax \cdot ay}$	C = 0,016 avec ax = 1,96 m ay = 1,25 m	C entre 0,06 et 0,016 ax = β * Long avec β entier ay ≤ (L-D) = 1,30
b Largeur du passage libre entre les blocs	$b = ay - D$	1,05 m	
k Hauteur utile des blocs	$q_k^2 = \frac{q}{\sqrt{g \cdot k^{1,3}}} = 0,995 \cdot \left(\frac{h}{k}\right)^{2,396} \cdot f^{0,446} \cdot C^{-0,23}$ $\rightarrow k = \left(\frac{0,995 \cdot h^{2,396} \cdot f^{0,446} \cdot C^{-0,23} \cdot g^{0,5}}{q}\right)^{1/0,396}$	0,40 m	rapport k/D doit être compris entre 1 et 2

Plan

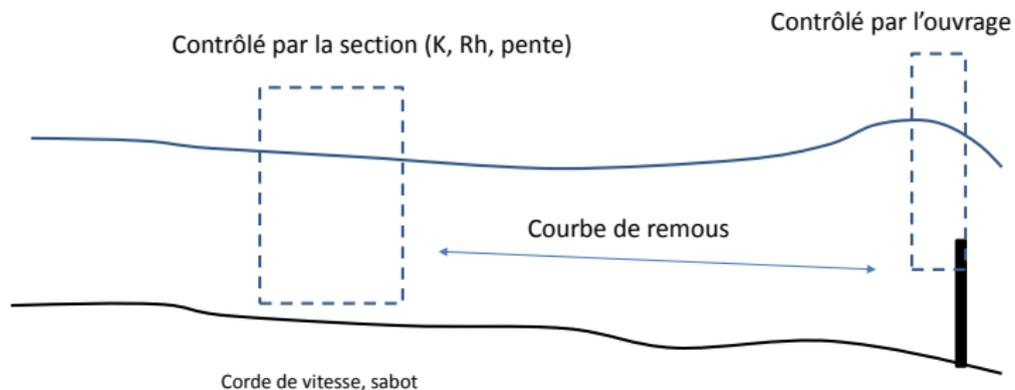
- 1 Ecoulements turbulents en rivières
- 2 Mesure de débit
- 3 Ouvrage hydraulique
- 4 Courbe de tarage**
- 5 Crue et aménagements

Définition

- Une courbe de tarage est une courbe basée sur ensemble de point (h, Q) en un endroit donné (station).
- Les points (h, Q) sont en général issus de jaugeage (ou de modélisation).
- Les courbes sont ajustements des points expérimentaux. Elles peuvent être données sous forme graphique ou mathématique. Elles peuvent être continues par morceaux.
- Elles assurent la mesure du débit à partir de mesures de hauteurs d'eau (ou de vitesse locale).
- Les stations hydrométriques utilisent des courbes de tarages pour le suivi des débits de rivières (banque hydro) et/ou l'alerte de crue (<http://www.vigicrues.gouv.fr/>).

Positionnement

- Ouvrages (lois, facilité d'installation)
- Stabilité dans le temps
- Sensibilité de la mesure ($\Delta Q/\Delta h$)



Positionnement

Exemple

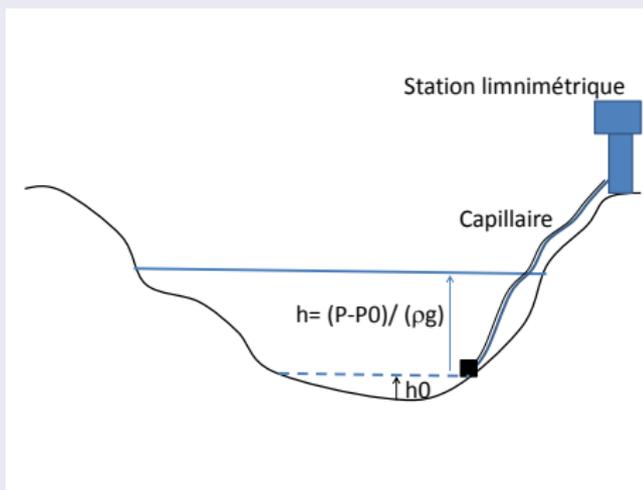


Pour l'alerte de crue



Mesure de hauteur d'eau

capteur de pression



Mesure de hauteur d'eau

Autres techniques



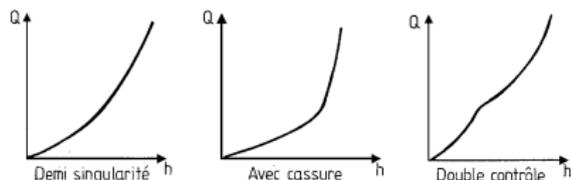
4. Récapitulatif des caractéristiques des capteurs de niveau de liquide

