

Notes de cours sur le dimensionnement des buses et des dalots

Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et
Mathématiques d'Abomey



PADONOU G. Tankpinou
Novembre 2023

Chapitre IX : Dimensionnement des buses et des dalots

A Généralités- types d'ouvrages

Les ouvrages constitués par les dalots et les buses sont appelés «petits ouvrages», qu'ils servent au franchissement des cours d'eau ou à l'assainissement en comparaison avec « grands ouvrages » que sont les ponts. Les méthodologies pour l'étude de ces diverses catégories sont totalement différentes.

Les conditions hydrologiques, hydrauliques, topographiques, géotechniques et économiques font de chaque petit ouvrage un cas d'espèce et le choix du type d'ouvrage est rarement immédiat. De plus les conditions générales d'utilisation diffèrent pour chacun des types d'ouvrages.

A.1 Les buses

Deux types de buses sont couramment utilisés à l'heure actuelle : les buses en béton et les buses en métal.

Les buses en béton sont généralement fabriquées localement. Ce qui n'est pas le cas des buses en métal selon le pays concerné. Elles devront ou non être importées avec les sujétions et aléas classiques de délais et de prix (critère économique, qui dictera ou non le choix entre buses métalliques et buses en béton.)

Les buses sont utilisées exclusivement dans des sections où l'on dispose d'une épaisseur suffisante de remblais (un minimum de 0,80 m de remblai est nécessaire au-dessus de la buse) et peuvent être utilisées avec des hauteurs de remblais élevées.

Dans le cas des buses métalliques, cette hauteur de remblai admissible est fonction de l'épaisseur de la buse : les constructeurs fournissent les tableaux donnant ces limites d'utilisation.

Les buses en béton dépassent rarement un diamètre de 1,20 m, sinon leur poids très élevé constitue un obstacle à leur mise en place et leur coût croissant très rapidement rend concurrentielles les buses métalliques, même importées. La buse en béton nécessite une fondation rigide.

Les buses en métal ont des diamètres très variables qui peuvent atteindre plusieurs mètres suivant les constructeurs. Elles doivent faire corps avec le remblai qui doit être parfaitement compacté. La buse en métal nécessite en outre une fondation souple et sera toujours noyée dans le remblai.

Outre les sections circulaires, il existe des buses arches beaucoup plus aplaties, utilisables avec de faibles hauteurs de remblais.

Afin de permettre le nettoyage ou le curage des buses qui risquent souvent d'être obstruées partiellement ou totalement par les dépôts de sédiments et de pierres charriés par les eaux.

Il est conseillé de ne jamais adopter de diamètres inférieurs à 0,80 m. Les débits admissibles sont donc variables et peuvent être très élevés dans le cas d'une batterie de plusieurs buses de grand diamètre quand la topographie du site permet un tel dispositif.

A.2 Les dalots

Ils sont en béton armé et présentent une section rectangulaire ou carrée.

Les dalots sont des ouvrages sous chaussée qui ne nécessitent aucun remblai. Une circulation à même la dalle peut être envisagée moyennant des précautions lors de la construction. Ils ne peuvent en général admettre qu'une faible épaisseur de remblai (de l'ordre d'un ou deux mètres),

à moins d'être spécialement calculés pour les surcharges. Ces remblais sont à proscrire si la chaussée doit être revêtue.

Trois types de dalots sont couramment utilisés :

- les dalots ordinaires constitués de piédroits verticaux fondés sur semelles ou radier général et sur lesquels repose une dalle en béton armé.
- les dalots cadres dans lesquels la dalle, les piédroits et le radier constituent une structure rigide en béton armé (cadre).
- les dalots portiques analogues aux dalots cadres mais sans radier (piédroits verticaux fondés sur semelles).

Les dalots sont en général adoptés pour des débits élevés (dépassant $10 \text{ m}^3/\text{s}$). Une batterie de buses pourrait cependant être de coût moins élevé que le dalot. Une rapide comparaison du coût des deux ouvrages est nécessaire pour prendre la décision, si d'autres contraintes (par exemple plus grands risques d'obstruction des buses par branchages et souches en zone boisée) ne viennent écarter d'office l'une des deux solutions.

B Les diverses conditions de fonctionnement

Pour déterminer les dimensions des petits ouvrages hydrauliques d'une route, il convient de bien connaître les conditions dans lesquelles ils vont fonctionner et les diverses formes que peut prendre l'écoulement à travers ces ouvrages.

On distingue essentiellement 2 types de fonctionnement pour un petit ouvrage hydraulique: la sortie noyée ou la sortie est libre.

B.1 La sortie noyée

La sortie est noyée lorsque le niveau de l'eau à l'exutoire immédiat de l'ouvrage dépasse le bord supérieur de l'ouvrage.

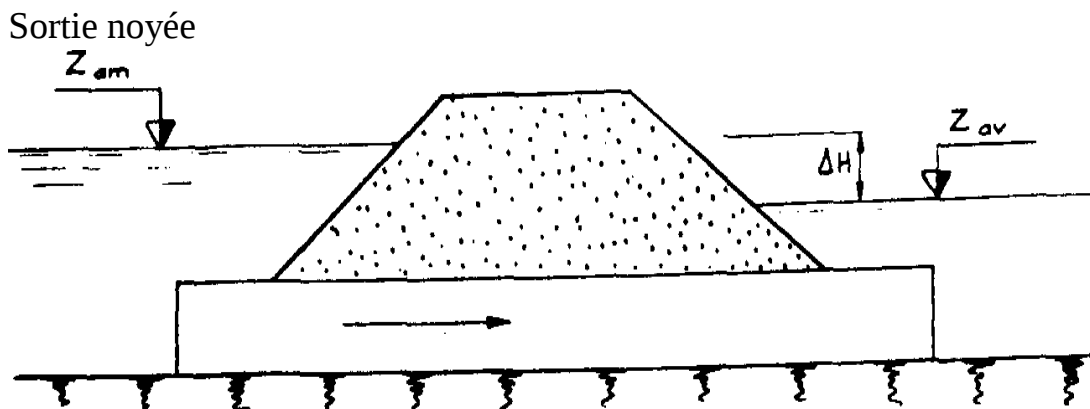


Figure IX-1: fonctionnement à sortie noyée (l'écoulement est en charge)

C'est par exemple le cas des ouvrages situés en zone inondable ou bien subissant la marée en zone littorale ou présentant un niveau aval élevé parce qu'il est à la confluence avec un autre cours d'eau à fortes crues. L'écoulement des eaux se fera par surélévation du niveau amont à l'arrivée d'une crue ; l'écoulement est en charge.

B.2 La sortie libre

Le niveau de l'eau à l'exutoire immédiat de l'ouvrage est en dessous du bord supérieur de l'ouvrage.

Du niveau amont dépend le type d'écoulement dans le cas de la sortie aval libre:

B.2.1 Sortie dénoyée- Ecoulement à surface libre

Si le niveau est tel que $H_1/D \leq 1,25$ (ce seuil de H_1/D où il y a changement de forme d'écoulement est relativement peu précis entre 1,25 et 1,50 suivant les auteurs ; du fait de la non-symétrie des conditions d'entrée et de l'ouvrage). D étant le diamètre s'il s'agit d'une buse circulaire ou bien la hauteur s'il s'agit d'un dalot ou d'une buse arche. L'écoulement de l'eau dans l'ouvrage se fait avec une surface libre (écoulement avec section de contrôle amont)

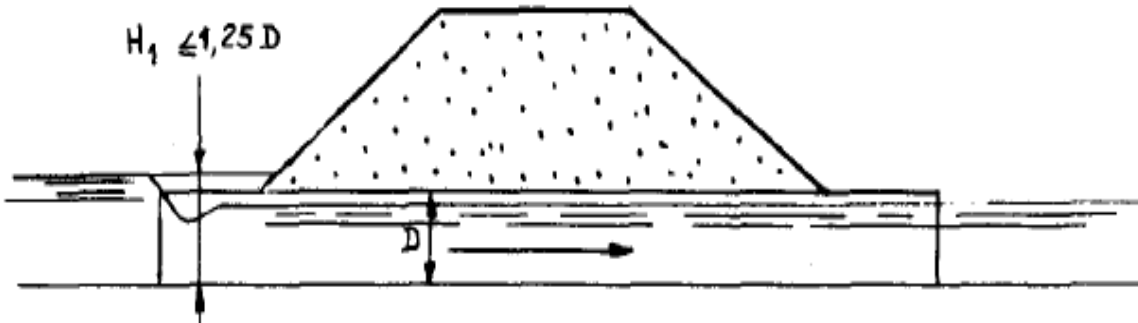


Figure IX-2 : fonctionnement à sortie dénoyée (écoulement à surface libre)

B.2.2 Sortie dénoyée- Ecoulement en charge

Si le niveau amont est tel que $H_1/D > 1,25$ (ce seuil de H_1/D où il y a changement de forme d'écoulement est relativement peu précis entre 1,25 et 1,50 suivant les auteurs ; du fait de la non-symétrie des conditions d'entrée et de l'ouvrage), l'écoulement de l'eau dans l'ouvrage peut se faire à surface libre ou à pleine section suivant la longueur de l'ouvrage, après une forte contraction à l'entrée amont semblable au passage d'une vanne de fond.

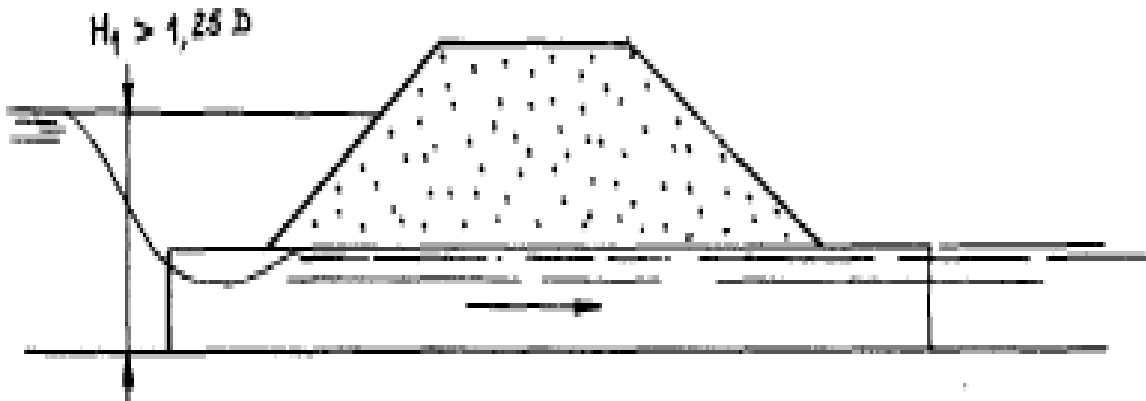


Figure IX-3: fonctionnement à sortie dénoyée (l'écoulement est en charge)

B.3 La revanche

La notion de tirant d'air est remplacée par la revanche, pour les dalots, buses qui sont souvent appelés à fonctionner en charge. Elle constitue une sécurité contre les déversements de l'eau par-dessus les remblais, par suite des vagues formées par le vent. Plusieurs auteurs ont proposé diverses formules pour calculer la hauteur des vagues. Ainsi MALLET et PACQUANT donnent la formule suivante :

$$h = \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{L}}{3} \quad \text{éq IX-1}$$

où :

h est la hauteur des vagues est en mètre ;

L est la longueur en km du plan d'eau amont.

Ces vagues se propagent à la vitesse V (m/s) donnée par :

$$V = \frac{3}{2} + \frac{2}{3}h$$

La revanche R (m) est alors :

$$R = h + \frac{V^2}{2g} \quad \text{éq IX-2}$$

ANDREANOFF introduit la vitesse W (km/h) du vent et propose, pour la hauteur des vagues :

$$h = 0,021 \times \sqrt[4]{W^5} \times \sqrt[3]{L} = 0,021 \times W^{5/4} \times L^{1/3}$$

Si la pente des talus est de $\text{tg } \alpha$, la revanche à adopter d'après DJOUNKOVSKI est de :

$$R = 3,2 \times K \times h \times \text{tg } \alpha$$

K dépend de la rugosité du talus ($K= 1$ pour les talus en terre lisse et $K= 0,77$ pour des talus pierreux).

La cote minimum des remblais sera donnée par :

Cote minimum des remblais = cote de la crue de projet sans l'ouvrage+ surélévation de l'eau due à l'ouvrage + revanche.

La cote atteinte par la crue de projet, avant construction de l'ouvrage est déterminée.

Il est à noter que cette revanche ne doit servir à d'autres buts que comme sécurité contre les déversements de l'eau par les vagues formées sur le plan d'eau amont par le vent.

Détermination de la cote naturelle de l'eau

La présence d'un ouvrage hydraulique tel que pont, dalot, buse, etc., apporte dans la plupart des cas une surélévation de la cote naturelle de l'eau, surélévation plus ou moins grande selon l'importance des perturbations que cet ouvrage apporte à l'écoulement de la crue.

Cette surélévation du niveau de l'eau correspondant à la crue de projet se calcule par diverses méthodes

Pour connaître la cote de PHE à prendre en compte dans le projet, il faut déterminer la cote naturelle de l'eau, au droit du franchissement, sans l'ouvrage et pour la crue de projet.

Cette cote peut se déterminer, dans les cas favorables, par enquêtes sur le terrain auprès des riverains (Ces enquêtes sont de toute manière indispensables, préalablement aux études, car elles apportent des ordres de grandeur qui guident utilement les calculs).

Certains notent en effet, les niveaux des crues, année par année, ce qui permet une approche directe de la distribution fréquentielle de ces crues, si ces données sont en nombre suffisant.

D'autres marquent les niveaux atteints par les crues remarquables et les dates de ces crues : en rapprochant ainsi ces niveaux des pluies correspondantes, on peut obtenir une idée des niveaux atteints pour certaines fréquences, si on connaît la distribution fréquentielle de ces pluies.

A défaut de ces données précises, somme toute rares, les riverains peuvent fournir des indications, qui bien que qualitatives, pourraient être fort utiles : niveaux fréquemment ou rarement atteints, fortes vitesses, zones inondées, etc.

Ces indications doivent obligatoirement être dans toute la mesure du possible recoupées par les laisses de crues récentes par la morphologie du cours d'eau (terrasses par exemple), par la

végétation des berges, etc. Ces données fournissent les premiers ordres de grandeur pour la détermination par calcul du niveau des crues.

En toute rigueur, il faut procéder à la détermination de la ligne d'eau, mais les calculs précis de la ligne d'eau d'une crue donnée sont extrêmement longs et exigent des mesures topographiques et hydrauliques nombreuses sur le tronçon intéressé.

Pour un ouvrage hydraulique sur une route, un calcul approché suffit, pour cela plusieurs formules, dérivant de la formule générale de CHEZY, permettent d'obtenir avec une approximation acceptable, le niveau d'une crue.

Connaissant le débit Q de la crue par calculs hydrologiques et les caractéristiques géométriques du cours d'eau (section S et périmètre P mouillés) par lever des profils en travers dans la zone du franchissement. La formule la plus usitée est celle de MANNING STRICKLER :

$$\begin{cases} V = KR^{2/3}I^{1/2} \\ Q = VS = KSR^{2/3}I^{1/2} = \frac{1}{n} SR^{2/3}I^{1/2} \end{cases} \quad \text{éq IX-3}$$

Avec :

V est la vitesse moyenne en m/s

$K = \frac{1}{n}$ est le coefficient de rugosité en $m^{-1/3}s^{-1}$

S est la section mouillée en m^2

R est le rayon hydraulique en m

I est la pente en m/m

Le coefficient de rugosité dépend de la profondeur d'eau, du tracé et de la pente du cours d'eau ainsi que de l'état des berges et du fond. Sa détermination reste quelque peu subjective. Le tableau IX-1 permet quelque peu d'adopter une valeur pour K .

Tableau IX-1: valeur possible de K

	Etats des berges et du fond			
	parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
<i>A Canaux artificiels</i>				
canaux et fossés en terre, droits et uniformes	59	50	44	40
canaux et fossés avec pierres, lisses et uniformes	40	33	30	29
Canaux et fossés avec pierres, rugueux et irréguliers	29	25	22	
Canaux en terre à larges méandres	44	40	36	33
Canaux en terre dragués	40	36	33	30
canaux avec lits de pierres fugueuses, herbes sur les rives de terre	40	33	29	25
Canaux à fond en terre, côtes avec pierres	36	33	30	29
<i>B Cours d'eau naturels</i>				
1) Pentes, rives en ligne droite, l'eau au niveau le plus haut, sans gué ou fosse profonde	40	36		30
2) Le même que (1) mais avec quelques herbes et pierres	33	30	27	25
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	33	30	27	25
4) Le même que (3), l'eau à l'étiage, pentes et sections plus faibles	29	25	22	20
5) Le même que (3) avec quelques herbes et pierres	29	25	22	20
6) Le même que (4) avec pierres....	25	22	20	18
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	25	22	20	18
8) Zones avec beaucoup de mauvaises	20	17	15	13
	13	10	8	7
			1	
			4	
			8	

De nombreux auteurs, en fonction des facteurs qui l'influencent, ont tenté de mieux préciser le coefficient de rugosité. COWAN propose la formule suivante :

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5$$

Le coefficient de base n_0 correspond à un cours d'eau ou un canal rectiligne, à berge et fond homogènes et lisses. Ce coefficient, qui ne dépendra alors que de la nature des parois, sera :

$$n_0 = \begin{cases} 0,020 & \text{pour la terre} \\ 0,025 & \text{pour le rocher} \\ 0,024 & \text{pour le gravier fin} \\ 0,028 & \text{pour le gravier grossier} \end{cases}$$

Le coefficient n_1 , définit les irrégularités de surface des parois.

$$n_1 = \begin{cases} 0 & \text{pour des parois lisses} \\ 0,005 & \text{pour de légères irrégularités} \\ 0,01 & \text{pour les cours d'eau à irrégularités modérées} \\ 0,02 & \text{pour des cours d'eau naturels} \end{cases}$$

Le coefficient n_2 traduit l'influence des variations de forme et de dimension de la section mouillée.

$$n_2 = \begin{cases} 0 & \text{avec une variation progressive} \\ 0,005 & \text{s'il y a des variations peu accusées} \\ 0,010 & \text{à } 0,015 \text{ si ces variations sont importantes} \end{cases}$$

Le coefficient n_3 exprime l'influence des obstructions qui s'opposent à l'écoulement : obstacles, racines, souches, pierres, détritiques, etc.

$$n_3 = \begin{cases} 0 & \text{pour des obstructions négligeables} \\ \text{varie de } 0,040 & \text{à } 0,060 \text{ pour des obstructions importantes} \\ & \text{par rapport à la section mouillée} \end{cases}$$

Le coefficient n_4 donne l'influence de la végétation.

$$n_4 = \begin{cases} \text{varie de } 0,005 & \text{à } 0,010 \text{ pour une faible végétation (herbes, arbustes souples)} \\ \text{varie de } 0,010 & \text{à } 0,025 \text{ pour une végétation modérée} \\ 0,025 & \text{à } 0,050 \text{ si la végétation est importante} \end{cases}$$

Le coefficient m_5 traduit l'importance des méandres, qu'on peut définir par le rapport m de la longueur du profil longitudinal à la longueur du segment de droite joignant les deux extrémités du méandre. On aura ainsi :

$$m_5 = \begin{cases} 1 & \text{pour } 1 \leq m < 1,2 \\ 1,15 & \text{pour } 1,2 \leq m < 1,5 \\ 1,3 & \text{pour } 1,5 < m \end{cases}$$

Dans la fixation du coefficient de rugosité K , l'appréciation personnelle joue par conséquent un grand rôle. Il est conseillé de caler les estimations de K dans la mesure du possible sur des mesures par bouchon flottant.

Pour ce qui concerne la pente I , il s'agit de la pente hydraulique du cours d'eau, c'est à-dire la pente de la ligne d'eau pour la crue considérée. Comme elle est en général inconnue, on prendra la pente longitudinale du cours d'eau en première approximation : figurant sous racine carrée elle introduit une erreur relative qui reste acceptable, eu égard aux imprécisions attachées aux autres paramètres de la formule de MANNING.

Les calculs du niveau de l'eau correspondant à un débit donné se font alors par approximations successives.

Dans le cas où le cours d'eau présente un écoulement sur lit majeur la formule de MANNING s'applique sous la forme :

$$Q = Q_g + Q_m + Q_d = K_g S_g R_g^{2/3} I^{1/2} + K_m S_m R_m^{2/3} I^{1/2} + K_d S_d R_d^{2/3} I^{1/2}$$

Les indices g, m et d désignant respectivement le lit majeur rive gauche, le lit mineur et le lit majeur rive droite.

On peut admettre que I est la même en écoulement sur lit mineur et sur lit majeur.

