IICA

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERACION PARA LA AGRICULTURA — OEA

JAUGEAGE DU DEBIT DANS L'ECOULEMENT A SURFACE LIBRE

(METHODES SIMPLES)

A2/HT-86-037

Humberto Pizarro C.
Spécialiste en
Irrigation et Drainage
IICA/Haiti

Décembre 1986

BUREAU EN HAITI

PREFACE

L'Institut Interaméricain de Coopération pour l'Agriculture (IICA) est heureux de présenter aux professionnels du secteur agricole en général et aux spécialistes en Irrigation en particulier les "Méthodes Simples de Jaugeage du Débit dans l'Ecoulement à Surface Libre" du Dr Humberto Pizarro, Spécialiste en Irrigation et Drainage de l'IICA.

Cet ouvrage vient s'ajouter à la liste déjà longue d'une série consacrée aux problèmes de Gestion de l'Eau. Le document est présenté en six chapîtres principaux qui se distinguent tant par la simplicité du texte que par la clarté, la précision et la technicité de l'information. L'écriture mathématique a été maintenue à un niveau moyen de compréhension afin de permettre l'accès de l'ouvrage à une vaste clientèle.

La Représentation de l'Institut Interaméricain de Coopération pour l'Agriculture en Haiti félicite une fois de plus le Dr Pizarro de cette nouvelle contribution scientifique et technique à l'amélioration de la capacité technique et administrative des professionnels haïtiens de l'eau.

Percy Aitken-Soux
Représentant Résident
de l'IICA en Haiti

P R E A M B U L E

L'eau constitue un intrant très important dans la production agricole. Pour obtenir le meilleur résultat de son utilisation dans l'irrigation, il est nécessaire que ce liquide soit disponible pour les plantes en quantité, en qualité et au moment où le végétal en a besoin.

Cet ouvrage présente deux méthodes de jaugeage de la vitesse moyenne de l'écoulement: l'une emploie le moulinet et l'autre le flotteur. Ces deux appareils sont disponibles en Haiti et de manipulation facile. Le relevé de l'aire mouillée s'effectue à partir du sondage de la profondeur du tirant d'eau et de la largeur de la surface libre de l'eau. Le débit est égal au produit de la vitesse moyenne multiplié par la section mouillée.

Pour une gestion adéquate de l'eau, sa disponibilité doit être quantifiée par un contrôle systématique du débit. Le jaugeage du débit d'eau permet de contrôler son utilisation, d'éviter le gaspillage et ainsi obtenir une plus forte efficience, ce qui assurera la plus haute rentabilité de l'agriculture irriguée. De multiples bénéfices peuvent être obtenus à partir du jaugeage du débit, en voici quelques uns:

- Détermination de la superficie totale à cultiver lorsqu'on connaît d'une part les besoins bruts d'eau des cultures par unité d'aire et d'autre part les disponibilités d'eau dans les différentes étapes du cycle végétatif des cultures.
- La capacité de donner à chaque canal, lorsqu'on connaît la superficie à irriguer par celui-ci ainsi que les besoins de pointe des cultures.
- L'évaluation de l'efficience et de l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans un système d'irrigation.
- La planification d'une distribution équitable de l'eau disponible en fonction dutype de culture par unité d'aire cultivée.
- La contribution équitable des usagers selon la consommation annuelle de chacun d'eux.

Les avantages tirés à partir du contrôle de l'eau ainsi que le rôle du jaugeage du débit dans la gestion des ressources hydriques disponibles dans un système d'irrigation ont été les principales raisons qui ont porté à élaborer ce manuel.

Humberto Pizarro-Carbone
Spécialiste en Irrigation
et Drainage.
IICA/Haiti

TABLE DES MATIERES

Pages

Table des Matières..... i

Liste des Tableaux..... iii

Liste des Figures..... iv

I. INTRODUCTION.....

1.1 Nécessité de jaugeage du débit..... 1

1.2 But de ce manuel..... 2

II. L'ECOULEMENT..... 2

2.1 Classification de l'écoulement en relation avec l'espace..... 2

2.2 L'écoulement par rapport au temps..... 4

2.2.1 L'écoulement normal..... 6

2.3 Les types d'écoulement par rapport à la similitude de Reynolds..... 7

2.4 Les types d'écoulement par rapport à la similitude de Froude..... 7

III. LE CANAL..... 9

3.1 Les éléments géométriques d'un canal..... 9

3.2 Calcul des éléments géométriques d'un canal..... 10

3.3 Les éléments hydrauliques de l'écoulement dans un canal..... 12

IV. FORMULES POUR CALCULER LE DEBIT EN ECOULEMENT NORMAL..... 14

4.1 Formule de Manning..... 14

4.2 Formule de Chézy employé pour les canaux rectangulaires..... 14

4.3 Analyse de la pente..... 15

4.4 Exemple de calcul..... 16

V. CANAL D'EFFICIENCE HYDRAULIQUE MAXIMA..... 23

5.1 Canal de section continue..... 23

5.2 Les canaux trapézoïdaux et rectangulaires..... 24

Le coefficient de résistance..... 27

VI. DETERMINATION DU DEBIT PAR LE JAUGEAGE DE LA VITESSE ET LA SECTION TRANSVERSALE..... 27

6.1 Le moulinet..... 27

6.2 Calcul du débit..... 28

6.3 Limitations du moulinet..... 30

6.4 Le flotteur..... 30

6.5 Procédures pour mesurer la vitesse superficielle..... 31

6.6 Choix d'une station de jaugeage..... 36

VII. LA SECTION DE CONTROLE POUR MESURER LE DEBIT PAR LA RELATION Q = f(H) 36

7.1 La relation Q = f(H)..... 36

7.2 Station limnimétrique - Choix d'un endroit..... 41

7.3 Limnimètres..... 42

Mires..... 42

7.4 Section transversale d'un canal dans lequel l'écoulement est critique. 43

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux Pages

1 Exemple de calcul de débit par le moulinet..... 29

2 Distance horizontale entre deux verticales consécutives de mesure pour diverse largeurs du canal..... 48

3 Vitesses permissibles selon le type de terre..... 48

4 Talus pour canaux d'irrigation..... 50

LISTE DES FIGURES

Figures		Pages
1	Schéma de l'écoulement d'un tronçon de canal	2
2	Hydrogramme annuel de la rivière de l'Artibonite à Pont Sondé (1952)	5
3	Schéma de la section transversale d'un canal en terre	16
4	Schéma de la section transversale d'un canal trapézoïdal	23
5	Schéma d'une section transversale d'un cours d'eau dans lequel on va jauger le débit	24
6	Schéma pour indiquer le bief du cours sur lequel se fera le jaugeage du débit	31
7	Distances nécessaires pour calculer la vitesse superficielle de l'écoulement par le biais du double flotteurs et du double chronomètres	32
8	Schéma d'un bief d'un canal utilisé pour le jaugeage de la vitesse à l'aide d'un flotteur	34
9	Schéma de la section transversale d'un cours d'eau pour le calcul du débit	35
10	Schéma d'une courbe d'étalonnage Q = f(H)	40
11	Installation d'un limnimètre vertical dans un cours d'eau	42
12	Installation d'un limnimètre incliné dans un cours d'eau	42
13	Schéma d'un jaugeur Parshall	44
13-A	Variation de la vitesse dans une section transversale et calcul du débit	45
14	Schéma d'un jaugeur dégorgé	46
15	Schémas de profil des canaux	47
16	Schéma de la section transversale d'un canal et ses éléments géométriques	49

I. INTRODUCTION

L'eau tombe sous diverses formes à la surface du bassin versant pour se réunir dans un cours principal pour être conduite vers une grande masse d'eau qui sera un lac ou la mer.

L'écoulement tout en mouillant une section transversale du cours, se déplace avec une certaine vitesse, ce qui produit une transformation d'énergie mécanique en chaleur. Si cette vitesse est élevée, l'énergie de dissipation sera grande, ce qui va entraîner l'érosion du lit et des parois de la rivière. Par contre, lorsque cette vitesse est faible il y a peu de dissipation d'énergie, ce qui favorise la déposition des sédiments.

1.1 Nécessité du jaugeage du débit

L'eau qui coule dans une rivière peut être utilisée pour l'irrigation, pour l'industrie, pour la production de l'énergie hydro-électrique et pour l'alimentation en eau potable des villes. En général, pour un meilleurs usage de l'eau il faut la dériver de la rivière au moyen de canaux de dérivation. La quantification de l'eau se fait au jaugeage du débit qui permettra de déterminer:

a) La surface agricole qu'on peut arroser une fois que le besoin en eau des cultures programmées est connu;

b) Les dimensions des canaux pouvant conduire une quantité d'eau en régime normale à la hauteur désirée;

c) La puissance nécessaire aux machines hydrauliques qui seront utilisées soit pour la production d'énergie, dans le cas d'une turbine; soit pour l'élévation du niveau de l'eau lorsqu'on veut l'évacuer (drainage) ou lorsqu'on veut l'extraire du sous-sol;

d) Le montant que doit payer l'usager pour son utilisation.

1.2 But de ce manuel

Le but de ce manuel est de montrer les différentes façons les plus simples de jauger le débit d'un écoulement par le biais de la vitesse moyenne et de la section transversale mouillée. Pour obtenir la vitesse on se sert d'un moulinet ou d'un flotteur. Pour la section transversale on fait le relevé directement dans la section choisie.

II. L'ECOULEMENT

La masse de fluide se déplaçant dans une rivière peut être constante ou variable d'un point à un autre, selon qu'il y ait ou non des apports ou des prélèvements par dérivation ou par infiltration. La masse d'eau peut rester constante. Cependant les paramètres qui définissent l'écoulement peuvent varier (changement d'aire et de vitesse par contraction ou élargisde la section). L'écoulement naturel change avec le temps et l'espace. La figure 2 montre l'hydrogramme de l'Artibonite au niveau du Pont Sondé pour l'année 1952, ceci permet de constater la variation du débit à travers le temps.

2.1 Classification de l'écoulement en relation avec l'espace

L'écoulement dans un canal de section constante revêtu d'un matériel impeméable, ne change pas s'il n'y a pas de prises d'eau latérale; par contre, dans un canal naturel de section variable ou dans un canal artificiel ayant

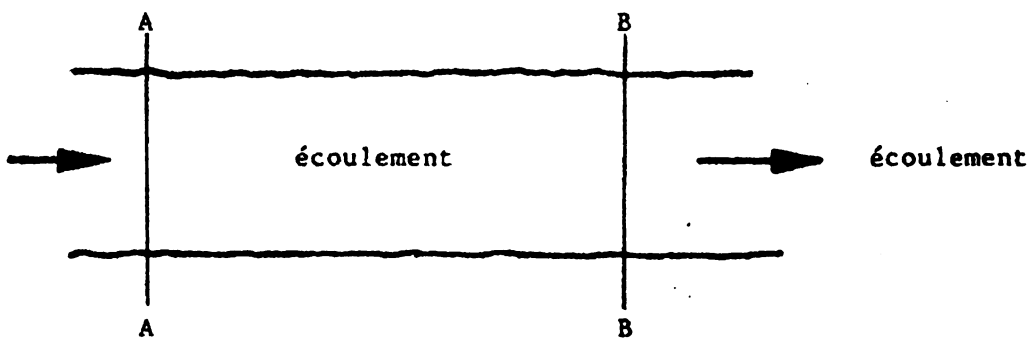


Figure 1: Schéma de l'écoulement dans un tronçon de canal.

des prises latérales, l'écoulement varie d'un point à un autre sur le tronçon. L'écoulement est uniforme lorsque tous ses paramètres restent constants, au contraire si les paramètres changent, on dit que l'écoulement est varié.

