

## Exercice n° HA 0508

### Dimensionnement d'une retenue pour l'écrêtement des débits – Application au bassin versant de la Bibera (FR, BE, Suisse)

#### Avant propos

Ces dernières années, le bassin versant de la Bibera (**surface de 50.1 km<sup>2</sup>, pente moyenne de 0.48%** - figure 1) a subi des modifications d'utilisation du sol (23 % de forêt, 63 % de culture et le reste en prairie) qui ont eu pour conséquence une diminution du temps de retour des débits de pointe. La capacité d'écoulement du canal de la Broye, dont la Bibera est un des principales affluents, a ainsi été réduite. Ceci a entraîné une élévation du niveau d'eau dans le canal et finalement son débordement.

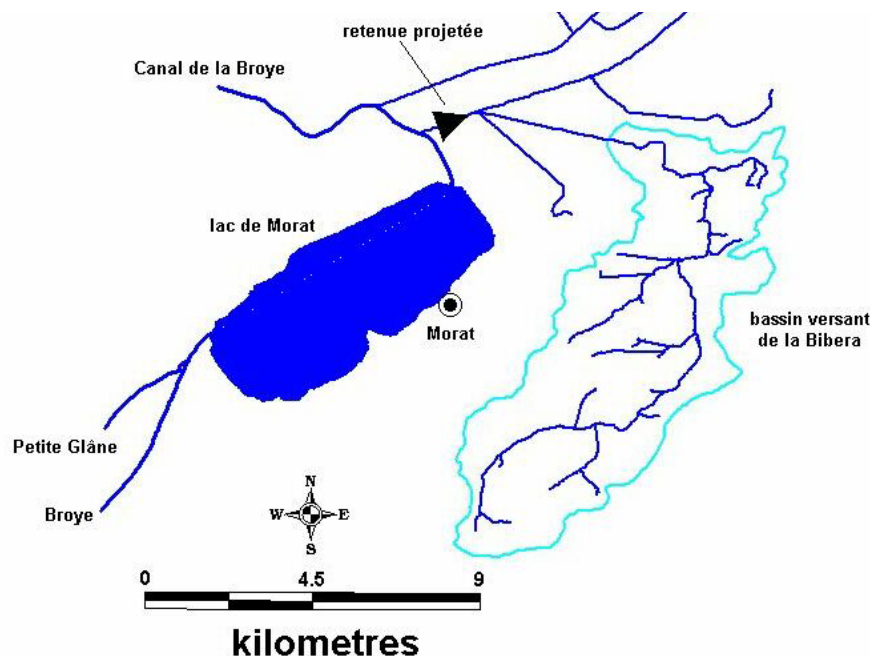


Figure 1 : Situation et délimitation du bassin versant de la Bibera (FR – BE)

#### Buts de l'exercice :

L'objectif de cet exercice est de proposer une estimation pour les dimensions d'une retenue qui permettrait l'écrêtement des débits avant qu'ils ne se déversent dans le canal de la Broye, ce qui préserverait ainsi sa capacité d'écoulement.

Pour parvenir à cela, on vous propose de suivre une approche événementielle du problème dont les étapes sont : 1) une étude hydrologique préliminaire qui consiste à établir un débit de projet afin de dimensionner les différents ouvrages hydrauliques (l'estimation de ce débit requiert la détermination d'une pluie de projet- donnée, d'une répartition temporelle de la pluie nette, d'une fonction de transfert permettant de transformer la pluie nette en hydrogramme de ruissellement, ainsi que d'une fonction d'acheminement pour l'acheminement de l'hydrogramme de crue entre l'exutoire de la Bibera et l'emplacement de la retenue); 2) une phase de dimensionnement de la retenue qui comportera uniquement un orifice de vidange circulaire.

## Déroulement de l'exercice – Partie 1

### Objectif :

La première partie de l'exercice consiste à caler et valider les paramètres de la fonction de transfert. Pour cette dernière, votre choix se portera sur un modèle de transfert basé sur une cascade de  $n$  réservoirs linéaires. Cette étape se fait à l'exutoire du bassin de la Bibera (surface de  $50.1 \text{ km}^2$ ) ; ceci à partir du fichier Excel fourni.

### Données :

Vous disposez de 8 événements pluie/débit observés à l'exutoire du bassin de la Bibera (les données de pluies proviennent de la station ANETZ n°53 de Bern-Liebefeld). Ces données sont regroupées dans le dossier « Bibera\_donnees ».