Par contre les coefficients de rugosité K_g et K_d sont différents de K_m et en général, sont inférieurs à K_m , puisque la profondeur d'eau étant plus faible, l'influence de la rugosité est plus accentuée.

Les coefficients K_g et K_d dépendent d'une part de la morphologie du champ majeur et d'autre part des obstacles naturels (végétation, ..) ou artificiels (constructions, ...). Pour caler K_g et K_d , il est conseillé de s'appuyer sur des résultats de mesures de vitesses.

Il est à noter que cette revanche ne doit servir à d'autres buts que comme sécurité contre les déversements de l'eau par les vagues formées sur le plan d'eau amont par le vent.

B.4 Le tirant d'air

Des détritiques, corps flottants, branchages souches, etc. sont charriés très souvent par un cours d'eau. Ces déchets peuvent, au passage sous un ouvrage, s'accrocher et boucher peu à peu la section d'écoulement. Ils mettent ainsi l'ouvrage en danger d'être en charge. C'est pourquoi il est obligatoire de prévoir un tirant d'air pour diminuer ce risque d'obstruction partielle ou totale de l'ouvrage. Ce tirant d'air dépend évidemment d'une part des risques de charriage de surface et d'autre part de l'importance de l'ouvrage concerné.

Pour des ponts de longueur inférieure ou égale à 50 m, on adopte en général un tirant d'air au moins égal à :

- 1 m zone désertique ou subdésertique ;
- 1,50 m zone de savane ;
- 2 m en zone de végétation arbustive dense ;
- 2,50 m en zone forestière.

Pour des ponts de longueur supérieure à 50 m, on ajoute 0,50 m aux tirants d'air minima donnés ci-dessus.

La cote minimum de sous-poutre est alors donnée par :

Cote minimum de sous-poutre = Cote de la crue de projet sous l'ouvrage + Surélévation de l'eau due à l'ouvrage + tirant d'air.

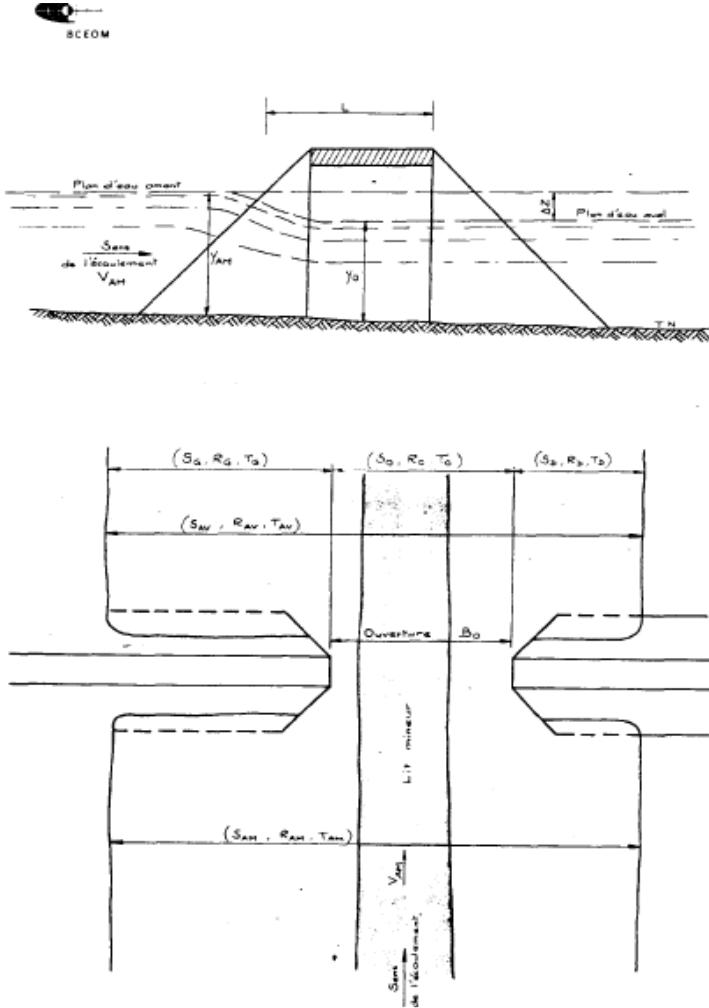
Notons que le tirant d'air doit uniquement être considéré comme moyen de défense contre le charriage de surface. En aucun cas, il ne doit servir de sécurité contre d'autres dangers tels que des crues plus fortes que la crue de projet ou bien les incertitudes, imprécisions ou erreurs de calculs.

B.5 Surélévation du niveau de l'eau

Un ouvrage d'art et ses remblais d'accès provoquent en général un étranglement de la section d'écoulement du cours d'eau. Les pertes de charge qui en résultent entraînent, pour un débit donné, une surélévation du niveau de l'eau. Surélévation qu'il faut calculer pour déterminer les

caractéristiques de l'ouvrage et des remblais d'accès, et fixer les dispositifs de protection destinés à assurer leur pérennité.

La figure suivante, schématise cette surélévation ΔZ du plan d'eau au passage de l'ouvrage (pont).



Le débit Q résulte du théorème de BERNOULLI :

$$Q = CS_0 \sqrt{2g \left(\Delta Z - \Delta h_f + \frac{\alpha V_{AM}^2}{2g} \right)} \quad \text{éq IX-4}$$

g est l'accélération de la pesanteur en m/sec^2

C est le coefficient de débit (sans dimension)

S_0 est le débouché de l'ouvrage (pont) correspondant au débit Q en m^2 ,

ΔZ est la surélévation de la ligne d'eau entre l'amont et l'aval, $Z_{AM} - Z_{AV}$ en m ,

Δh_f est la perte de charge par frottement en m ,

α est un coefficient (sans dimension) représentant la distribution des vitesses dans la section considérée, V_{AM} est vitesse moyenne à l'amont en m/s ;

L'indice 0 se réfère au pont, l'indice AM à l'amont et l'indice AV à l'aval

La surélévation ΔZ du niveau de l'eau provoquée par un ouvrage de franchissement est donné par :

$$\Delta Z = \frac{Q^2}{2gC^2S_0^2} - \alpha \frac{V_{AM}^2}{2g} + \Delta h_f$$

le terme $Q^2/2gC^2S_0^2$ représente la perte de charge due aux caractéristiques hydrauliques du pont ;

le terme $\alpha V_{AM}^2/2g$ est la hauteur d'eau correspondant à la pression dynamique en amont ;

le terme Δh_f donne la perte de charge résultant du frottement.

Cette surélévation relève donc de phénomènes hydrauliques assez complexes et les diverses formules communément utilisées fournissent des résultats assez divergents. De multiples recherches, mesures in situ, essais sur modèles réduits ont été effectués, pour trois (03) principales catégories d'ouvrages de franchissement biais ou droit, notamment les travaux réalisés par l'Institut de Technologie de Georgie (Etats-Unis) (C.E. KINDSVATER, R. W. CARTER et H.J. TRACY : Computation of peak discharge at contractions. U.S. Geological Survey, Circular n° 284, 1953.)

- ouvrages à culées verticales, sans mur en aile, remblais talutés à 1/1 ou 1/2,
- ouvrages à culées verticales, avec murs en aile, remblais talutés à 1/1 ou 1/2,
- ouvrages à culées talutées à 1/1 ou 1/2, remblais talutés à 1/1 ou 1/2, avec quarts de cône.

La majorité des ouvrages appartiennent à l'une de ces 3 catégories ; les autres ouvrages s'en approchent suffisamment pour que la méthode reste applicable avec une bonne approximation par extrapolation ou interpolation.

C Sortie noyée

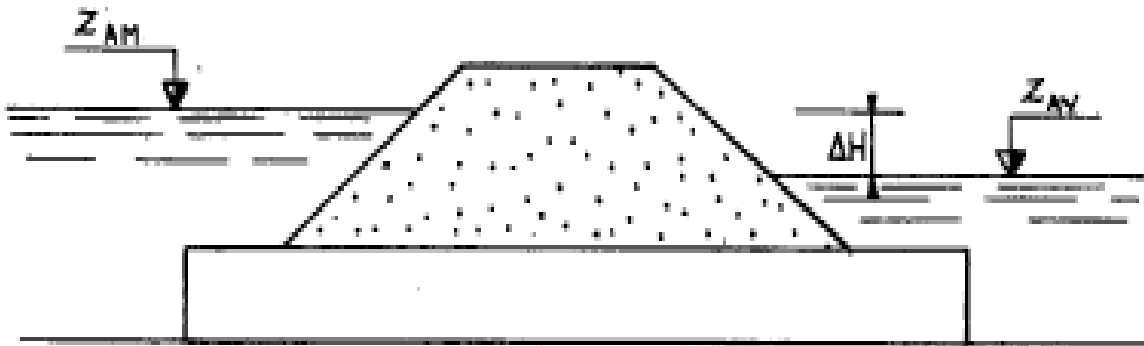


Figure IX-4 : fonctionnement à sortie noyée

Les pertes de charge à la traversée de l'ouvrage sont de 3 sortes :

Pertes de charge à l'entrée

$$\Delta H_e = K_e \frac{V^2}{2g}$$

K_e étant un coefficient dépendant de la forme de l'entrée et V la vitesse moyenne de l'eau

Pertes de charge dues au frottement le long de l'ouvrage :

$$\Delta H_f = \frac{LV^2}{K^2 R_H^{4/3}} = \frac{2gL}{K^2 R_H^{4/3}} \frac{V^2}{2g}$$

où K est le coefficient de MANNING STRICKLER, L longueur de l'ouvrage, R_H le rayon hydraulique.

Pertes de charge à la sortie quand la vitesse passe de V à 0

$$\Delta H_s = \frac{V^2}{2g}$$

On a donc (théorème de BERNOULLI)

$$\Delta H = Z_{AM} - Z_{AV} = K_e \frac{V^2}{2g} + \frac{2gL}{K^2 R_H^{4/3}} \frac{V^2}{2g} + \frac{V^2}{2g} \quad \text{éq IX-5}$$

où encore en introduisant le débit $Q=V.A$; A étant la section de l'ouvrage :

$$\Delta H = \frac{Q^2}{2gA^2} \left(K_e + \frac{2gL}{K^2 R_H^{4/3}} + 1 \right) \quad \text{éq IX-6}$$

La formule générale applicable dans le cas des ouvrages fonctionnant avec sortie noyée.

C.1 Buses circulaires

Cas d'une buse circulaire, on a : $A = \pi D^2/4$ et $R_H = D/4$

Ce qui donne

$$\Delta H = \frac{8Q^2}{\pi^2 g D^4} \left(K_e + \frac{2\sqrt[3]{256}gL}{K^2 D^{4/3}} + 1 \right)$$

C.1.1 Méthode numérique

En prenant $g=9,8$ m/sec, nous aurons les formules numériques suivantes :
pour les buses en béton ($K=67$)

$$\Delta H = 0,083 \frac{Q^2}{D^4} \left(K_e + 0,028 \frac{L}{D^{4/3}} + 1 \right)$$

Pour les buses métalliques type ARMCO ($K=37$)

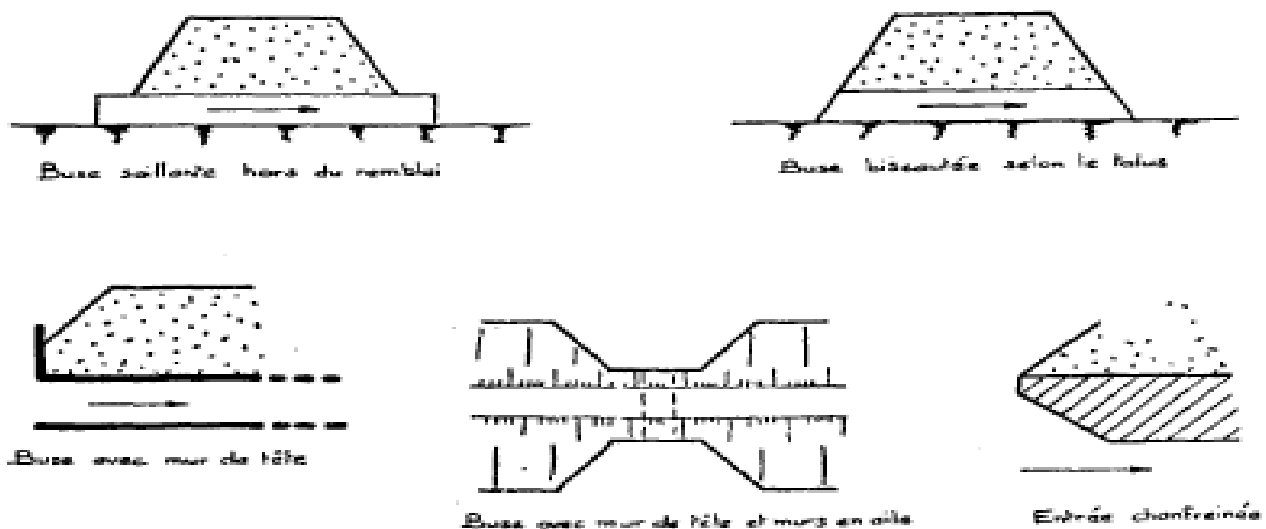
$$\Delta H = 0,083 \frac{Q^2}{D^4} \left(K_e + 0,091 \frac{L}{D^{4/3}} + 1 \right)$$

Les valeurs de K_e dépendant des conditions d'entrée, sont données dans le tableau IX-2

Tableau IX-2 : Valeurs du coefficient K_e de perte de charge à l'entrée des ouvrages- buses circulaires et buses arches

Buses en béton	
Biseautée selon le talus	$K_e = 0,7$
Saillante hors du remblai, coupée droite, extrémité amont à emboitement femelle	$K_e = 0,5$
Avec mur tête (ou avec mur tête et mur en aile) extrémité amont à emboitement femelle	$K_e = 0,2$
Entrée chanfreinée	$K_e = 0,2$
Buses métalliques	
Saillante hors du remblai, coupée droite	$K_e = 0,9$
Biseautée selon le talus	$K_e = 0,7$
Avec mur tête (ou avec mur tête et mur en aile)	$K_e = 0,5$
Entrée chanfreinée	$K_e = 0,2$

L'emboîtement femelle à l'entrée joue le rôle de chanfrein et améliore K_e . L'emboîtement mâle à l'entrée est à proscrire : il double K_e .



Pratique des calculs (Dans le cas où l'entretien des ouvrages apparaît problématique, il est préférable d'adopter comme vitesse maximale $V_{\max} = 2,0$ m/s afin de limiter les dégradations) : Connaissant le débit Q à évacuer, la vitesse maximum admissible ($V_{\max} = 3,0$ m/s) donne la section $A = Q/V_{\max}$, donc une première valeur du diamètre D de la buse. On calcule alors la surélévation ΔH du niveau amont par la formule ci-dessus pour vérifier si elle est compatible avec la géométrie du projet au droit du franchissement. On augmentera ensuite D le cas échéant.

C.1.2 Méthode graphique

La formule de base ci-dessus peut s'écrire :

$$\frac{\Delta H}{Q^2/2gA^2} = (K_e + 1) + 4^{4/3} \frac{2gL/K^2}{D^{4/3}}$$

En posant

$$\Delta H^* = \frac{\Delta H}{Q^2/2gA^2} \text{ et } K^* = 4^{4/3} \frac{2gL/K^2}{D^{4/3}} = \frac{12,7gL}{K^2 D^{4/3}}$$

d'où la relation : $\Delta H^* = (K_e + 1) + K^*$ entre les variables ΔH^* et K^* représentées graphiquement par des droites parallèles. Pour $K_e = 0,9$; $K_e = 0,7$; $K_e = 0,5$; $K_e = 0,2$. La figure IX-5 donne ces droites parallèles.

Pratique des calculs : Pour un diamètre D choisi au préalable, on calcule

$$K^* = \frac{12,7gL}{K^2 D^{4/3}}$$

La longueur L et la rugosité K étant connues (K=37 pour les buses métalliques et K = 67 pour les buses béton). Le type d'entrée étant par fixé, on connaît K_e (voir tableau IX-2). Le diagramme de la figure IX-5 donne alors :

$$\Delta H^* = \frac{\Delta H}{Q^2/2gA^2} \text{ ce qui permet de déduire } \Delta H \text{ car } Q \text{ et } A = gD^2/4 \text{ sont connus.}$$

L'abaque à points alignés (figure IX-6) suivant permet de faciliter les calculs. L'on détermine graphiquement K^* connaissant L/K^2 et D .

