

Appréciation du danger particulier à l'aide de calculs simplifiés de l'onde de submersion



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

Workshop petits barrages
7.5.2003 **R.W. Müller**

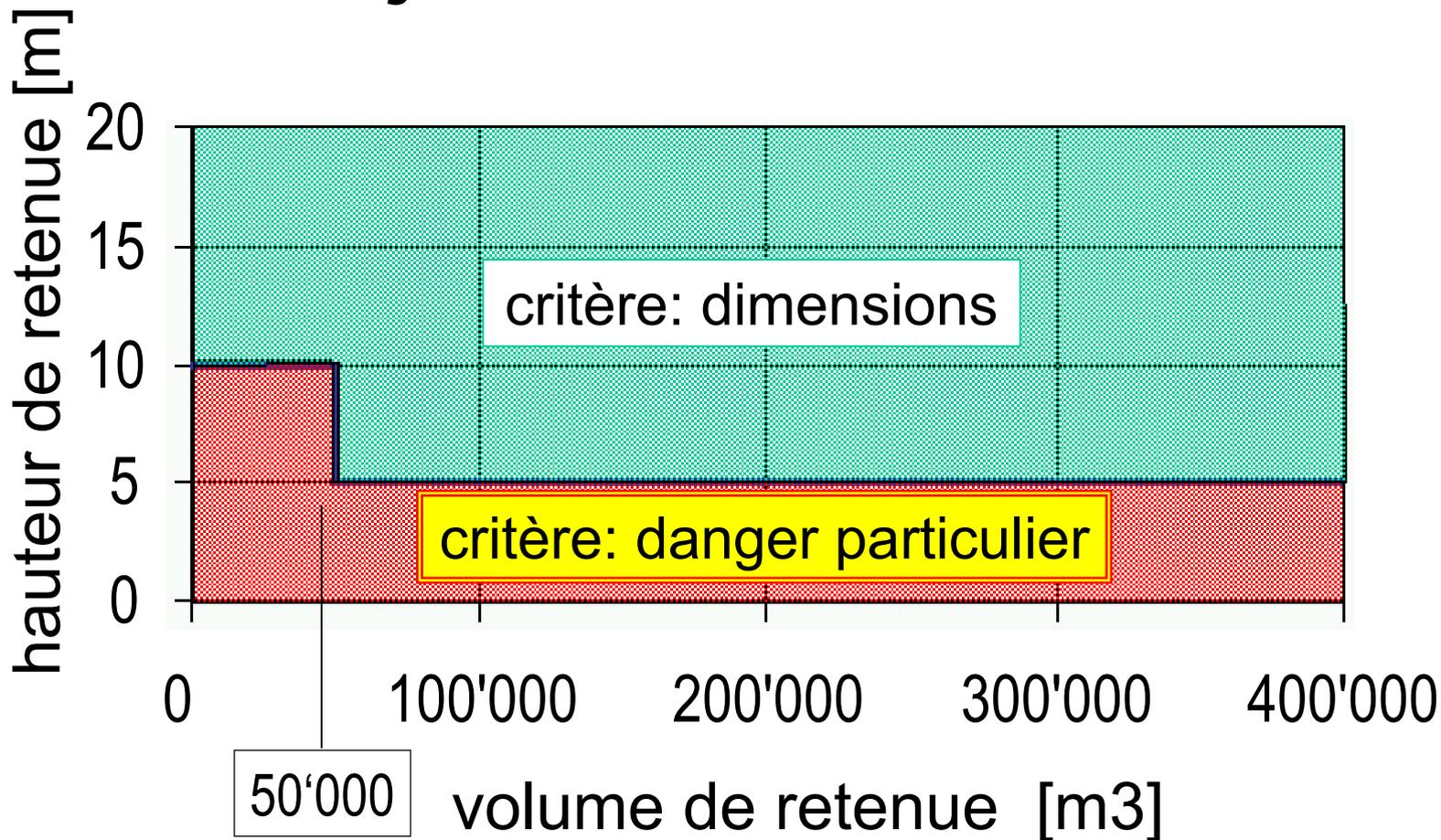
Table des matières

- Assujettissement à l'OSOA
- Détermination du „danger particulier“
- Critère d'assujettissement „danger particulier“
- Conditions initiales pour le calcul de l'onde de submersion
- Evacuateurs de crue susceptibles d'être obstrués
- Brèche 1
- Brèche 2
- Hypothèses admises pour la forme de la brèche
- Débit à l'instant de la rupture
- Ecoulement 1D ou 2D
- Méthodes de calcul simplifiées 1D
- Méthode de calcul simplifiée 2D
- Exemple d'un calcul 1D
- Zone d'écoulement
- Profil longitudinal
- Calcul de Q_{max}

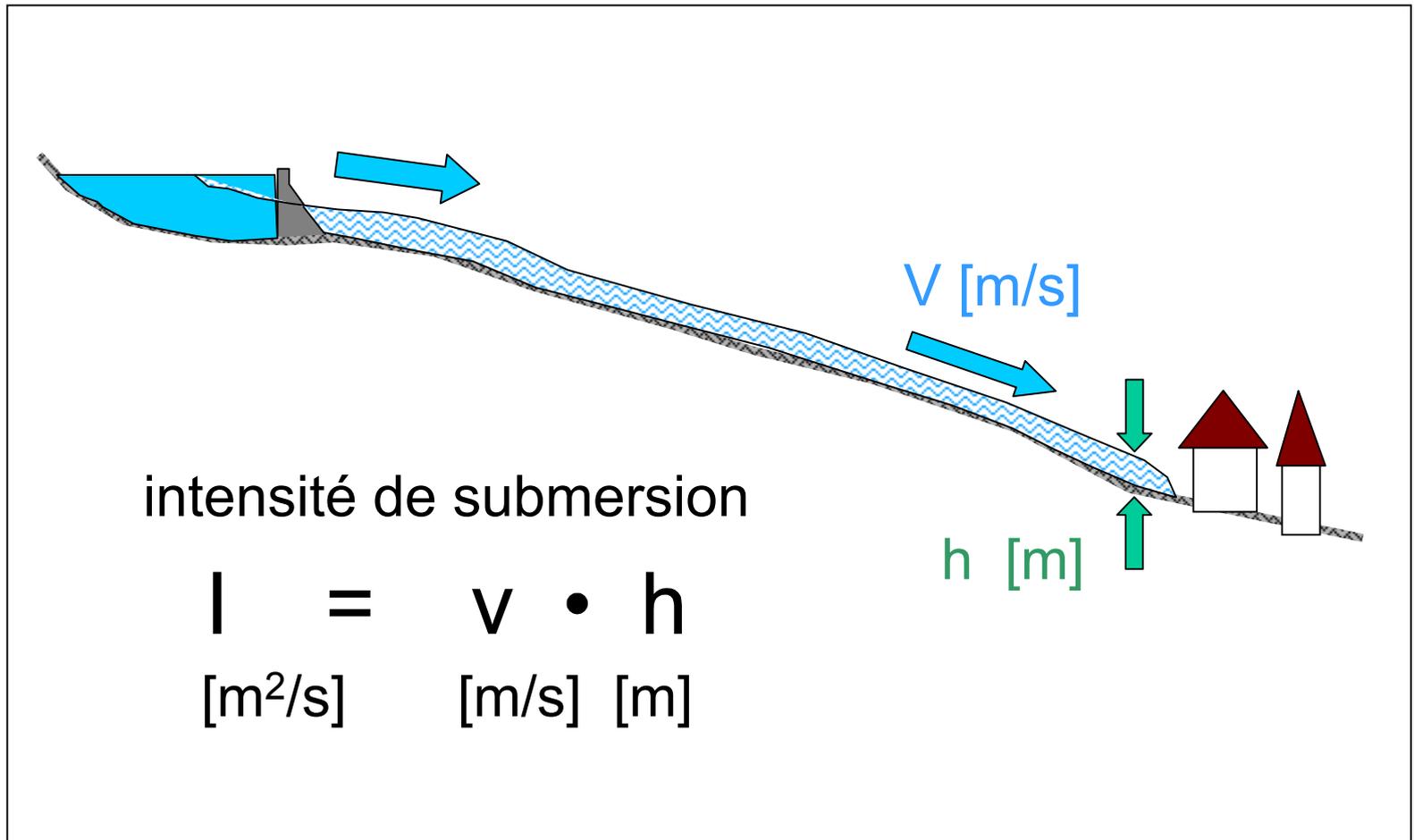
Table des matières (suite)

- Calcul de la hauteur d'eau max. h
- Variable intermédiaire D_{max}
- Variable intermédiaire U_{max}
- Calcul de la hauteur d'eau h
- Détermination de la vitesse v
- Onde de submersion 2D
- Calcul 2D avec une méthode paramétrique simplifiée
- Paramètres sans dimension
- Débit spécifique
- Vitesse de l'écoulement
- Propagation latérale
- Propagation latérale
- Intensité de l'écoulement
- Résultat