### Déroulement :

La **procédure de calage** des paramètres de la fonction de transfert se déroule comme suit pour 4 des 8 événements pluies/débits observés :

1. Estimation de la lame ruisselée (séparation des écoulements).
2. Détermination de la répartition temporelle de la pluie nette (on prendra la fonction de production du SCS-CN),
3. Établissement du modèle de transfert basé sur une cascade de  $n$  réservoirs linéaires ayant un coefficient de stockage  $S$  identique (cf. rappel 1). Construction de l'hydrogramme résultant de la pluie nette avec le modèle.
4. Ajustement « manuel » des valeurs de  $n$  (nombre entier) et  $S$  en vous reposant sur le critère visuel (ajustement des courbes des débits observés et simulés) sachant que  $n$  a une influence sur la forme de l'hydrogramme alors que  $S$  agit sur l'intensité de la pointe de crue.

Cette forme d'ajustement bien que subjective ne doit jamais être négligée ni omise. Une manière complémentaire pour apprécier l'ajustement consiste à employer des critères mathématiques quantifiant la différence entre les hydrogrammes observé et simulé. On présente ci-dessous quelques unes des fonction-critères utilisées en hydrologie (point 6, cf. rappel 2 et 3).

Remarque : Si l'on souhaite comparer l'hydrogramme observé à celui simulé, il est nécessaire d'estimer le débit de base que l'on additionne à l'hydrogramme simulé de ruissellement.

5. Recherche de la valeur (ou de l'intervalle) optimale des paramètres  $n$  et  $S$  selon la fonction-objectif retenue pour un événement. On vous suggère de faire varier  $n$  entre 1 et 3 (nombre entier), respectivement  $S$  entre 60 et 1400 minutes, par incrément de 15 minutes puis de calculer pour chaque couple  $(n, S)$  la valeur de la fonction-critère. Dès lors il est possible de représenter graphiquement, pour  $n = 1, 2$  et  $3$ , la relation entre la valeur de la fonction-critère et la valeur de  $S$ .
6. Recherche de la valeur optimale des paramètres  $n$  et  $S$  basée sur les 4 événements pluie – débit pour l'étape de validation. Le couple optimal à tester peut s'obtenir simplement en additionnant les quatre valeurs de la fonction-objectif pour chaque couple  $(n_i, S_i)$ .



*Quelles remarques pouvez-vous faire sur la variabilité des paramètres  $n$  et  $S$  d'un événement à un autre ?*

### 2/ Procédure de validation :

La **validation** des paramètres est obtenue lorsque la valeur de la fonction-objectif est jugée « acceptable » pour les 4 événements non utilisés lors du calage du modèle.

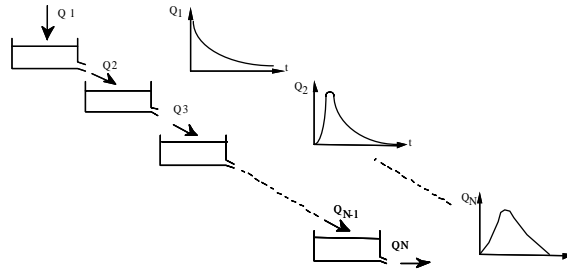


Quel est le couple  $(n, S)$  optimal que vous avez choisi ? Quelles critiques pouvez-vous faire sur l'approche adoptée ici ? Est-ce qu'une autre approche est envisageable ?

## Rappels

### Rappel 1 : Modèle de transfert basé sur une cascade de réservoirs linéaires

Ce modèle de transfert utilise l'effet de laminage d'une cascade linéaire de  $n$  réservoirs (nombre entier). Les réservoirs ont un coefficient de stockage  $S$  identique.



La solution exacte de l'équation différentielle qui régit le comportement d'un réservoir linéaire quelconque s'écrit sous la forme discrétisée suivante :

Avec :

$\Delta t$  : pas de temps de calcul [temps]

$S$  : coefficient de stockage des réservoirs

[temps]

$$Q_{N+1,i+1} = Q_{N+1,i} \cdot \left( e^{-\frac{\Delta t}{S}} \right) + Q_{N,i+1} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{S}} \right)$$

$Q_{N,i}$  : Débit de vidange à la sortie du réservoir n°N au temps  $i$ , en [volume/temps]

$Q_{N,i+1}$  : Débit de vidange à la sortie du réservoir n°N au temps  $i+1$ , en [volume/temps]