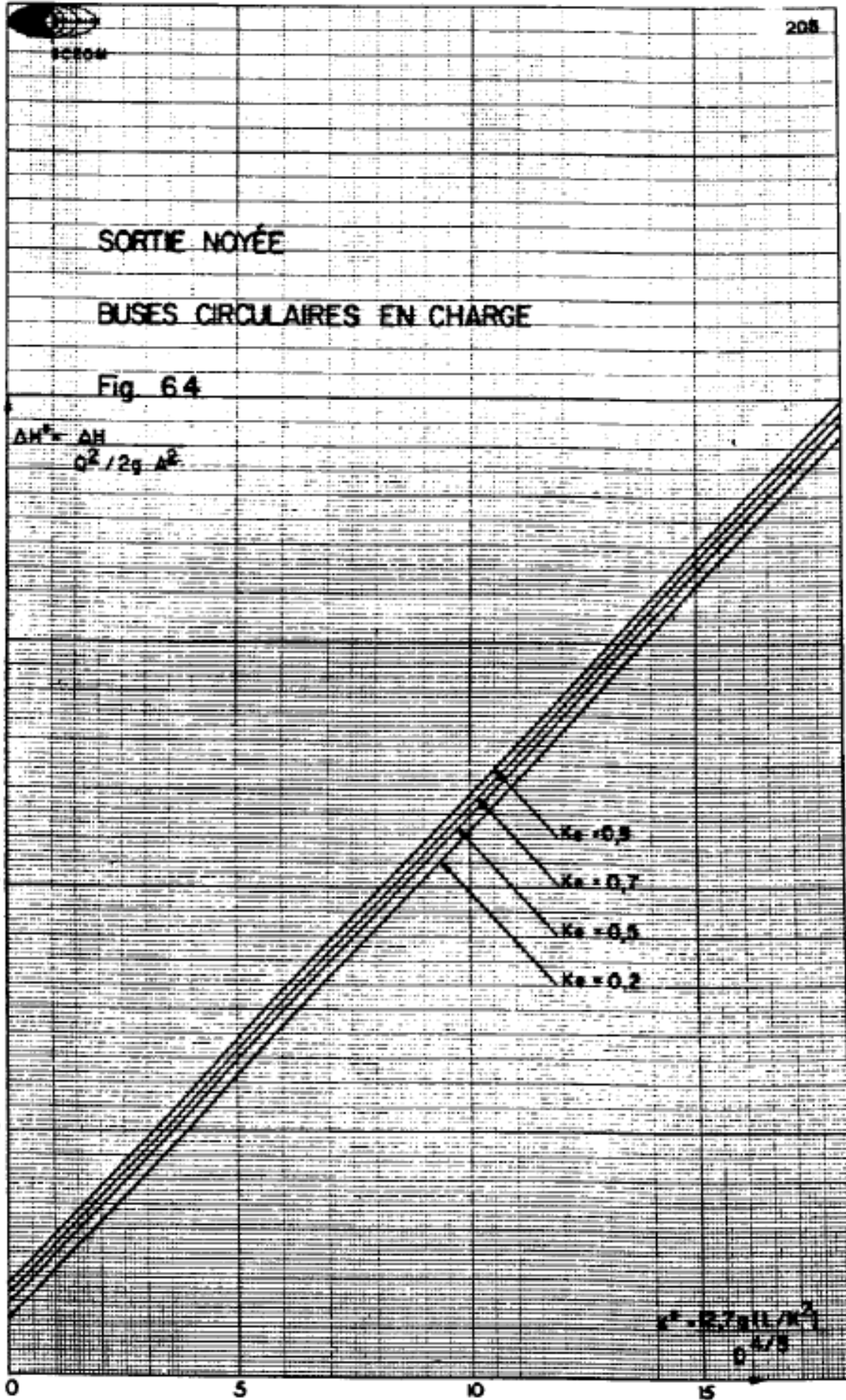


Figure IX-5: Sortie noyée. Buses circulaires en charge.[BCEOM

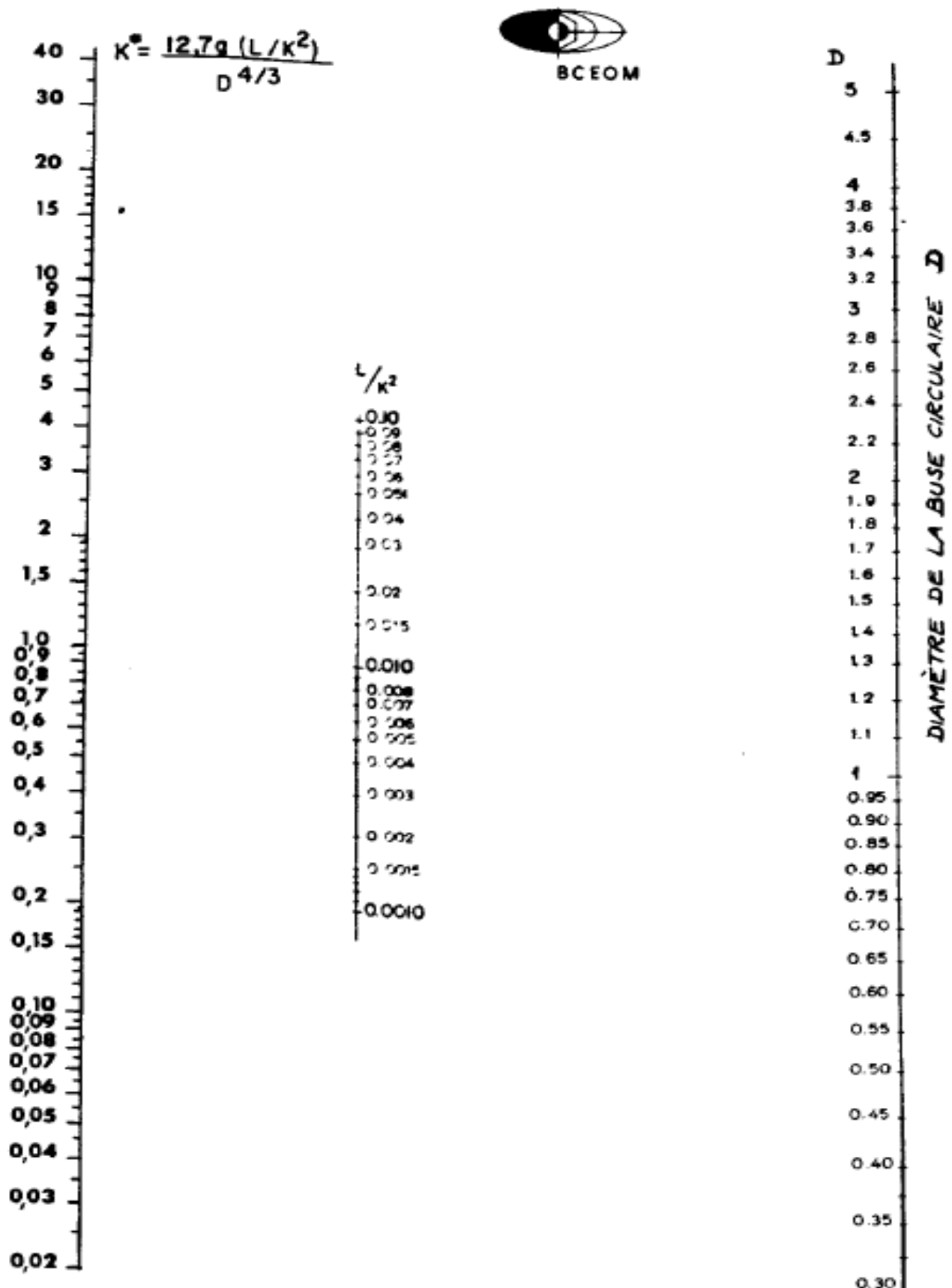


Figure IX-6: calcul de $K^* = \frac{12,7gL}{K^2D^{4/3}}$ à partir de L/K^2 et D (Buses circulaires métalliques ou en béton [BCEOM])

C.2 Buses arches

Cas d'une buse arche de section A, de périmètre P, de rayon hydraulique R_H , de longueur L, la formule générale est :

$$\Delta H = \frac{Q^2}{2gA^2} \left(K_e + \frac{2gL}{K^2 R_H^{4/3}} + 1 \right)$$

C.2.1 Méthode numérique

Avec $g=9,8 \text{ m/sec}^2$ et $k=37$ on a :

$$\Delta H = 0,051 \frac{Q^2}{A^2} \left(K_e + 0,014 \frac{L}{R_H^{4/3}} + 1 \right)$$

Les coefficients K_e d'entrée sont les mêmes que pour les buses circulaires donnés dans le tableau IX-2 plus haut. Les caractéristiques A, P, R_H des buses arches sont données par le tableau IX-3 suivant.

Pour les calculs on procèdera de la même manière que pour les buses circulaires en se fixant une flèche D compatible avec le projet et une vitesse maximale à ne pas dépasser

$$(V_{max} = Q/A < 2 \text{ m/s})$$

C.2.2 Méthode graphique

La formule des buses arches peut se mettre sous la forme :

$$\frac{\Delta H}{Q^2/2gA^2} = K_e + \frac{2gL}{K^2 R_H^{4/3}} + 1$$

Soit en posant :

$$\Delta H^* = \frac{\Delta H}{Q^2/2gA^2} \text{ et } K^* = \frac{2gL/K^2}{R_H^{4/3}}$$

On a : $\Delta H^* = K_e + 1 + K^*$

Relation représentant des droites parallèles de pente 1. La figure IX-7 suivante donne ces droites avec les 4 valeurs de K_e = (0,2 ; 0,5, 0,7 ; 0,9) correspondant aux divers types d'entrée rencontrés communément (tableau IX-2).

En pratique, on se fixe d'abord une première valeur D pour la flèche de la buse arche, compatible avec le projet et la vitesse maximale admissible.

On détermine alors la valeur de : $K^* = \frac{2gL/K^2}{R_H^{4/3}}$ soit par calcul, connaissant L, K et R_H ;

soit par l'abaque à points alignés de la figure IX-8. Les droites de la figure IX-7 donne la valeur de ΔH^* pour la valeur de K_e fixée. d'où la surélévation ΔH correspondant à Q avec :

$$\Delta H = Q^2 \Delta H^* / 2gA^2$$

Pour les buses arches de type ARMCO, le tableau IX-3 donne la valeur de $2gA^2$.

Tableau IX-3: Caractéristiques géométriques des buses arches de type ARMCO [BCEOM]



	Portée B m	Flèche D m	Périmètre P m	Section A m ²	Rayon hy- draulique	$\frac{P^3}{A^2}$
SÉRIE A	1,85	1,40	5,39	2,04	0,38	81,65
	1,93	1,45	5,64	2,23	0,40	97,57
	2,04	1,50	5,88	2,42	0,41	114,9
	2,12	1,56	6,13	2,60	0,42	132,63
	2,22	1,60	6,37	2,88	0,43	162,34
	2,33	1,65	6,62	3,07	0,46	184,9
	2,41	1,71	6,86	3,25	0,47	207,2
	2,48	1,76	7,11	3,53	0,50	244,5
	2,62	1,81	7,35	3,72	0,51	271,5
	2,69	1,86	7,60	3,99	0,53	312,4
	2,83	1,90	7,84	4,27	0,54	357,7
	2,91	1,96	8,09	4,55	0,56	406,2
	2,96	2,02	8,33	4,83	0,58	457,7
	3,10	2,06	8,58	5,11	0,60	512,3
	3,24	2,11	8,82	5,39	0,61	570
	3,31	2,17	9,07	5,67	0,63	630,8
	3,45	2,21	9,31	5,95	0,64	694,6
	3,52	2,27	9,56	6,22	0,65	759,1
	3,60	2,32	9,80	6,60	0,67	854,6
	3,74	2,36	10,05	6,87	0,68	926
	3,81	2,42	10,29	7,25	0,70	1031,3
	3,87	2,48	10,54	7,52	0,71	1109,5
	3,93	2,54	10,78	7,90	0,73	1224,5
	4,08	2,58	11,03	8,27	0,75	1341,9
	4,22	2,62	11,27	8,64	0,77	1464,6
	4,29	2,68	11,52	9,01	0,78	1592,8
	4,35	2,74	11,76	9,38	0,80	1726,3
	4,51	2,77	12,01	9,75	0,81	1865,1
	4,65	2,82	12,25	10,13	0,83	2013,3
	4,72	2,87	12,50	10,50	0,84	2163,1
	4,79	2,93	12,74	10,96	0,86	2356,8
	4,84	2,98	12,99	11,33	0,87	2518,6
	5,00	3,03	13,23	11,71	0,89	2690,4
	5,06	3,08	13,48	12,17	0,90	2905,9
SÉRIE B	4,03	2,84	11,27	9,10	0,81	1624,7
	4,11	2,90	11,52	9,48	0,82	1763,3
	4,22	2,95	11,76	9,85	0,84	1903,6
	4,31	3,01	12,01	10,22	0,85	2049,3
	4,38	3,05	12,25	10,68	0,87	2237,9
	4,51	3,10	12,50	11,06	0,88	2400,0
	4,65	3,14	12,74	11,52	0,90	2603,8
	4,72	3,20	12,99	11,98	0,92	2815,9
	4,80	3,25	13,23	12,36	0,93	2997,3
	4,93	3,30	13,48	12,82	0,95	3224,6
	5,01	3,35	13,72	13,28	0,97	3460,2
	5,13	3,40	13,97	13,75	0,98	3709,4
	5,22	3,45	14,21	14,21	1	3961,8
	5,28	3,51	14,46	14,68	1,02	4228,2
	5,42	3,55	14,70	15,14	1,03	4497,3
	5,49	3,61	14,95	15,61	1,04	4780,8
	5,63	3,65	15,19	16,08	1,06	5123,7
	5,70	3,71	15,44	16,63	1,08	5426,0
	5,84	3,76	15,68	17,19	1,10	5797,6
	5,92	3,81	15,93	17,65	1,11	6112,1
	5,99	3,86	16,17	18,21	1,13	6506,1
	6,05	3,92	16,42	18,77	1,14	6912,4
	6,20	3,96	16,66	19,32	1,16	7323,4
	6,26	4,02	16,91	19,88	1,18	7754,1

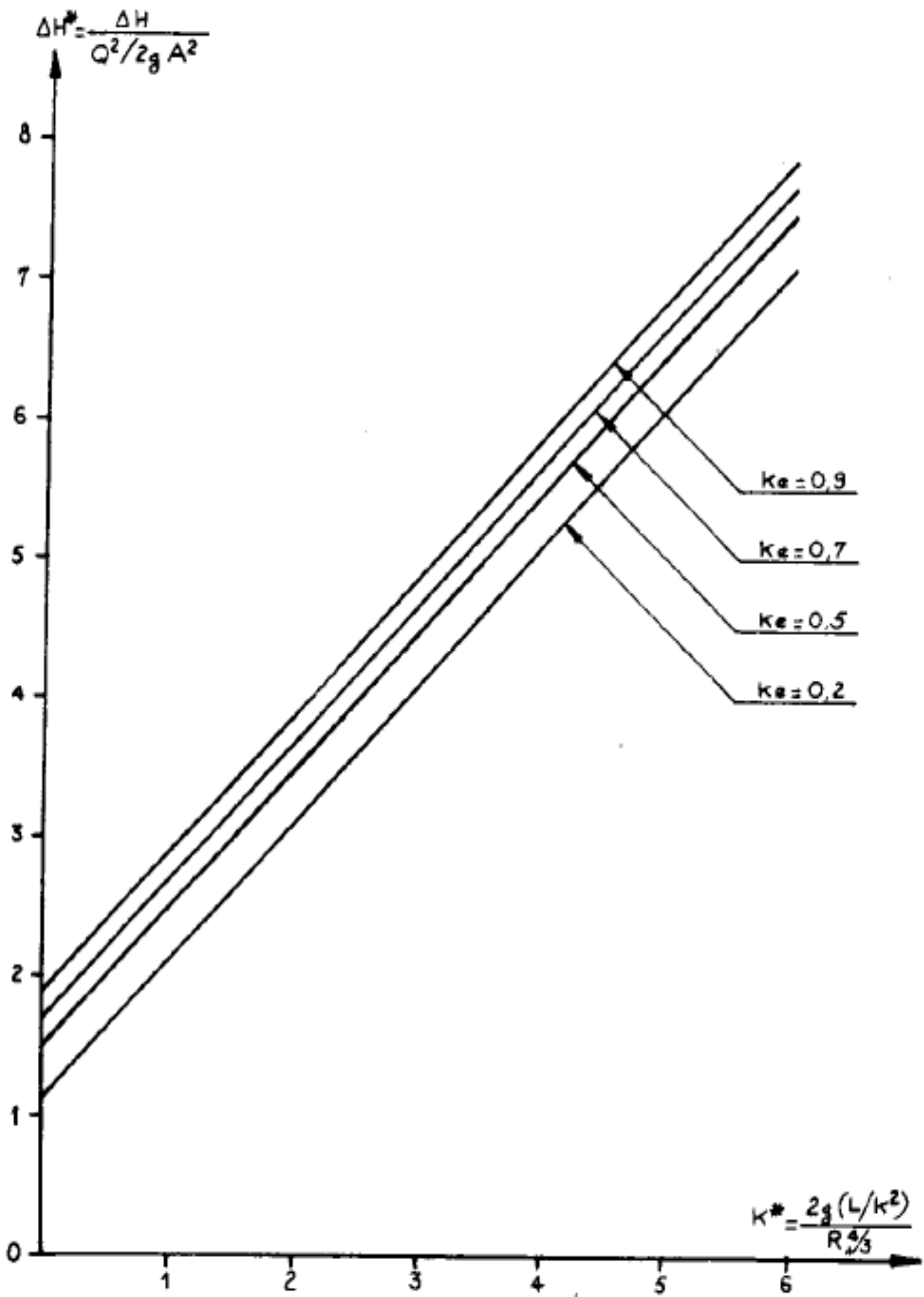


Figure IX-7 : Sortie noyée. Buses arches en charge [BCEOM]

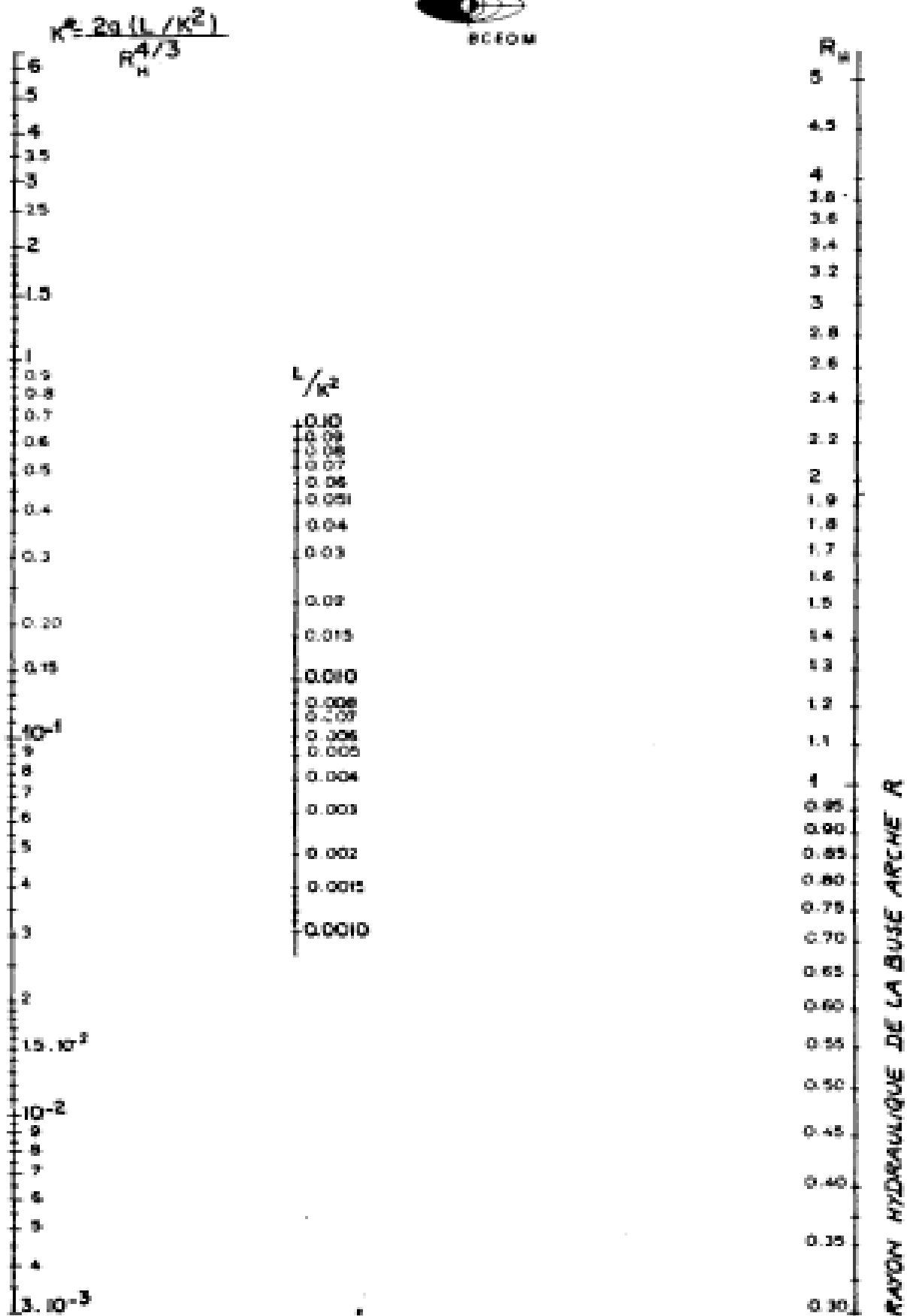


Figure IX-8 : Buses arches -calcul de $K^* = \frac{2gL/K^2}{R_H^{4/3}}$ à partir de L/K^2 et R_H [BCEOM]

C.3 Dalots

cas d'un dalot rectangulaire de largeur B, de hauteur D, de longueur L, la formule générale qui est :

$$\Delta H = \frac{Q^2}{2gA^2} \left[K_e + \frac{2gL}{K^2 R_H^{4/3}} + 1 \right]$$

Avec $R_h = BD/2(B + d)$, on a :

$$\Delta H = \frac{Q^2}{2gA^2} \left[K_e + 2^{4/3} \frac{2gL}{K^2 D^{4/3}} \left(1 + \frac{D}{B} \right)^{4/3} + 1 \right]$$

C.3.1 Méthode numérique

Avec $K = 67$ pour le béton et $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, On obtient :

$$\Delta H = 0,051 \frac{Q^2}{A^2} \left[K_e + 0,0044 \frac{L}{R_H^{4/3}} + 1 \right]$$

$$\Delta H = 0,051 \frac{Q^2}{B^2 D^2} \left[K_e + 0,011 \frac{L}{D^{4/3}} \left(1 + \frac{D}{B} \right)^{4/3} + 1 \right]$$

C.3.1.1 Dalot carré ($B = D$)

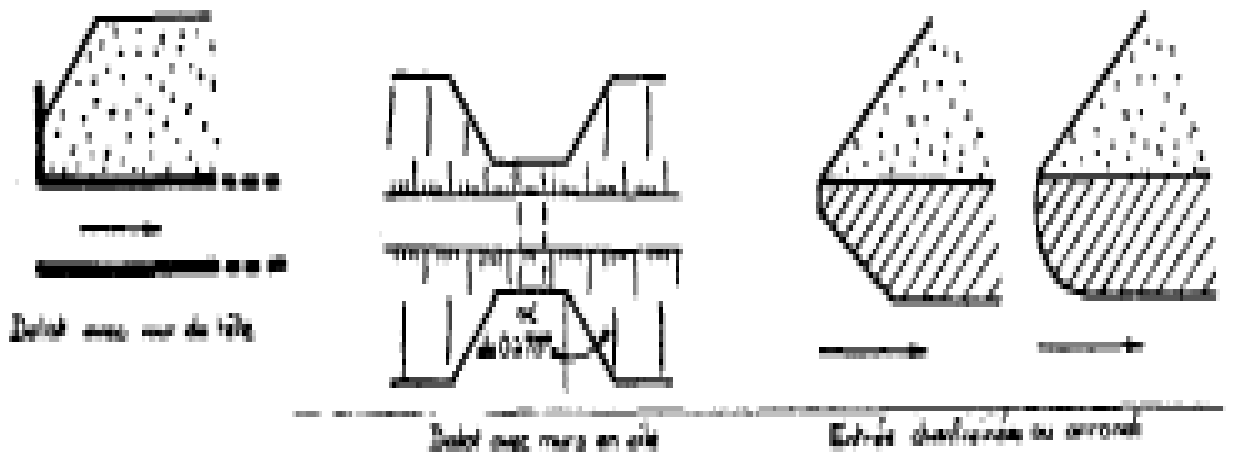
on a :

$$\Delta H = 0,051 \frac{Q^2}{B^2 D^2} \left[K_e + 0,028 \frac{L}{D^{4/3}} + 1 \right]$$

Les coefficients d'entrée K_e , pour les dalots sont donnés dans le tableau IX-4 ci-après

Tableau IX-4 : Coefficient d'entrée K_e pour les dalots [BCEOM]

Mur de tête, sans mur en aile A bords francs sur 3 côtés Chanfreiné sur 3 côtés	$K_e = 0,5$ $K_e = 0,2$
Mur en aile incliné sur l'axe de 30° à 75° Toit à bord franc Toit à bord arrondi ou chanfreiné	$K_e = 0,4$ $K_e = 0,2$
Mur en aile incliné sur l'axe de 10° à 25° Toit à bord franc Toit à bord arrondi ou chanfreiné	$K_e = 0,5$ $K_e = 0,2$
Murs en aile dans le prolongement des parois latérales Toit à bord franc Toit à bord arrondi ou chanfreiné	$K_e = 0,7$ $K_e = 0,4$
Entrée chanfreinée	$K_e = 0,2$



Les calculs se font comme dans le cas des buses circulaires avec deux niveaux d'approximation. Il s'agit ici de déterminer à la fois B et D successivement. On se fixe d'abord la hauteur D du dalot compte tenu de la ligne rouge ; la vitesse maximum admissible ($V_{max} = 3 \text{ m/s}$) donnera alors la section $A = BD$ d'où une première valeur de la largeur B. On calculera alors la surélévation H par la formule ci-dessus avec la valeur adéquate de K_e et on vérifiera la compatibilité de H avec le projet. Si H est trop grand, on essaie alors une deuxième valeur de la largeur B, plus grande que la première.