Assujettissement à l'OSOA



Détermination du „danger particulier“



Critère d'assujettissement „danger particulier“

hauteur d'eau

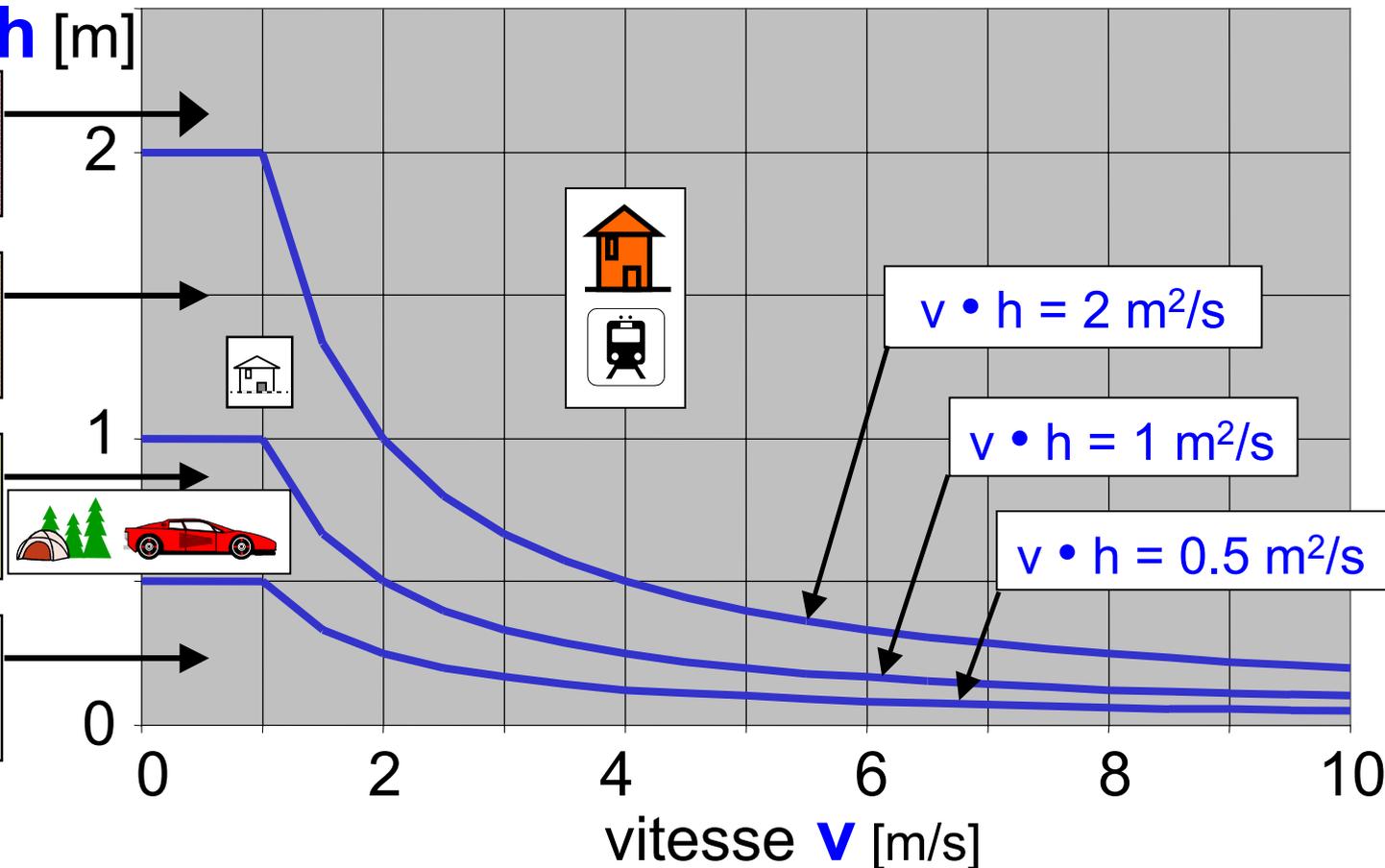
h [m]

danger élevé

danger moyen

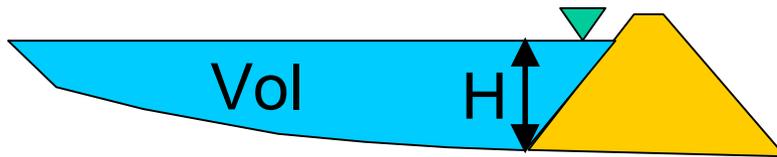
danger modéré

danger faible



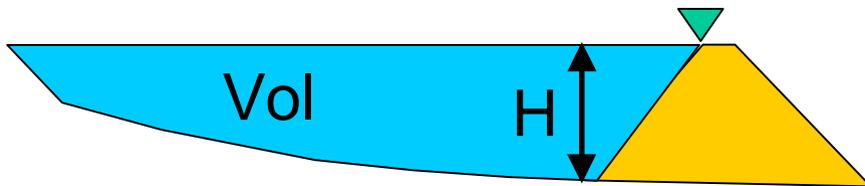
Conditions initiales pour le calcul de l'onde de submersion

Rupture soudaine à retenue pleine



A) hypothèse généralement admise:

niveau normal de retenue



B) évacuateur de crue inexistant ou susceptible d'être obstrué:

niveau du couronnement

Evacuateurs de crue susceptibles d'être obstrués



Brèche

lors de la rupture du bassin de protection
contre les crues de Glashütte (D)
23.8.2002



hauteur de la
digue:

9 m

volume de la
retenue:

60'000 m³

Brèche

lors de la rupture de la digue de Zeyzoun en Syrie, 5.6.2002

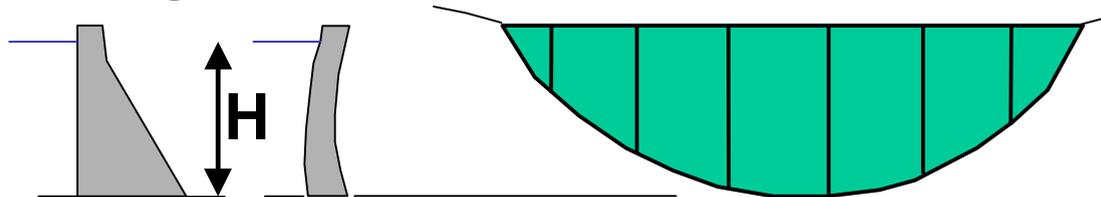
digue



brèche

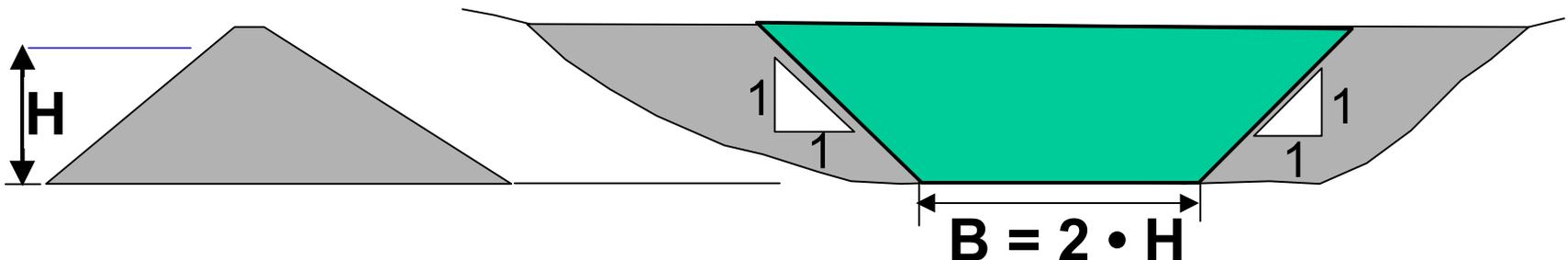
Hypothèses admises pour la forme de la brèche

barrages en béton:



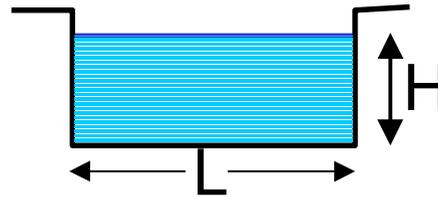
rupture soudaine et
totale du barrage

Barrages en remblai
de faible hauteur:



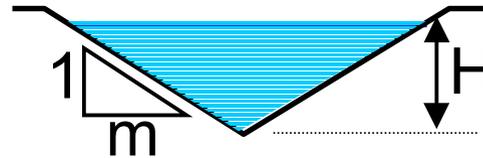
Débit à l'instant de la rupture

- rectangulaire



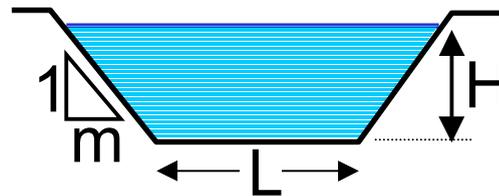
$$Q_b = 0.93 \cdot L \cdot H^{3/2}$$

- triangulaire



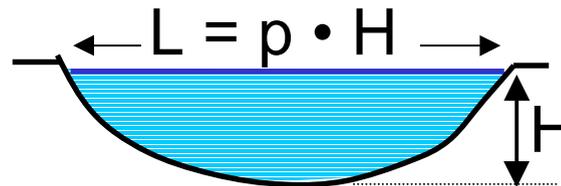
$$Q_b = 0.72 \cdot m \cdot H^{5/2}$$

- trapézoïdale



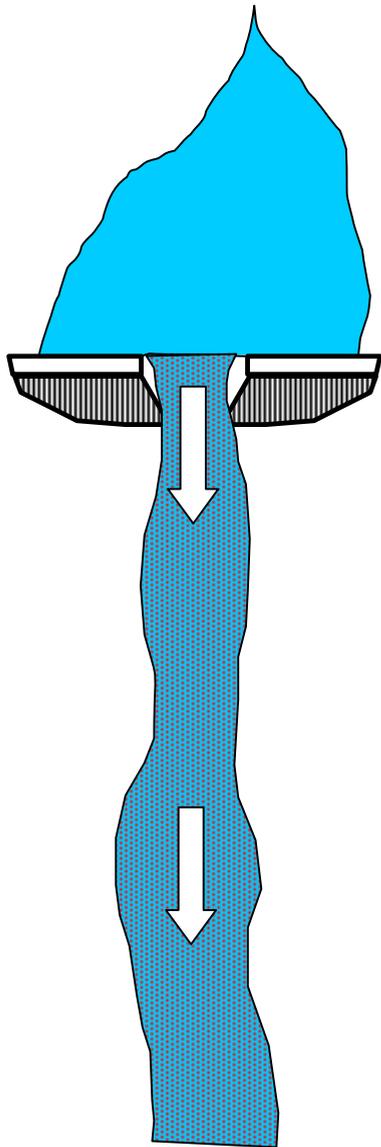
$$Q_b = 0.93 \cdot L \cdot H^{3/2} + 0.72 \cdot m \cdot H^{5/2}$$