La figure 1 montre le tronçon d'un canal. Désignons par le sous-indice A et par le sous-indice B les paramètres de l'écoulement dans les sections A et B, on a:

Q_A et Q_B = Débit en A et débit en B.

A_A et A_B = L'aire mouillée en A et en B.

P_A et P_B = Le périmètre mouillé en A et en B

Y_A et Y_B = Le tirant d'eau en A et en B.

V_A et V_B = La vitesse en A et en B.

L'écoulement est uniforme si

$$Q_A = Q_B$$

$$A_A = A_B$$

$$P_A = P_B$$

$$Y_A = Y_B$$

$$V_A = V_B$$

L'écoulement sera varié par rapport à l'un des paramètres si celui-ci est différent dans les deux sections. Par exemple si $Y_A \neq Y_B$ on dit que l'écoulement est varié par rappor au tirant d'eau.

La variation du paramètre choisi (le tirant d'eau Y) peut être lente, dans ce cas on dit que l'écoulement est graduellement varié. Ce type d'écoulement peut se produire dans beaucoup de cas, par exemple lorsque le cours d'eau est intercepté par un barrage.

EXEMPLE: L'écoulement à l'amont du barrage de Caneau.

Dans d'autres conditions, le paramètre peut changer brusquement.

EXEMPLE: Une chute où il se produit un résaut hydraulique.

2.2 L'écoulement par rapport au temps

Si on se place dans une section quelconque du canal, soit A-A de la figure 1 et que les paramètres de l'écoulement ne changent pas avec le temps, on dit que l'écoulement est permanent. Si au contraire, il y a une variation de l'un des paramètres par rapport au temps, l'écoulement est non permanent.

Soit: Q_o le débit dans la section A-A dans le temps t_o

Q_1 le débit dans la section A-A, dans le temps t_1

A_o l'aire mouillée dans la section A-A, dans le temps t_o

A_1 l'aire mouillée dans la section A-A, dans le temps t_1

P_o le périmètre mouillé dans la section A-A, dans le temps t_o

P_1 le périmètre mouillé dans la section A-A, dans le temps t_1

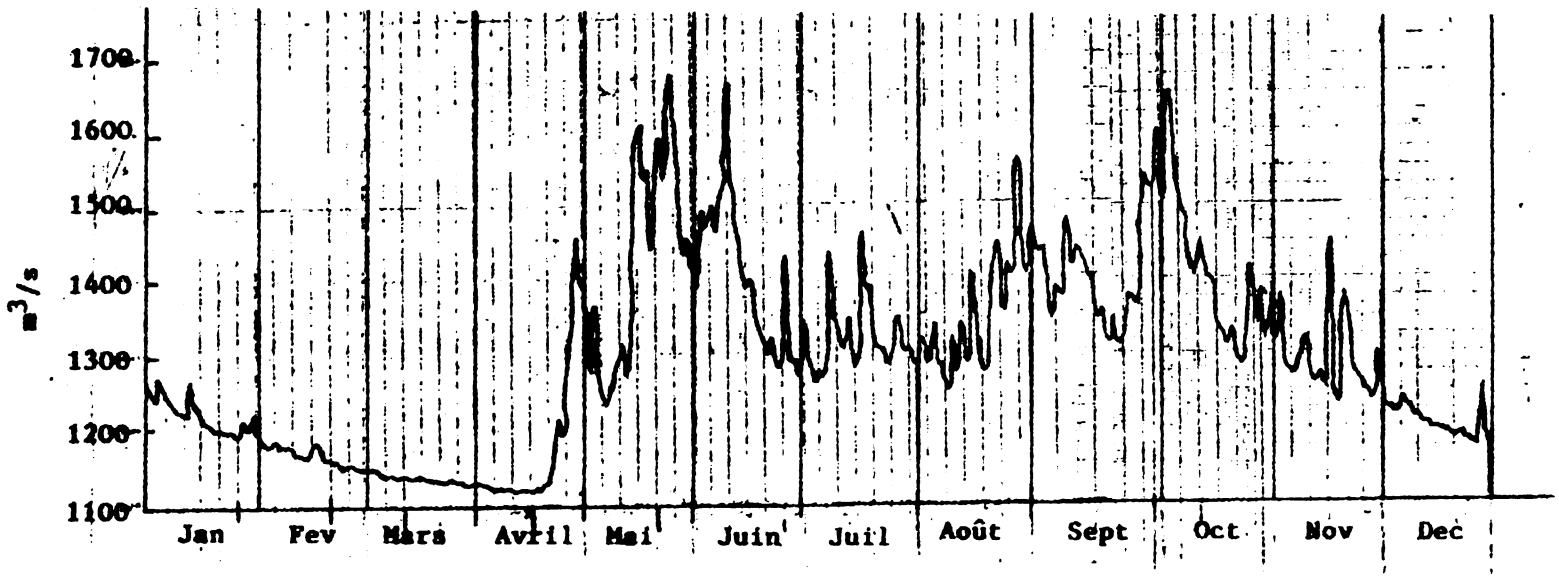
Y_o le tirant d'eau dans la section A-A, dans le temps t_o

Y_1 le tirant d'eau dans la section A-A, dans le temps t_1

V_o la vitesse dans la section A-A, dans le temps t_o

V_1 la vitesse dans la section A-A, dans le temps t_1

Figure 2: Hydrogramme annuel de la rivière Artibonite à Pont Sondé (1952).



Dans l'hypothèse que $t_o \neq t_1$ l'écoulement est permanent si :

$$A_o = A_1$$

$$Q_o = Q_1$$

$$P_o = P_1$$

$$Y_o = Y_1$$

$$V_o = V_1$$

Par contre l'écoulement sera non permanent si:

$$Q_o \neq Q_1$$

$$A_o \neq A_1$$

$$P_o \neq P_1$$

$$Y_o \neq Y_1$$

$$V_o \neq V_1$$

2.2.1 L'écoulement normal

Dans les canaux artificiels de section constante où l'infiltration, l'évaporation et les apports d'eau dans le canal sont négligeables d'une part, et d'autre part lorsque l'ouverture de la vanne à l'entrée de l'eau dans le canal est constante, l'écoulement est dit uniforme et permanent et on le désigne par **écoulement normal.**

Dans les cours d'eau naturels (rivières) l'écoulement est variable dans le temps et dans l'espace à cause des phénomènes d'infiltration, de l'évaporation, des apports d'affluents et des prélèvements par des effluents.

Le jaugeage du débit par la mesure de la vitesse et de l'aire mouillée se base dans l'hypothèse que l'écoulement est normal (Cette hypothèse doit être vérifiée au préalable pour s'assurer de la validité des résultats).

2.3 Les types d'écoulement par rapport à la similitude de Reynolds

La similitude de Reynolds se présente par l'identité:

$$R_e = \frac{VL}{\nu}$$

Où:

R_e = Nombre de Reynolds (sans dimensions)

V = Vitesse moyenne de l'écoulement (L/T)

L = Grandeur linéaire représentative de l'écoulement

ν = Viscosité de l'eau à une température donnée. Si $T^oC = 20^oC$

$\nu = 10^{-6}\ m^2/S,\ (L^2/T)$

Dans le cas de l'écoulement à surface libre, cela peut être:

a) laminaire si $Re < 500$

b) turbulent si $Re > 1000$

c) transitionnel si $500 < Re < 1000$

2.4 Les types d'écoulement par rapport à la similitude de Froude

La similitude de Froude se présente par l'expression ci-après:

$$Fe = \frac{V}{(gL)^{0,5}}$$

Où:

F = Nombre de Froude (sans dimensions)

V = Vitesse moyenne de l'écoulement (L/T)

L = Grandeur linéaire représentative de l'écoulement (L)

g = Accélération de la pesanteur (L/T^2)

Dans le cas de l'écoulement à surface libre, l'écoulement sera:

1) Sous-critique si $F < 1$

2) Critique si $F = 1$

3) Super critique si $1 < F < 2$

4) Hypercritique si $F > 2$

Les similitudes de Reynolds et de Froude jouent un rôle très important dans l'écoulement à surface libre. Elles constituent les lois hydrauliques à respecter dans les essais sur modèles réduits des structures d'irrigation et de drainage afin de trouver la forme adéquate de la structure, considérant aussi bien l'aspect technique que l'aspect économique.

D'autre part, on se sert de l'écoulement critique pour jauger le débit quand on connaît la section du canal et la hauteur critique (y_c) de l'écoulement; ainsi dans un canal rectangulaire en écoulement critique et turbulent, on a la relation:

$$q^2 = gy^3_c$$

Où:

q = Le débit spécifique (le débit par unité de largeur du canal) (L^3/TL).

g = Accélération de la pesanteur (L/T^2)

y_c = Hauteur critique de l'écoulement (L)

L'écoulement sous-critique est à vitesse lente et à grand tirant d'eau, ce qui permet son captage par des prises latérales, c'est pour cette raison qu'il est conseillé que l'écoulement dans les canaux d'irrigation soit un écoulement sous-critique. L'écoulement super-critique est au contraire, à grande vitesse et à tirant d'eau faible. Cet écoulement n'est pas recommandé pour la dérivation de l'eau destinée à l'irrigation.

III LE CANAL

Le canal est constitué par une paroi solide contenant du fluide en mouvement. Celle-ci peut être en: terre compactée, béton, maçonnerie, pierres, fer, bois etc. La forme du canal peut être: rectangulaire, trapézoïdale, triangulaire, carré, fer à cheval, circulaire, semi-circulaire, etc pour les cas simples; la combinaison de deux formes simples donne une forme composée.

3.1 Les éléments géométriques d'un canal

Dans une section transversale d'un canal on peut distinguer:

a) L'aire mouillée (A est la section droite du fluide en mouvement (L^2);

b) Le périmètre mouillé (P), est la longueur de la section transversale mouillée de la paroi qui se trouve en contact avec le fluide (L);

c) Le rayon hydraulique (Rh), est la relation entre l'aire mouillée et le périmètre mouillé (L);

d) La largeur du lit (b), est la base inférieure du canal (L);

e) Le fruit de berge ou talus (z) est la relation entre la longueur horizontale et la longueur verticale de l'inclinaison de la paroi du canal. Pour un canal rectangulaire (z = 0);

f) Le bord libre ou revanche (f) est la hauteur comprise entre le tirant d'eau d'un écoulement normal et la hauteur totale du canal. Le

bord libre doit tenir compte de la montée du niveau d'eau dans le canal dûe à la pluie (qui tombe directement à l'intérieur de celui-di) ou à la fermeture d'une vanne entrainant un écoulement graduellement varié;

g) La largeur supérieure du canal (B) est la largeur de la surface libre de l'eau dans le canal (L);

h) La profondeur moyenne (D) est la relation entre l'aire mouillée et la largeur supérieure du canal (L), $D = \frac{A}{B}$.