C.3.1.2 Méthode graphique

En écrivant la formule de base sous la forme :

$$\frac{\Delta H}{Q^2/2gA^2} = K_e + 1 + 2g \frac{L}{K^2} \left(\frac{2}{D}\right)^{4/3} \left(1 + \frac{D}{B}\right)^{4/3}$$

et en posant :

$$\Delta H^* = \frac{\Delta H}{Q^2/2gA^2} \text{ et } K^* = 2^{4/3} \frac{2gL/K^2}{D^{4/3}} = 5,04 \frac{gL/K^2}{D^{4/3}}$$

On obtient :

$$\Delta H^* = (K_e + 1) + \left(1 + \frac{D}{B}\right)^{4/3} K^*$$

En pratique, pour des raisons mécaniques de construction, le rapport D/B est limité en général à des valeurs rondes comprises entre 0,5 et 2.

Sur les figures IX-9 à IX-13 des pages suivantes sont tracées les droites représentatives pour $D/B = 0,5 ; 0,75 ; 1 ; 1,5$ et 2.

Si exceptionnellement D/B prennent d'autres valeurs que les valeurs ci-dessus, il est relativement simple de tracer le réseau de droites parallèles de pente $\left(1 + \frac{D}{B}\right)^{4/3}$

La hauteur D du dalot fixée, on calcule $K^* = 5,04 \frac{gL/K^2}{D^{4/3}}$ avec $K = 67$.

Ou on le détermine par le graphique à points alignés de la figure IX-14

On peut rapidement ainsi avoir les valeurs de H^* (donc de H) correspondant aux diverses possibilités d'ouverture B de l'ouvrage.

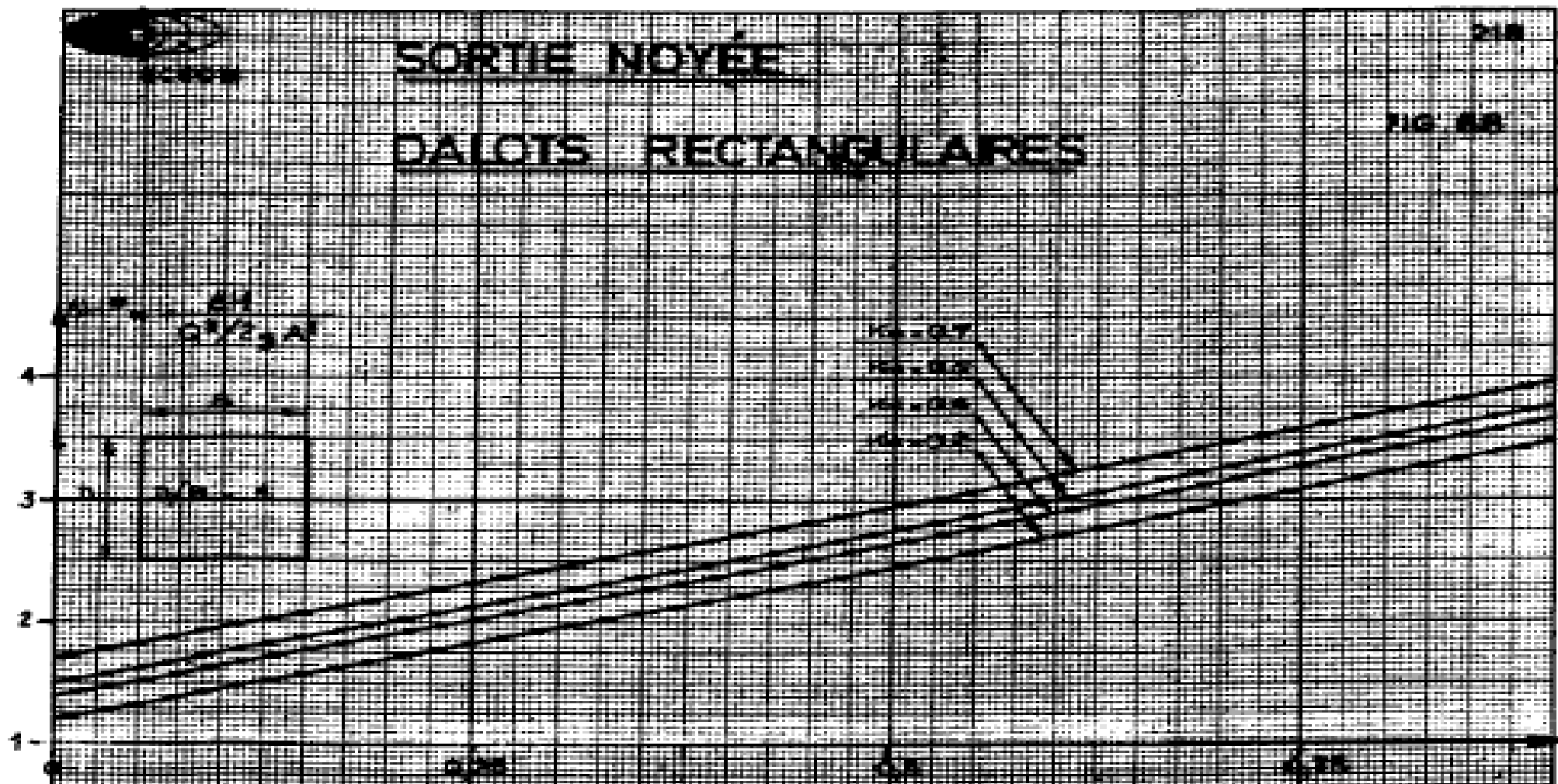


Figure IX-9 : Sortie noyée. Dalots rectangulaires $D/B = 1$ [BCEOM]

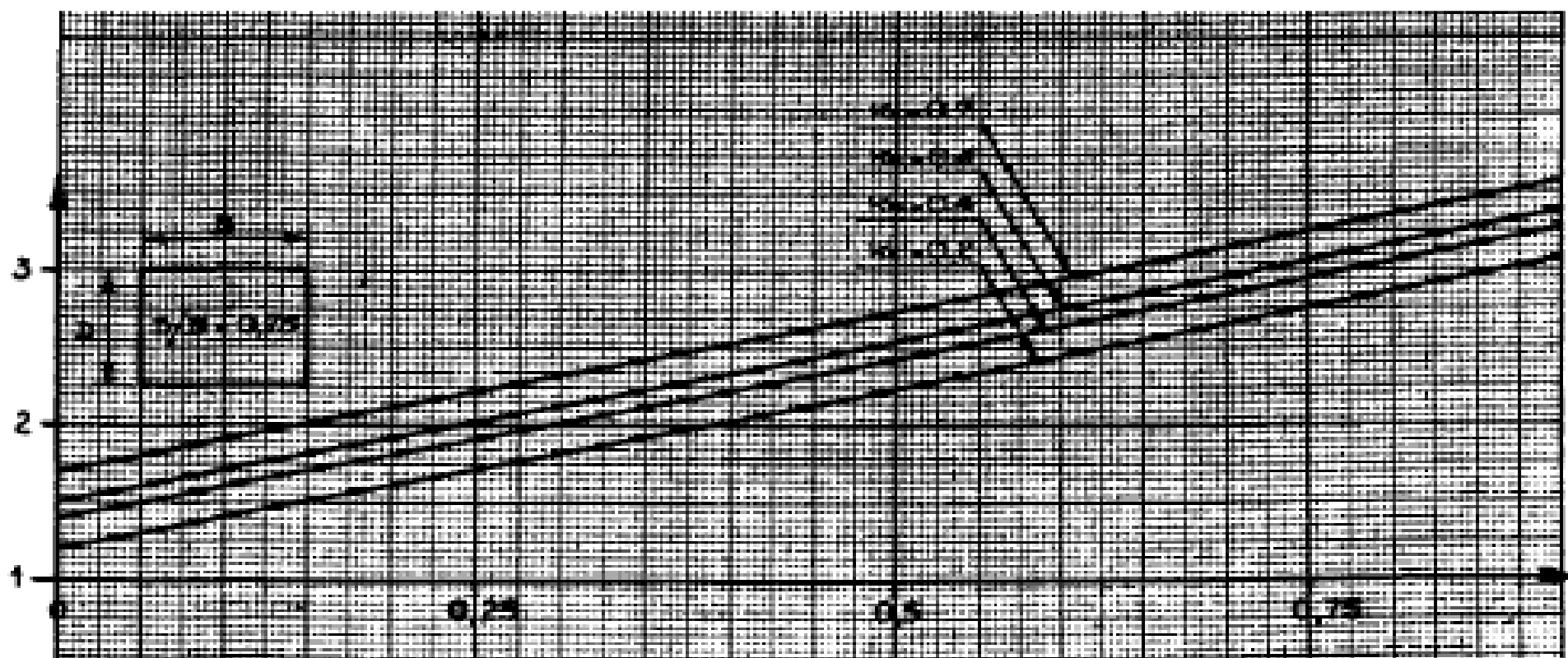


Figure IX-10 : Sortie noyée. Dalots rectangulaires $D/B = 0,75$ [BCEOM]

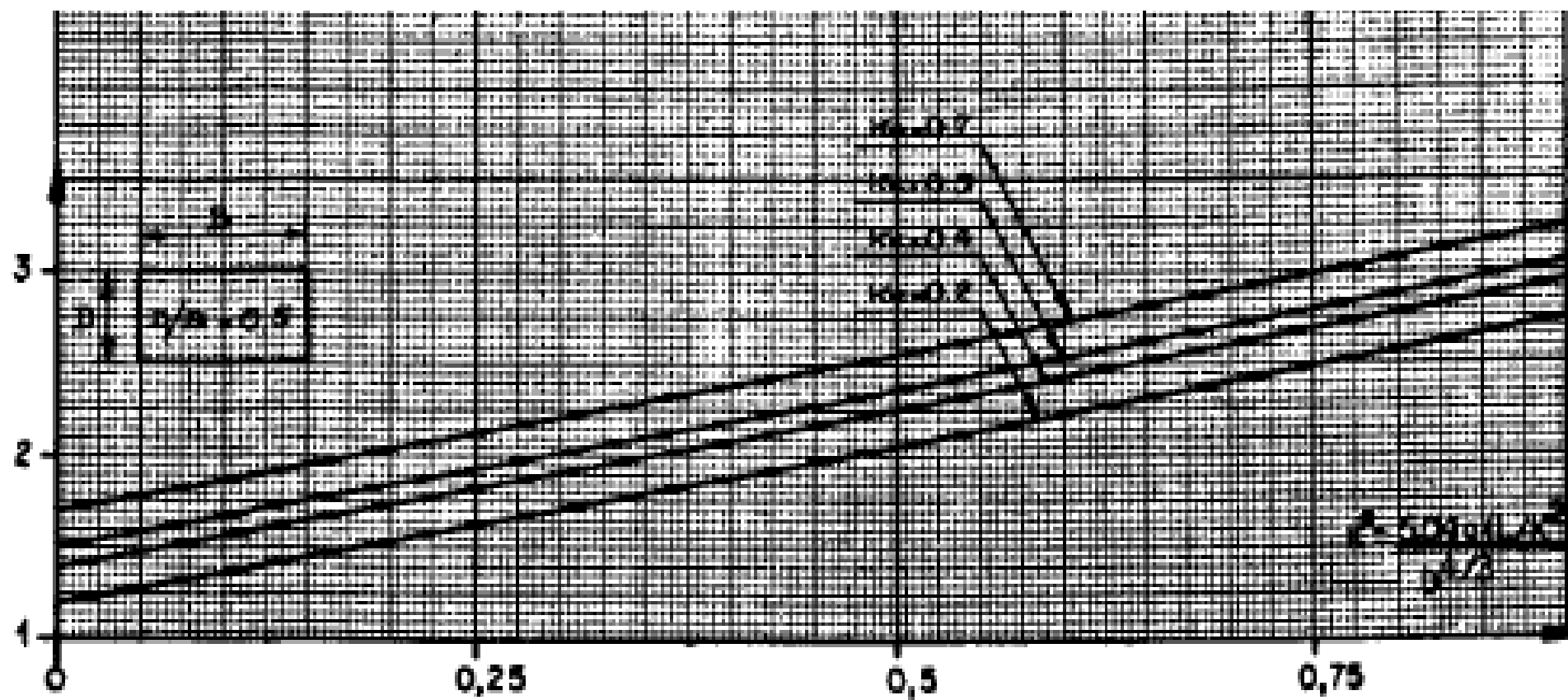


Figure IX-11 : Sortie noyée. Dalots rectangulaires $D/B = 0,50$ [BCEOM]

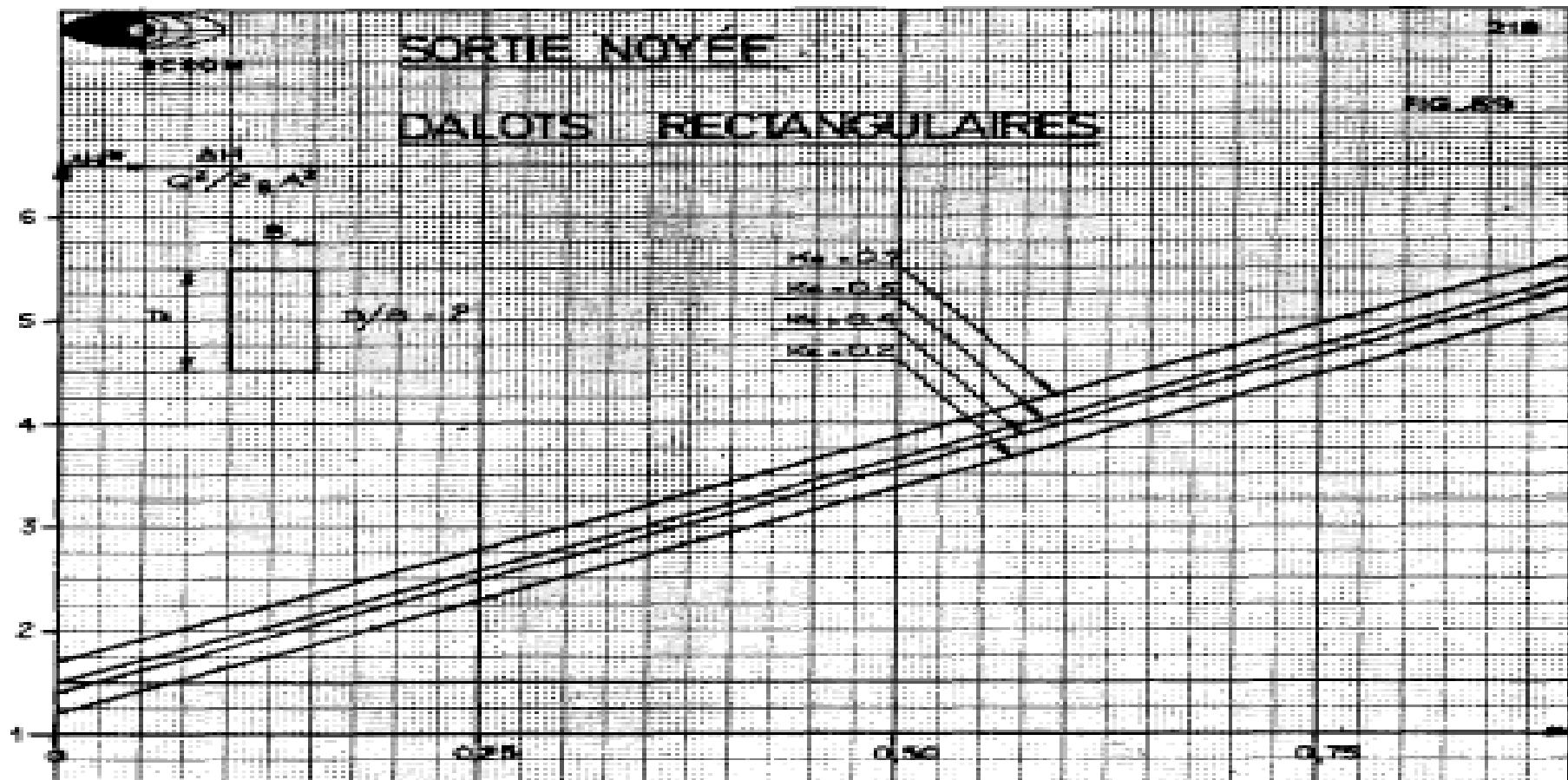


Figure IX-12: Sortie noyée. Dalots rectangulaires $D/B = 2$ [BCEOM]

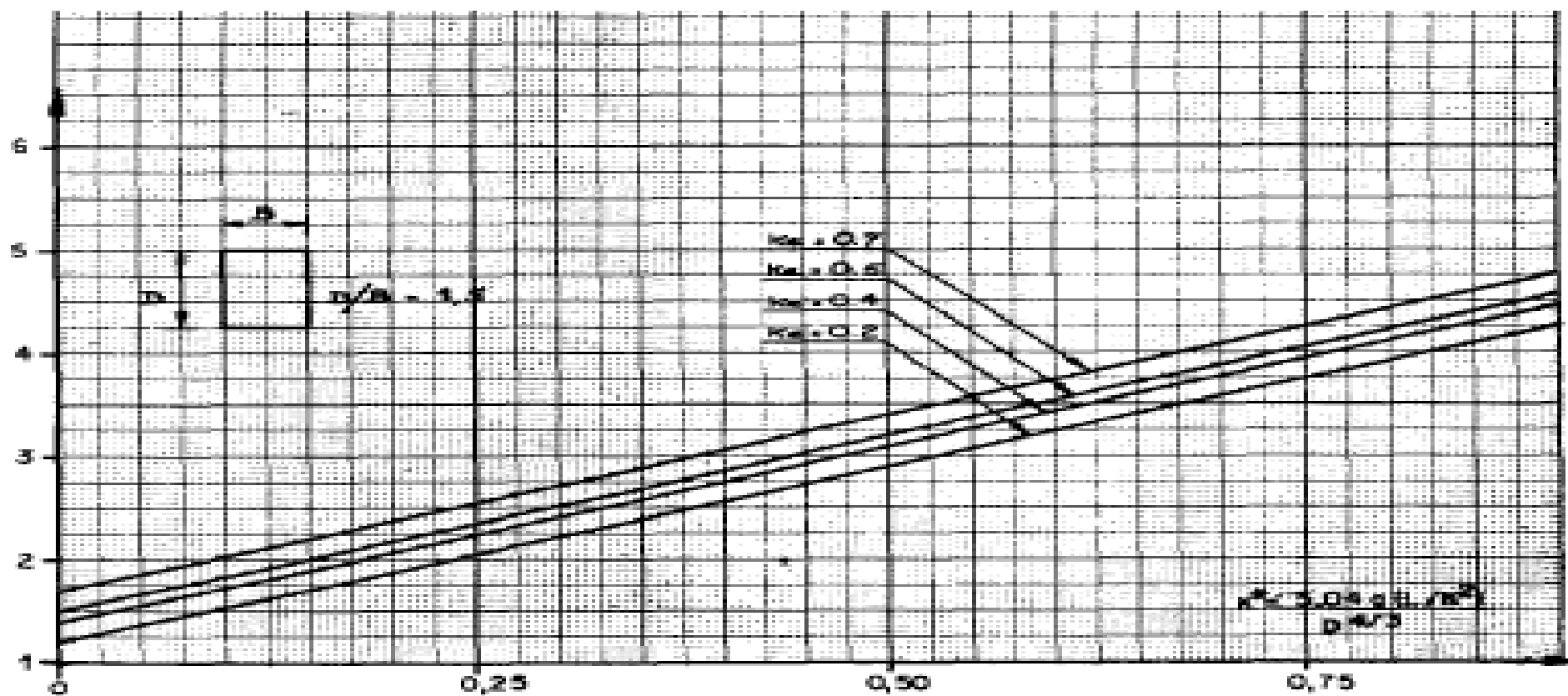


Figure IX-13 : Sortie noyée. Dalots rectangulaires $D/B = 1,5$ [BCEOM]