- parabolique

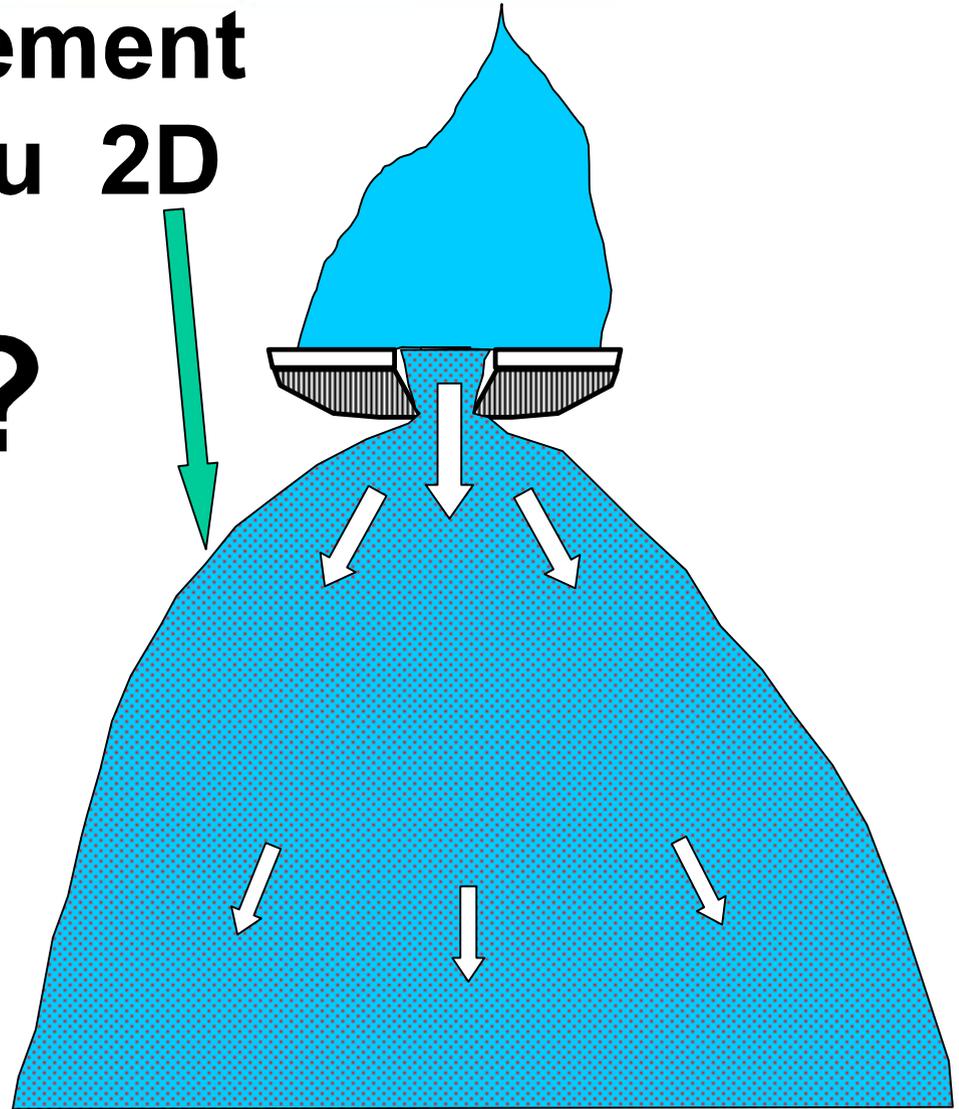


$$Q_b = 0.54 \cdot L \cdot H^{3/2}$$

Écoulement 1D ou 2D



?



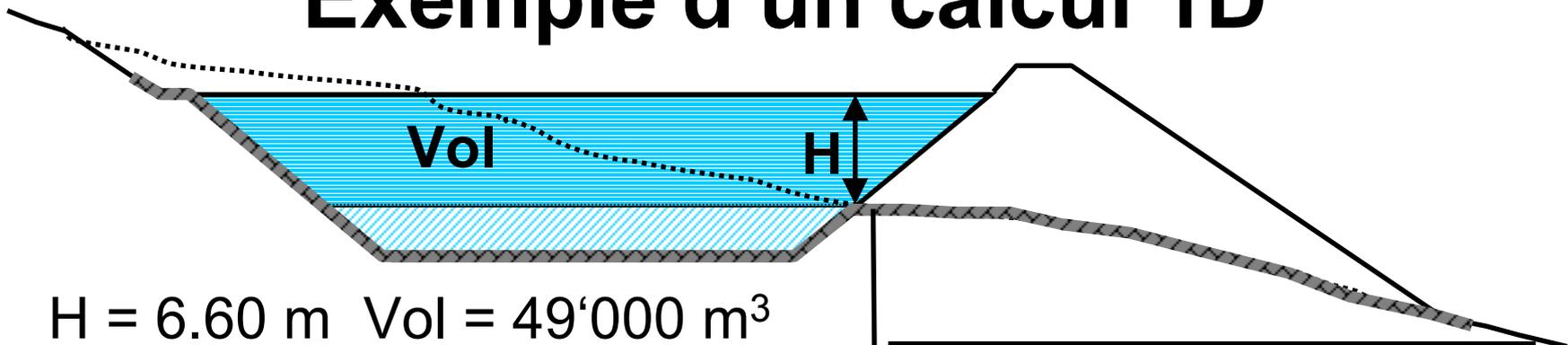
Méthodes de calcul simplifiées 1D

- **CTGREF** **calcul à la main**
1978
- **CASTOR** **CTGREF, version pour PC**
1997
- **SMPDBK** **Simplified Dam-Break**
1991 **Flood Forecasting Model**

Méthode de calcul simplifiée 2D

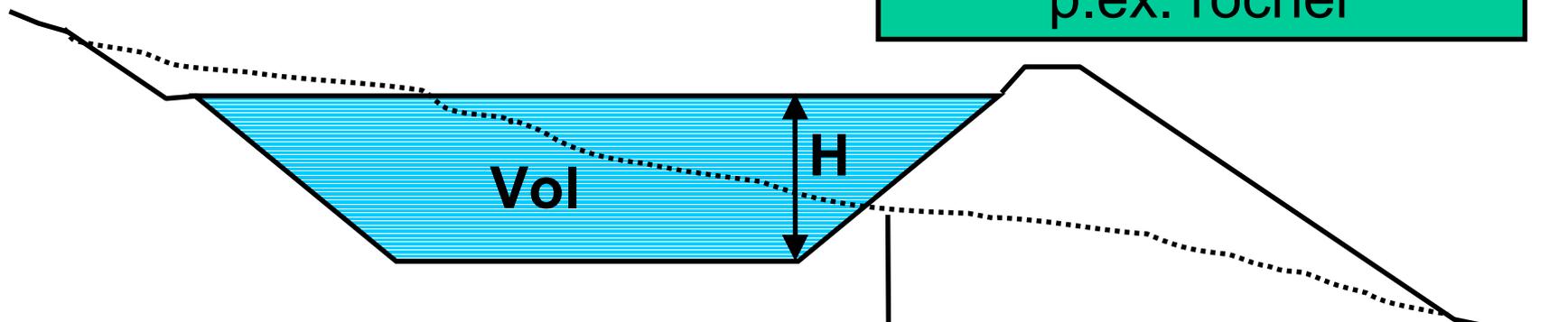
- **BEFFA
2001** **Méthode paramétrique
pour l'évaluation
des ondes de submersion
sur surface plane**