Technologie	Étendue de mesure	Précision	Gamme de Température	Pression max (bar)
Flotteur	10 mm à 30 m	0,5 à 5 %	-180 à 450 °C	100
Plongeur	30 cm à 6 m	0,5 %	-150 à 450 °C	40
Palpeur électromécanique	50 max	1 mm	-160 à 180 °C	25
Capteur de pression	0 à 25 bar	0,5 à 1 %	-20 à 120 °C	40
Sonde capacitive	0 à 10 m	1 %	-20 à 85 °C	40
Radar	0 à 30 m	10 mm	-	-
Ultrasons	0 à 50 m	1 %	-190 à 250 °C	40

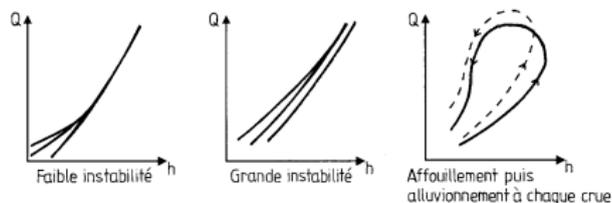
Tracé

Type de courbe

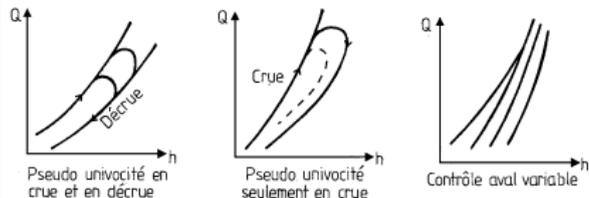
A - Relations univoques



B - Relations non-univoques dans des biels à fond mobile



C - Relations non-univoques en régime non-permanent



Tracé

Interpolation dans la zone de mesure

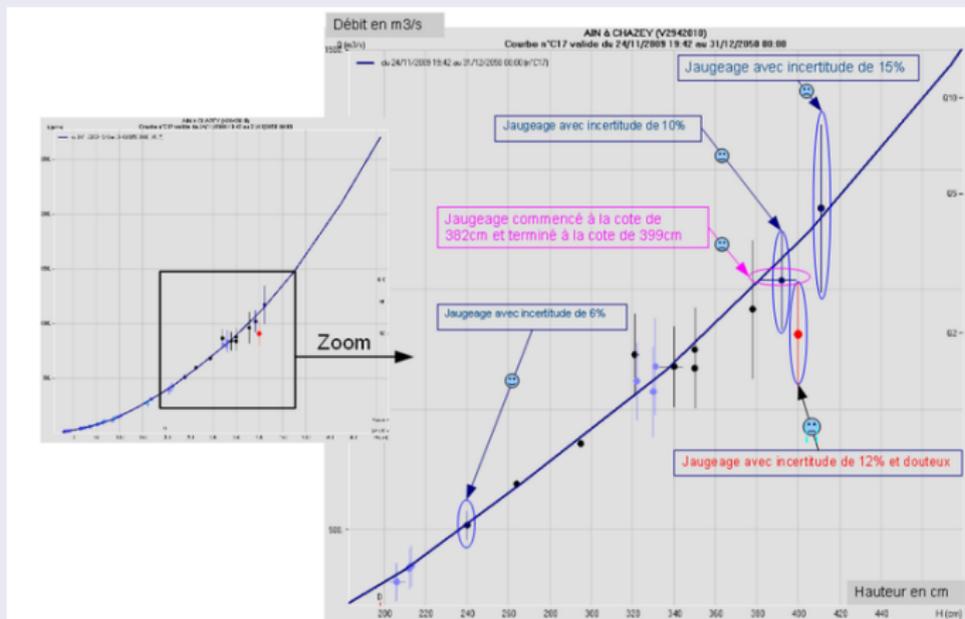
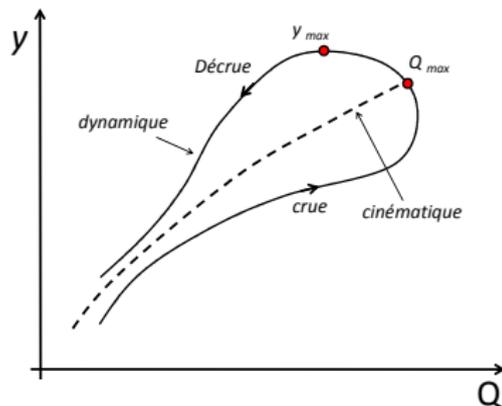
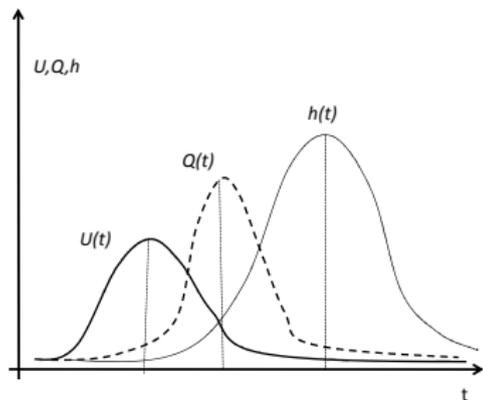