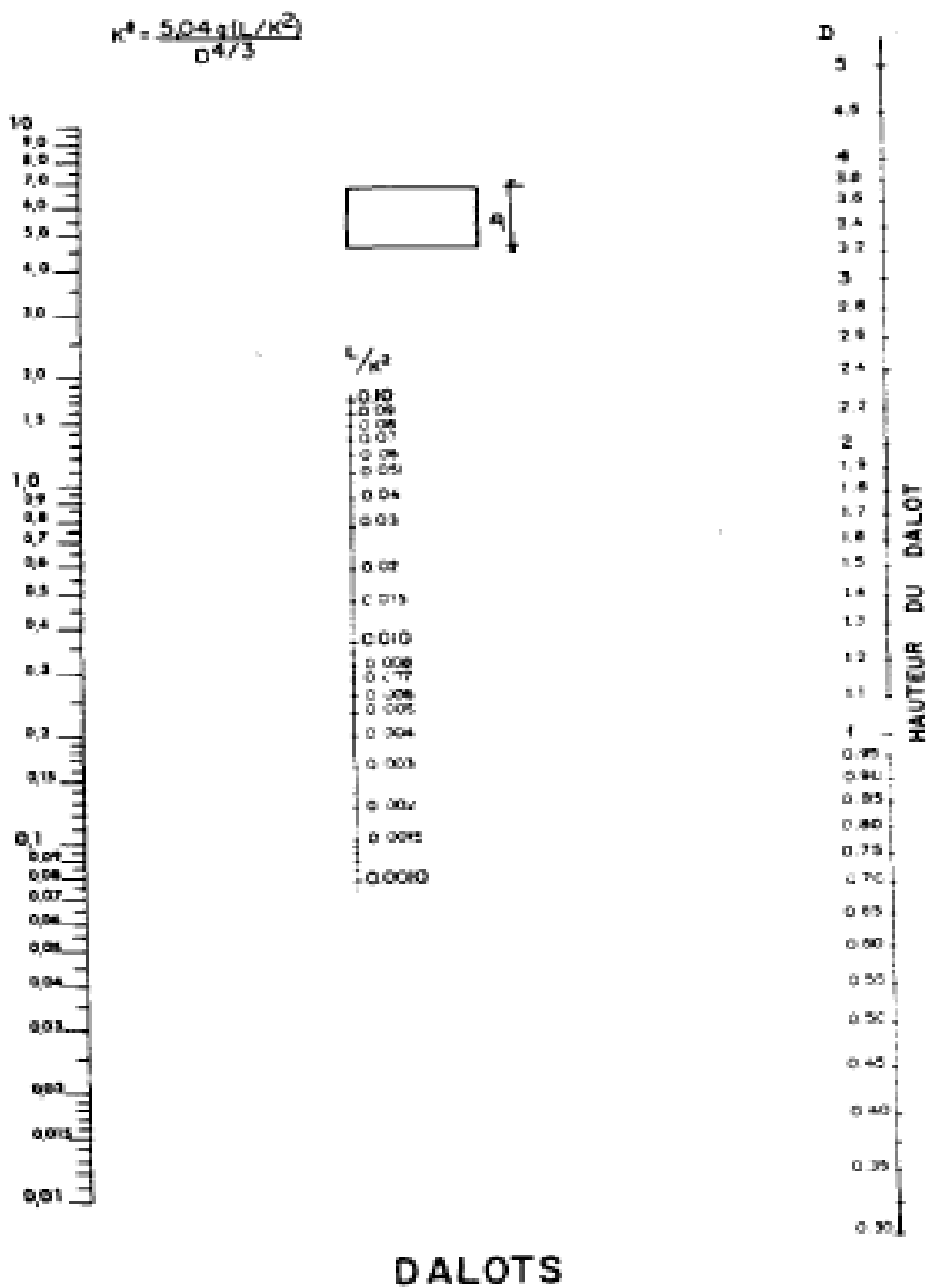


Figure IX-14 : Calcul de $K^* = 5,04 \frac{gL/K^2}{D^{4/3}}$ à partir de L/K^2 et D [BCEOM]

Remarquons sur les conditions d'entrée que :

- pour les diverses valeurs de K_e , les débits admis dans les ouvrages étudiés sont influencés par leur tête amont.
- les buses saillantes hors du remblai doivent être évitées.
- les dispositifs suivants sont vivement conseillés:
 - chanfreinage des buses et des dalots,
 - adoption de murs en aile inclinés de 30° sur l'axe de l'ouvrage,
- dans le cas des buses en béton, on choisira de préférence pour les têtes amont, des buses à emboîtement femelle qui présentent un chanfrein naturel.

D Sortie libre

Le type d'écoulement dépend alors de la profondeur d'eau H_1 , en amont de l'ouvrage. Contrairement aux écoulements à sortie aval noyée qui peuvent se mettre sous forme analytique relativement simple, les écoulements à sortie libre sont des phénomènes plus complexes. Les coefficients qui les régissent sont empiriques, aussi les méthodes de calculs sont graphiques et s'appuient sur les courbes expérimentales qui sont données pour chaque type d'ouvrage.

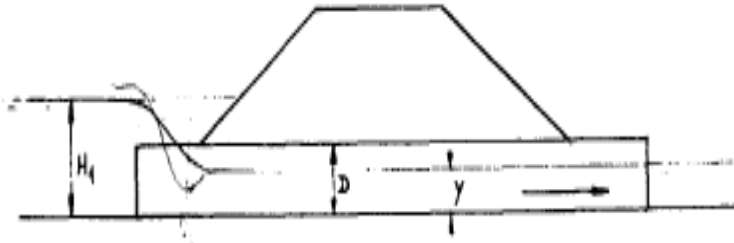


Figure IX-15 : Fonctionnement à sortie libre

Si $H_1 \leq 1,25D$, l'écoulement se fait à surface libre dans l'ouvrage, après la formation d'une section de contrôle à l'entrée où apparaissent les conditions de l'écoulement critique. Le débit de l'ouvrage est donné par la relation générale :

$$Q = CS\sqrt{2g(H_1 - y)} \quad \text{éq IX-7}$$

dans laquelle :

C est un coefficient dépendant de la forme de l'entrée,

H_1 est la hauteur d'eau en amont de la buse

y est la profondeur d'eau dans la buse,

S surface mouillée dans l'ouvrage.

Le régime critique à l'entrée confère au débit sa valeur maximum pour une valeur H_1 donnée de la hauteur d'eau amont.

On démontre que cette relation se mettra sous la forme :

$$Q = \sqrt{2gD^5} \times F(H_1/D) \quad \text{éq IX-8}$$

En adoptant les variables adimensionnelles :

$$H_1^* = H_1/D \quad \text{et} \quad Q^* = Q/\sqrt{2gD^5}$$

on obtient la relation : $Q^* = F(H_1^*)$ qui permet de récapituler toutes les valeurs expérimentales sous un nombre limité de courbes en regroupant les multiples paramètres sous les variables adimensionnelles ci-dessus définies.

Si $H_1 \geq 1,25D$, l'écoulement peut se faire à surface libre ou à section pleine (suivant H_1/D et la longueur de l'ouvrage).

Il se forme à l'entrée amont une section contractée semblable au passage d'une vanne de fond : le régime critique est atteint dans cette section et le débit est :

$$Q = C' S \sqrt{2g(H_1 - y)} \quad \text{éq IX-9}$$

C' est le coefficient de contraction à l'entrée. On démontre que cette relation se met également sous la forme :

$$Q = \sqrt{2gD^5} \times G(H_1/D) \quad \text{éq IX-10}$$

Avec les mêmes variables adimensionnelles que ci-dessus, on écrit que :

$$Q^* = G(H_1^*)$$

Les résultats expérimentaux pour ce cas d'écoulement se regroupent sous des courbes qui prolongent les courbes $F(H^*)$ du premier type d'écoulement.

Remarques importantes

Dans le cas de la sortie libre, l'écoulement dans l'ouvrage se fait très souvent à surface libre. Pour assurer une bonne évacuation des débits admis à l'entrée de l'ouvrage, il faut que le régime soit torrentiel, c'est-à-dire que la pente longitudinale de l'ouvrage soit égale ou supérieure à la pente critique.

- le calcul de cette pente critique sera abordé dans un paragraphe ultérieur.
- la limitation de la vitesse maximale à 3 m/s reste imposée. L'écoulement ne se faisant pas à section pleine, la vitesse ne peut plus se calculer par la formule $V = Q/S$.
- la méthode de calcul de la vitesse de l'eau dans le cas de la sortie libre sera vue dans un paragraphe ultérieur.
- le calcul de cette vitesse est obligatoire pour s'assurer qu'elle reste bien inférieure à 3 m/s. Si elle est supérieure à cette valeur, on devra alors prendre un ouvrage d'ouverture plus grande.

D.1 Buses circulaires

Les courbes expérimentales $Q^* = F(H_1^*)$ et $Q^* = G(H_1^*)$ sont données dans les figures IX-16 et IX-17. Rappelons que :

$$H_1^* = H_1/D \quad \text{et} \quad Q^* = Q/\sqrt{2gD^5}$$

La figure IX-16 concerne les buses métalliques type ARMCO :

Le rôle du chanfrein est joué par l'extrémité amont à emboîtement femelle et donne un rendement meilleur que l'extrémité amont à emboîtement mâle qui est déconseillé. Il y a intérêt à améliorer au maximum l'entrée de l'ouvrage en la chanfreinant pour les très gros diamètres de buses métalliques ou en béton ($D > 2$ m). La figure IX-18 ci-après donne les courbes $F(H_1^*)$ et $G(H_1^*)$ pour ce cas d'ouvrage.

Connaissant le débit Q à évacuer, en se fixant une première valeur du diamètre D , on calcule alors $Q^* = Q/\sqrt{2gD^5}$ d'où l'on tire $H_1^* = H_1/D$ de la courbe correspondante. On obtient ainsi une première valeur de $H_1 = H_1^* \times D$ dont on jugera de la compatibilité avec le projet.

La valeur de $Q^* = Q/\sqrt{2gD^5}$ peut se déterminer par méthode graphique au moyen de l'abaque de la figure IX-19 ci-après.

On calculera alors la pente critique correspondante puis la vitesse de l'eau dans la buse pour vérifier si elle est inférieure à 2 m/s. Si V est supérieure à 2 m/s, soit on prend une valeur du diamètre supérieure à la première valeur D essayée, soit on augmente le nombre de buses.

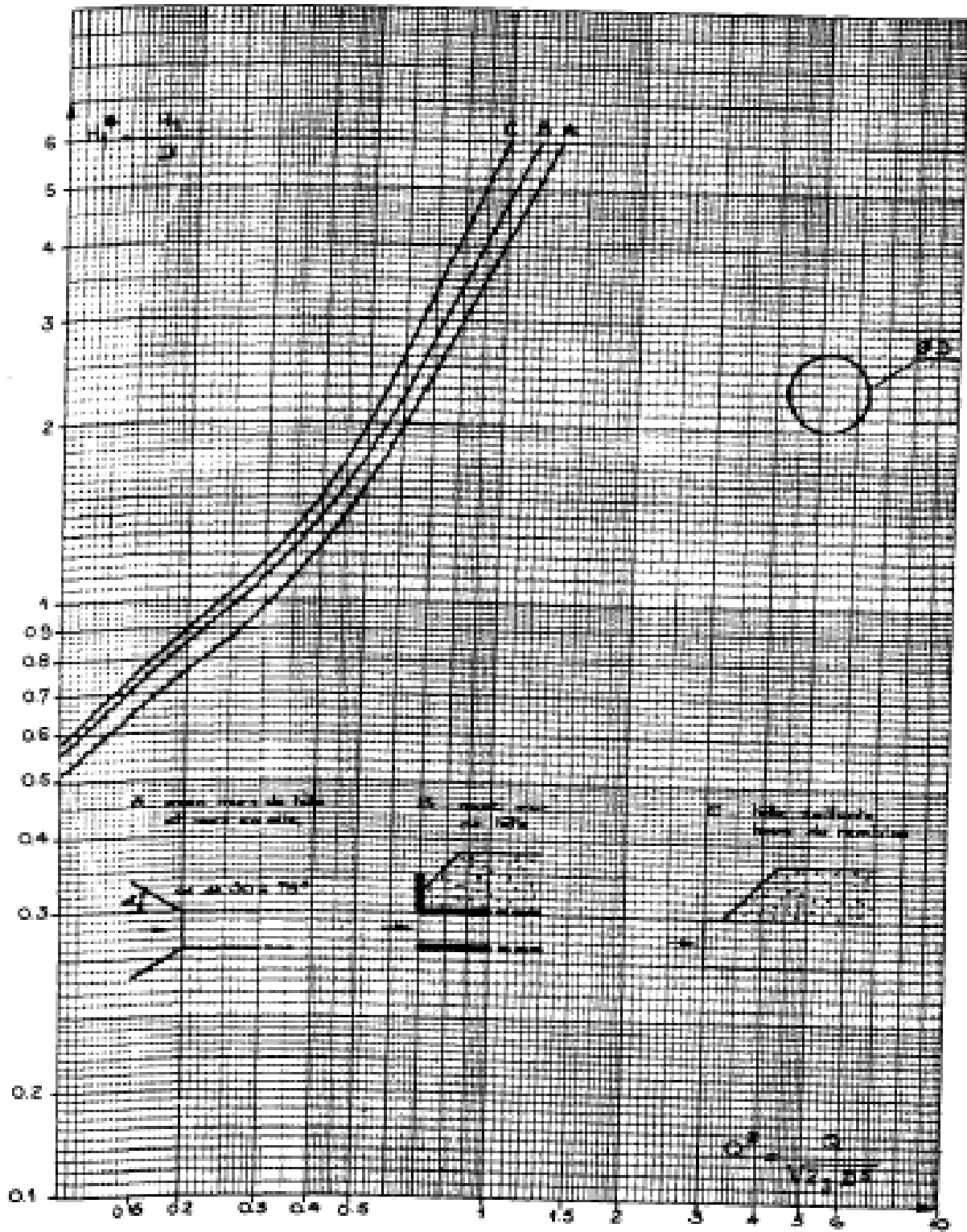


Figure IX-16: Sortie libre - buses métalliques circulaires ($D \leq 2m$) [BCEOM]

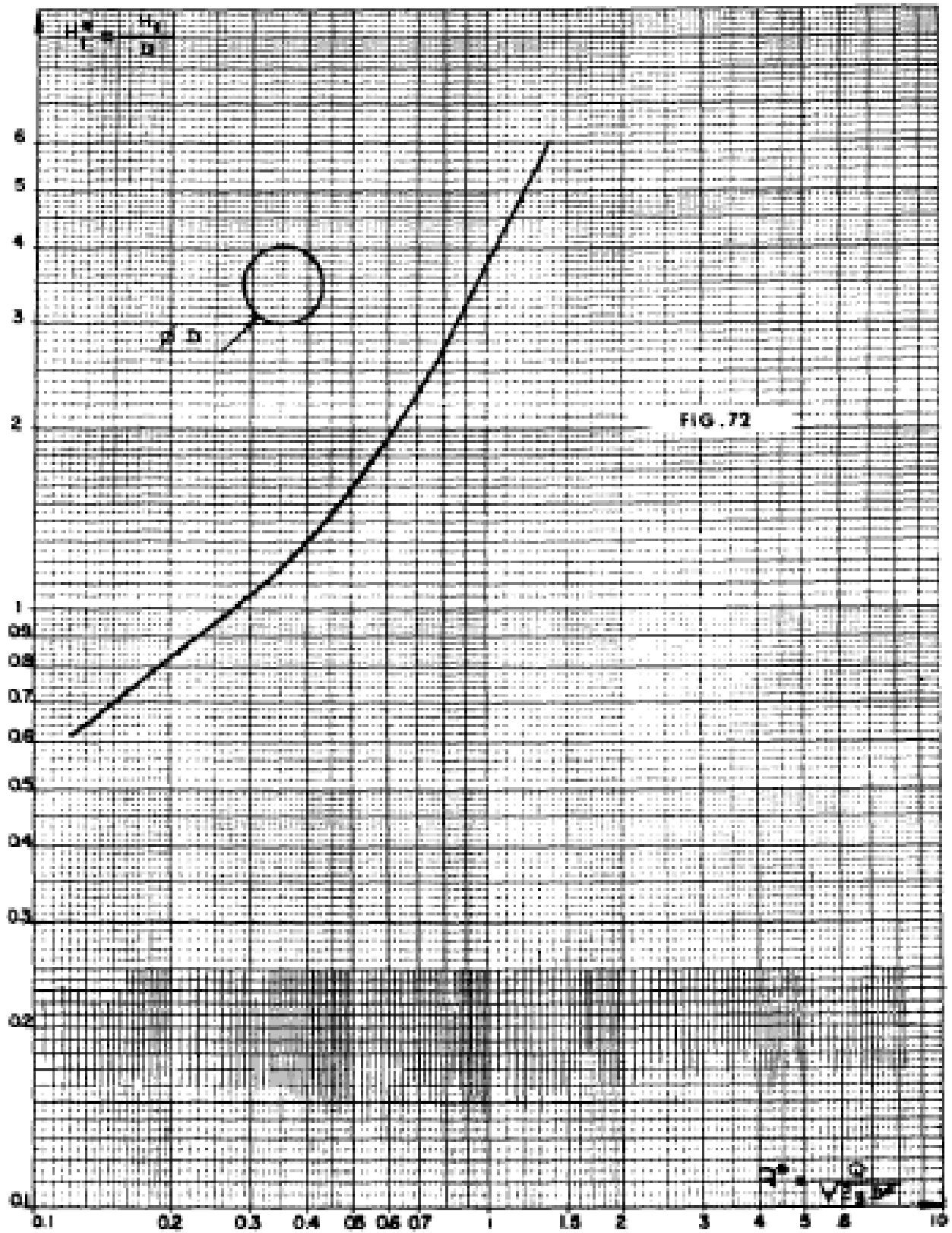


Figure IX-17 : Sortie libre- buses circulaires en béton [BCEOM]

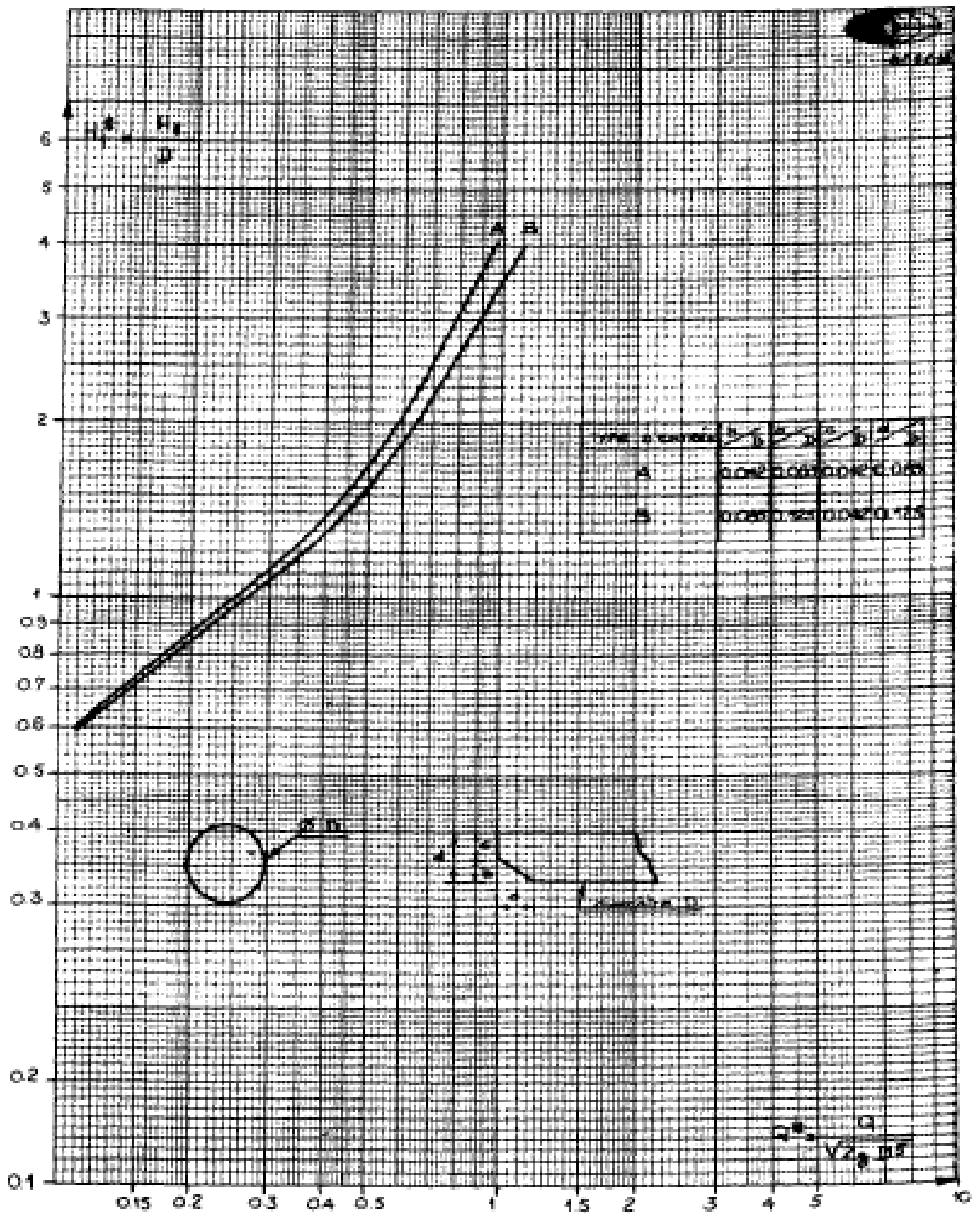


Figure IX-18: Sortie libre : grandes buses métalliques circulaires ($D > 2m$) à entrée chanfreinée [BCEOM]