3.2 Calcul des éléments géométriques d'un canal:

Canal trapézoïdal

$$A = by + zy^2$$

$$P = b + 2y\,(z^2 + 1)^{0.5}$$

$$Rh = \frac{A}{P} = \frac{by + zy^2}{b + 2y\,(z^2 + 1)^{0.5}}$$

$$B = b + 2\,zy$$

$$D = \frac{by + zy^2}{b + 2\,zy}$$

Canal rectangulaire: $z = 0$

$$A = by$$

$$P = b + 2y$$

$$Rh = \frac{by}{b + 2y} \quad ; \text{ si } b \quad 20\,y;\ Rh = y$$

$$B = b$$

$$D = y$$

<u>Canal triangulaire</u>: $b = 0$

$$A = zy^2$$

$$P = 2y(z^2 + 1)^{0.5}$$

$$Rh = \frac{zy^2}{2y(z^2 + 1)^{0.5}}$$

$$B = 2zy$$

$$D = \frac{y}{2}$$

<u>Canal semi-circulaire</u> ($\emptyset$ = diamètre du canal)

$$A = \frac{\pi \emptyset^2}{8}$$

$$P = \frac{\pi \emptyset}{2}$$

$$Rh = \frac{\emptyset}{4}$$

$$B = \emptyset$$

$$D = \frac{\pi \emptyset}{8}$$

$$\pi = 3.14159$$

Les canaux peuvent être naturels tel le cas des rivières: l'Artibonite, l'Estère, Cabeuil, Coupe à l'Inde qui se trouvent sur la Vallée de

l'Artibonite, ou artificiels tels que le canal de la Rive Droite (Right Bank Canal), le canal Upper Benoît, le canal Tête Morte du Système Momance dans la plaine de Léogâne, le canal principal du système d'irrigation Dubreuil.

En relation avec la surface du terrain, les canaux peuvent être complètement ou partiellement excavés ou en remblais compactés. Si dans son parcours le canal doit traverser une dépression on a la possibilité de placer soit un siphon, soit un aqueduc.

EXEMPLES: Le siphon de Caneau situé à l'origine du canal de la Rive Droite.
L'aqueduc du canal Desdunes traversant la rivière l'Estère pour arroser les terres de Grand Islet.

D'autre part, on dit que le canal est uniforme si sa section transversale est constante dans le tronçon considéré (le canal Villard par exemple). Dans le cas contraire, on parle d'un canal variable (la Rivière Artibonite).

3.3 Les éléments hydrauliques de l'écoulement dans un canal

a) Débit (Q). C'est le volume de fluide par unité de temps qui traverse la section transversale d'un canal (L^3/T). Le débit est exprimé en mètres cubes par seconde (m^3/s); litres par seconde (l/s), etc.

b) Vitesse (V) - Distance parcourue par une particule fluide dans l'unité de temps ($\frac{L}{T}$). A cause de la résistance qu'offrent la paroi solide et les particules fluides, la vitesse de l'écoulement est ponctuelle et elle change d'un point à un autre, aussi bien dans la direction verticale que dans la direction horizontale; c'est la raison pour laquelle on parle de la distribution de la vitesse dans une section transversale de l'écoulement.

c) Vitesse moyenne (Vm) - Dans le cas des canaux d'irrigation et de drainage on s'interesse au débit (Q) égal au produit de la vitesse moyenne

multipliée par l'aire de la section transversale. Pour obtenir la vitesse moyenne on utilise l'expression suivante:

$$V_m = \frac{\int_A . VdA}{A}$$

Où:

$\int_A$ = Intégrale dans toute la surface A

dA = Aire élémentaire

V = Vitesse perpendiculaire à l'aire

A = Aire totale de la section transversale.

Si on prend une aire finie, l'expression de la vitesse moyenne devient:

$$V_m = \frac{\sum_{i=i}^{n} A_i V_i}{A}$$

d) La pente (I) est la différence de niveau entre deux points d'un canal, divisée par la distance qui les sépare. C'est un paramètre sans dimension ($\frac{L}{L}$). Dans l'écoulement à surface libre, on distingue trois types de pente:

d.1) Pente de la ligne d'énergie (J) qui est la chute d'énergie entre deux points divisés par la distance qui les sépare.

d.2) Pente de la surface libre de l'eau (i) qui est la différence de niveau entre deux points de la surface libre divisée par la distance qui les sépare.

d.3) Pente du radier (I) qui est la différence des côtes de deux points du radier du canal divisé par la distance qui les sépare.

e) Le coefficient de rugosité (n) représente la résistance qu'offre le canal à l'écoulement ($L^{1/6}$).

IV. FORMULES POUR CALCULER LE DEBIT EN ECOULEMENT NORMAL

Pour le calcul du débit en écoulement normal, on présentera les deux formules empiriques qui sont très utilisées par les hydrauliciens.

4.1 Formule de Manning

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{0.6667} J^{0.5}$$

4.2 Formule de Chézy employée pour les canaux rectangulaires

$$Q = C A R_h^{0.5} J^{0.5}$$

Où Q, A, R_h, J et n ont été déjà définis. C est le coefficient de conductance de Chézy. C et n sont liés par les relations ci-après:

$$C = \frac{1}{n} Rh^{1/6}$$

$$n = \frac{1}{C} Rh^{1/6}$$

Du point de vue pratique, on trouve deux problèmes à résoudre pour l'écoulement normal:

1. Calculer le débit si on connaît la pente, le coefficient de rugosité, la largeur du lit, le talus et la hauteur d'eau.

2. Calculer la hauteur d'eau quand on connaît le débit, la largeur du lit, le talus du canal, la pente du radier et le coefficient de rugosité.

4.3 Analyse de la pente

Dans un écoulement normal la ligne du fond du radier, la ligne de la surface libre de l'eau et la ligne d'énergie sont parallèles quoiqu'on a la condition:

$$J = i = I$$

C'est pour cela, dans les formules précédentes on peut écrire:

$$Q = \frac{1}{n} A\ Rh^{0.06667}\ i^{0.5} \qquad \text{(Manning)}$$

$$Q = C\ A\ Rh^{0.5}\ i^{0.5} \qquad \text{(Chézy)}$$

$$Q = \frac{1}{n} A\ Rh^{0.6667}\ I^{0.5} \qquad \text{(Manning)}$$

$$Q = C\ A\ Rh^{0.5}\ I^{0.5} \qquad \text{(Chézy)}$$

En ce qui concerne les avant-projets d'irrigation et de drainage, on connaît le débit que doit conduire le canal pour arroser une superficie agricole déterminée. De la même manière, on doit connaître, dans un certains endroit bien déterminé, le débit d'évacuation que doit écouler le drain. On se pose la question à savoir: quelles seront les dimensions du canal pour écouler un tel débit ? La réponse est obtenue après plusieurs essais, en considérant connus: la pente du radier (I), le coefficient de rugosité (n) et les fruits de berge (Z). Pour un débit donné, à chaque valeur de la largeur du radier correspond une hauteur normale. Si on utilise le critère d'efficience hydraulique maximale, on trouve une solution unique. Cependant, pour des raisons constructives, il n'est pas possible dans tous les cas de choisir un canal à efficience hydraulique maximale.

4.4 Exemples de calcul

Calculer le débit que conduit un canal à partir des données suivantes:

Coefficient de rugosité:	n = 0.0225
Pente du radier	I = 0.0002
Largeur du canal	b = 3.00 m
Hauteur d'eau	Y = 1.15 m
Talus	Z = 1.5

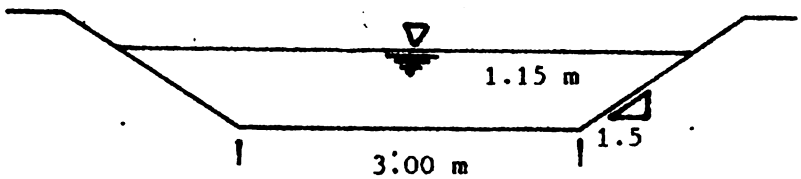


Figure 3: Schéma de la section transversale d'un canal en terre.

A partir de ces données de base on peut calculer:

$$A = by + zy^2 = 3(1.15) + 1.5\ (1.15)^2 = 3.45 + 1.983375$$

$$A = 5.43375\ m^2$$

$$P = b + 2y(z^2 + 1)^{0.5} = 3 + 2(1.15)\ [(1.5)^2 + 1]^{0.5} = 3 + 3.6(1.18) = 7.14\ m$$

$$Rh = \frac{A}{P} = \frac{5.43375}{7.14} = 0.76 \; ; \; Rh^{2/3} = 0.8328 \text{ m}$$

$$I^{0.5} = 0.01414$$

$$n = 0.0225$$

$$Q = \frac{1}{0.0225} (0.8328) (5.43375) \, 0.0141 = 2.843$$

$$Q = 2.843 \text{ m}^3/1$$

On peut trouver les dimensions d'un canal quand on connaît le débit, la pente du radier, le coefficient de rugosité et le talus. D'après la grandeur du débit et du type de machine à utiliser pour l'excavation, on se donne une largeur du radier.

EXEMPLE: Déterminer les dimensions d'un canal d'irrigation qui doit conduire 3 m^3/s, le coèfficient de rugosité $n = 0.0225$, la pente du radier $I = 0.0002$ et le talus $Z = 1.5$.

A partir de la formule de Manning:

$$\frac{Qn}{I^{0.5}} = ARh^{0.6667}$$

$$\frac{(3)(0.0225)}{0.01414} = ARh^{0.6667}$$

On sait que $ARh^{0.6667} = (by + Zy^2)\left[\frac{by + Zy^2}{b + 2y(Z^2 + 1)^{0.5}}\right]^{0.6667}$

a) <u>Premier essai</u> b = 2m

$$ARh^{2/3} = (2y + 1.5\ y^2)\left[\frac{2y + 1.5\ y^2}{2 + 3.6\ y}\right]^{0.6667}$$

y est la seule inconnue mais l'expression n'est pas linéaire, c'est pourquoi la solution n'est pas directe et il faut procéder par tatonnement. Dans ce cas, on introduit la relation suivante:

$$\frac{Qn}{I^{0.5}} = ARh^{2/3} = F(y)*$$

Dans l'exemple F(y)* = 4.7737

D'autre part on pose

$$f(y) = (by + Zy^2)\ \left[\frac{by + Zy^2}{b + 2y(Z^2 + 1)^{0.5}}\right]^{0.6667}$$

Dans l'exemple

$$f(y) = (2y + 1.5y^2)\ \left[\frac{2y + 1.5y^2}{2 + 3.6y}\right]^{0.6667}$$

Maintenant on doit donner des valeurs à y pour trouver celle qui correspond à f(y), ainsi:

$$y = 1.0$$

$$f(y = 1.0) = (2' + 1.5)\left(\frac{2 + 1.5}{2 + 3.6}\right)^{0.6667} =$$

$$\frac{(3.15)^{1.6667}}{(5.6)^{0.6667}} = \frac{6.76915}{3.1536} = 2.1464$$

$f\ (y = 1.0) = 2.1464 < 4.7737$

$f\ (y = 1.0) < F(y)^*$

D'après le résultat, on doit augmenter la valeur de y. Soit y = 1.2

$y = 1.2 = f(y = 1.2)$

$$f(y = 1.2) = \frac{[2(1.2) + 1.5(1.2)^2]^{1.6667}}{[2 + 3.6(1.2)]^{0.6667}} = \frac{12.539976}{3.4185} = 3.6682$$