Exemple d'un calcul 1D



$H = 6.60 \text{ m}$ $\text{Vol} = 49'000 \text{ m}^3$

sans risque d'érosion
p.ex. rocher

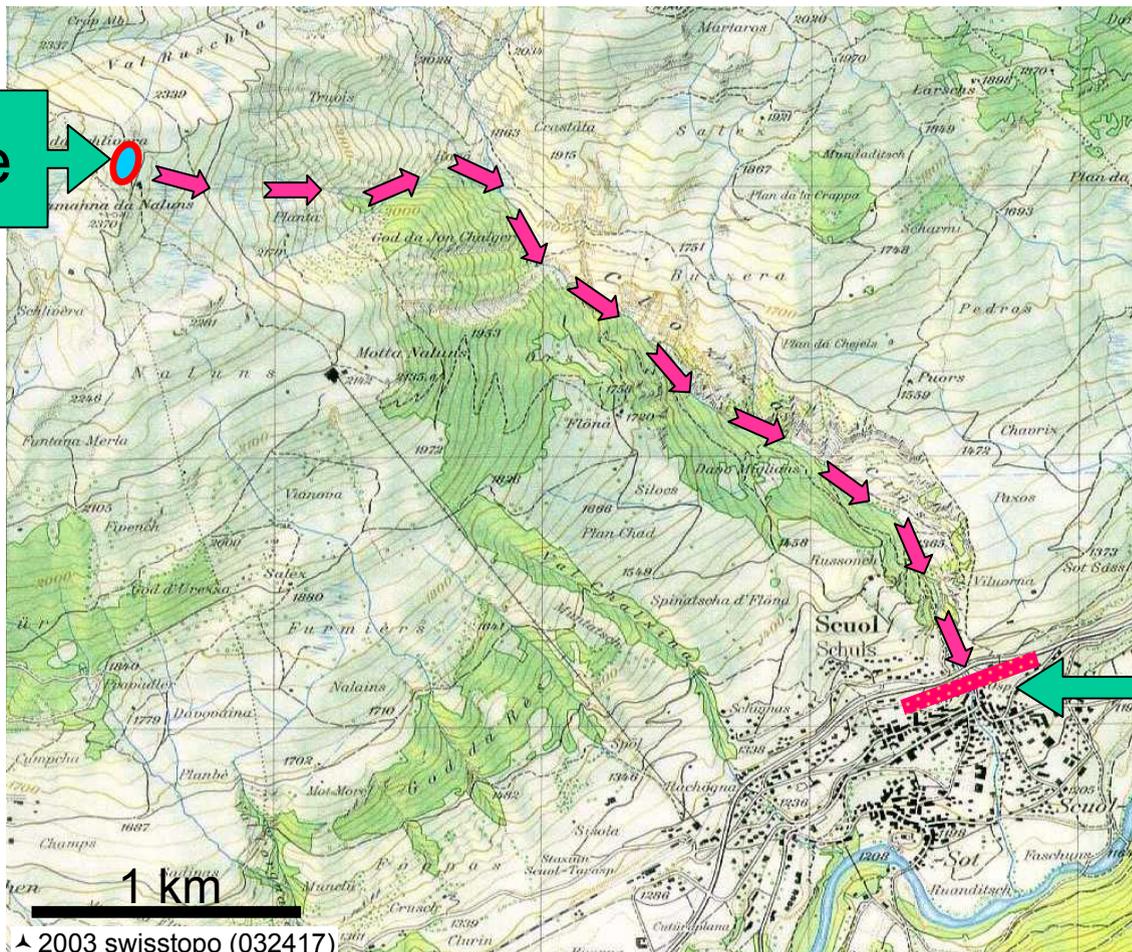


$H = 10 \text{ m}$ $\text{Vol} = 60'000 \text{ m}^3$

avec risque d'érosion
p.ex. moraine

Zone d'écoulement

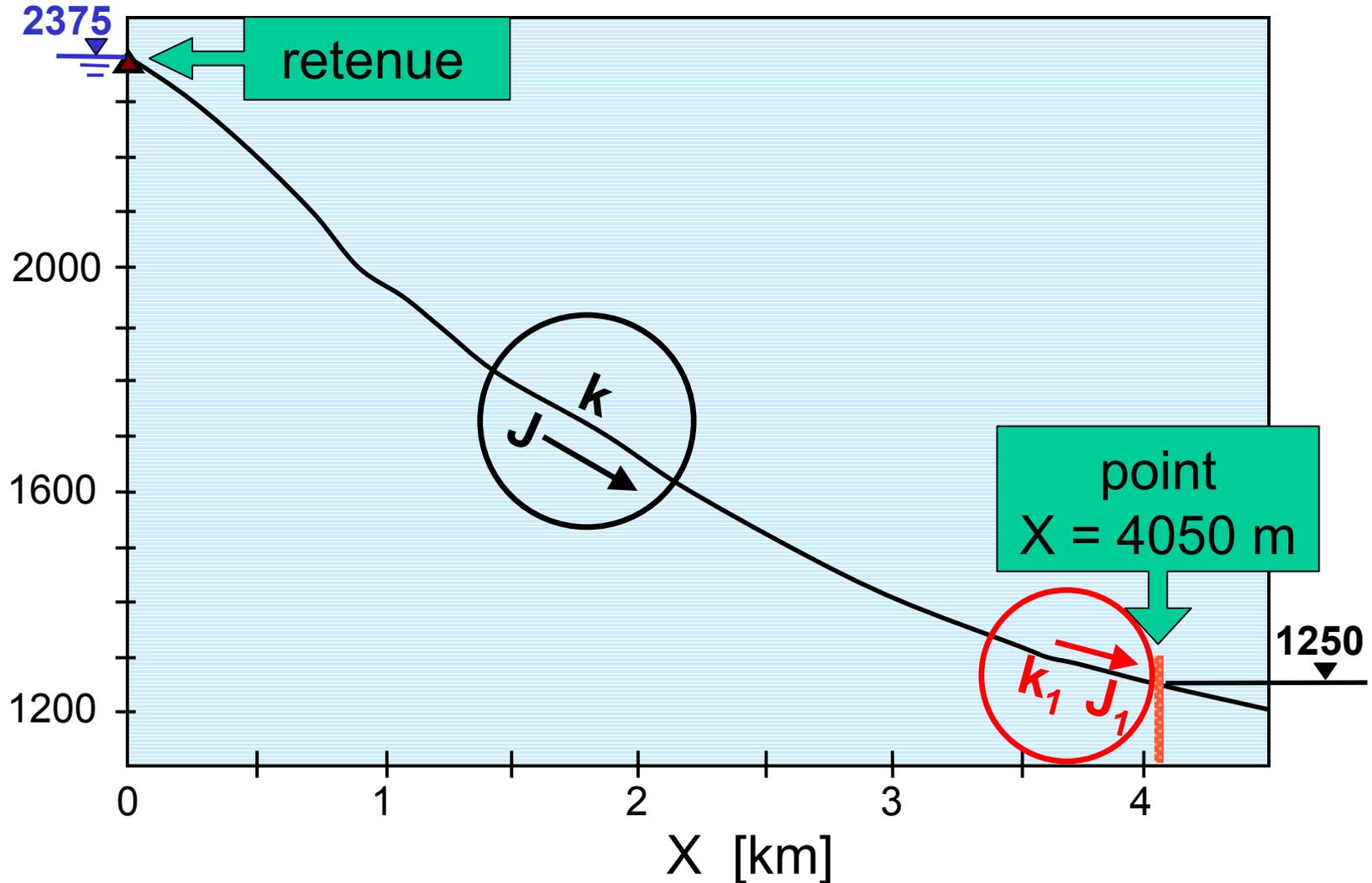
retenue



recherché:
intensité
au point
X
= 4050 m

Profil longitudinal

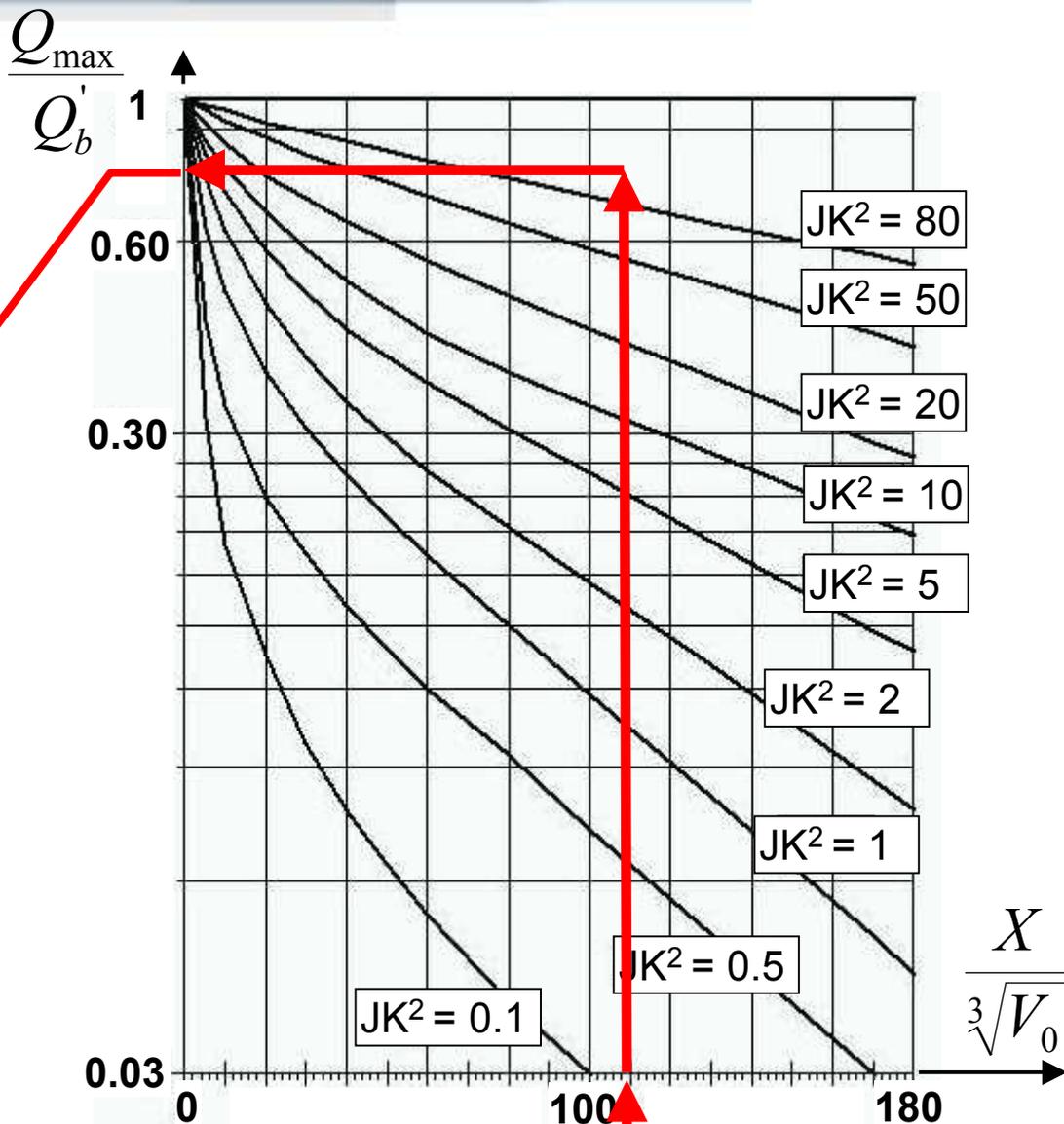
Z [m s.m.]



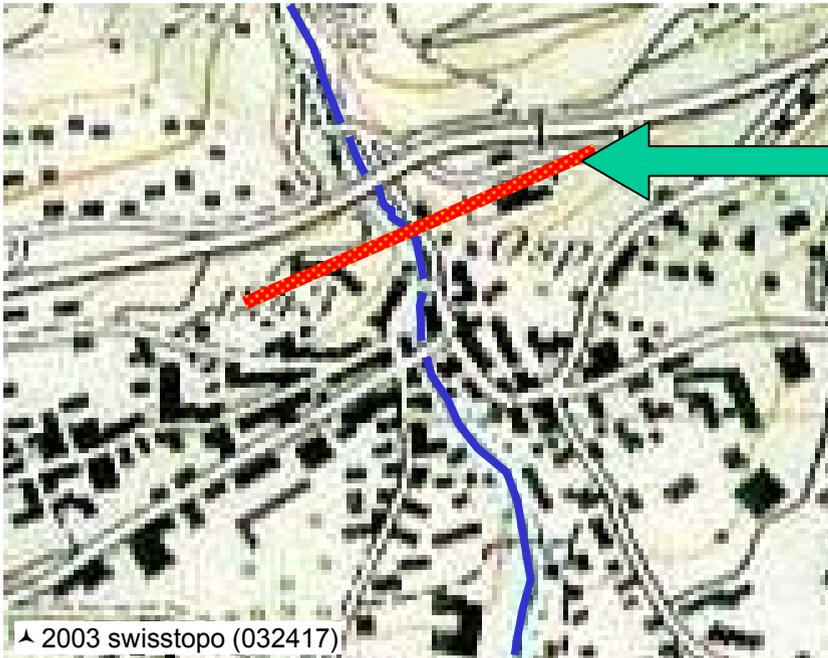
Calcul de Q_{max}

$$\frac{Q_{max}}{Q'_b} = 0.76$$

$$\frac{X}{\sqrt[3]{V_0}} = 110$$



Calcul de la hauteur d'eau max. h



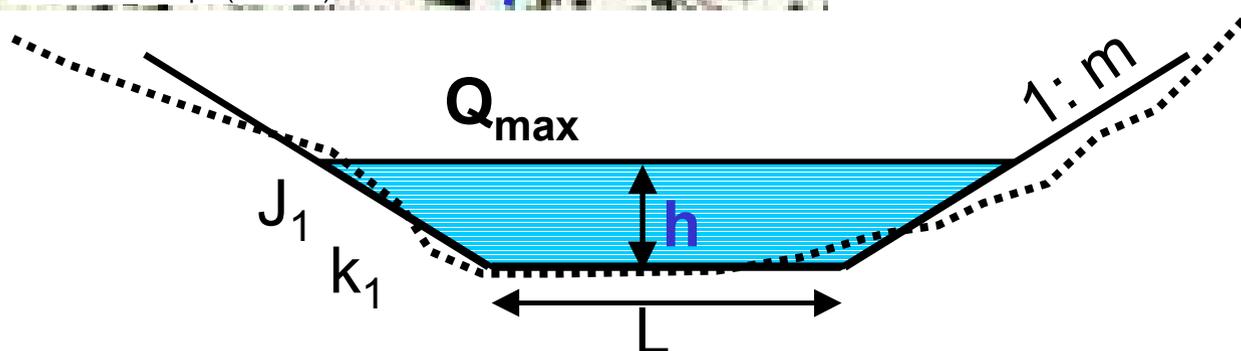
section transversale
au point
 $X = 4050 \text{ m}$

données:

débit Q_{\max}

paramètres J_1, k_1, L, m

recherché: hauteur d'eau h



Variable intermédiaire D_{\max}

- rectangulaire $D_{\max} = \frac{Q}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot L^{8/3}}$

- triangulaire $D_{\max} = \frac{Q \cdot (1 + m^2)^{1/3}}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot m^{5/3}}$