Fig 1. Courbe de tarage de l'Ain à Chazey (DREAL R-A, modifiée pour l'exemple), partie interpolée visualisée avec le logiciel BAREME.

Régime non permanent

Cinématique vs. Dynamique

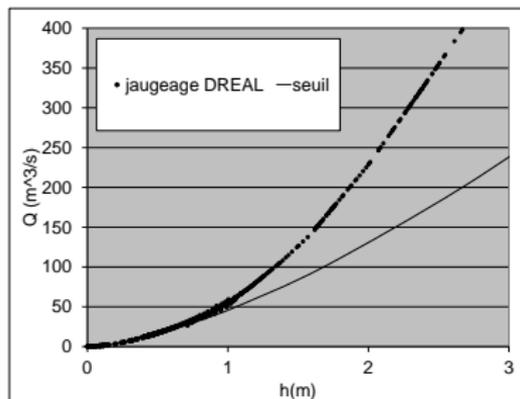
Visualisation des effets d'inertie sur les grandeurs d'une crue dynamique.
Pour la même hauteur 2 débits sont possibles.



Ajustement des courbes

$$Q = a(h - h_0)^n$$

- Lois de seuils
- Loi de Manning Strickler
- Plusieurs paliers (Echancrures, débordements)



Extrapolation

Problèmes particuliers

- Forts débits, pas de jaugeage possible
- Débordements (section de passage ?)
- Modification du lit, chenaux latéraux
- Contrôle aval

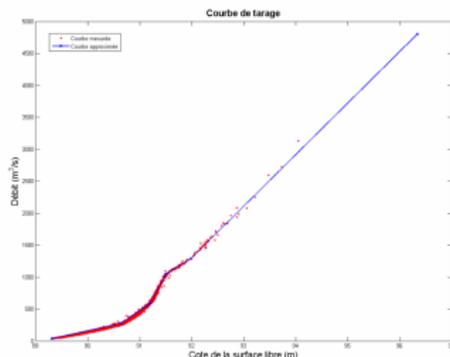
$$Q = KBh(Bh/(2h + B))^{2/3} S^{1/2}$$

faible hauteur :

$$Q = KB(h)^{5/3} S^{1/2}$$

forte hauteur :