$f\ (y = 1.2) < F(y)^*$

Il faut augmenter la valeur de y, soit:

$y = 1.3$

$$f(y = 1.3) = \frac{[2(1.3) + 1.5(1.3)^2]^{1.6667}}{[2 + 3.6(1.3)]^{0.6667}} = \frac{15.28473}{3.547} = 4.309$$

$4.309 < 4.77^*$; $f(y = 1.3) < F(y)^*$

Prenons:

$y = 1.35$

$$f(y) = \frac{[2(1.35 + 1.5(1.35)^2]^{1.6667}}{[2 + 3.6(1.35)]^{0.6667}} \quad \frac{16.7954}{3.61} = 4.6524$$

$4.6524 < 4.7737$

$f(y) < F(y)^*$, soit:

$y = 1.37$

$$f(y) = \frac{[2(1.37) + 1.5(1.37)^2]^{1.6667}}{[2 + 3.6(1.37)]^{0.6667}} = \frac{17.4265}{3.6358} = 4.7930$$

$4.7930 > 4.7737$

$F(y)^* > f(y)$

Dans ce cas il faut diminuer la valeur de y, soit:

$y = 1.365$

$$f(y = 1.365) = \frac{[2(1.365) + 1.5(1.365)^2]^{1.6667}}{[2 + 3.6(1.365)]^{0.6667}} = \frac{17.26728}{3.6295} =$$

4.757

$4.7574 < 4.7737$

$f(y) < F(y)^*$

$1.365 < yn < 1.37$

Compte tenu du résultat, on peut prendre pour le niveau normal:

$$y = 1.37 \text{ m}$$

Dans ce cas on a:

$A = 5.5553 \text{ m}^2$

$P = 6.932 \text{ m}$

$Rh = 0.80 \text{ m}$

$V = 0.54 \text{ m/s}$ (A)

$f = 0.2(yn) = 0.2(1.37) = 0.274 \text{ m}$

b) <u>Deuxième essai</u>

Avec $Q = 3 \text{ m}^3/\text{s}$

$n = 0.0225$

$I = 0.0002$

$Z = 1.5$

$b = 2.5 \text{ m}$

Prenons: $y = 0$

Suivant la même procédure, nous avons:

$$f(y = 1.0) = \frac{[2.5(1) + 1.5(1)^2]^{1.6667}}{[2.5 + 3.6(1)]^{0.6667}} = \frac{(4)^{1.6667}}{(6.1)^{0.6667}} =$$

$$\frac{10.079}{3.3387} = 3.018$$

$3.018 < 4.7737$

$f(y) < F(y)^*$

Pour y = 1.25

$$f(y = 1.25) = \frac{[2.5(1.25) + 1.5(1.25)^2]^{1.6667}}{[2.5 + 3.6(1.25]^{0.6667}} = \frac{16.76105}{3.6595431}$$

$$f(y = 1.25) = 4.6388$$

$f(y) < F(y)^*$

Pour y = 1.27

$$f(y = 1.27) = \frac{[2.5(1.27) + 1.5(1.27)^2]^{1.6667}}{[2.5 + 3.6(1.27)]^{0.6667}} = \frac{17.630893}{3.6845955} =$$

$f(y = 1.27) = 4.7850$

$f(y) > F(y)^*$

Compte tenu du résultat, on peut prendre comme tirant normal

Yn = 1.27

Dans ce cas, on a:

$A = 5.59435\ m^2$

P = 7.072 (B)

Rh = 0.72635 m

V = 0.5362 m/s

f = 0.2(yn) = 0.2(1.27) = 0.254 m

Si on compare ces deux résultats, on voit que la solution A est plus convenable parce qu'il y a une moindre excavation que dans le cas B.

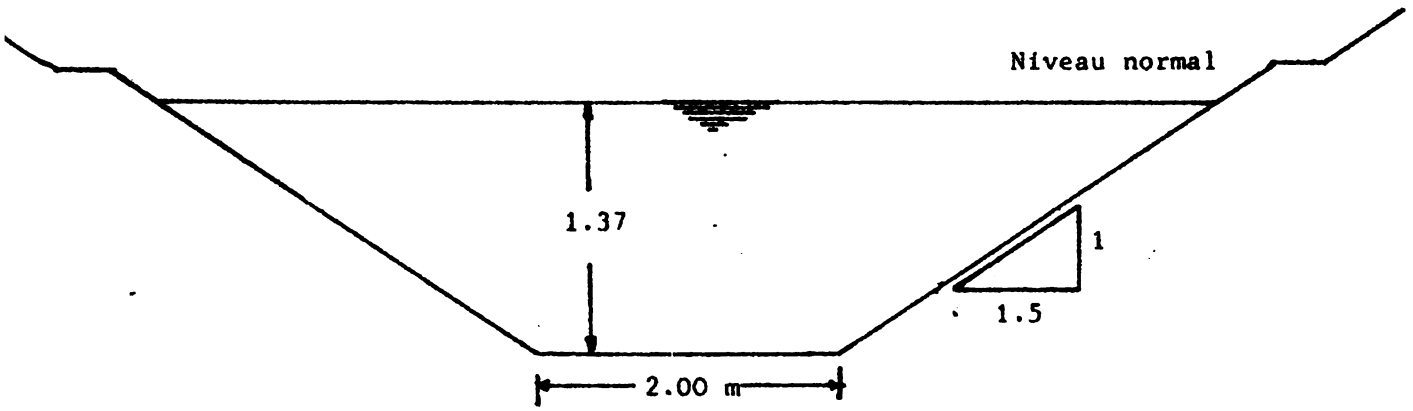


Figure 4: Schéma de la section transversale d'un canal trapézoïdal.

V. CANAL DE MAXIMA EFFICIENCE HYDRAULIQUE

5.1 Canal de section continue

La section transversale minimale d'un canal qui laisse passer un débit donné ou si pour une aire mouillée donnée le débit est maximum, on dit que cette section est d'**Efficience Hydraulique Maximale**. D'après la formule de Manning on a:

$$Q = \frac{1}{n} ARh^{2/3} I^{0.5}$$

Pour I et n donnés A est directement proportionnel au rayon hydraulique si l'aire est constante. Ainsi, on peut écrire:

$$Q = K(ARh)^{2/3} = KA^{5/3}\ p^{-2/3}$$

$$A = f(y); \quad P = g(y)$$

Pour trouver l'aire qui nous donne le débit maximum, on applique le critère du calcul infinitésimal:

$$dQ = 0$$

$$dQ = K\ \frac{5}{3}\ A^{-2/3}\ dA - \frac{2}{3}\ A^{5/3}\ p^{-5/3}\ dP = 0$$

D'où il résulte que:

$$5\ A^{2/3}\ p^{-2/3}\ \ dA = 2\ A^{5/3}\ p^{-5/3}\ dp$$

$$5\ PdA = 2\ AdP$$

Cette relation est applicable si l'expression algébrique de l'aire mouillée est dérivable; c'est le cas des canaux de section circulaire et parabolique.

5.2 Les canaux trapézoïdale et rectangulaire

- canal trapézoïdal:

$$A = by + Zy^2 \qquad (1)$$

$$P = b + 2y(Z^2 + 1)^{0.5} \qquad (2)$$

Pour une aire donnée, le périmètre doit être minimum, ce qui permet d'avoir un Rh et un débit maxima.

De (1) et (2)

$$P = Ay^{-1} - Zy + 2y(Z^2 + 1)^{0.5}$$

$$P = Ay^{-1} + y[2(Z^2 + 1)^{0.5} - Z]$$

$$\frac{dP}{dy} = - Ay^{-2} + 2(Z^2 + 1)^{0.5} - Z \qquad (3)$$

Pour que l'expression (3) devienne minimale il faut que:

$$\frac{dp}{dy} = 0$$

De (3) on a:

$$Ay^{-2} = 2(Z^2 + 1)^{0.5} - Z$$

$$A = y^2[2(Z^2 + 1)^{0.5} - Z] \qquad (4)$$

D'autre part, on sait que:

$$A = by + Zy^2 = y^2[2(Z^2 + 1)^{0.5} - Z]$$

$$b = 2y[Z^2 + 1)^{0.5} - Z] \qquad (5)$$

$$P = 2y[(Z^2 + 1)^{0.5} - Z] + 2y(Z^2 + 1)^{0.5}$$

$$P = 4y(Z^2 + 1)^{0.5} - 2yZ = 2y\ [2(Z^2 + 1)^{0.5} - Z]$$

$$Rh = \frac{y^2\ [2(Z^2 + 1)^{0.5} - Z]}{2y\ [2(Z^2 + 1)^{0.5} - Z]} = \frac{y}{2}$$

- Pour un canal rectangulaire Z = 0

EXEMPLE: Trouver les dimensions d'un canal d'efficience hydraulique maxima qui doit conduire 3 m^3/s; n = 0.0225; I = 0.0002; Z = 1.5.

De l'équation (4)

$$A = [2(1.5^2 + 1)^{0.5} - 1.5]y^2 = 2.1\ y^2$$

$$b = 0.6\ y$$

$$Q = \frac{0.01414}{0.0225}\ (2.1\ y^2)(\frac{y}{2})^{2/3} = \frac{(0.62844)2.1\ y^{8/3}}{1.5874}$$

$$Q = 0.8313\ y^{8/3}$$

$$(\frac{3}{0.8313})^{3/8} = y; \quad y = 1.618 = 1.62\ m$$

$$A = 3.398 = 3.4\ m^2$$

$$V = \frac{3}{3.4} = 0.8828\ m/s$$

$$b = 0.6(1.62) = 0.972\ m$$

$$P = 4.2\ y = 4.2(1.62) = 6.8\ m$$

Il est certain que ce canal a une aire d'excavation plus petite que celui qu'on a calculé avant, mais il est plus profond et sa vitesse est aussi plus grande; il reste à savoir si l'excavateur peut travailler aisément sans que son rendement soit affecté dans le cas où sa vitesse n'arrive pas à éroder les parois et le lit. En résumé, un canal d'efficience hydraulique maxima n'a pas toujours la section la plus économique.

5.3 le coefficient de résistance

S'il n'y a pas d'entretien, le canal sera envahi par la végétation. La résistance à l'écoulement ainsi que le tirant d'eau vont croître, ce qui va entraîner l'inondation des berges et des champs cultivés et le gaspillage de l'eau. Dans ces conditions l'eau ne sera plus suffisante pour arroser la surface prévue d'où un décroissement de la production. Ainsi, pour conserver la capacité de la conduction d'un canal, il est nécessaire de l'entretenir afin de maintenir la valeur du coefficient de rugosité.

VI. DETERMINATION DU DEBIT PAR LE JAUGEAGE DE LA VITESSE ET LA SECTION TRANSVERSALE

Pour mesurer le débit de l'eau à l'intérieur d'un canal en fonctionnement on détermine d'abord l'aire mouillée par sondage, puis on calcule la vitesse moyenne.