- trapézoïdal $D_{\max} = \frac{Q \cdot m^{5/3}}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot L^{8/3}}$

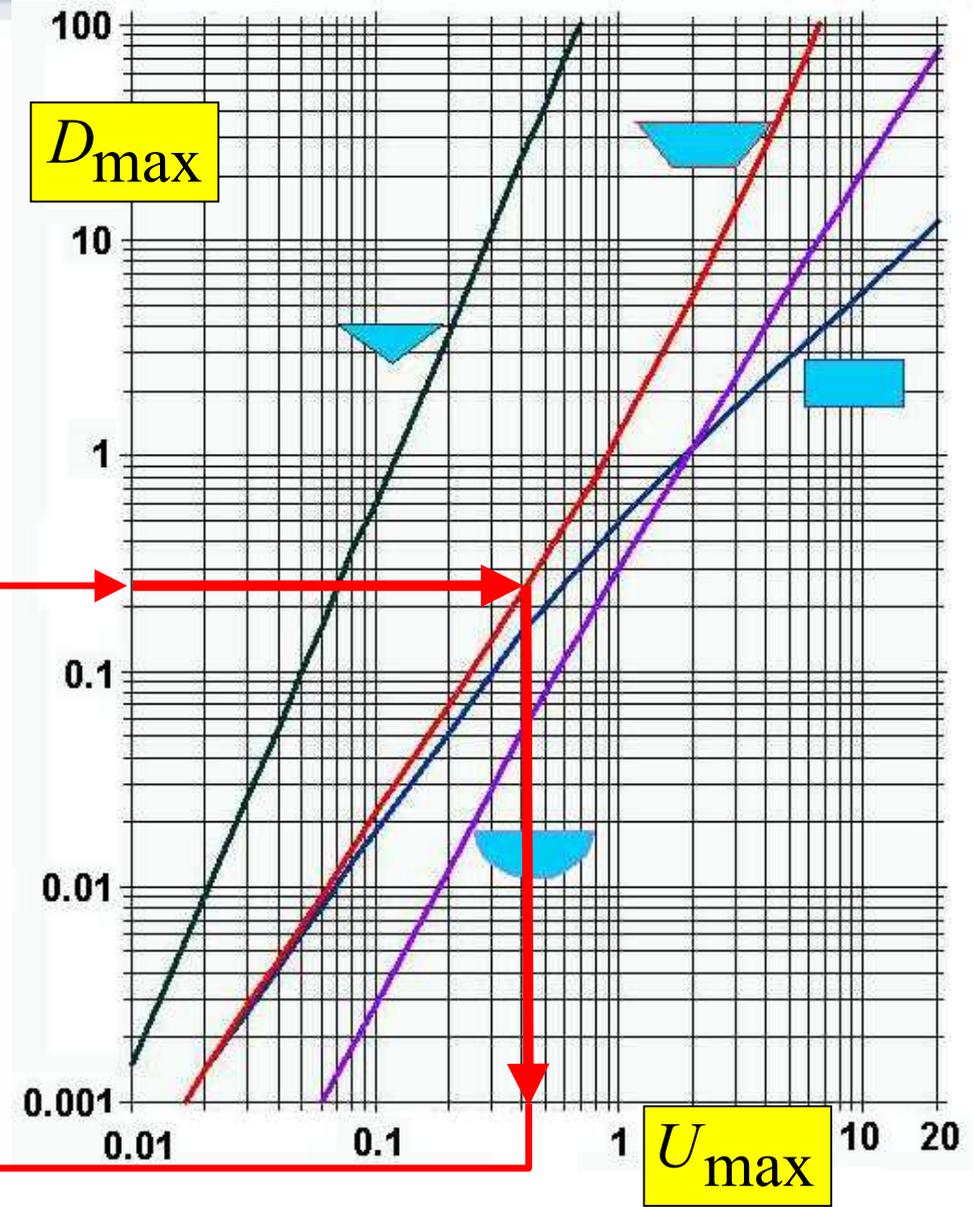
- parabolique $D_{\max} = \frac{Q}{K_1 \cdot J_1^{1/2} \cdot p^{16/3}}$

Variable intermédiaire

U_{max}

$D_{max} = 0.232$

$U_{max} = 0.44$



Calcul de la hauteur d'eau h

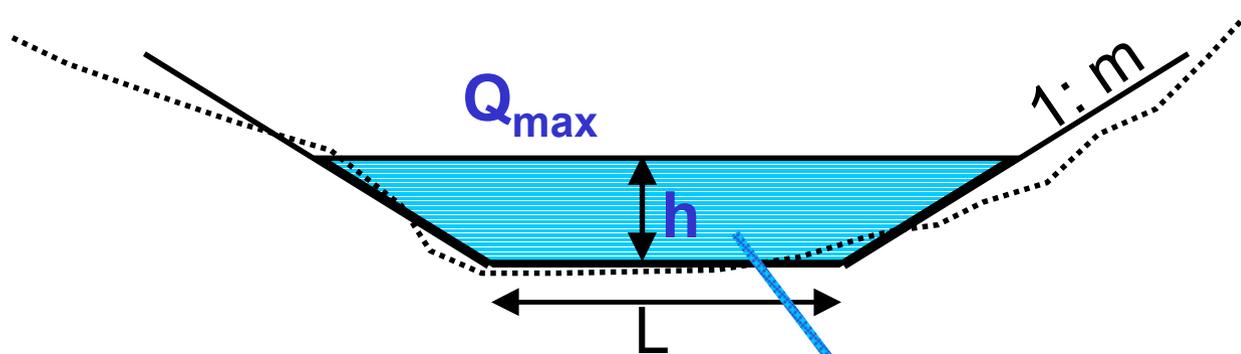
- rectangulaire $h = L \bullet U_{\max}$

- triangulaire $h = 10 \bullet U_{\max}$

- trapézoïdal $h = \frac{L}{m} \bullet U_{\max}$

- parabolique $h = p^2 \bullet U_{\max}$

Détermination de la vitesse v



surface de la section mouillée:

$$F = L \cdot h + m \cdot h^2$$

vitesse de l'écoulement:

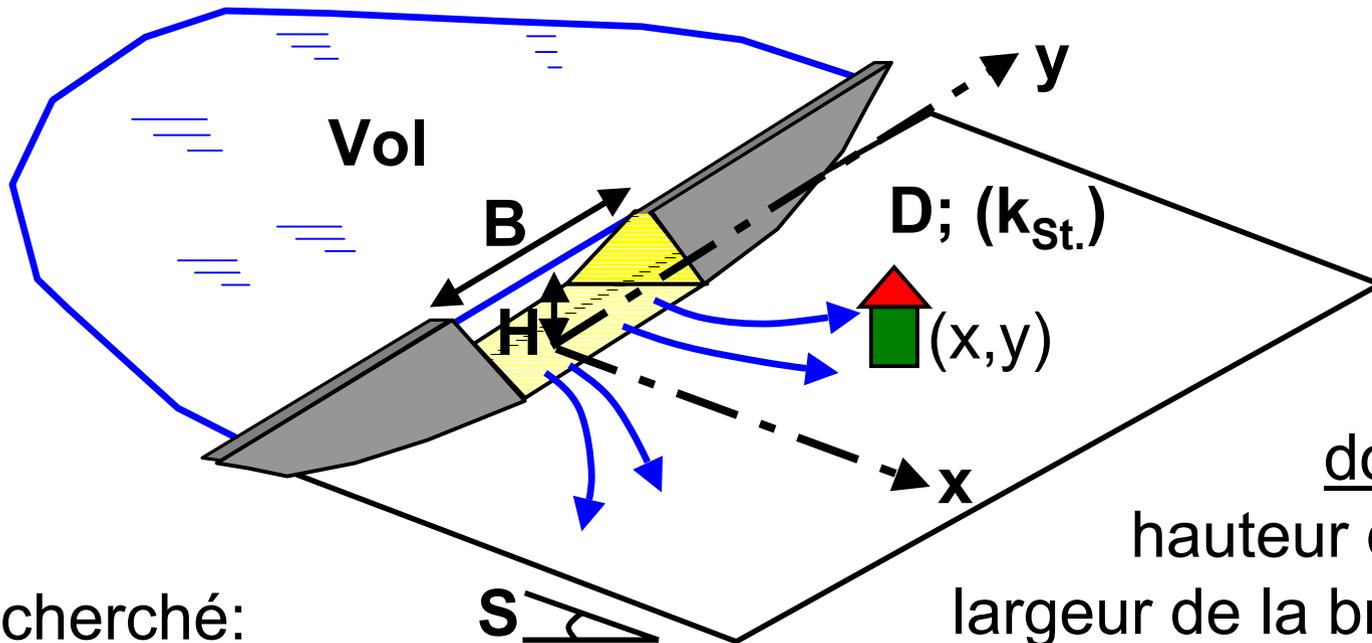
$$v = \frac{Q_{\max}}{F}$$

Onde de submersion 2D



- surface d'écoulement plane
- p.ex. digues latérales d'un barrage en rivière
- modélisation 2D nécessaire

Calcul 2D avec une méthode paramétrique simplifiée



recherché:

hauteur d'eau h et
vitesse de l'écoulement v
au point (x, y)

données:

hauteur d'eau H
largeur de la brèche B
volume de la retenue Vol
pente du terrain S
rugosité D resp. k_{st}