$$Q = KB^{5/3}/2^{2/3} h S^{1/2}$$

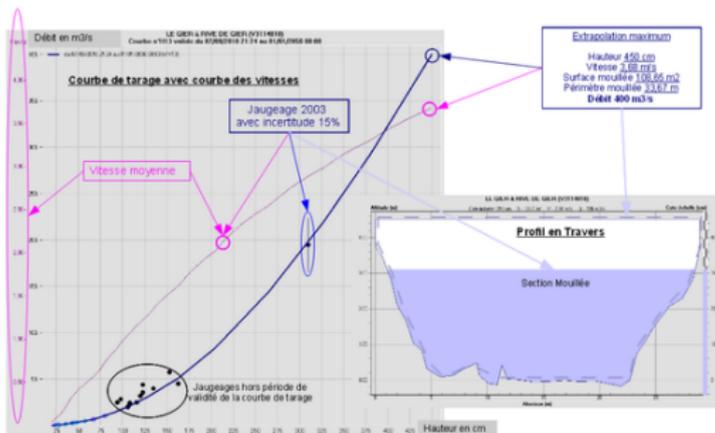


Extrapolation

Barème

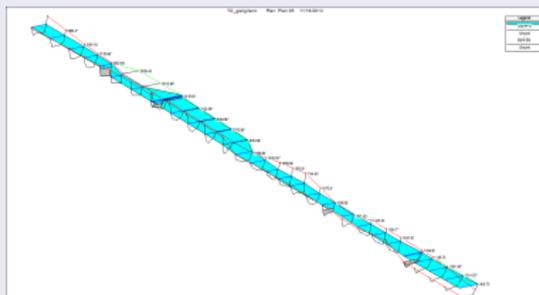
$$Q = V_m S$$

- V_m extrapolé
- S connue

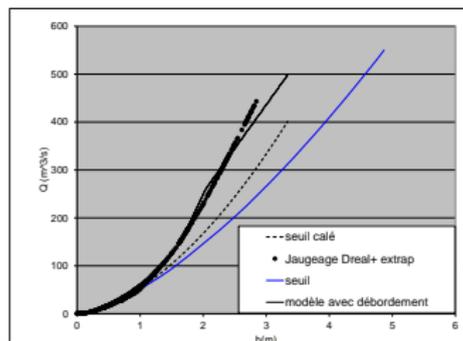
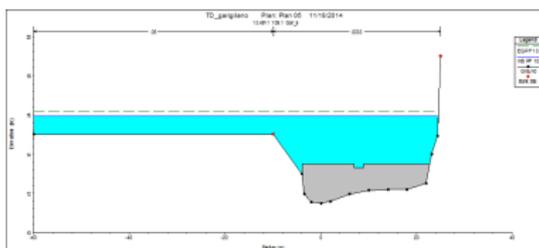


Modélisation

modélisation 1D (HEC-RAS)

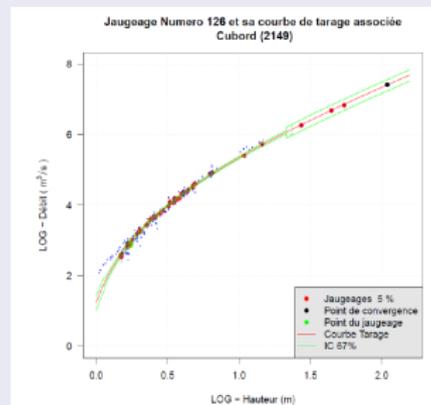
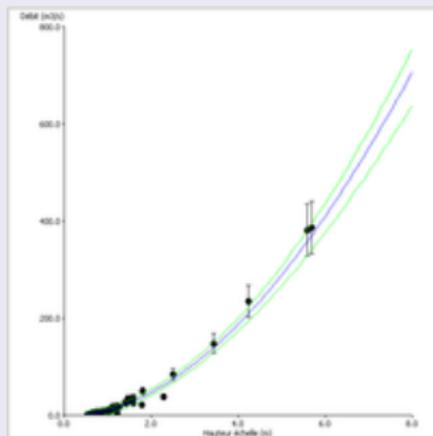


- Influence aval
- Zone de débordement
- Rugosité lit majeur



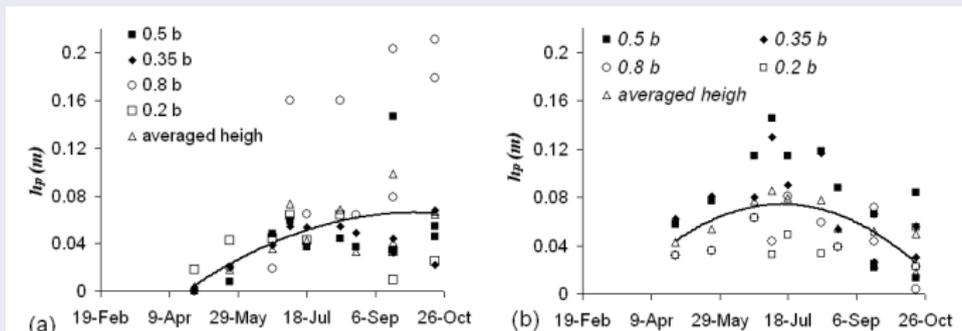
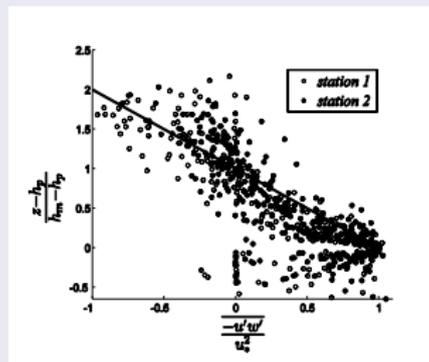
Incertitude