6.1 Le moulinet

Le moulinet est un appareil servant à mesurer la vitesse d'un cours d'eau. Il est constitué d'une hélice qui tourne sous l'effet de la vitesse de l'écoulement et doit être étalonné dans un laboratoire hydraulique afin de trouver la relation entre la vitesse ainsi que le nombre de tours réalisé par ceci. Le calibrage doit être effectué au moins chaque trois ans ou toutes les fois que l'on soupçonne une variation dans la relation d'étalonnage. Le moulinet doit être utilisé lorsqu'il existe une relation linéaire entre la vitesse de l'écoulement et le nombre de tours.

$$V = aN + b$$

où

V = Vitesse en m/s

N = Nombre de tours par seconde

a et b sont les constantes de l'appareil

Le moulinet mesure la vitesse ponctuelle de l'écoulement, c'est la raison pour laquelle on utilise plusieurs procédures pour trouver la vitesse dans une section verticale.

6.2 Calcul du débit

1. Pour calculer le débit, on prend la vitesse jaugée à 0.6 y comme la vitesse moyenne enregistrée dans une section verticale, y étant le tirant d'eau dans la verticale.

2. On prend la moyenne des vitesses mesurées à 0.2y et 0.8y est la vitesse moyenne.

$$Vm = \frac{V_{0.2} + V_{0.8}}{2}$$

Pour trouver le débit en utilisant le moulinet, on procède ainsi:

- On divise la largeur de la surface libre de l'eau dans la section transversale choisie en tronçons de 1 ou 2 mètres de longueur;
- On calcule la vitesse moyenne selon la procédure choisie, à l'intérieur de chaque verticale;
- On calcule le débit pour la surface limitée par deux verticales consécutives;
- On fait la somme des débits partiels pour trouver le débit total.

Les données concernant chaque tronçon seront groupées de la manière suivante: on tâchera de remplir les cases directement sur le terrain.

Rive	Distance	$V_{0.2}$	$V_{0.6}$	$V_{0.8}$	V_{mi}	Vm	Ai	Qi

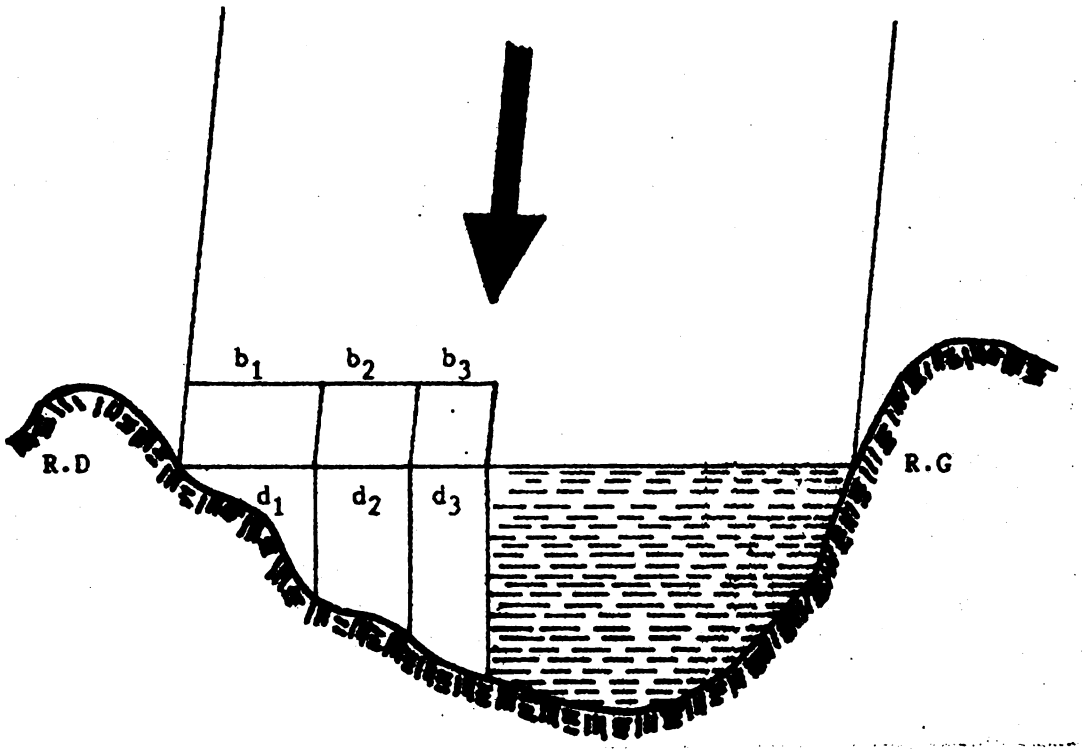


Figure 5: Schéma d'une section transversale d'un cours d'eau dans lequel on va jauger le débit.

Tableau 1: Exemple de calcul de débit par le Moulinet

Rive Gauche	Distance	$V_{0.2}$	$V_{0.6}$	$V_{0.8}$	Vm	Vm_i	di	Ai	Oi
	0	0		0	0		0		0.125
						0.5		0.250	0.125
1	1	1.2		0.8	1		0.5		
						1.0		1.600	1.600
2	2	1.1		0.9	1		1.1		
						1.05		2.300	2.415
3	2	1.2		1.0	1.1		1.2		
						1.05		2.700	2.835
4	2	1.2		0.8	1.00		1.5		
						1.05		3.200	3.360
5	2	1.3		0.9	1.1		1.7		
						0.90		2.300	2.070
6	2	0.9		0.5	0.7		0.6		
						0.35		0.150	0.052
7	0.5	0		0	0		0		

6.3 Limitations du moulinet

A côté de beaucoup d'avantages, l'utilisation du moulinet présente beaucoup de limitations telles que:

- Son utilisation dans les courants turbulants diminue la précision de la mesure du débit;
- Son emploi devient difficile lorsque le courant transporte beaucoup de sédiments;
- L'exactitude, selon le nombre de verticales considérées dans le meilleur des cas, arrive jusqu'à 3 %;
- Son utilisation est à éviter lorsque la vitesse de l'eau est supérieure à 3 m/s.

6.4 Le flotteur

C'est un outil permettant de mesurer la vitesse superficielle de l'écoulement. Son poids doit être négligeable pourqu'il puisse se déplacer à la même vitesse que les lignes de courants superficiels de l'écoulement.

Pour trouver la distribution des vitesses à l'intérieur d'une verticale et le long du canal, il faut passer de la vitesse moyenne superficielle à la vitesse moyenne de l'écoulement.

L'expérience montre que l'on peut trouver la vitesse moyenne par l'expression suivante:

$$V = K\ Vms$$

Où:

Vm = Vitesse moyenne de l'écoulement
K = Facteur de conversion
Vms = Vitesse moyenne superficielle

Le facteur de conversion K varie d'une section à une autre dans un même canal, c'est la raison pour laquelle il faut trouver sa valeur pour la section sélectionnée.

6.5 Procédures pour mesurer la vitesse superficielle

Pour mesurer la vitesse superficielle, on passe par la formule suivante:

$$V = \frac{e}{T}$$

Où:

V = Vitesse $(\frac{L}{T})$

e = Espace parcouru par le flotteur

t = Temps dans lequel le flotteur parcourt l'espace e

Pour réaliser l'opération, il est nécessaire d'avoir deux flotteurs, deux chronomètres, un ruban métrique et deux jalons.

On commence par sélectionner un tronçon uniforme du canal d'environ 30 à 50 mètres de longueur en plaçant un jalon dans chaque point extrême, puis on jette le flotteur dans l'eau. Lorsque celui-ci aura traversé le premier jalon, on met le chronomètre en marche pour l'arrêter lorsque le flotteur aura traversé le deuxième jalon. Cette opération permet d'obtenir, à la fois, le temps et la vitesse parcourue pendant ce temps.

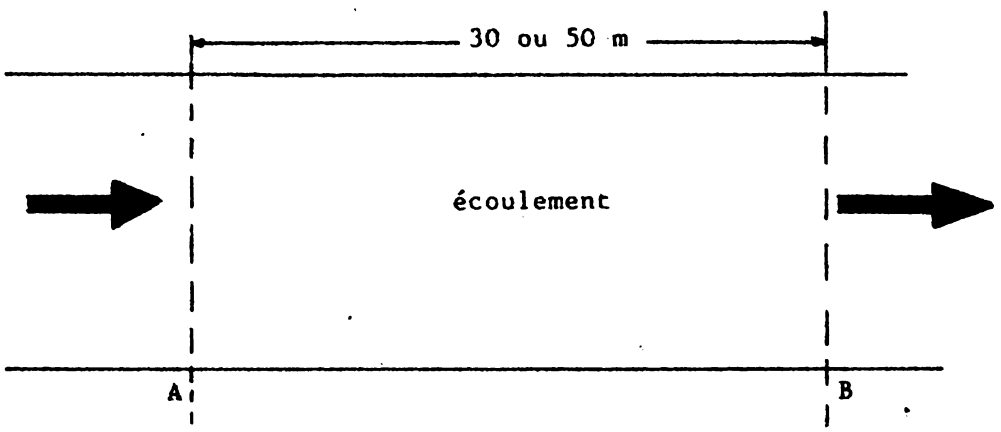


Figure 6: Schéma pour indiquer le bief du cours sur lequel se fera le jaugeage du débit.

La procédure décrite ci-devant peut être utilisée que lorsque la largeur du canal est petite, mais si celle-ci est suffisamment grande, il est nécessaire de connaître la vitesse superficielle à plusieurs points de la largeur, pour cela, on utilise le procédé dénommé "Mesure de la vitesse par le double chronomètre" qui consiste à:

1. Choisir un tronçon uniforme du canal ou de la rivière d'environ 30 à 50 mètres;
2. Placer 4 jalons (deux par deux) dans chacune des rives du cannal ou de la rivière (A, C, D et B)

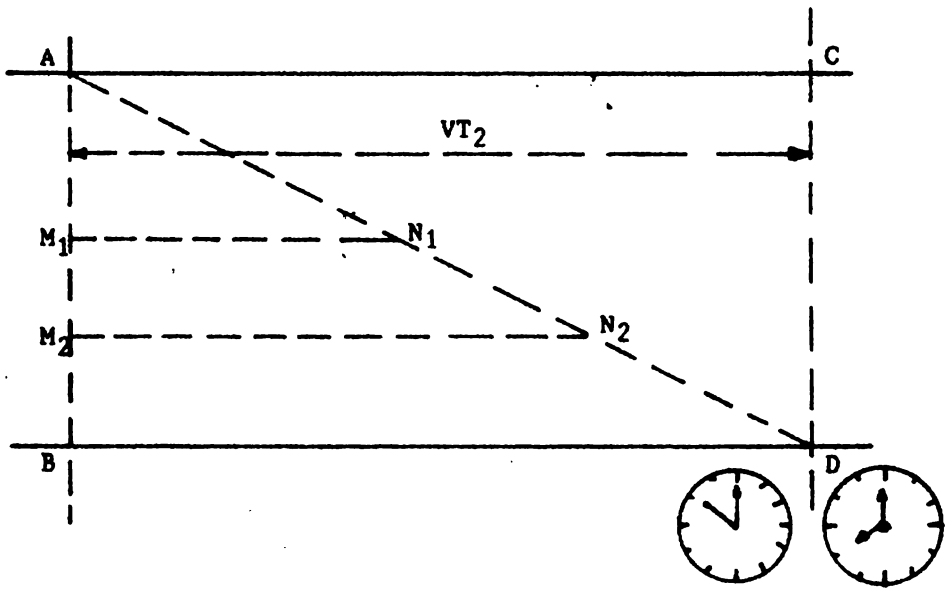


Figure 7: Distances nécessaires pour calculer la vitesse superficielle de l'écoulement par le biais du double flotteurs et du double chronomètres.