Paramètres sans dimension

- longueur horizontale:

$$L_0 = \sqrt{B \cdot H}$$

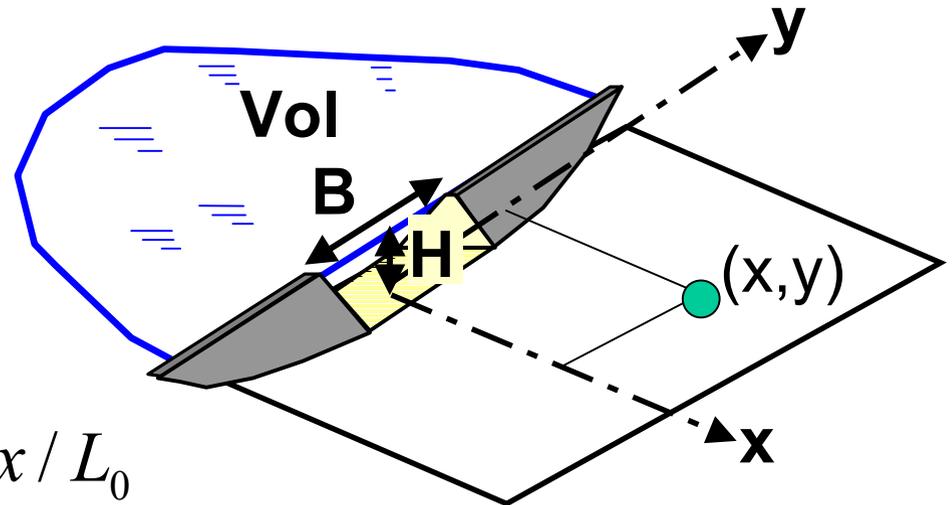
- distance du barrage:

$$X_0 = x / L_0$$

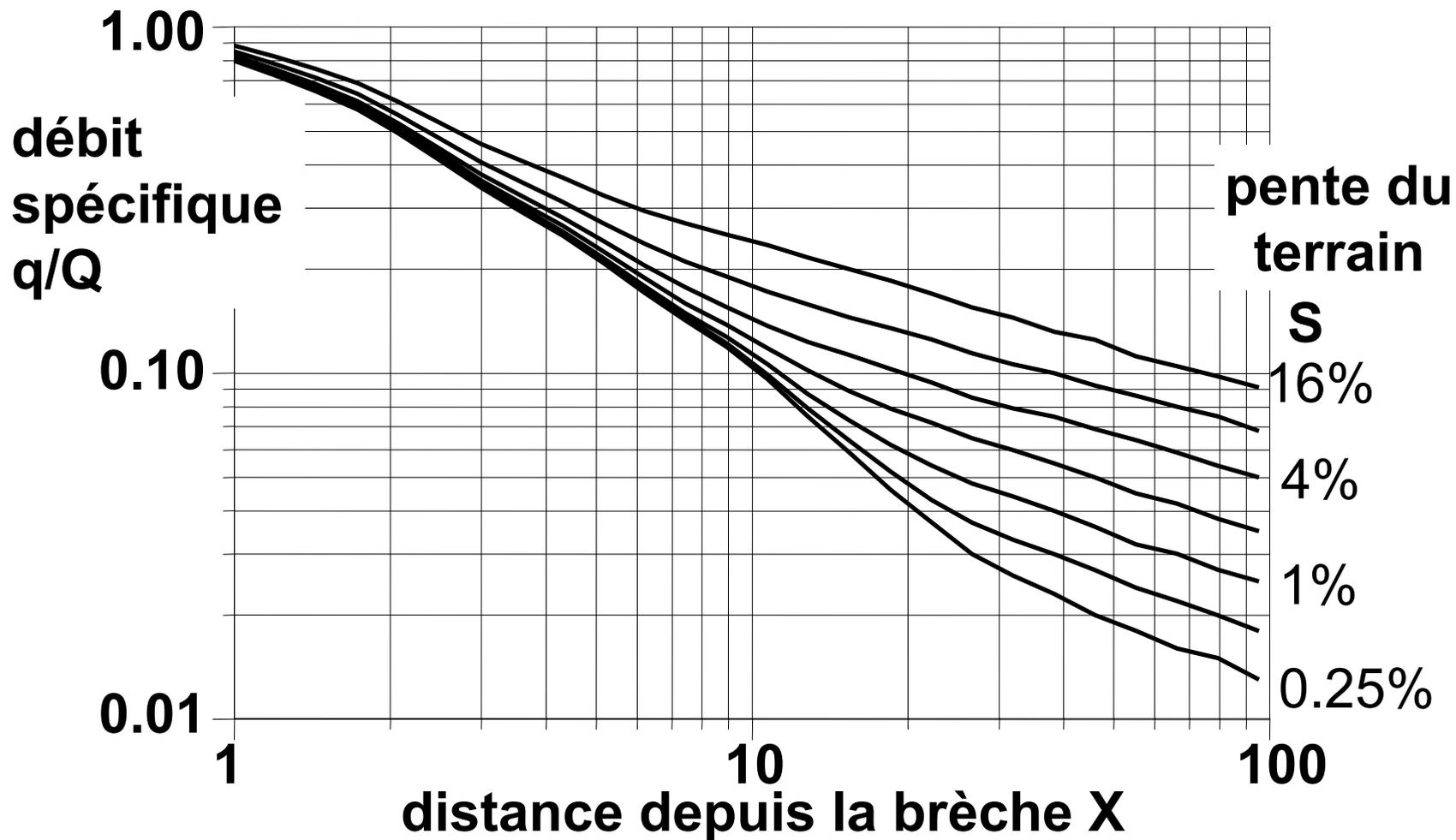
- distance de l'axe x: $Y_0 = y / L_0$

- coefficient de la retenue:

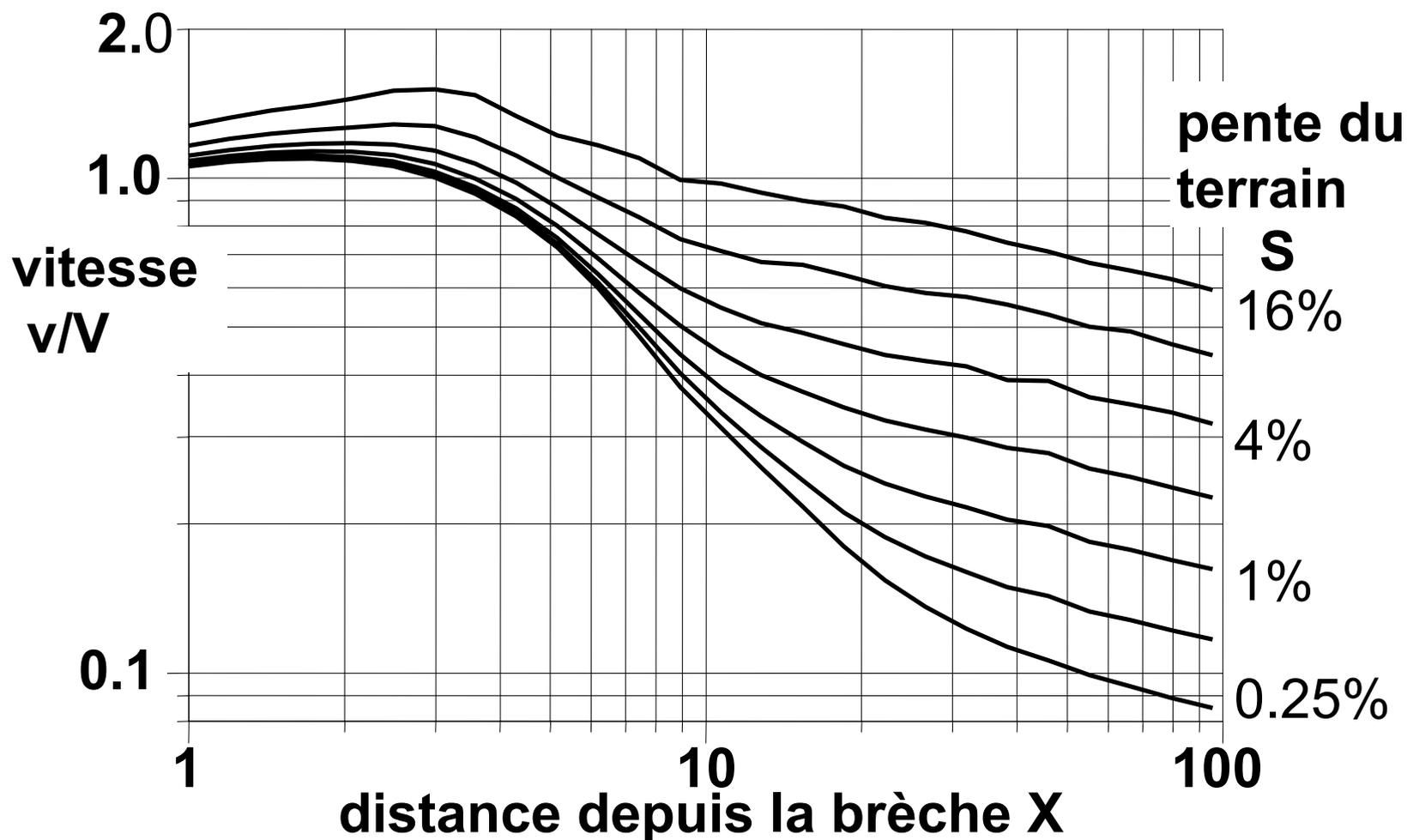
$$Vol_0 = \frac{Vol}{B \cdot H^2}$$



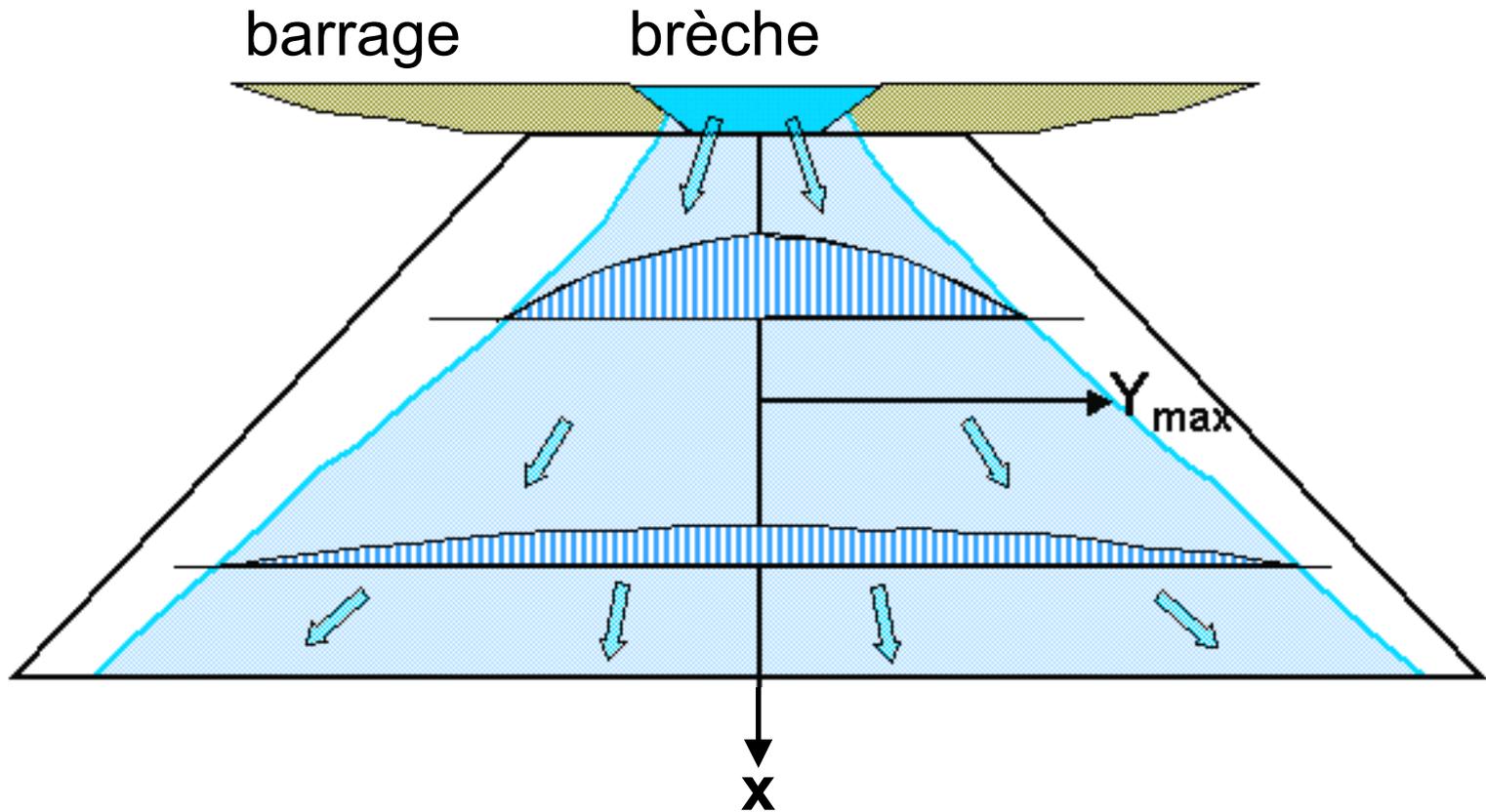
Débit spécifique



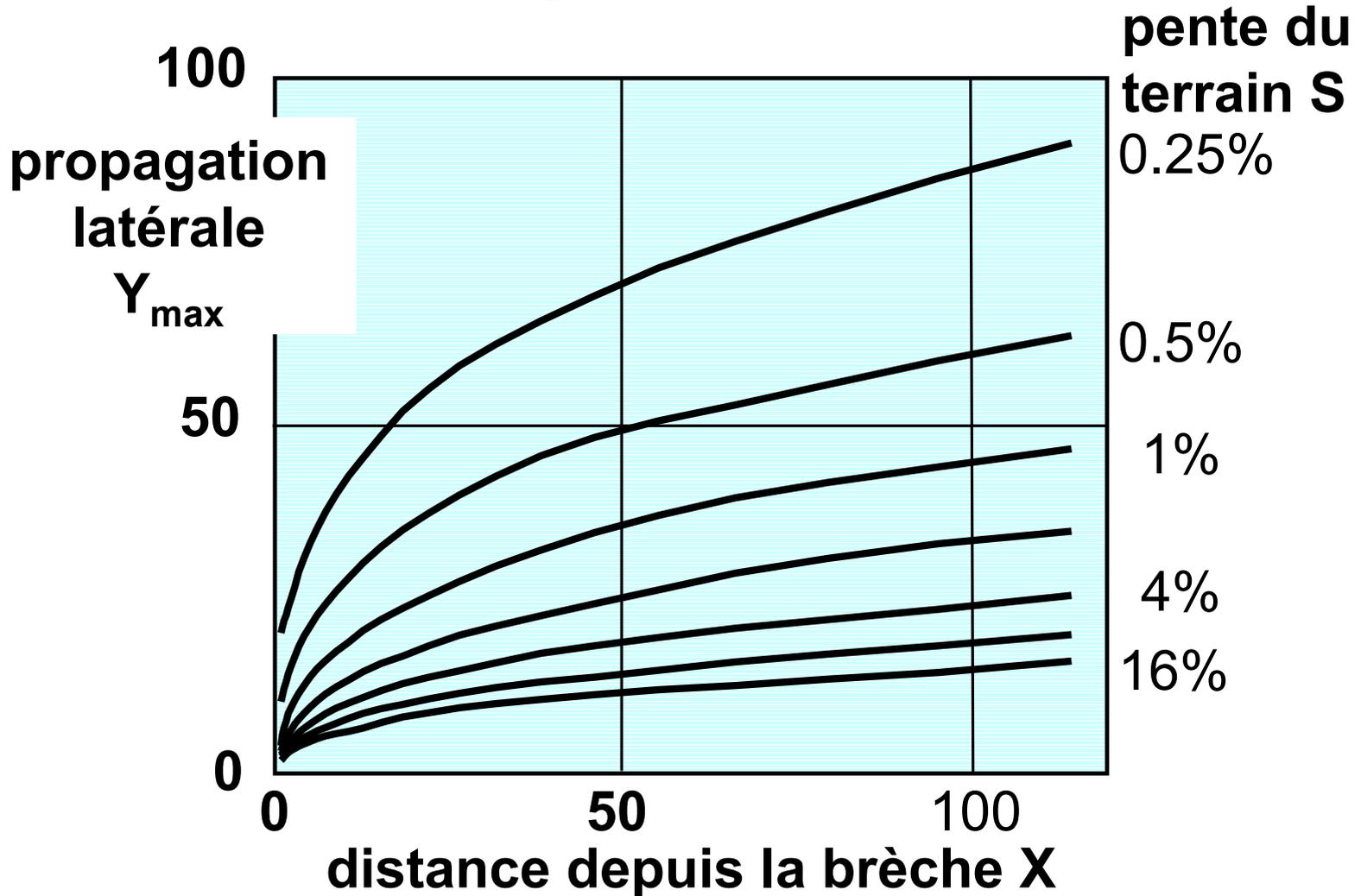
Vitesse de l'écoulement



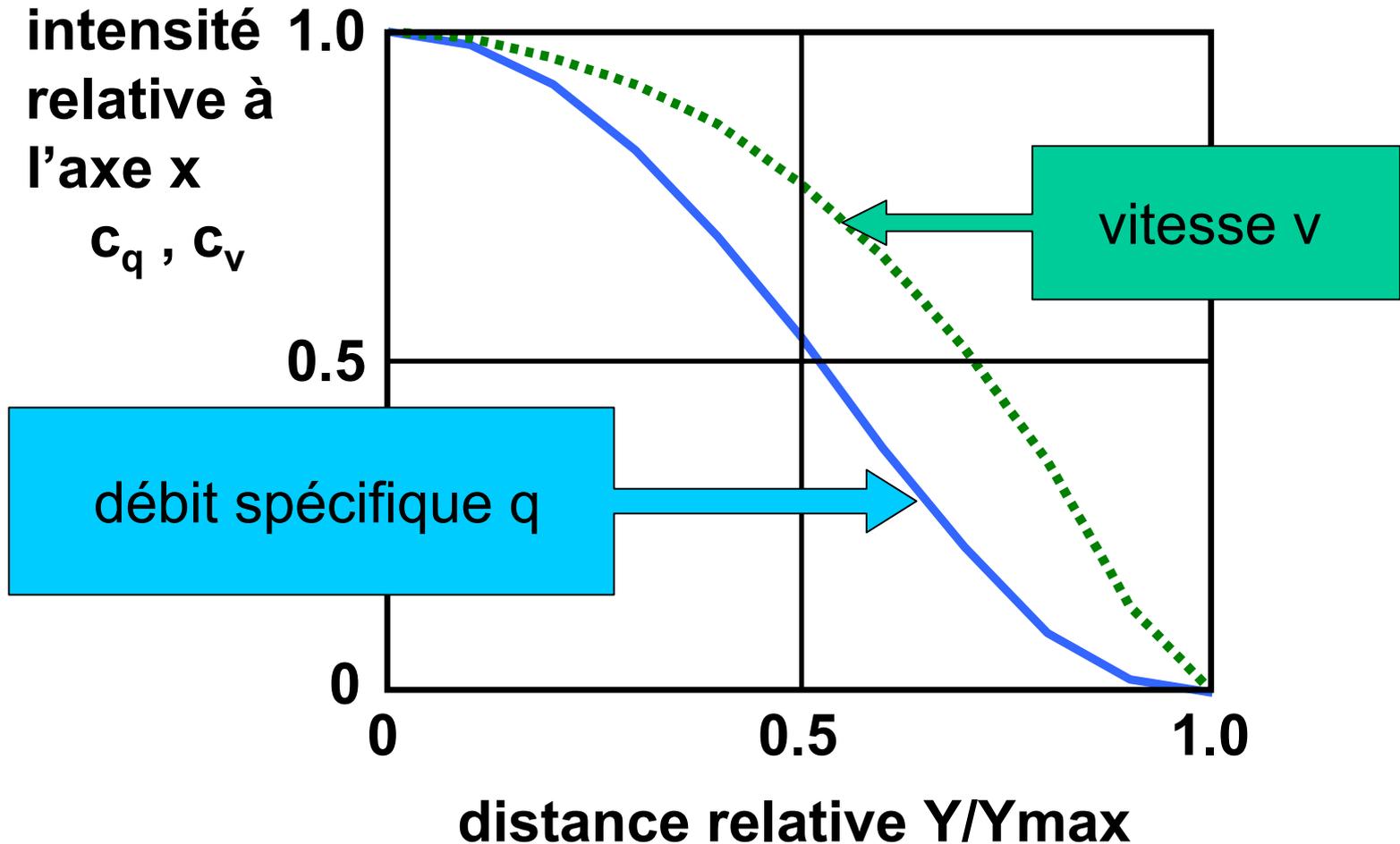
Propagation latérale



Propagation latérale



Intensité de l'écoulement



Résultat



- intensité
 $I = v \cdot h$ [m²/s]
- critère du „danger particulier“ atteint?
- si oui, l'ouvrage d'accumulation est assujetti

Commentaires (1)

Figure 1

Pour apprécier si un ouvrage d'accumulation représente un danger particulier, il faut connaître quelles sont les conséquences de l'inondation à l'aval en cas de rupture de l'ouvrage de retenue. L'objectif de cet exposé est de présenter comment cette question peut être résolue de manière simple et rapide.

Figures 2 et 3

Tables des matières

Figure 4

Un ouvrage d'accumulation est assujéti à l'ordonnance si certaines dimensions géométriques sont atteintes ou dépassées. C'est-à-dire, si la hauteur d'eau est plus de 10 m ou si cette hauteur est de 5 m au moins et en même temps la capacité de la retenue est supérieure à 50'000 m³. L'ordonnance s'applique aussi aux ouvrages de moindres dimensions lorsque le critère du danger particulier est rempli.

Figure 5

Un danger particulier existe si, en cas de rupture soudaine d'un ouvrage de retenue, l'intensité de submersion atteint certaines valeurs-seuil pour lesquelles des personnes ou des biens peuvent être mis en danger. L'intensité de submersion est définie comme le produit de la vitesse d'écoulement v par la hauteur d'eau h , déterminées par un calcul de l'onde de submersion.

Figure 6

Les valeurs-seuils de l'intensité de submersion sont différentes selon les objets touchés. Dans ce graphique, les valeurs-seuils sont indiquées en fonction de la hauteur d'eau h et de la vitesse d'écoulement v . Rappelons qu'un danger particulier existe, si cette valeur est supérieure à 2 m²/s pour une habitation, un lieu de travail ou une ligne de chemin de fer. Pour une route fréquentée ou une place de camping une intensité au-dessus de 0.5 m²/s compte déjà comme danger particulier.