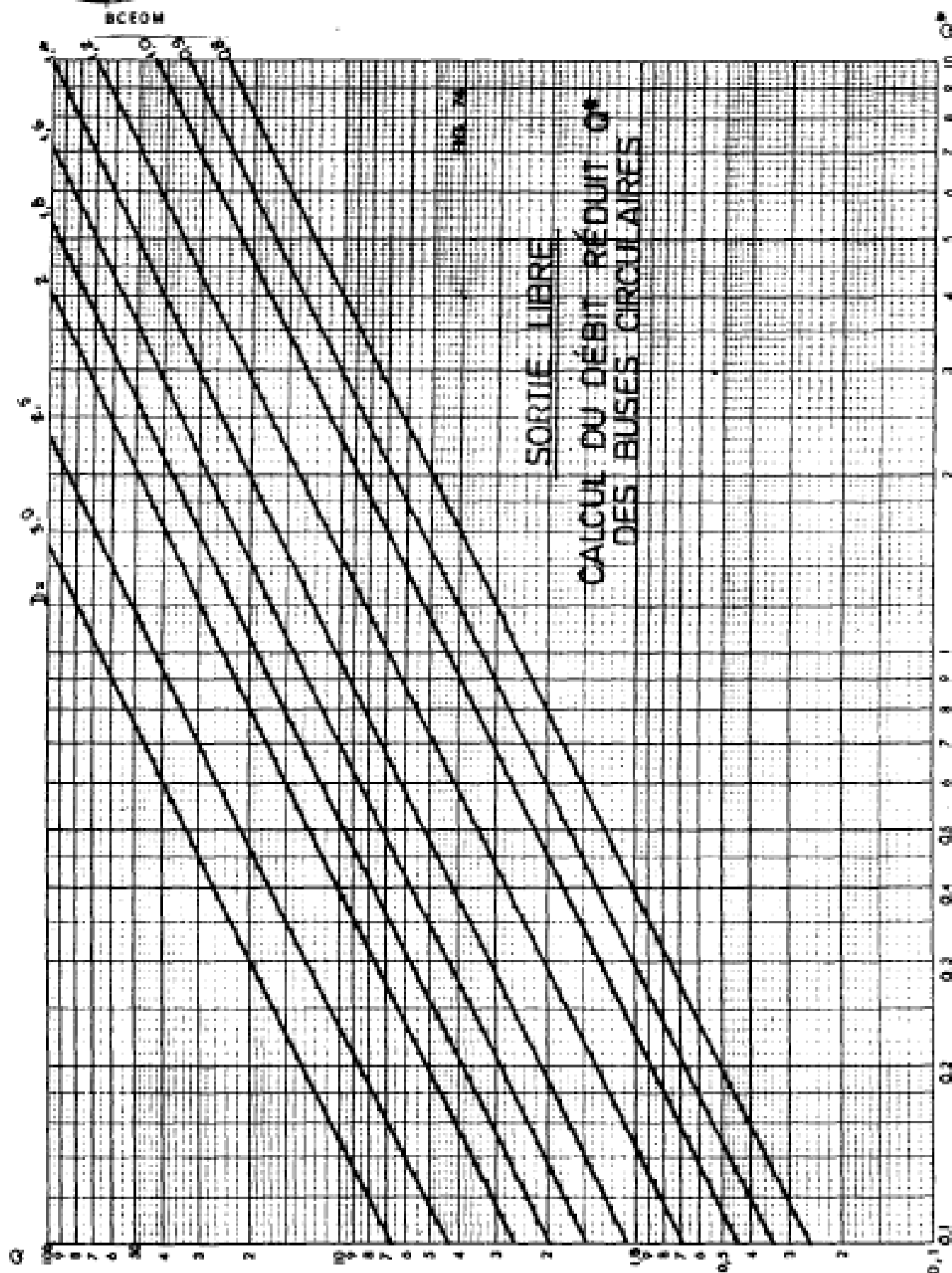


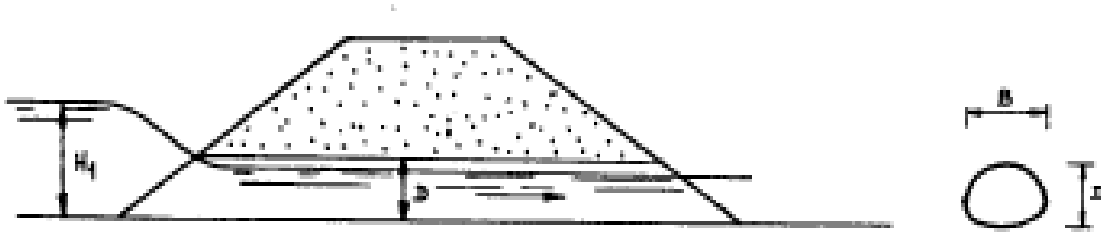
Figure IX-19 : sortie libre : calcul des débits réduits Q^* des buses circulaires [BCEOM]

D.2 Buses arches

Les variables adimensionnelles ici sont les suivantes :

$$H_1^* = H_1/D \quad \text{et} \quad Q^* = \frac{Q}{A\sqrt{2gD}}$$

A étant la section de la buse arche (le tableau IX-3 donne les diverses caractéristiques des buses arches).



Dans les cas suivants :

- avec mur de tête,
- tête en sifflet suivant la pente du talus,
- tête saillante hors du remblai.

Les valeurs H^* en fonction de Q^* sont données par les courbes de la figure IX-20. Le processus de calcul est le même que pour les buses circulaires. Le débit Q étant connu. On se fixe une première valeur de la flèche D , ce qui donne la section A (tableau IX-3). Avec laquelle on vérifiera si la vitesse moyenne $V = Q/A$ est inférieure à la vitesse maximale admissible qui est de 3,0 m/s.

On calcule alors directement la valeur de $Q^* = Q/A\sqrt{2gD}$ ou on le détermine au moyen du graphique à points alignés de la figure IX-21. Les courbes de la figure IX-20 donnent alors $H_1^* = H_1/D$ d'où une première valeur de H_1 dont on vérifiera la compatibilité avec le projet.

D.3 Les dalots

Les variables adimensionnelles ici sont les suivantes :

$$H_1^* = H_1/D \quad \text{et} \quad Q^* = \frac{Q}{A\sqrt{2gD}}$$

Nous avons également les relations de la forme

$$H_1^* = F(Q^*) \quad \text{si} \quad H_1^* \leq 1,25 \quad \text{où} \quad H_1^* = G(Q^*) \quad \text{si} \quad H_1^* > 1,25$$

Ces relations expérimentales sont représentées sur les courbes de la figure IX-22 ci-après où sont regroupés trois cas :

- avec murs mur aile, faisant 30° à 70° avec l'axe de l'ouvrage
- avec mur de tête mais sans mur en aile,
- tête saillante ou coupée en sifflet suivant le talus.

Les calculs d'un dalot se font à deux niveaux différents d'approximations successives.

Connaissant Q , on se donne une première valeur de la

Hauteur D admissible pour le dalot, compte tenu des caractéristiques

Géométriques du projet au droit de l'ouvrage. On se fixe alors la largeur B du dalot tel que la vite moyenne $V = Q/BD$ ne dépasse pas la vitesse maximale de 3 m/s.

Les valeurs B , D et Q étant connues, on calcule $Q^* = Q/BD\sqrt{2gD}$ ou on détermine Q^* grâce au graphique à points alignés de la figure IX-23. On obtient

$H_1^* = H_1/D$ de la figure IX-22 dont on vérifiera la compatibilité avec le projet.

Au cas où, cette valeur ne satisfait au projet, on recommencera avec une autre valeur de la largeur B , supérieure à la première valeur essayée.

D.4 Pente longitudinale des ouvrages

Les calculs précédents supposent que les ouvrages sont capables d'évacuer le débit critique correspondant à la profondeur d'eau H_1 amont.

Pour cela, il faut que la pente longitudinale des ouvrages soit au moins égale à la pente critique. L'écoulement de l'eau à travers l'ouvrage se fait ainsi en régime torrentiel ; on est ainsi assuré qu'il ne se forme, après la section critique à l'entrée, un ressaut hydraulique empêchant l'évacuation normale des eaux. D'autre part, la vitesse d'écoulement de l'eau dans l'ouvrage sera ainsi largement suffisante, pour empêcher en règle générale le dépôt des particules solides. pour le calcul de la pente critique, les variables adimensionnelles qui permettent de regrouper les paramètres définissant le phénomène seront utilisées.

Le critère général du régime critique est :

$$\frac{Q^2 \times B}{g \times S^3}$$

que nous associerons à la formule de MANNING

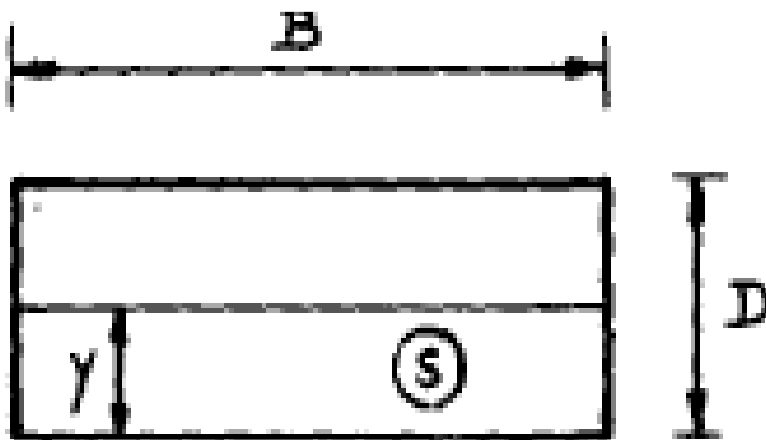
$$Q = K \times S \times R_H^{2/3} \times I_c^{1/2}$$

pour tirer la valeur de la pente critique I_c dont l'expression est :

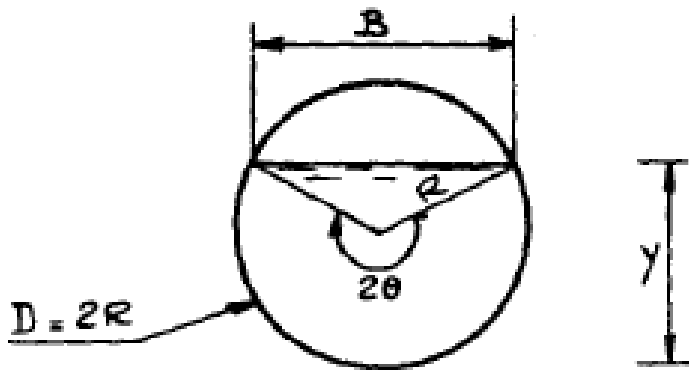
$$I_c = \frac{g \times S}{K^2 \times R_H^{4/3} \times B} \quad \text{éq IX-11}$$

Q le débit ; B la largeur au miroir ; S la section mouillée

y la profondeur maximum dans la section



Pente critique pour une buse circulaire



Si R est le rayon de la buse, on a alors les paramètres suivants :

$$S = R^2 \theta = \frac{1}{2} R^2 \times \sin 2\theta$$

$$P = 2R\theta$$

$$R_H = \frac{R}{2} \left(1 - \frac{\sin 2\theta}{2\theta} \right)$$

$$B = 2R \sin \theta$$

$$\theta = 2 \arcsin \sqrt{y/2R}$$

En introduisant ces relations dans les expressions de Q et de I_c , nous aurons :

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gR^5}} = \frac{(2\theta - \sin 2\theta)^{3/2}}{4(\sin \theta)^{1/2}}$$

$$I_c^* = \frac{I_c}{g/(K^2 \times R^{1/3})} = \frac{2^{2/3} \times \theta^{4/3}}{(\sin \theta) \times (2\theta - \sin 2\theta)^{1/3}} \quad \text{éq IX-12}$$

ce qui permet de tracer la courbe $I_c^* (Q^*)$ par l'intermédiaire du paramètre θ . Courbe de la (figure IX-24).

Connaissant le débit Q et le diamètre D de la buse, donc son rayon R , on calcule $Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gR^5}}$

La figure IX-24 donne alors la valeur correspondante de :

$$I_c^* = \frac{I_c}{g/(K^2 \times R^{1/3})} \quad \text{éq IX-13}$$

D'où nous tirons immédiatement I_c ; K étant égal à 37 pour les buses métalliques et égal à 67 pour les buses béton.

L'utilisation des abaques à points alignés (figure IX-25; donnant $Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gR^5}}$ connaissant Q et R) et (figure IX-26 donne I_c , connaissant I_c^* (obtenu par la courbe de la figure IX-19) ; R et K), facilite l'application de la méthode de détermination de la pente critique.

en pratique, il est recommandé d'adopter pour l'ouvrage, une pente longitudinale de 1,2 fois ($1,2 * I_c$,) la pente critique déterminée pour tenir Compte des imperfections dans la mise en place des buses. Il faut aussi avoir à l'esprit qu'une pente longitudinale supérieure à $1,2 * I_c$, pourrait engendrer des vitesses trop grandes dans des ouvrages longs ($l > 25m$)

Pente critique pour une buse arche

Les expressions rationnelles ne servent plus à formuler les divers paramètres.

Les vérifications faites sur les caractéristiques géométriques montrent que les résultats pour les calculs de pente critique sont très proches des buses métalliques circulaires ($K = 37$).

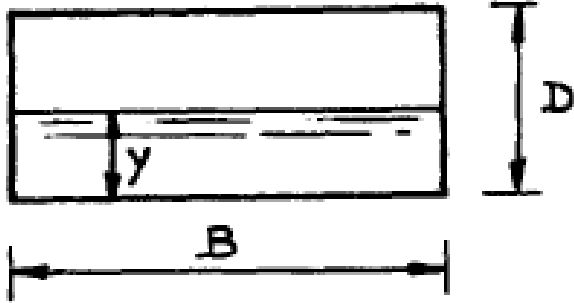
Les mêmes courbes figures IX-24; IX-25 et IX-26 servent pour la détermination de la pente critique, en prenant comme variables adimensionnelles :

$$\begin{cases} I_c^* = \frac{I_c}{g / \left[K^2 \times \left(\frac{D}{2} \right)^{\frac{1}{3}} \right]} \\ Q^* = \frac{Q}{g \times \left(\frac{D}{2} \right)^5} \end{cases} \quad \text{éq IX-14}$$



D étant la flèche de la buse arche

Pente critique pour un dalot



Nous avons : $S = B \times y$; $P = B + 2y$ et $R_H = B \times y / B + 2y$

Si nous posons : $x = y/B$, nous obtiendrons :

$$\begin{cases} I_c^* = \frac{I_c}{g / (K^2 \times B^{1/3})} = x * \left(2 + \frac{1}{x} \right)^{\frac{4}{3}} \\ Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g B^5}} = x^{3/2} \end{cases} \quad \text{éq IX-15}$$

I_c^* en fonction de Q^* est donné par la courbe de la figure IX-27 ; connaissant le débit Q et la largeur B , on calcule donc :

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gB^5}}$$

On lit I_c^* sur la courbe figure IX-27 ; K étant égal à 67 pour les dalots en béton, on déduit I_c . La détermination graphique et rapide de Q^* à partir de Q et B de I_c à partir de I_c^* , K et B se fait avec les abaques à points alignés des figures IX-25 et IX-26

D.5 Calcul de la vitesse

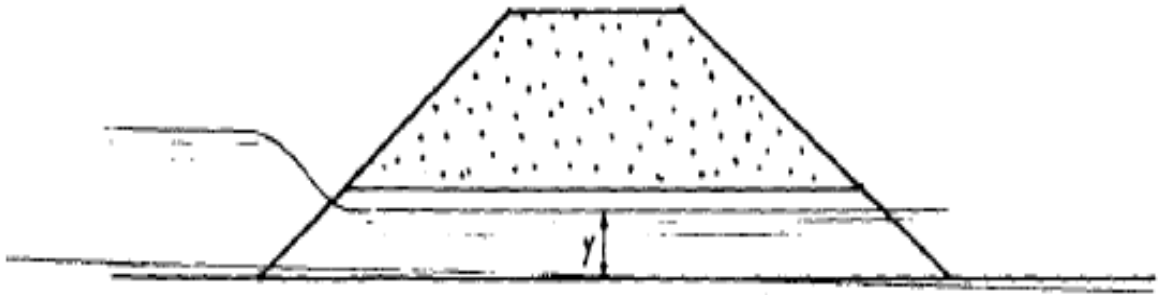
La pente de l'ouvrage est fixée en fonction de la pente critique I_c précédemment calculée, de la topographie au point de franchissement et de la géométrie du projet en ce point. Il convient de calculer la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau dans l'ouvrage pour vérifier :

- d'une part si elle reste en dessous d'une valeur maximale admissible ($V_{max} = 3 \text{ m/s}$),
- d'autre part si elle reste suffisante pour éviter les dépôts des particules solides dans l'ouvrage.

Les vitesses minimales à respecter suivant le diamètre des matériaux solides susceptibles de se déposer dans l'ouvrage sont les suivantes :

sable fin (< 0,05 m)	0,40 à 0,50 m/s
graviers fins (< à 5 mm)	0,50 à 0,70 m/s
gros graviers (5 mm à 15 mm)	0,70 à 0,90 m/s
cailloux (15 mm à 30 mm)	1,00 à 1,20 m/s
gros cailloux (30 à 100 mm)	1,50 à 1,80 m/s

Pour le cas des ouvrages fonctionnant en charge (sortie aval noyée), la vitesse $V = Q/A$ est simple à calculer, A étant la section de l'ouvrage. (Pour une buse arche le tableau IX-5 donne la valeur de A)



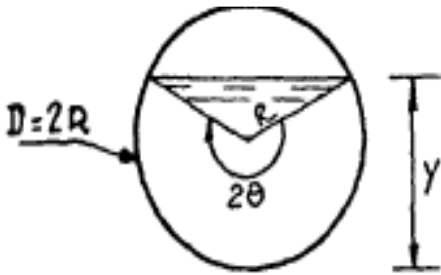
Pour le cas des ouvrages à sortie aval libre la vitesse dans l'ouvrage est plus complexe à calculer puisqu'elle dépend de la hauteur d'eau y dans l'ouvrage dans les cas où l'écoulement ne se fait pas à section pleine.

Les variables adimensionnelles suivantes :

$$\begin{cases} V^* = \frac{V}{KI^{1/2}\lambda^{2/3}} \\ Q^* = \frac{Q}{KI^{1/2}\lambda^{8/3}} \end{cases} \quad \text{éq IX-16}$$

permettront d'aborder le problème par la méthode graphique, λ étant une dimension caractéristique de l'ouvrage, et d'éviter de longs calculs par approximations successives.