Un opérateur est placé en D avec les deux chronomètres.

3. On jette le flotteur dans l'eau et au moment de traverser la ligne AB, l'opérateur met en marche les deux chronomètres.
4. Quand le flotteur traverse la ligne AD, l'opérateur arrête l'un des chronomètres. C'est le temps (T_1).

5) Quand le flotteur traverse la ligne CD, l'opérateur arrête le deuxième chronomètre. C'est le temps (T_2).

Dans l'hypothèse que sur une ligne de courant la vitesse est constante et si en plus on considère que:

$AC = BD = VT_2$ et $AB = CD$ sont connues, on aura:

$$\frac{BD}{M_1N_1} = \frac{AB}{AM_1} \; ; \quad V_1 = \frac{AC}{T_2}$$

On calcule la distance AM_1

$$AM_1 = AB \frac{M_1N_1}{BD} = AB \frac{VT_1}{VT_2} = AB \frac{T_1}{T_2}$$

$$AM = AB \frac{T_1}{T_2}$$

Ainsi on a la vitesse et la distance de celle-ci par rapport à la rive gauche du canal.

Avec un deuxième essai, on trouve V_2 et AM_2 . Dans ce cas, on peut avoir plusieurs vitesses superficielles avec lesquelles on trouve la vitesse moyenne superficielle. Par la formule **Vm = K Vms** on trouve la vitesse moyenne de l'écoulement.

La section transversale est mesurée par sondage à l'aide d'un jalon. Le produit de la vitesse moyenne de l'écoulement multiplié par l'aire de la section transversale nous donne le débit.

5.6 Exemple de calcul de la vitesse par la méthode du double chronomètre.

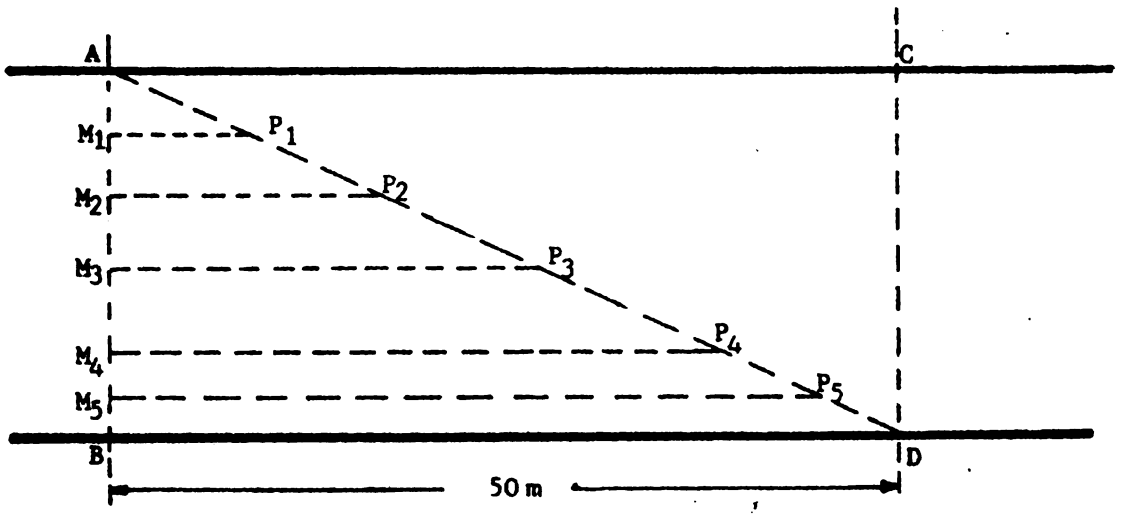


Figure 8: Schéma d'un bief d'un canal utilisé pour le jaugeage de la vitesse à l'aide d'un flotteur.

AB = AC = 50 cm

AB = CD = 20 m

Données obtenues de l'essai réalisé sur le terrain.

	M_1P_1	M_2P_2	M_3P_3	M_4P_4	M_5P_5
T_1 (Seg)	22.5	22.8	36.1	56	67.5
Les valeurs du temps pour T_2 sont:					
T_2 (Seg)	75	72	60	70	75
Point	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
Vitesse (Vi) m/s	0.667	0.69	0.83	0.714	0.6667

	AM_1	AM_2	AM_3	AM_4	AM_5
Distance de A(m)	6	8	12	16	18

$$Vms = \frac{0.6667 + 0.69 + 0.83 + 0.714 + 0.6667}{5} = 0.713$$

$$Vm = 0.75\ (Vms) = 0.534\ m/s$$

Les sondages dans la section transversale donnent:

RG	Tirant d'eau	Aire partielle
0	m 0.90	
1	1.75	1.325
2	1.90	1.825
3	2.40	2.150
4	1.80	2.100
5	1.50	1.650
RD 5.5	0.95	0.920

Aire totale = 9.97 m^2

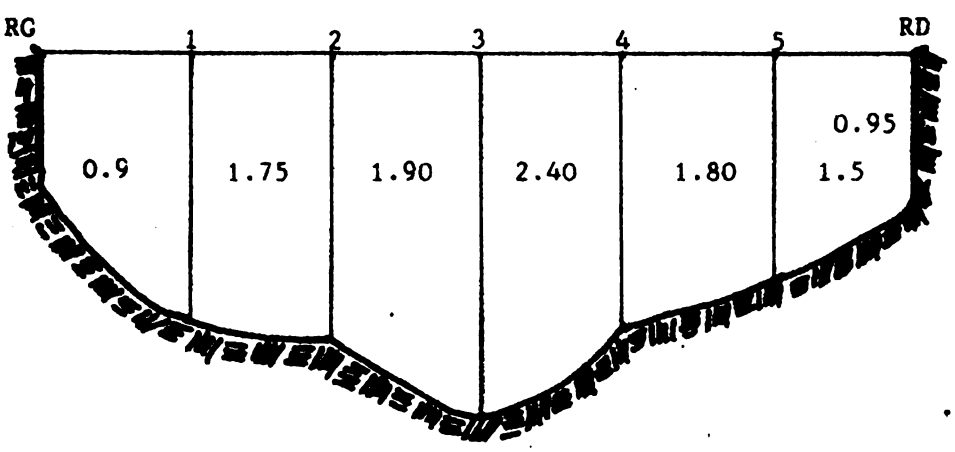


Figure 9: Schéma de la section transversale d'un cours d'eau pour le calcul du débit.

Calcul du débit

$$Q = A \times V = 9.97\ m^2 \times 0.534\ m/s = 5.323\ m^3/s$$

$$Q = 5.323\ m^3/s.$$

6.6 Le choix d'une station de jaugeage

Le choix d'une station de jaugeage sera conditionné par les facteurs suivants. Cette station devra:

- Se situer au point où les mesures sont les plus utiles aux objectifs fixés.
- Etre accessible.
- Fournir des mesures suffisamment exactes pour les objectifs fixés.
- Etre la plus économique de toutes les alternatives possibles.

La meilleure précision dans les jaugeages sera obtenue quand on dispose des tronçons adéquats dans la rivière. Les tronçons droits permettent de déterminer avec précisions la pente de la superficie libre de l'eau.

Par conséquent, la station de jaugeage disposera d'une section de contrôle naturelle ou artificielle, choisie de telle sorte que la relation Q = f(H) ait la plus grande stabilité.

VII. LA SECTION DE CONTROLE POUR MESURER LE DEBIT PAR LA RELATION Q = f(H)

7.1 La relation Q =f(H)

A partir des formules pour l'écoulement normal de Manning ou de Chézy on peut établir la relation suivante:

$$\frac{Qn}{I^{0.5}} = A\ Rh^{2/3} = f(y) \qquad \text{(Manning)}$$

$$\frac{Q}{I^{0.5}} = A\ Rh^{0.5} = g(y) \qquad \text{(Chézy)}$$

Si l'on connaît I, b, Z, n ou C, le débit Q est fonction du tirant d'eau "y". Soit:

$$A\ Rh^{2/3} = K = f(y) = \alpha (y)^N \qquad \text{(Manning)}$$

$$A\ Rh^{0,5} = K = f(y) = \beta (y)^N \qquad \text{(Chézy)}$$

Où K est la conductance, c'est-à-dire la contribution de la géométrie de la section transversale du canal pour rendre possible l'écoulement avec un débit Q, une pente I et un coefficient de rugosité n.

Posons:

$$K^2 = By^N \qquad (6.1)$$

Où:

B = Facteur de proportionalité

y = Tirant d'eau normal

N = Exposant hydraulique

En appliquant les logarithmes naturels à l'expression (6.1)

$$2\ LnK = LnB + NLny \qquad (6.2)$$

La dérivée de l'expression (6.2) donne:

$$2\ \frac{dK}{K} = N\ \frac{dy}{y}$$

$$N = 2\,\frac{y}{K}\left(\frac{dK}{dy}\right) \qquad (6.3)$$

Pour un canal rectangulaire de base b et de tirant d'eau y on aura:

$$A = by$$

$$P = b + 2y$$

$$R_h = \frac{by}{b + 2y} = \frac{y}{1 + 2(y/b)}$$

Si b est très grand par rapport à y, $y/b \longrightarrow 0$ et dans ce cas:

$$R_h = y$$

$$K = by(y^{1/2}) = by^{3/2}\ ; \quad \frac{dK}{dy} = 3/2\ by^{\frac{1}{2}}$$

En remplaçant (6.3) par (6.4) on a:

$$N = 2\,\frac{y}{by^{3/2}} \cdot \frac{3}{}\ by^{1/2} = 3$$

$$N = 3$$

Ainsi

$$Q \propto K \propto By^{3/2}$$

C'est-à-dire que dans un canal rectangulaire le débit est lié au tirant d'eau à la puissance 1.5

$$Q = By^{1.5}$$

Pour un canal de section triangulaire

$$A = Zy^2$$

$$P = 2y(1 + Z^2)^{0.5}$$

$$R_h = \frac{Zy^2}{2y\sqrt{1 + Z^2}} = \frac{Z}{2\sqrt{1 + Z^2}}\ y$$

$$K = AR_h^{2/3} = Zy^2\ \left(\frac{Z}{2\sqrt{1 + Z^2}}\ y\right)^{2/3} = \frac{Z^{5/3}}{2^{2/3}(1 + Z^2)^{1/3}}\ y^{8/3}$$

$$K = \alpha y^{8/3}$$

$$\frac{dK}{dy} = \alpha\ \frac{8}{3}\ y^{5/3}$$

$$N = \frac{2y}{\alpha y^{8/3}} \cdot \alpha \cdot \frac{8}{3}\ y^{5/3} = \frac{16}{3}$$

$$Q = \alpha y^{8/3}$$

C'est-à-dire que dans un canal triangulaire le débit est lié au tirant d'eau à la puissance 8/3.

De la même manière pour un canal trapézoidal

$$A = by + Zy^2$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + Z^2}$$

$$P = b + 2y\sqrt{1 + Z^2}$$

$$R_h = \frac{by + Zy^2}{b + 2y\sqrt{1 + Z^2}} \; ; \; R_h^{2/3} = \left(\frac{by + Zy^2}{b + 2y\sqrt{1 + Z^2}}\right)^{2/3}$$

$$K = (by + Zy^2)\left(\frac{by + Zy^2}{b + 2y\sqrt{1 + Z^2}}\right)^{2/3}$$

Dans ce cas K est fonction de b, Z et y. Le problème doit être résolu numériquement pour chaque valeur de b et de Z connu.