Baratin +DTG EDF



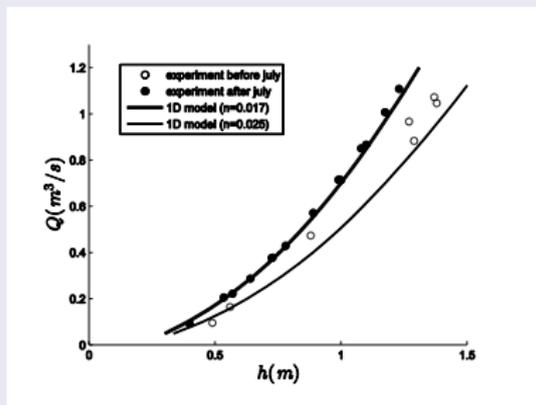
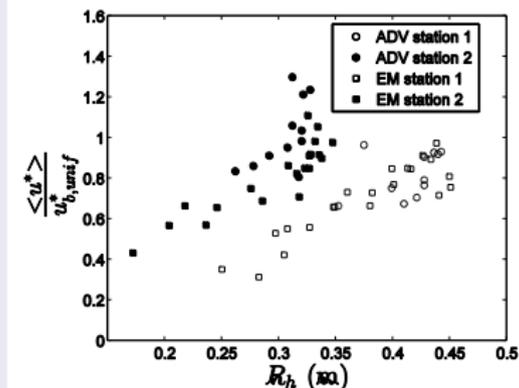
- Chaîne de Markov Monte Carlo
- Courbe la plus probable
- Valorisation des jaugeages incertains (crué)

Influence de la rugosité (saisonnalité)



Influence de la rugosité (saisonnalité)

modélisation 1D (HEC-RAS)



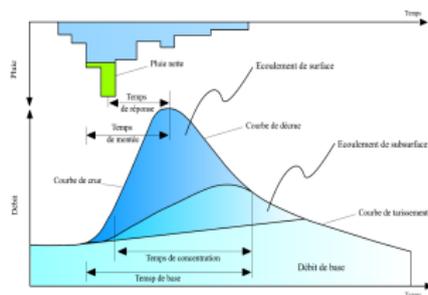
- Régime non uniforme (contraction de section)
- Couplage manning- u_*
- Influence aval

Plan

- 1 Ecoulements turbulents en rivières
- 2 Mesure de débit
- 3 Ouvrage hydraulique
- 4 Courbe de tarage
- 5 Cruet et aménagements**
 - Description
 - Aménagements pour la maîtrise des crues
 - Plan de Prévention des Risques d'Inondation

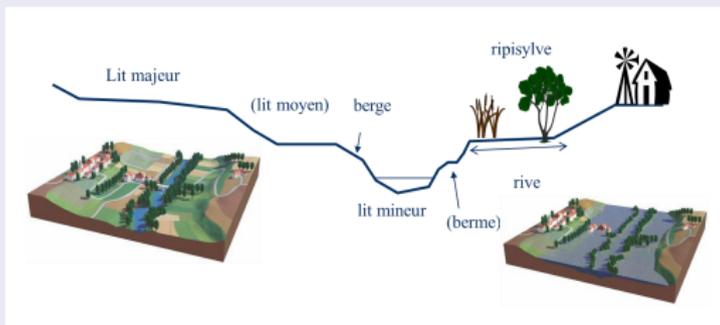
Définition d'une crue

- Q_{max} : cf définition des PPR (valeur centennale ou maximale observée)
- Temps de concentration : durée entre pic de pluie et pic de crue (cf gestion de crise)
- Temps de montée et temps de base : caractérise la rapidité de la crue
- Volume de la crue : à relier aux possibilités de stockage