D.5.1 Vitesse dans une buse circulaire



en prenant $\lambda = R$ (rayon de la buse circulaire), nous aurons :

$$\begin{cases} V^* = \frac{V}{KI^{1/2}R^{2/3}} = \frac{1}{2^{2/3}} \left(1 - \frac{\sin 2\theta}{2\theta}\right)^{2/3} \\ Q^* = \frac{Q}{KI^{1/2}R^{8/3}} = \frac{\theta}{2^{2/3}} \left(1 - \frac{\sin 2\theta}{2\theta}\right)^{5/3} \\ \theta = 2 \arcsin \sqrt{y/2R} \end{cases}$$

La courbe Q^* en fonction de V^* est donnée à la figure IX-28

On procédera de la manière suivante : connaissant le débit Q à évacuer et ayant déterminé la pente I_c et le rayon R de la buse. On calcule alors

$$Q^* = Q / (KI^{1/2}R^{8/3})$$

La courbe de la figure IX-28 donne V^* et connaissant K l'on tire la valeur de la vitesse par :

$$V = V^* KI^{1/2} R^{2/3}$$

D.5.2 vitesse dans une buse arche

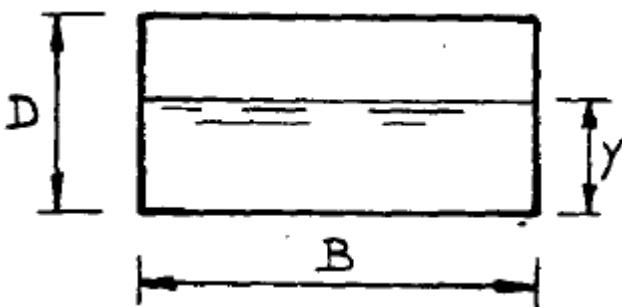
Les résultats sont très proches avec les buses circulaires, c'est pourquoi nous adopterons la même courbe de la figure IX-28 pour déterminer la vitesse dans une buse arche.

D étant la flèche de la buse arche.

$$\begin{cases} V^* = \frac{V}{KI^{1/2}(D/2)^{2/3}} = \frac{1,59V}{KI^{1/2}D^{2/3}} \\ Q^* = \frac{Q}{KI^{1/2}(D/2)^{8/3}} = \frac{6,35Q}{KI^{1/2}D^{8/3}} \end{cases}$$

On procédera comme ci-dessus pour le calcul de V , connaissant K

D.5.3 Vitesse dans un dalot



Posons : $\lambda = B$ et $x = y/B$, Les variables Q^* et V^* sont :

$$\begin{cases} V^* = \frac{V}{KI^{1/2}B^{2/3}} = \frac{x^{2/3}}{(1+2x)^{2/3}} \\ Q^* = \frac{Q}{KI^{1/2}B^{8/3}} = \frac{x^{5/3}}{(1+2x)^{2/3}} \end{cases}$$

La courbe de la figure IX-29 donne les valeurs de V^* en fonction de Q^* .

Pour obtenir la vitesse V on calcule d'abord $Q^* = Q/(KI^{1/2}B^{8/3})$

connaissant le débit Q à évacuer, la pente I et la largeur B du dalot.

La courbe de la figure IX-29 donne les valeurs de V^* , connaissant K , on calcule la valeur de la vitesse par l'expression :

$$V = V^* KI^{1/2} B^{2/3}$$

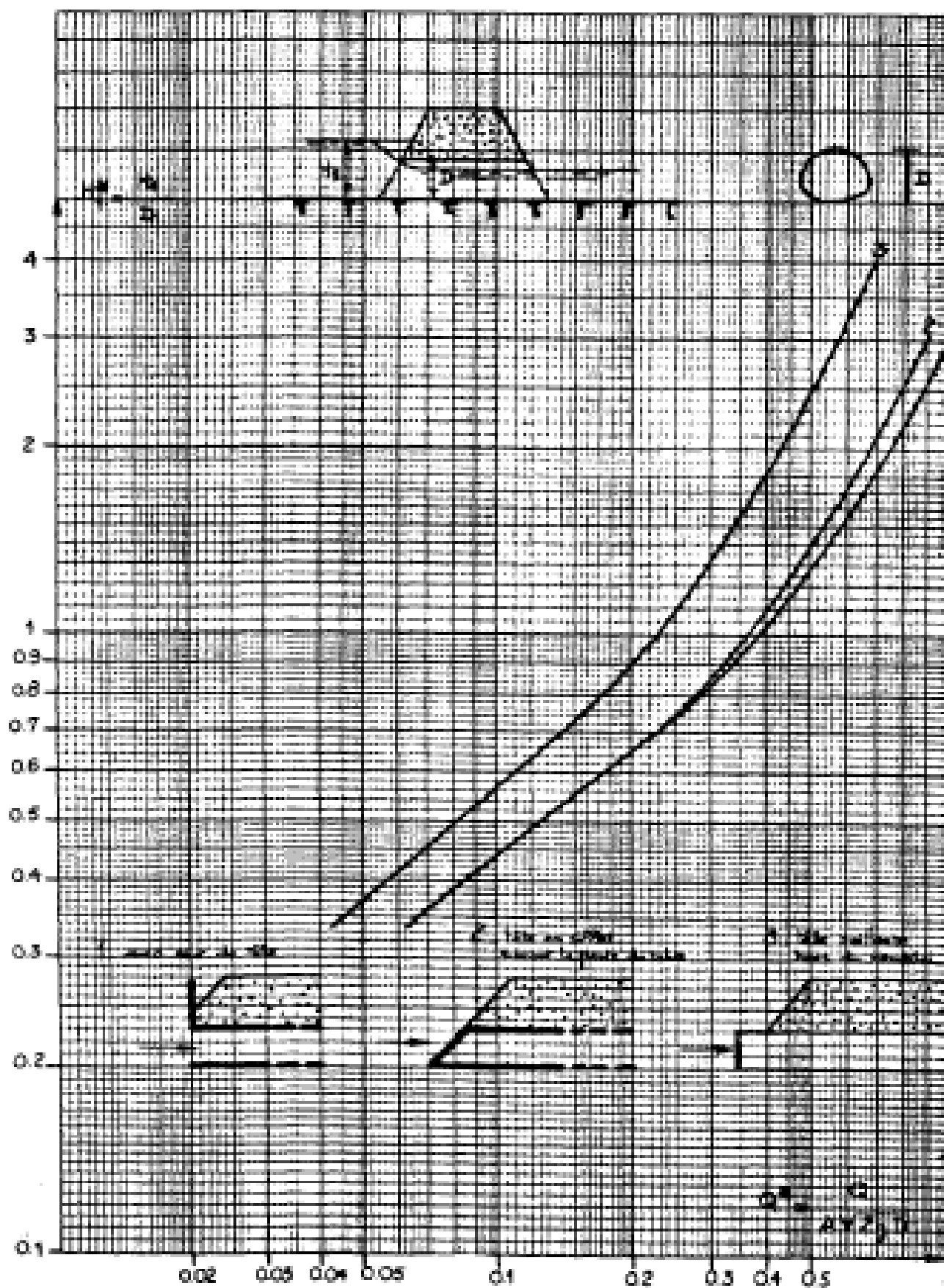


Figure IX-20: Sortie libre : buses arches [BCEOM]

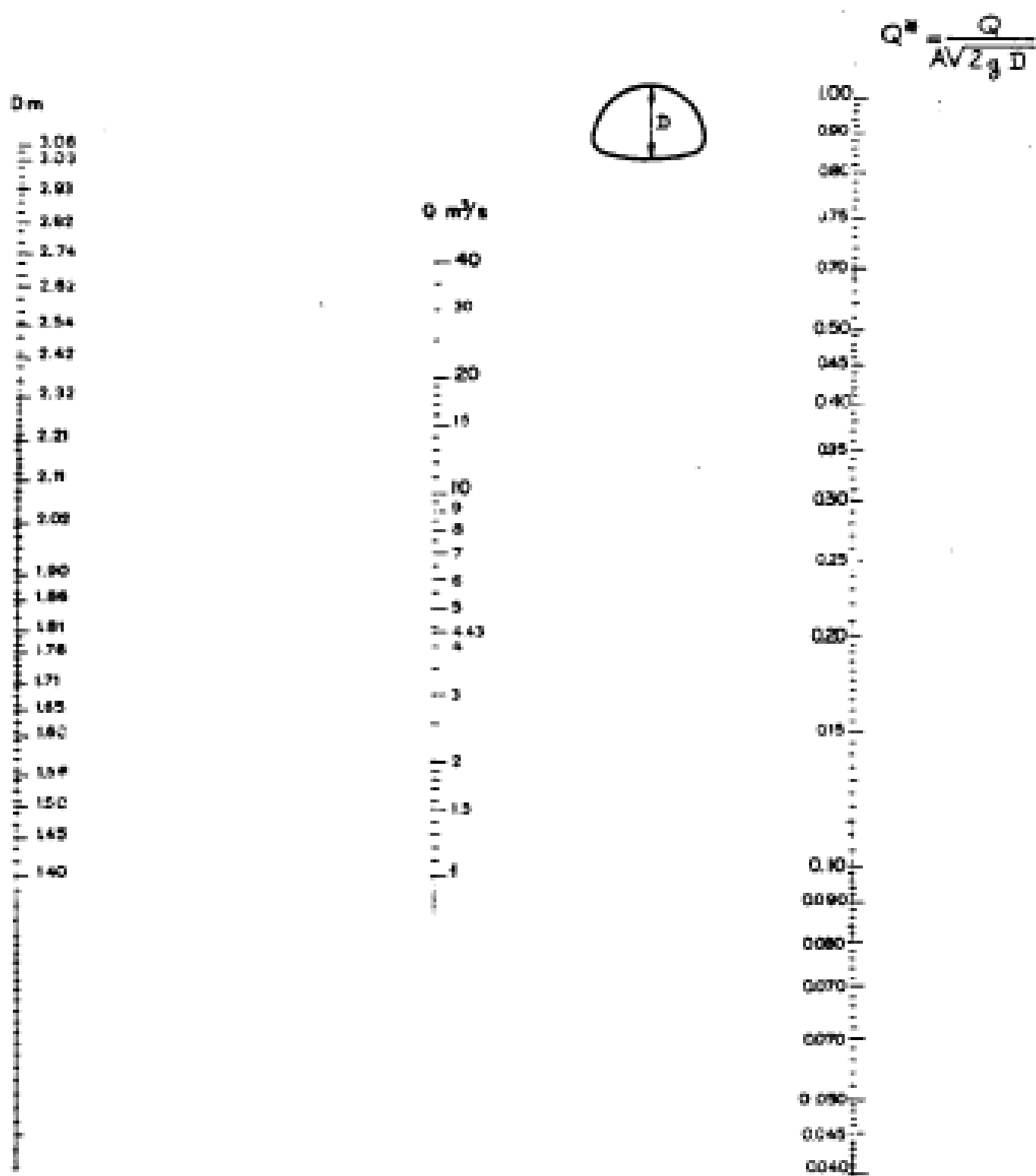


Figure IX-21: Sortie libre : calcul du débit réduit Q^* dans les buses arches [BCEOM]

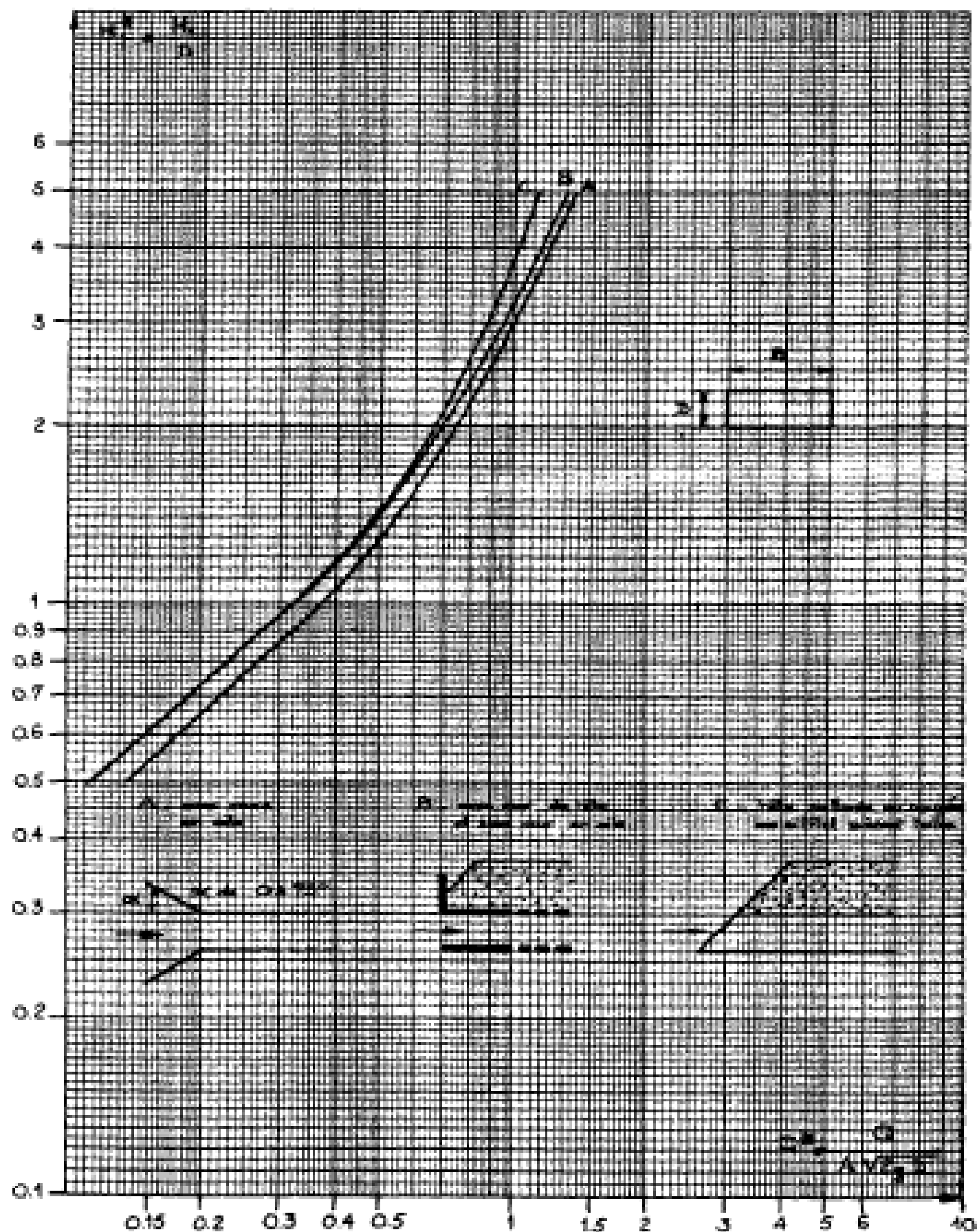


Figure IX-22 : Sortie libre : dalots rectangulaires [BCEOM]

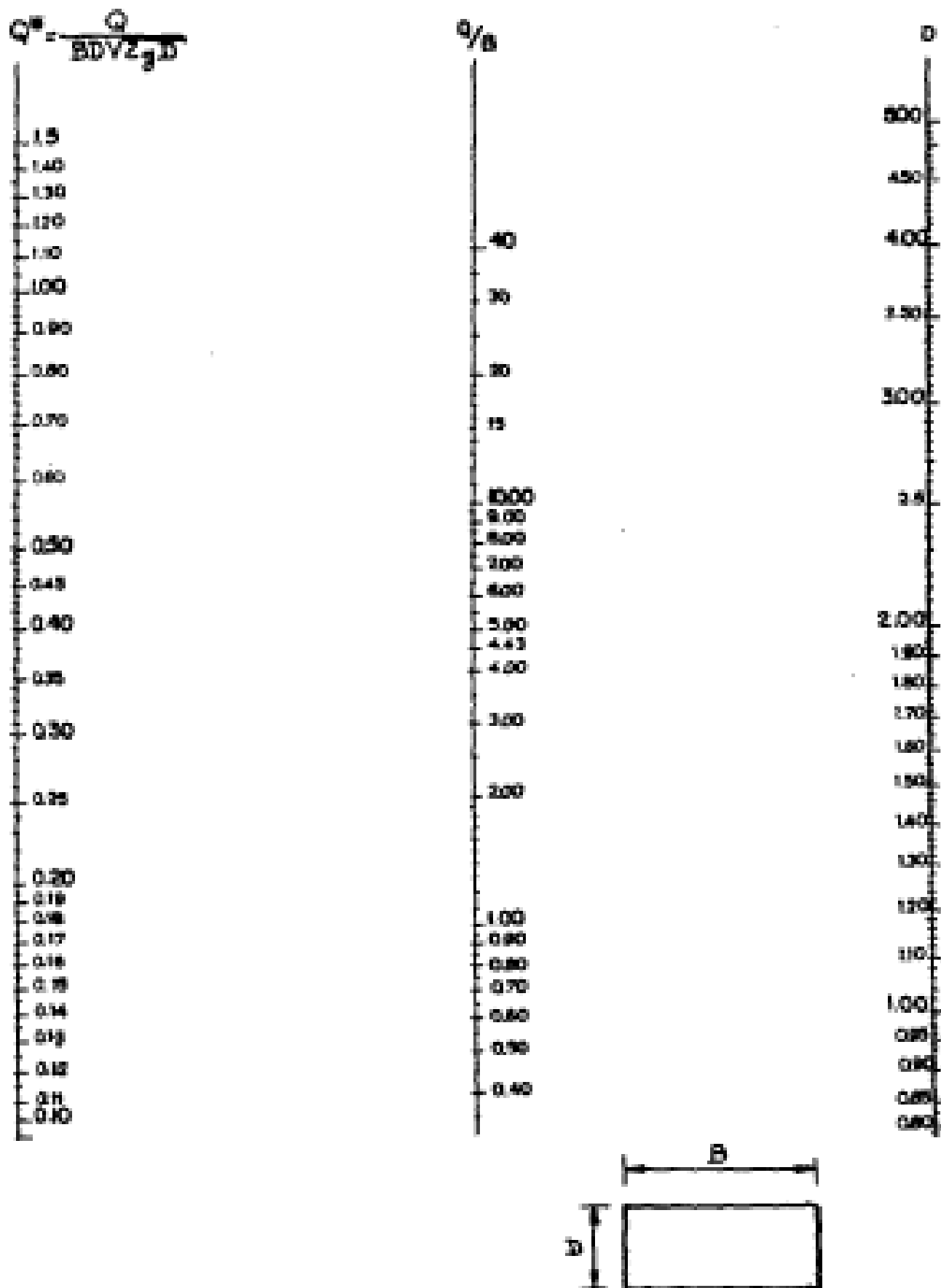


Figure IX-23 : Sortie libre : calcul du débit réduit Q^* dans dalots [BCEOM]