Pour trouver la relation Q = F(H) pour une section transversale stable, il faut mesurer avec précision plusieurs valeurs des débits et les hauteurs d'eau correspondantes. Cette relation peut changer avec le temps à cause des facteurs comme l'érosion ou la sédimentation du matériel dans le fond et dans les talus, ce qui rend nécessaire la réalisation d'un étalonnage continue

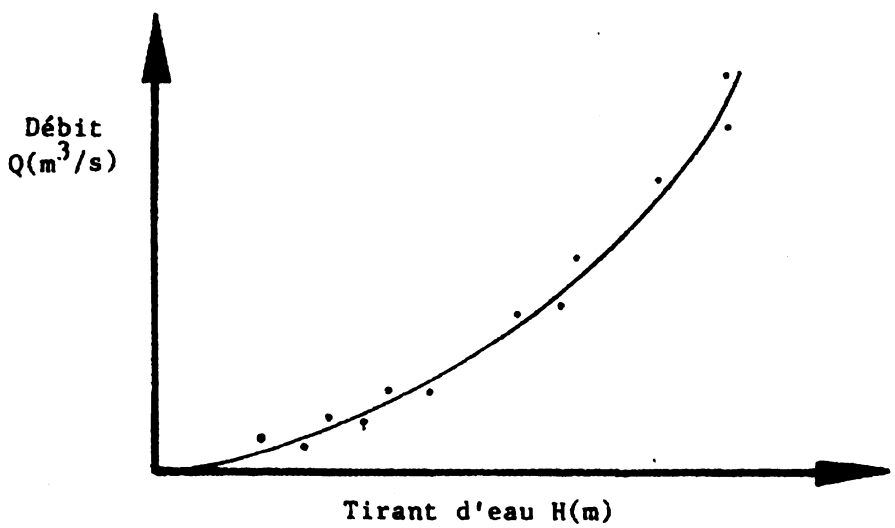


Figure 10: Schéma d'une courbe d'étalonnage Q = f(H).

Etant donné que b la largeur du lit du canal est constant, on peut connaître le débit dans une section si l'on connaît le tirant d'eau; c'est la raison pour laquelle dans la section de jaugeage on place une mire ou un limnimètre pour mesurer le débit. Cette dernière méthode très utilisée dans les réseaux d'irrigation doit disposer au préalable de l'étalonnage de la section de jaugeage. La relation Q = f(H) est présentée sous forme de tableau ou d'un graphique. Ainsi l'opérateur peut donner avec précision le débit que doit conduire le canal par réglage de l'ouverture de la vanne afin d'obtenir le tirant d'eau nécessaire.

Le tableau ou le graphique d'étalonnage n'est valable que pour la section transversale choisie et pour la période dans laquelle les conditions de fonctionnement restent constant.

7.2 Station limnimétrique - Choix d'un endroit

Pour recevoir une station limnimétrique, le terrain doit remplir les conditions suivantes:

1. Etre d'accès facile
2. Doit permettre de mesurer toute la gamme de débits possibles.
3. La section choisie doit être stable pourque la courbe d'étalonnage ne varie pas avec le temps. Les causes de variations peuvent être les suivantes:
   - Changements dans la section provoqué par l'érosion et la sédimentation.
   - Changement dans la végétation des berges.
   - Nappe d'eau dormante ou tourbillons.
4. Etre de nature solide, c'est-à-dire qui ne sera affecté ni par le vent, ni par l'eau.
5. La section choisie doit être sensible, c'est-à-dire qu'une petite augmentation dans le débit doit produire un changement important du niveau d'eau.

7.3 Limnimètres

1. Mires verticales

C'est une sorte de règle graduée placée en position verticale, ayant une structure qui garantisse sa stabilité et facilite une bonne lecture.

2. Mires inclinées

Elles sont placées de manière à former un angle avec la verticale. La division de l'échelle se fait en considérant l'angle de position. Cette technique est surtout utilisée dans des canaux artificiels et peuvent être constituées par une mire métallique encastrée dans le béton.

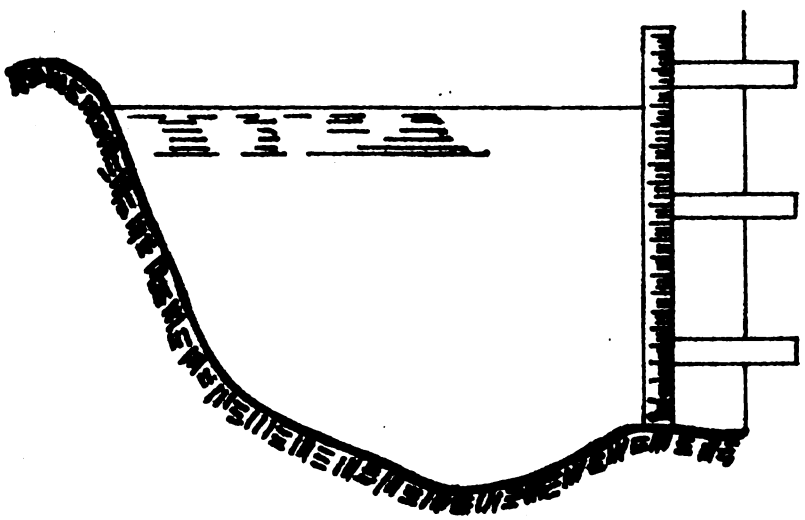


Fig.11: Installation d'un limnimètre vertical dans un cours d'eau.

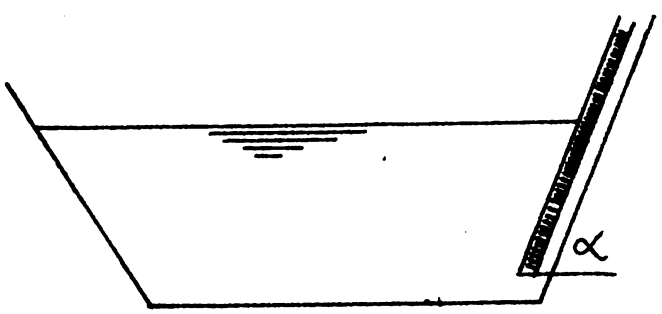


Fig. 12: Installation d'un limnimètre incliné dans un cours d'eau.

7.4 Section transversale d'un canal où l'écoulement est critique

La section transversale d'un canal dans laquelle l'écoulement est critique (F = 1) permet d'établir la relation ci-après:

$$V = g^{0.5} D^{0.5}$$

Où:

V = Vitesse critique de l'écoulement

g = Accélération de la pesanteur

D = Profondeur moyenne de l'écoulement

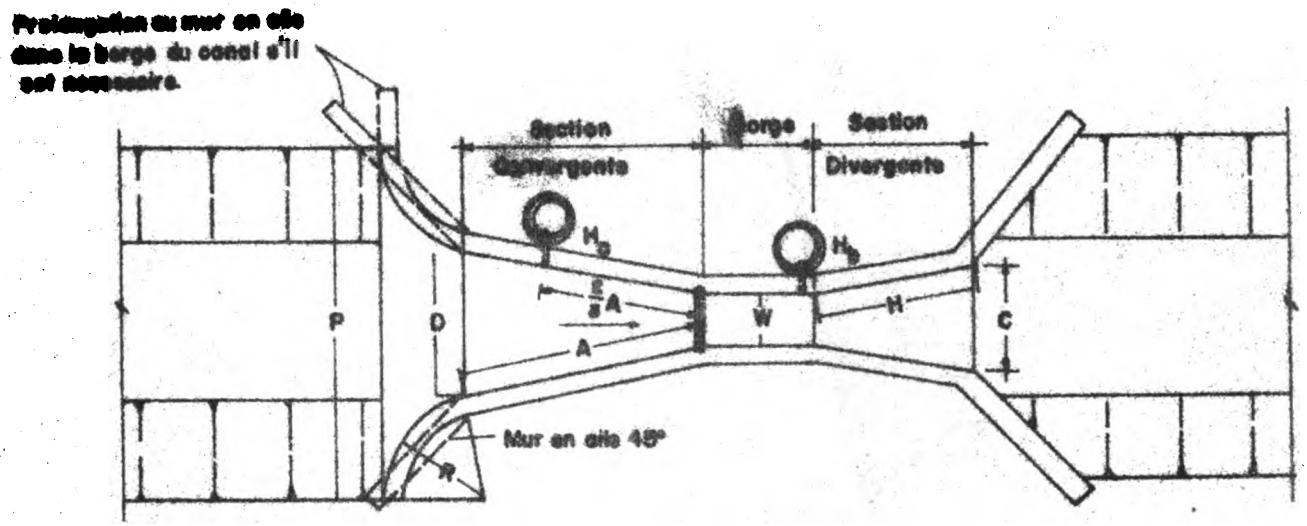
Lorsqu'il s'agit d'une section rectangulaire

$q = Vy$ et $D = y$

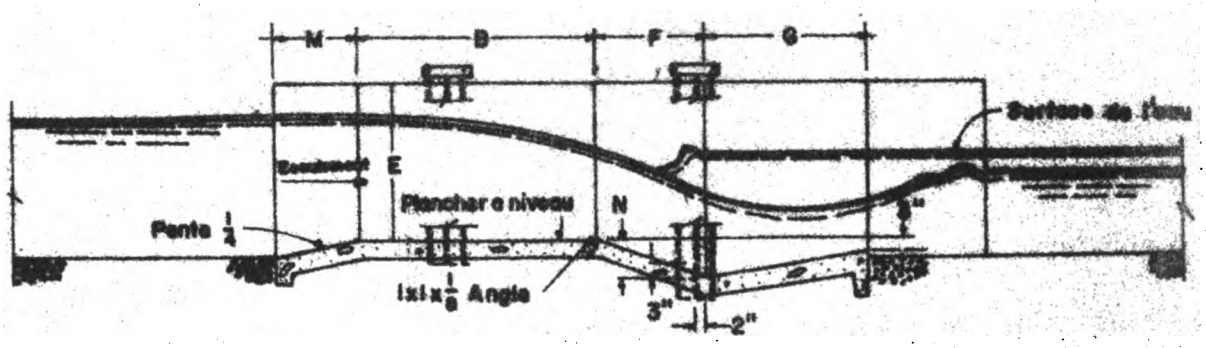
$q = g^{0.5} y^{1.5}$ et $Q = bg^{0.5} y^{1.5}$

$g = 9.81\ m/s^2$ et b est connue, la mesure de y nous donne le débit dans la section.

Parmi les appareils utilisés pour le jaugeage du débit à l'aide du principe de l'écoulement critique, il y a le jaugeur PARSHALL et le jaugeur dégorgé.