$Q_{N,i+1}$  : Débit entrant dans le réservoir n°N au temps  $i+1$  = Débit de vidange à la sortie du réservoir n°N-1 au temps  $i+1$ , en [volume/temps]

### Rappel 2: fonction-critère de Nash

La fonction-critère de Nash peut être utilisée pour déterminer l'écart quadratique moyen entre une courbe de référence ( $Y_{réf}(x)$ ) et une courbe simulée ( $Y_{mod}(x)$ ) qui se veut modéliser correctement la courbe de référence. Il est défini de la façon suivante lorsque les courbes sont définies en un nombre discret de points  $n$  (Nash et al 1970) :

$$Nash[Y(x)] = 1 - \frac{\sum_{k=1}^n \left( Y_{mod}(x_k) - Y_{réf}(x_k) \right)^2}{\sum_{k=1}^n \left( Y_{réf}(x_k) - \overline{Y_{réf}} \right)^2}$$

- Si  $Nash[Y(x)] = 1$  : estimation de  $Y_{réf}(x)$  parfaite avec  $Y_{mod}(x)$ ,
- si  $0 < Nash[Y(x)] < 1$  : estimation de  $Y_{réf}(x)$  meilleure avec  $Y_{mod}(x)$ , qu'avec  $Y_{réf}$ ,
- $Nash[Y(x)] < 0$  : estimation moins bonne.

### Rappel 3: Autres fonction-critères

On présente ci-dessous quelques unes des autres fonction-critères utilisées en hydrologie :

Fonction-objectif de la somme des carrés des résidus

$$e = \sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2$$

Fonction-objectif du pourcentage de biais

$$e = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})}{\sum_{t=1}^n Q_{obs,t}} \cdot 100$$

Fonction-objectif de Cauchy

$$e = \sum_{t=1}^n \left[ \text{Ln} \left( 1 + (Q_{obs,t} - Q_{sim,t})^2 \right) \right]$$

avec

$Q_{obs,t}$  : débit observé au temps  $t$ , en  $[m^3/s]$   
 $Q_{sim,t}$  : débit simulé au temps  $t$ , en  $[m^3/s]$   
 $\overline{Q}_{obs}$  : débit moyen observé, en  $[m^3/s]$

Remarque : L'emploi de ces fonction-critères doit se faire néanmoins avec une certaine prudence et leur choix doit être subordonné à l'objectif fixé (simulation du débit de pointe, de l'allure générale de l'hydrogramme, etc.).

## Déroulement de l'exercice – Partie 2

Objectif :

Cette partie de l'exercice consiste à déterminer les paramètres « temps de propagation dans le canal  $K$  » et « facteur de pondération  $\alpha$  » de la méthode de Muskingum. Cette fonction vous permettra par la suite d'acheminer l'hydrogramme de crue entre l'exutoire de la Bibera et l'emplacement de la retenue.

Données :

Vous disposez de données débitométriques observés à l'exutoire du bassin de la Bibera et à l'emplacement projeté de la retenue. Ces données sont regroupées dans le fichier « HA0508\_donnees.xls ».

Déroulement :

Ayant les hydrogrammes observés à l'exutoire de la Bibera et à l'emplacement projeté de la retenue, la procédure est la suivante :

1. Estimer *a priori* une valeur de  $\alpha$
2. Pour chaque pas de temps calculer la valeur du « volume » de stockage instantané ( $\alpha Q_e + (1-\alpha)Q_s$ ) ainsi que le volume total moyen stocké dans le bief ( $V$ )
3. Représenter graphiquement les couples de valeurs volume instantané – volume moyen
4. Ajouter une courbe de tendance de type linéaire, afficher la valeur du coefficient de corrélation  $R^2$
5. Modifier la valeur de  $\alpha$  jusqu'à obtenir la meilleure valeur de  $R^2$
6. La pente de la droite de régression est égale à la valeur de  $K$



*Quel est le couple  $(\alpha, K)$  optimal que vous avez choisi ?*

## Déroulement de l'exercice – Partie 3

Objectif :

En vous basant sur la pluie de projet de temps de retour  $T$  de 10 ans et sur les résultats obtenus sur le bassin versant de la Bibera (étapes précédentes), l'objectif est maintenant d'estimer pour cette pluie de projet, les dimensions de la retenue qui permettrait l'écrêtement des débits avant qu'ils ne se déversent dans le canal de la Broye.

Données :

Vous avez à disposition les courbes Intensité – Durée – Fréquence de la station de Berne (figure 1) à la station ANETZ de Bern-Liebefeld.