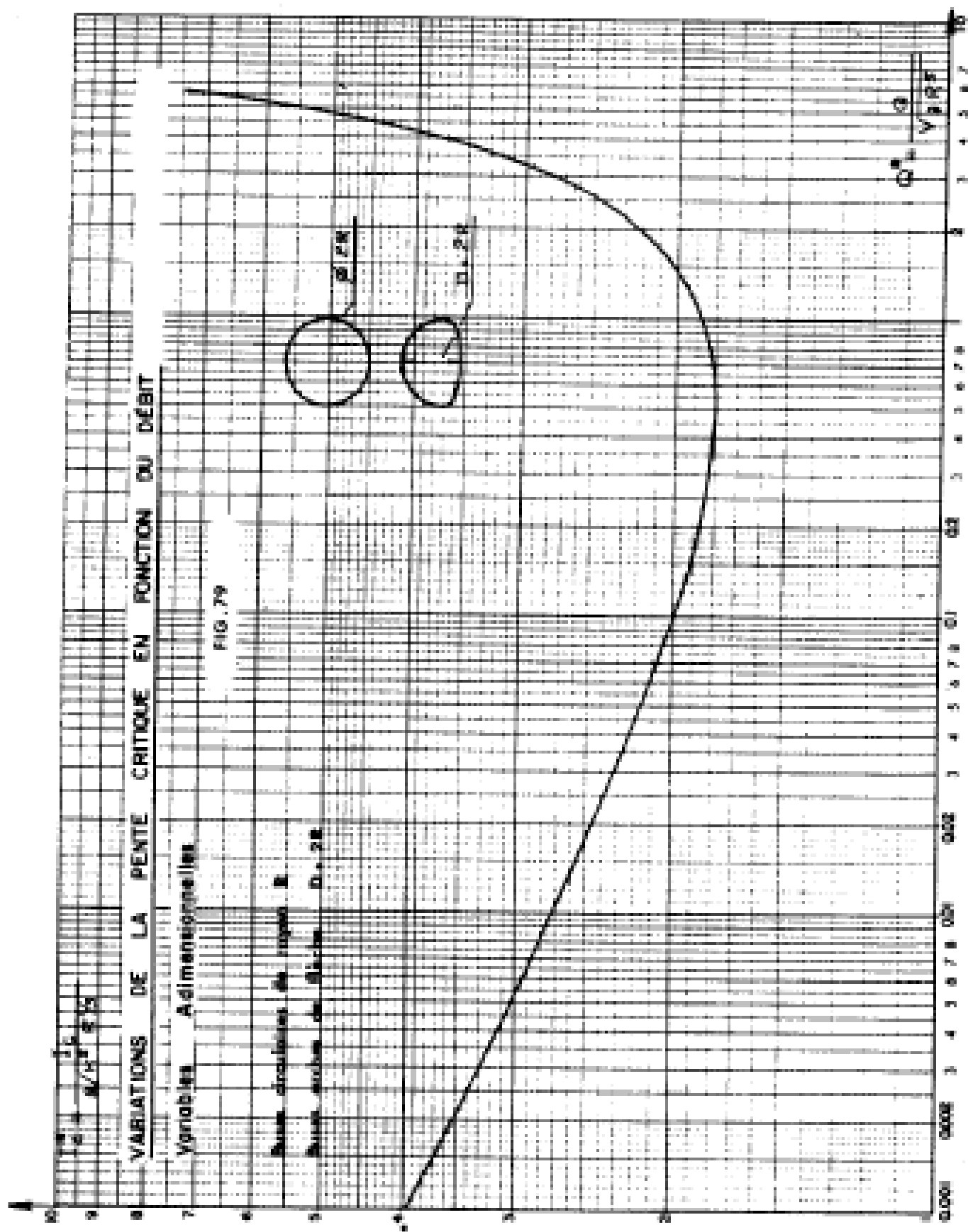
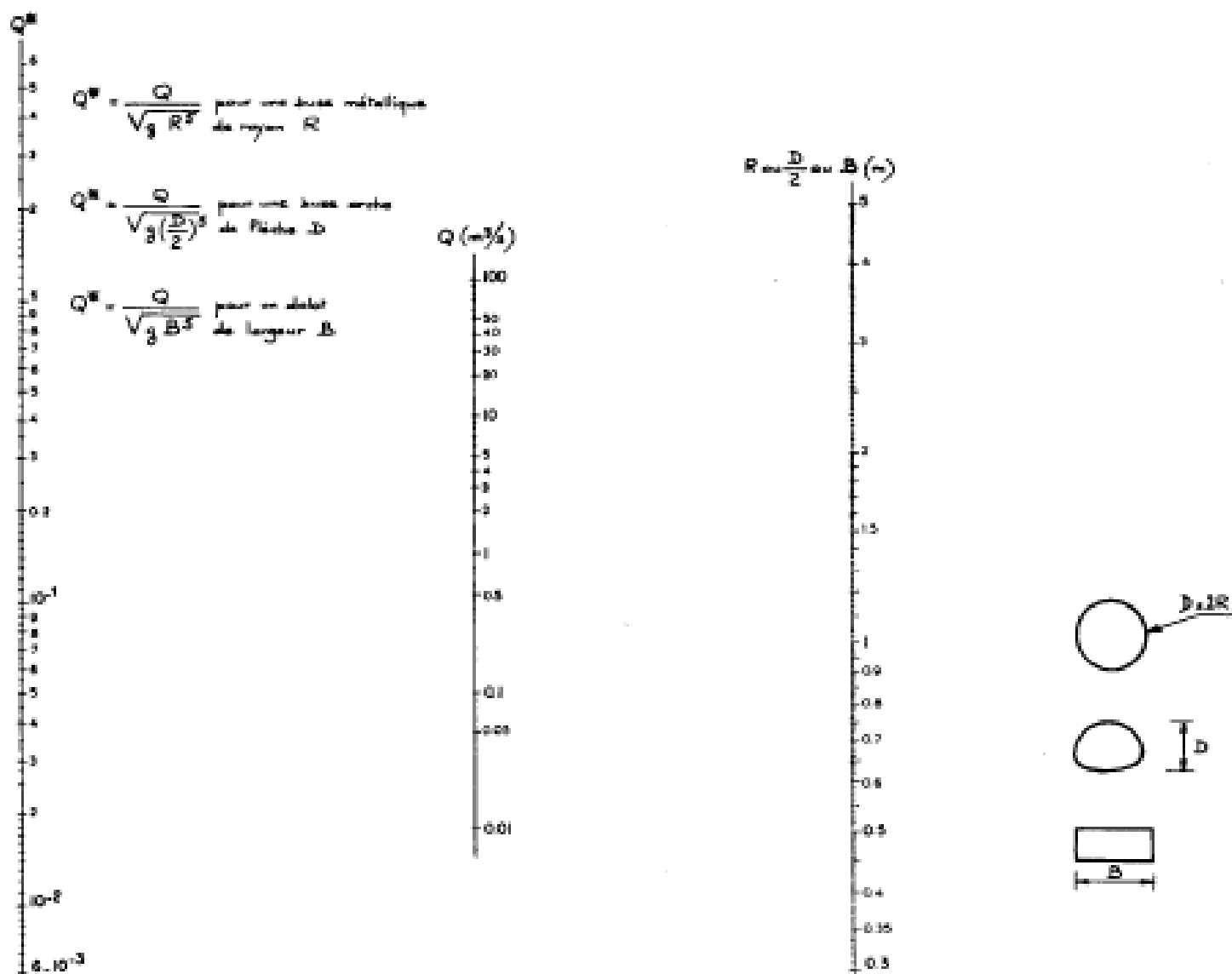


Figure IX-24: Variation de la pente critique en fonction du débit [BCEOM]



Calcul du débit critique réduit

Figure IX-25: Détermination de la pente critique [BCEOM]

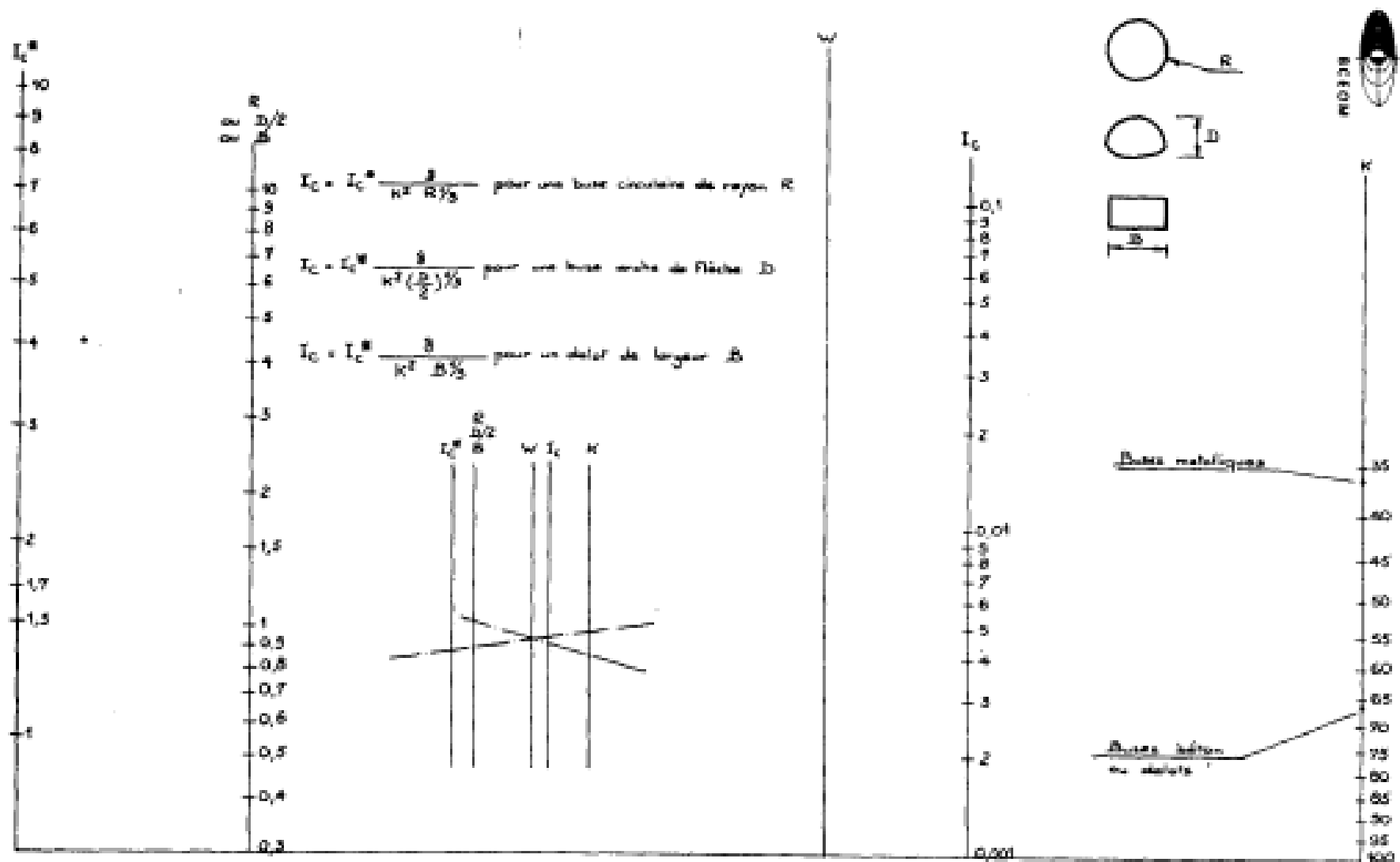


Figure IX-26 : Détermination de la pente critique. Calcul des pentes critique [BCEOM]

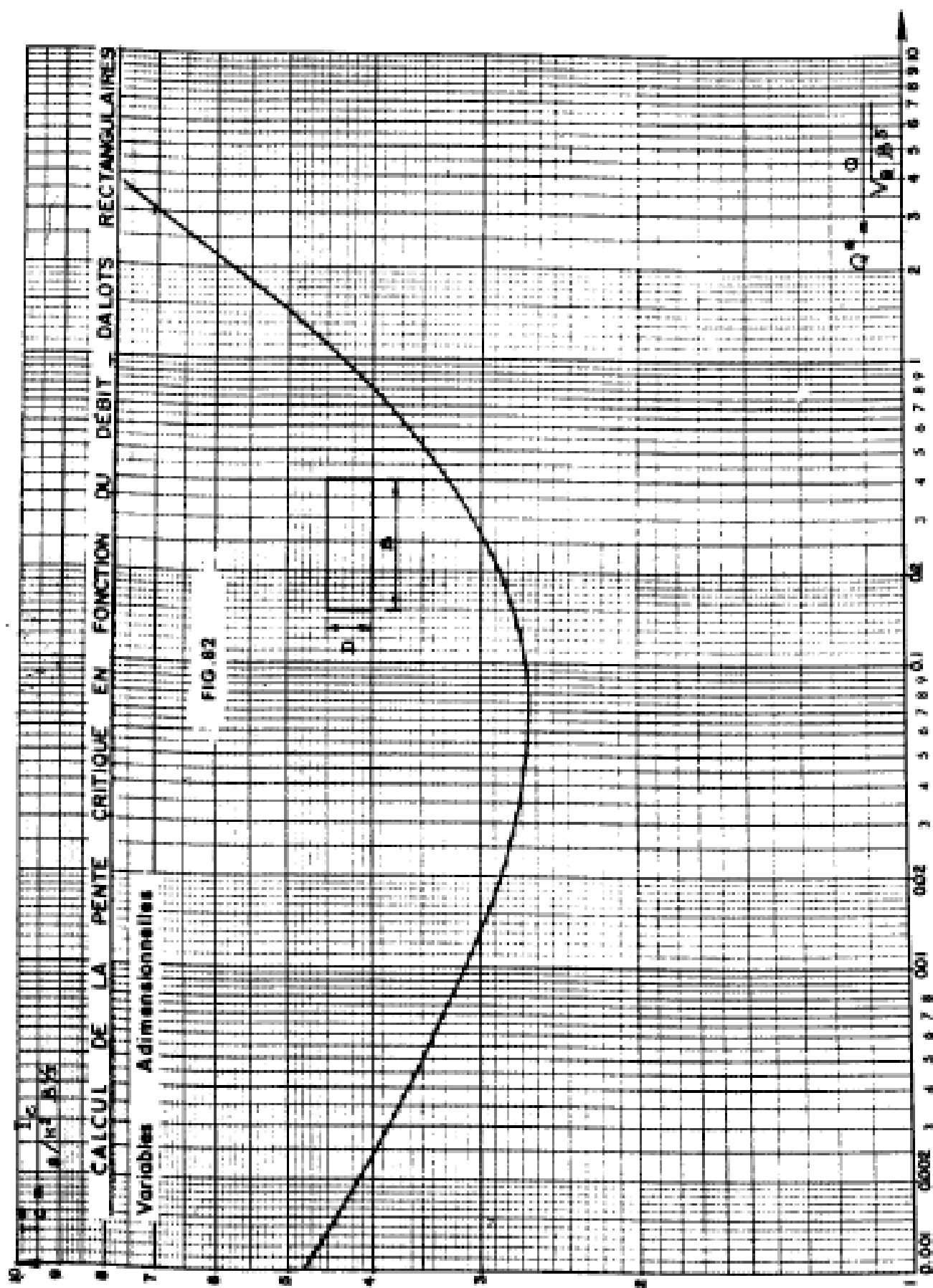


Figure IX-27 : Calcul de la pente critique en fonction du débit pour les Dalots rectangulaires [BCEOM]

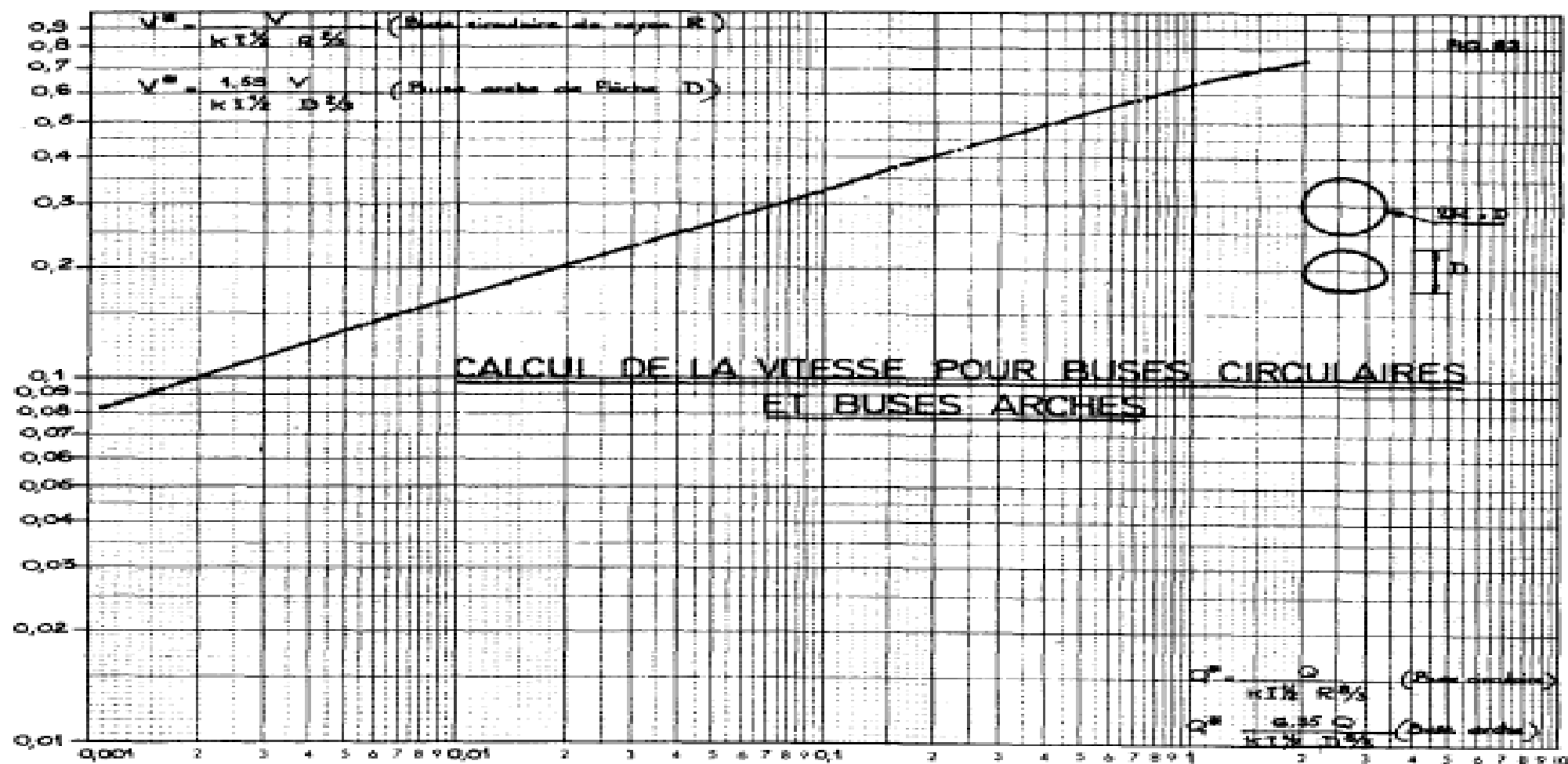


Figure IX-28: Calcul de la vitesse pour les buses circulaires et buses arches [BCEOM]

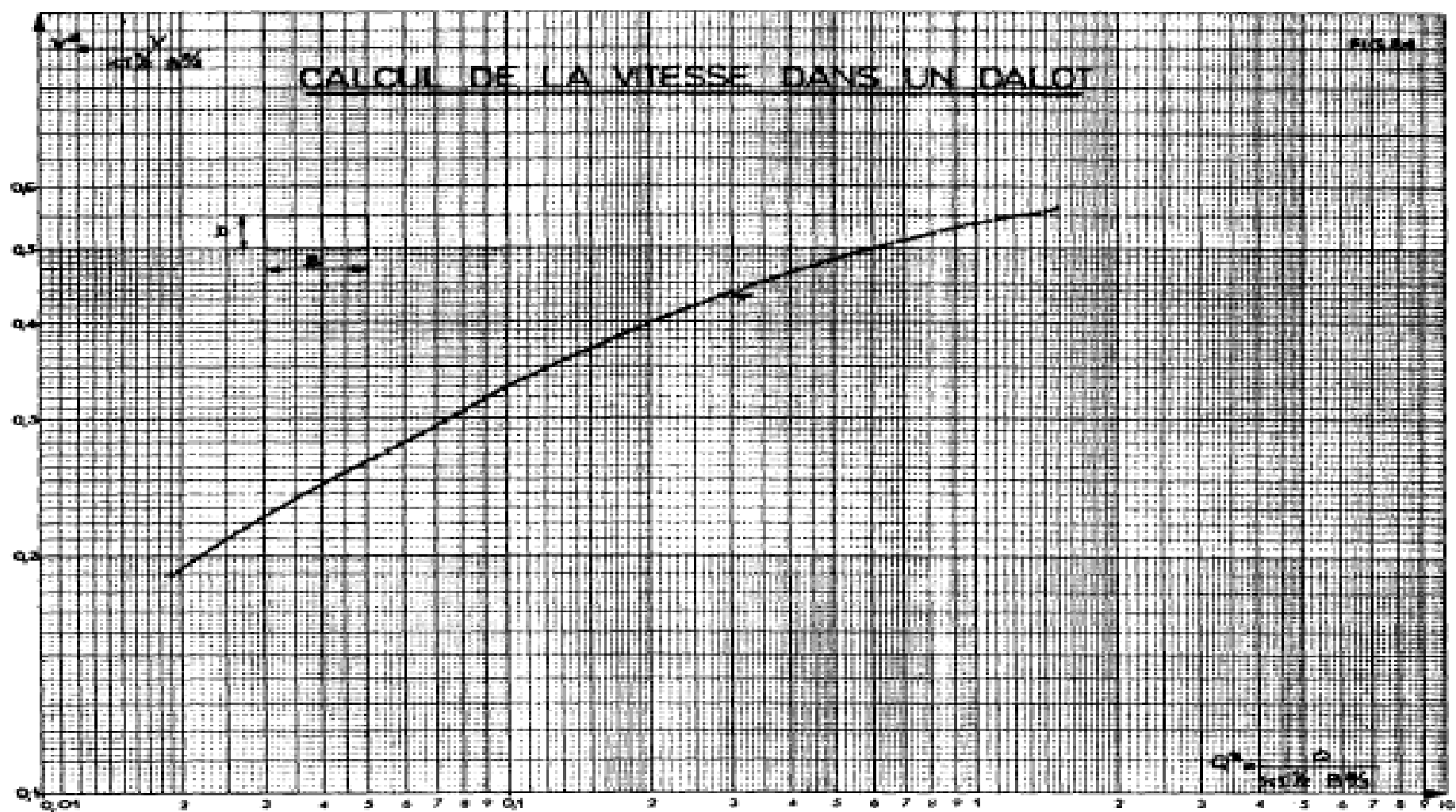


Figure IX-29: Calcul de la vitesse dans un dalot [BCEOM]