Différents types de crue

Débordements de cours d'eau



Ruissellement urbain



Exemples

Débordements de cours d'eau



Lit mineur / moyen



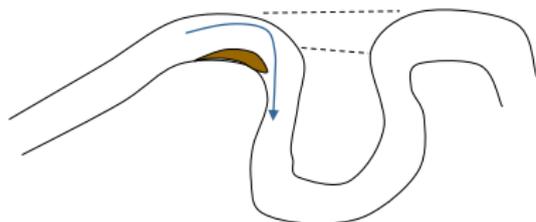
Lit majeur

Impact morphologique

Débits dominants

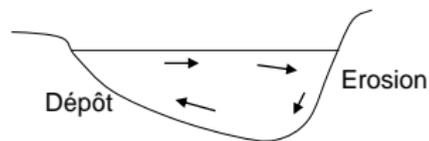
- débit fictif façonnant le cours d'eau
- débit de plein bord
- crue annuelle à biennale

Évolution par creusement, comblement, élargissement, méandrage...



Excès d'énergie ---> allongement parcours

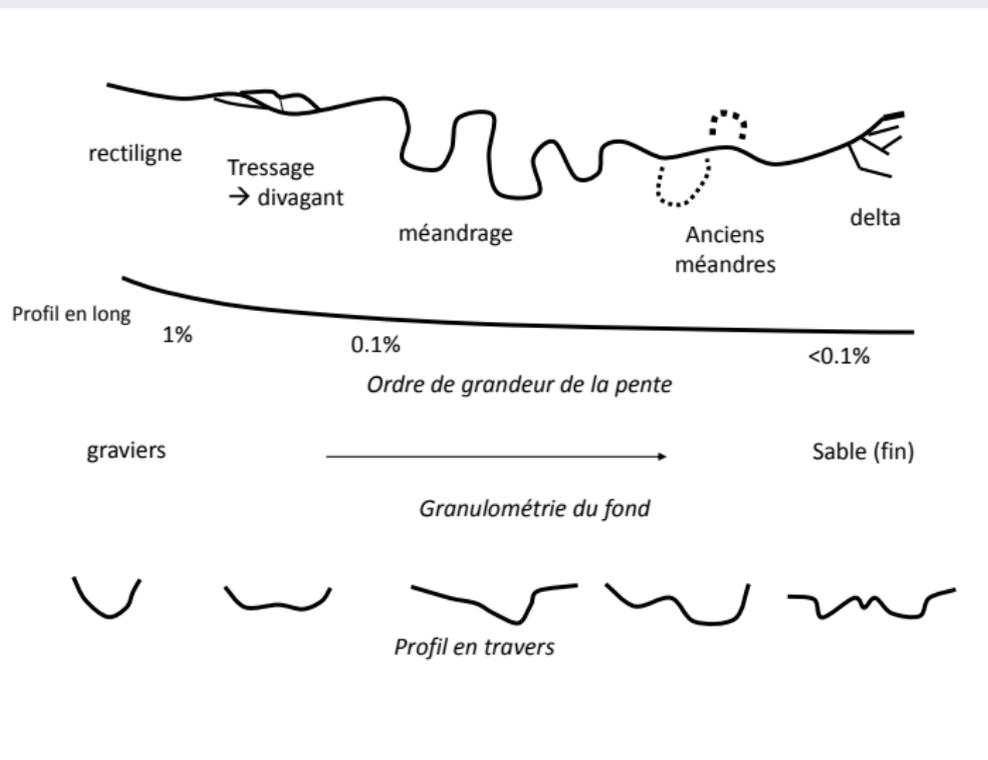
Coupe au milieu de la courbe



Intérieur

Extérieur

Morphologie du fond



Aménagements pour la maîtrise des crues

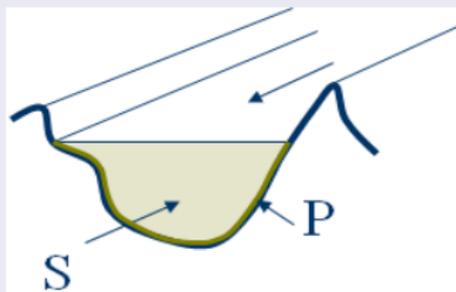
- Chenalisation
 - ▶ recalibrage
 - ▶ endiguement
- Bassins de laminage
 - ▶ bassins de rétention urbains
 - ▶ champ d'expansion des crues
 - ▶ ouvrages transversaux
- Maîtrise de l'occupation du sol
 - ▶ gestion de l'urbanisation
 - ▶ choix des pratiques culturelles