Commentaires (2)

Figure 7

L'estimation de l'onde de submersion s'effectue sous la condition initiale d'une rupture soudaine à retenue pleine. L'hypothèse généralement admise pour le niveau initial correspond au niveau normal de retenue. Pour certains ouvrages sans évacuateur de crue ou pour lesquels l'obstruction de l'évacuateur de crue par des corps flottants est possible, le niveau du plan d'eau de départ sera admis identique à celui du couronnement.

Figure 8

Voici quelques exemples où une obstruction des orifices ou grillages par de l'herbe, des feuilles, des branches ou d'autres objets est très probable. Une telle situation provoque un remplissage complet de la retenue et par conséquent un débordement par dessus le couronnement et la formation d'une brèche avec rupture du barrage.

Figure 9

Lors de la rupture d'un barrage, une brèche de forme et dimensions différentes se développe. L'exemple ici montre la brèche d'un bassin de protection contre les crues qui s'est rompu lors des crues extrêmes de l'année 2002 en Saxe. La digue avait une hauteur de 9 m et le volume de la retenue était de 60'000 m³. La brèche de forme trapézoïdale était limitée à droite par le rocher de fondation et à gauche par l'ouvrage de vidange principal, complètement obstruée par des corps flottants. (Photo: <http://www.heimatverein-cunnersdorf.de>)

Figure 10

Une brèche plus grande s'est formé lors de la rupture de la digue d'une retenue pour irrigation en Syrie aussi en 2002. La brèche avait également une forme trapézoïdale et sa largeur était de 3 fois sa hauteur.

Figure 11

Dans nos calculs des ondes de submersion, on admet différentes formes et dimensions pour la brèche selon le type de barrage. Pour les barrages en béton, on admet une rupture soudaine et totale du barrage entier. Pour les petites digues, qui représentent certainement la majorité des cas à étudier par rapport au danger particulier, on admet une brèche normalisée. Elle sera de forme trapézoïdale, de base égale à 2 fois la hauteur hydrostatique et avec des pentes latérales de 45 degrés.

Commentaires (3)

Figure 12

Le débit maximal à l'instant de la rupture peut être calculé avec de simples formules fonction de la géométrie de la brèche. Des brèches de forme rectangulaire sont typiques pour des barrage-poids ou des barrages en rivière, la forme triangulaire pour des barrages-voûte, tandis que les formes trapézoïdales et paraboliques sont attribuées à tous les barrages, mais surtout aux barrages en remblai. Dans les formules, on peut observer qu'avec un élargissement de la brèche le débit augmente linéairement tandis qu'une augmentation de la hauteur a pour conséquence une augmentation exponentielle du débit.

Figure 13

Pour déterminer le débit d'écoulement à une certaine distance à l'aval du barrage, il faut distinguer si l'écoulement est unidimensionnel ou bidimensionnel. Dans la majorité des cas, la topographie présente une vallée avec une zone d'écoulement qui peut être clairement définie par des sections transversales. C'est la situation pour un calcul unidimensionnel. Si l'écoulement peut se propager dans toutes les directions sur une surface plane, il convient d'utiliser un modèle bidimensionnel.

Figure 14

Il existent plusieurs méthodes de calcul simplifiées unidimensionnelles. Une méthode claire et pratique est le procédé selon CTGREF, développé en France. Son avantage est que le calcul peut être exécuté rapidement et pas à pas à la main. Sous le nom de CASTOR, il existe une version informatisée pour ordinateurs personnels. Une autre méthode pour ordinateurs est le Simplified Dam-Break Model, développée aux États-Unis, où elle semble être assez populaire.

Figure 15

Afin de pouvoir aussi appliquer une méthode simplifiée pour des calculs bidimensionnels, nous avons fait développer par le Dr Beffa une méthode paramétrique pour l'évaluation des ondes de submersion sur surface plane. Cette méthode permet la détermination de l'intensité de submersion à des points définis en utilisant des formules simples et des abaques. D'autres méthodes bidimensionnelles aussi simples n'existent pas à notre connaissance.

Commentaires (4)

Figure 16

Regardons l'exemple d'un calcul unidimensionnel de l'onde de submersion selon la méthode CTGREF pour un bassin typique d'un ouvrage pour la production de neige artificielle. Tout d'abord il faut définir la hauteur et le volume déterminants du bassin créé en grande partie par excavation à flanc de coteau. La digue est construite avec du matériel d'excavation du bassin. Si la fondation est sans risque d'érosion, le niveau du terrain naturel est pris comme niveau de référence. Mais, si la fondation risque d'être érodée - ce qui est souvent le cas - la hauteur maximale d'eau est déterminante. On aperçoit que pour le cas en-bas l'ouvrage sera assujéti à l'ordonnance à base du critère géométrique. Pour les cas en-haut il faut analyser si le critère du danger particulier est rempli et donc effectuer un calcul de l'onde de submersion.

Figure 17

Sur la base de la situation topographique on définit la zone d'écoulement et les points qui nous intéressent. Dans ce cas, l'écoulement suit le ruisseau existant jusqu'au village. Nous nous intéressons à l'intensité en un point qui se trouve à 4 km à l'aval du barrage.

Figure 18

Sur ce profil longitudinal figurent les données nécessaires pour le calcul. En plus des indications concernant la retenue, comme le volume et les paramètres de la brèche, il faut connaître la pente moyenne entre le barrage et la section située au point X et le coefficient moyen de Strickler sur le même tronçon. Au point X, il faut aussi connaître la pente locale J_1 et le coefficient de Strickler local K_1 .

Figure 19

Pour déterminer le débit maximum dans la section au point X on utilise cet abaque. L'axe horizontal est une fonction de la distance X et du volume de la retenue V_0 . Les courbes dans le graphique sont fonction de la pente et du coefficient de Strickler globales. L'axe vertical nous donne la relation entre le débit maximum au point X et le débit au moment de la rupture. Dans notre exemple la valeur sur l'abscisse est de 110. Avec une forte pente la valeur JK^2 devient relativement grande et le débit maximal au point X atteint encore 76 % du débit au droit de la brèche au moment de la rupture.

Commentaires (5)

Figure 20

Pour déterminer la hauteur d'eau au point X qui nous intéresse, il faut dessiner la section transversale et l'attribuer à une des 4 sections de géométrie-type. Avec les valeurs données: débit maximum Q_{\max} , pente locale J_1 et coefficient local de Strickler K_1 ainsi qu'avec les paramètres correspondants L et m de la section, on peut déterminer la hauteur d'eau h .

Figure 21

Pour l'obtenir, on calcule la variable intermédiaire D_{\max} avec une simple formule. La formule contient les valeurs données pour la section considérée. La formule pour la section trapézoïdale, utilisée dans notre exemple, est marquée en jaune.

Figure 22

Avec la valeur calculée D_{\max} on entre dans un deuxième abaque pour évaluer une autre variable intermédiaire U_{\max} . Les 4 courbes correspondent aux 4 sections de géométrie-type. Dans notre exemple D_{\max} est égale à 0.232. Sur la courbe du profil trapézoïdal on lit la valeur correspondante de U_{\max} .

Figure 23

Finalement la hauteur d'eau h est calculée avec une simple formule qui correspond à la section géométrique. La formule contient la variable intermédiaire U_{\max} sortie de l'abaque et les paramètres de la section.

Figure 24

Enfin, la vitesse d'écoulement v peut être calculée avec le débit maximum Q_{\max} et la hauteur d'eau h . La surface de la section d'écoulement F est définie par la géométrie et la vitesse v est obtenue par la division de Q_{\max} par F . Maintenant nous connaissons h et v ce qui nous permet de calculer l'intensité de submersion.

Figure 25

Comme déjà mentionné, une surface plane de l'écoulement - par exemple derrière des digues latérales d'un barrage en rivière - nécessite une modélisation bidimensionnelle.

Figure 26

Pour l'application de la méthode simplifiée selon Beffa, il faut connaître: la hauteur d'eau H et la largeur B de la brèche, le volume de la retenue Vol , la pente S du terrain et la rugosité D qui peut être calculé à partir du coefficient de Strickler K . Pour la détermination de la hauteur d'eau h et de la vitesse v au point recherché, il faut connaître ses coordonnées x et y . Le point zéro des coordonnées se trouve au milieu de la brèche.

Commentaires (6)

Figure 27

Avec ces données, on définit des paramètres normalisés et sans dimensions qui nous permettent - à l'aide d'abaques - de calculer les valeurs recherchées. Les valeurs déterminantes sont les paramètres de la brèche ainsi que le volume de la retenue. De plus, des valeurs normalisées du débit spécifique et de la vitesse d'écoulement, non représentées ici, sont requises.

Figure 28

Cet abaque permet de déterminer le débit spécifique le long de l'axe central x et en fonction de la pente S du terrain. On voit que l'influence de la pente augmente, lorsque on s'éloigne de la brèche. Le débit spécifique résulte de la multiplication de la valeur tirée de l'abaque par la valeur normalisée du débit.

Figure 29

Avec un abaque similaire on détermine la vitesse de l'écoulement le long de l'axe central x . Ici, l'influence de la pente S du terrain est encore plus marquée. La vitesse de l'écoulement est aussi calculée en multipliant la valeur tirée de cet abaque par la valeur normalisée de la vitesse.

Figure 30

Pour la propagation latérale d'autres abaques ont été développés, dont l'un pour le calcul de la limite latérale de submersion Y_{\max} et l'autre pour les intensités de submersion entre l'axe central x et cette limite latérale.

Figure 31

La propagation latérale augmente d'une part en s'éloignant de la brèche et d'autre part si la pente du terrain est faible. On constate qu'une forte pente conduit à une très faible propagation latérale.

Figure 32

Sur cet abaque on peut facilement lire les intensités correspondantes pour chaque point entre l'axe central et la limite latérale. L'abscisse de l'abaque représente la distance relative entre l'axe central (0) et la limite latérale Y_{\max} (1). L'axe vertical représente les valeurs pour la vitesse et le débit spécifique par rapport aux valeurs correspondantes sur l'axe central x .

Figure 33

Le résultat de ces calculs nous donne de nouveau la valeur recherchée de l'intensité de submersion. Pour l'objet considéré, on doit décider si le critère du danger particulier est atteint. Si ce critère est atteint, l'ouvrage est assujéti à l'ordonnance.

Ça devrait être sans doute le cas pour cet objet touché par l'onde de submersion lors de la rupture du bassin de protection contre les crues de Glashütte préalablement mentionné. (Photo: <http://www.heimatverein-cunnersdorf.de>)