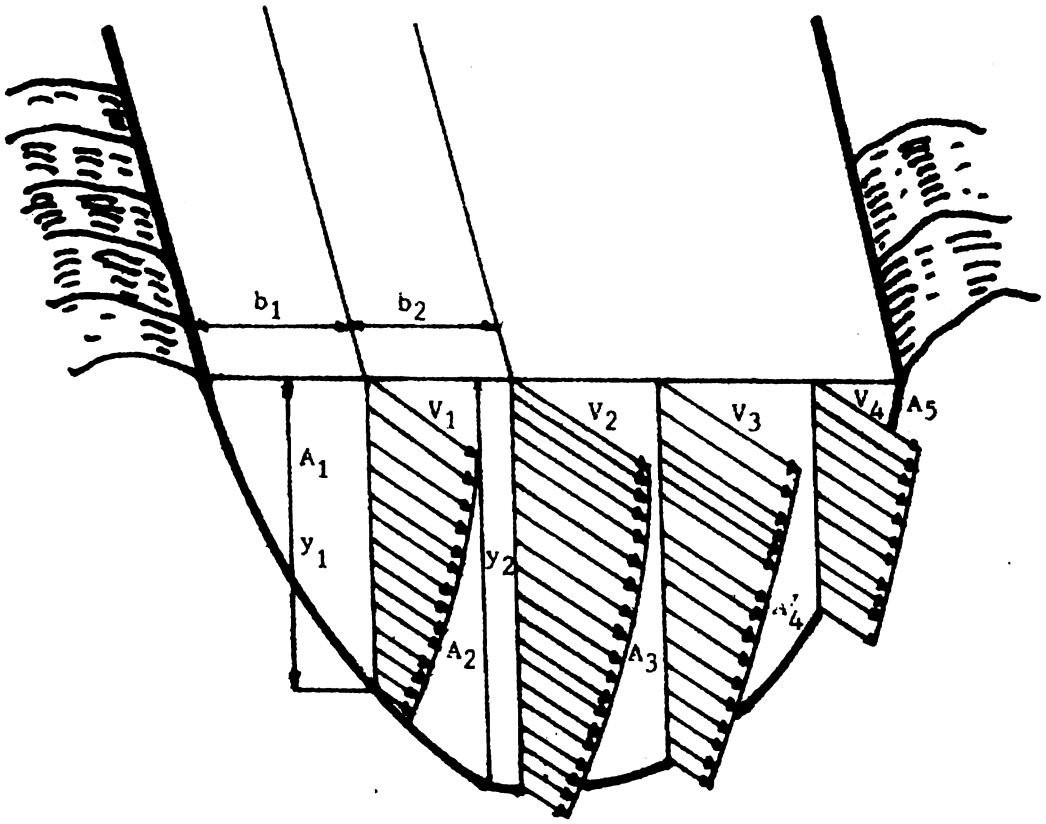
PLAN



PROFIL

Figure 13: Schéma d'un jaugeur Parshall.

Dimensions standards du jaugeur Parshall



Firuge 13-A: Variation de la vitesse dans une section transversale et calcul du débit.

$$V1m = \frac{\sum v1i\ y1i}{y_1} \qquad q_1 = A_1 \frac{(v1m)}{2}$$

$$V2m = \frac{\sum v2i\ y2i}{y_2} \qquad q_2 = A_2 \frac{(v1m + v2m)}{2}$$

$$V3m = \frac{\sum v3i\ y3i}{y_3} \qquad q_3 = A_3 \frac{(v2m + v3m)}{2}$$

$$V4m = \frac{\sum v4i\ y4i}{y_4} \qquad q_4 = A_4 \frac{(v3m + v4m)}{2}$$

$$q_5 = A_5 \frac{(v4m)}{2}$$

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5$$

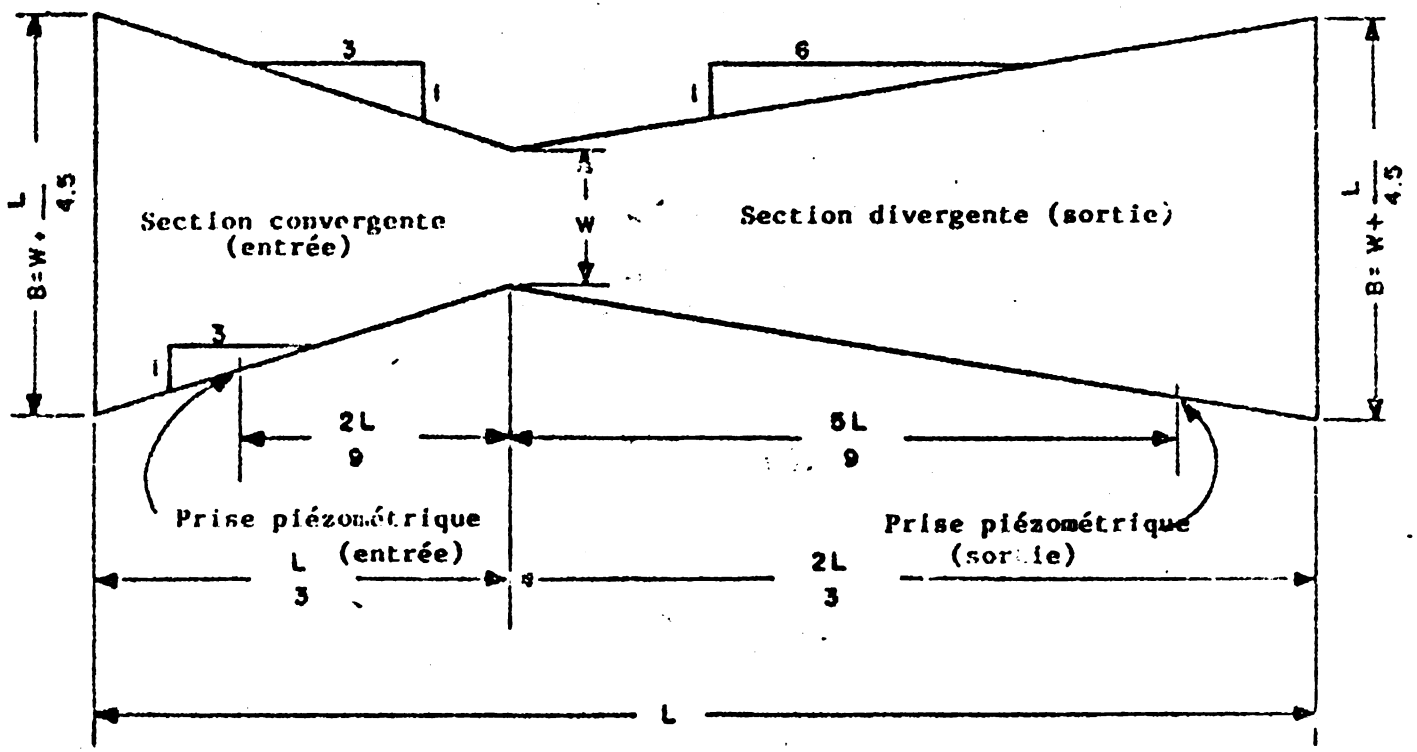


Fig. 14: Schéma d'un jaugeur dégorgé

Profil	Croquis	A	p	R	V	Q
Triangulaire	Remplissage h = D					
m = 1/1		1,0 h^2	2,828.h	0,354 h	1,260.Vc	1,582.Qc
m = 3/2		1,5 h^2	3,583 h	0,418.h	1,408.Vc	2,677.Qc
m = 2/1		2,0 h^2	4,472.h	0,447.h	1,474.Vc	3,759.Qc
Trapézoïdal	Remplissage b = h = D					
m = 1/2		1,5 h^2	3,236.h	0,464.h	1,509.Vc	2,882.Qc
m = 1/4		1,25 h^2	3,062.h	0,408.h	1,387.Vc	2,207.Qc
m = 1/5		1,2.h^2	3,040 h	0,395 h	1,356.Vc	2,072.Qc

Figure 15: Schémas de profils des canaux.

Tableau 2: Distance horizontale entre deux verticales consécutives de mesure pour diverses largeurs du canal.

Largeur du canal	Distance entre deux Verticales (m)
2	0.2
2-3	0.3
3-4	0.4
4-8	0.5
8-15	1.0
15-25	2.0
25-35	3.0
35-45	4.0
45-80	5.0
80-160	10.0
160-350	20.0
350	10 % de la largeur

Tableau 3: Vitesses permissibles selon le type de terre.

Type de terre	Vitesse m/s
Sable	0.20
Terre sans consistance	0.30
Terre forte	0.50
Sol pierreux	0.80 à 0.90
Sol ardoiseux	1.60

$A = by + Zm^2$

$P = b + 2y(Z^2 + 1)^{0.5}$

$R_h = \frac{A}{P}$

W_1 = Sentier

W_2 = Route

b = Largeur du plafond

y = Tirant d'eau

B = Largeur supérieure

f = Bord libre

Z = Talus

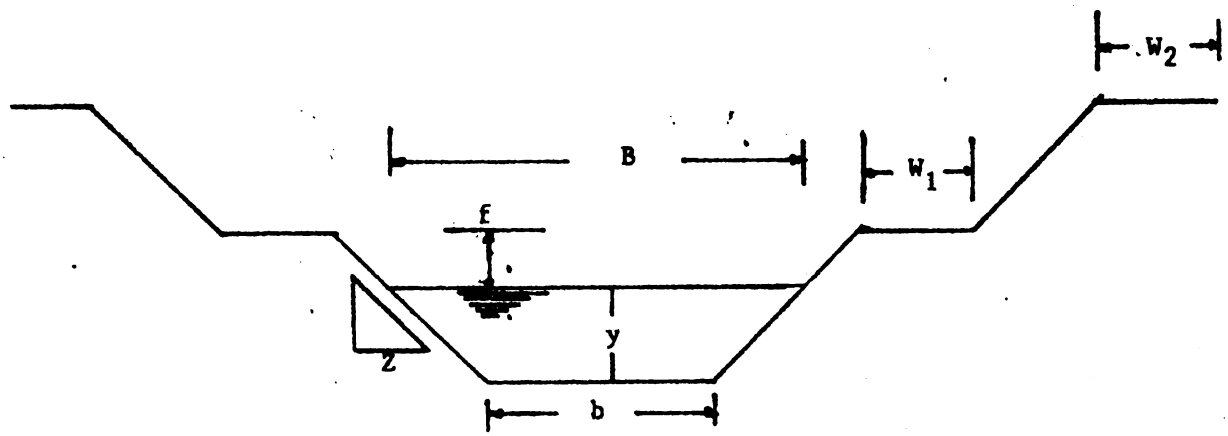


Figure 16: Schéma de la section transversale d'un canal et ses éléments géométriques.

Tableau 4: Talus pour canaux d'irrigation en terre (Z).

Terre consolidée	1
Terre non consolidée	1.5
Terres à moyenne consistance	2.0
Terre à peu de consistance	3.0

Tableau 5: Valeur de n pour la formule de Manning

Nature des parois

Désignation des canaux	Etat des Parois			
	Très bon	Bon	Assez bon	Mauvais
Canaux et fossés en terre droite et uniforme.	0.017	0.020	0.0225	0.025
Canaux et fossés en pierres lisses et uniformes	0.025	0.030	0.033	0.035
Canaux et fossés en pierres rugueuses et irrégulières.	0.035	0.040	0.045	0.050
Canaux en terre à larges méandres.	0.0225	0.025	0.0275	0.030
Canaux en terre draguée	0.025	0.0275	0.030	0.033
Canaux à lit en pierres rugueuses herbés sur les rives en terre.	0.025	0.030	0.035	0.040
Canaux à fond en terre et rive empierrées.	0.028	0.030	0.033	0.035