Chenalisation

$$Q = De \sqrt{J}$$

$$De = K R^{2/3} S$$

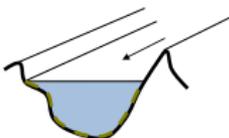
- De : débitance
- K : facteur de rugosité
- S : section d'écoulement
- $R = S/P$: rayon hydraulique



Augmentation débitance

Curage

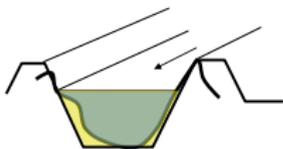
$$D_e = K R^{2/3} S$$



même gabarit
K augmenté
Impact écologique?

Recalibrage

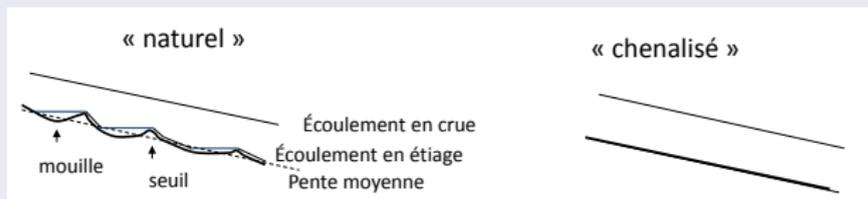
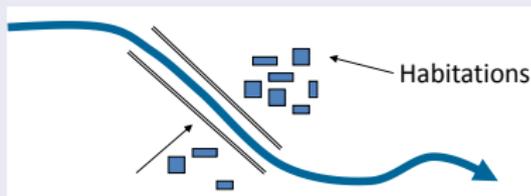
$$D_e = K R^{2/3} S$$



S augmenté
K augmenté
Impact écologique fort

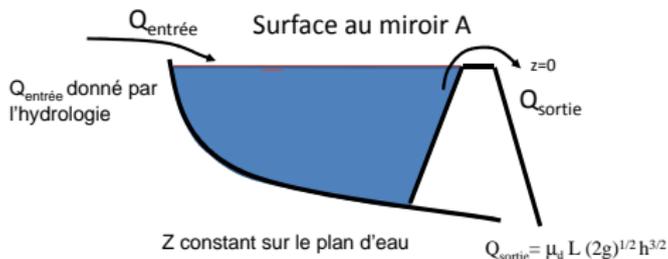


Endiguement

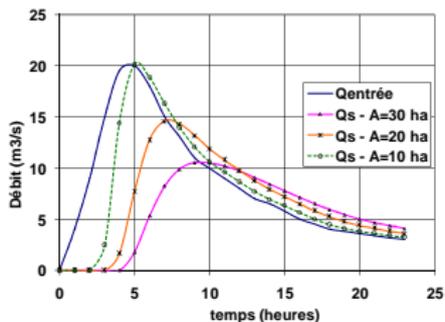


- Diminution de l'écrêtage
- Modification sensible du transport solide
- Impact écologique fort (lit mineur, ripisylve et lit majeur)
- Influence à l'aval (pollution, vitesse du courant)
- Influence sur la nappe (temps d'infiltration)

Laminage des crues



$$\frac{dz}{dt} = \frac{Q_e}{A} - \frac{Q_s}{A} \rightarrow az + \frac{dz}{dt} = \frac{Q_e(t)}{A}$$



Autres techniques

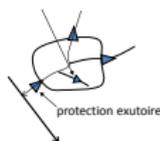
Petits bassins de rétention

- Ouvrages de petite taille : bassins spécifiques : enterrés / superficiels, parcs, jardins publics
- Principe : limiter l'effet d'imperméabilisation liée à l'urbanisation (lotissements. . .)

Pratiques culturales

- Enherbement
- Compactage des rangs
- Orientation des rangées par rapport à la pente

protection quartiers (bassins enterrés, parcs)



Inter-rang compacté
Accélération écoulements

Champ d'expansion



En général zones inondables à l'amont des BV

- Généralement zones cultivées et protégées par digues (à détruire)
- Potentiel limité par l'urbanisation et la construction en limite de ZI
- Efficacité si V stockable significatif p/r V crue

Maitrise de l'occupation du sols

Classement des zones NC

- champs d'expansion naturelle des crues
- zones urbanisées : PPRi / PLU

Zones agricoles

- Suppression de digues
- Pratiques favorisant l'infiltration

Restauration de zones humides

Moyens d'action

Programme d'actions de prévention des inondations (PAPI)

Elaboration des PPRi

Objectifs

- Interdire implantation en zone dangereuse
- Préserver les capacités d'écoulement et le laminage
- Sauvegarder l'équilibre des milieux

Principes

- Contrôler urbanisation
- Éviter tout endiguement non justifié par la protection de zones

Approche générale

- Approche globale, par tronçon et par bassin
- Concertation, démarche d'appropriation du risque

Elaboration des PPRi

Risques

Risque = croisement aléa et vulnérabilité

Aléa

Définir l'aléa climatique (P) ou hydrologique (Q) et son impact hydraulique :

- Hauteur d'eau ($Z_e(x, y)$)
- Vitesse d'écoulement ($V_e(x, y)$)
- Durée submersion

Vulnérabilité : Occupation du sol

Distinction du degré de vulnérabilité des constructions : habitations, établissements d'accueil de public vulnérable (écoles...), cliniques / stations d'épuration, équipements sportifs...

Caractérisation de l'aléa

Événement de référence

Crue centennale ou maximale observée si elle est supérieure

Méthode

- Etude hydrologique : Déterminer Q_{ref} en tout point de la zone d'étude
- Etude hydraulique : $Q_{ref}(t)$ fixé, détermination de Z_e , (V_e)
- Zonage du PPR s'imposant au PLU : classement en NC, constructible avec ou sans prescriptions

Qualification de l'aléa

Vitesse Hauteur	$V < 0,2 \text{ m/s}$	$0,2 \text{ m/s} < V < 0,5 \text{ m/s}$	$V > 0,5 \text{ m/s}$
$H < 0,5 \text{ m}$	Alea Faible	Alea Moyen	Alea Fort
$0,5 \text{ m} < H < 1 \text{ m}$	Alea Moyen	Alea Moyen	Alea Fort
$H > 1 \text{ m}$	Alea Fort	Alea Fort	Alea Fort

Tableau 6 : grille de caractérisation de l'aléa inondation

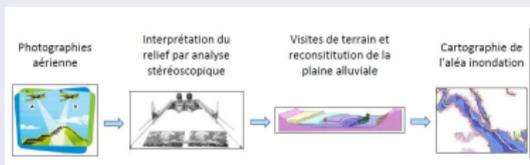
Aléas	Hors couche PAU	Inclus dans la couche PAU
Fort	Ri2*	Ri2*
Moyen	Ri2*	Bi2*
Faible	Ri1*	Bi1*

Tableau 7 : règles de caractérisation du zonage réglementaire

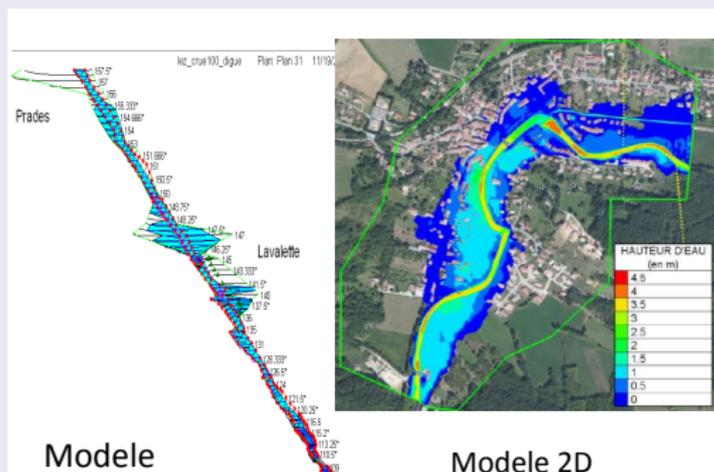
(Source : Guide méthodologique PPR inondation MATE – METL – 1999)

Etude hydraulique

Hydromorphologique



Modélisation



Zonage