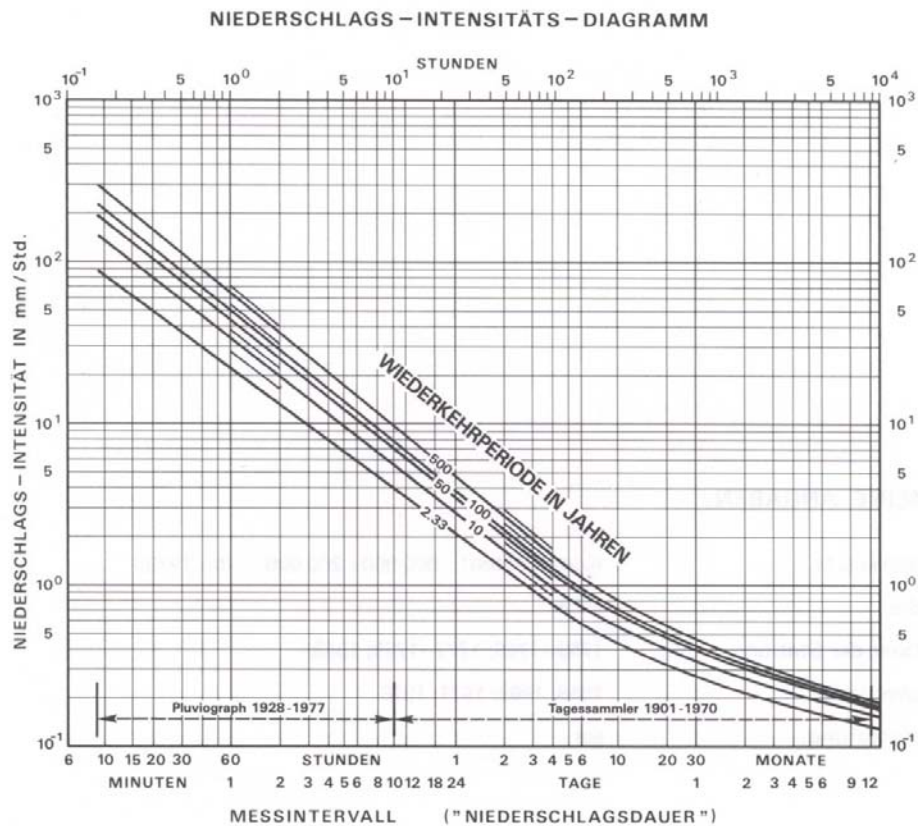


Figure 2 : Courbes Intensité – Durée – Fréquence des précipitations à la station pluviométrique de Berne

Déroulement :

La procédure se déroule comme suit :

### 1/ Construction d'une pluie de projet et choix d'une fonction de production.

En vous basant sur la Figure 2 , vous devez ainsi :

- Construire une pluie de 10 heures pour un temps de retour 10 ans, avec une structure composite.
- Choisir une fonction de production. On vous propose d'utiliser la méthode du *CN* du Soil Conservation Service (U.S. Department of Agriculture). Vous fixez les pertes initiales  $I_a$  à 1.5 mm ainsi qu'une valeur de 65.0 pour le *CN*, compte tenu du type de sol et de son utilisation pour le bassin de la Bibera. Pour juger de l'effet du *CN* vous ferez également ces calculs pour une valeur de 75.0.



*Quelle est l'influence du choix de CN sur la répartition de la pluie nette dans le temps ?*

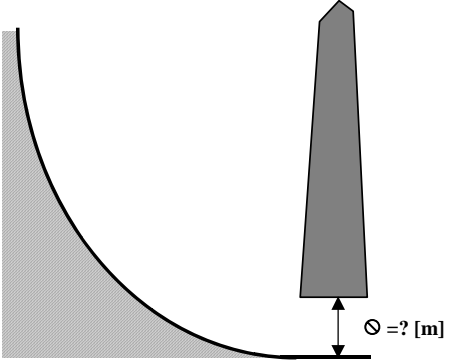
### 2/ Calcul du débit de pointe et du volume de crue à l'emplacement projeté de la retenue

Il est maintenant possible de calculer l'hydrogramme résultant de la pluie de projet à l'emplacement projeté de la retenue à l'aide des estimations des paramètres de la fonction de transfert et d'acheminement fournies par les étapes précédentes.

### 3/ Dimensionnement de la retenue

Une analyse globale du bassin a permis de définir un site pour la construction de la retenue dont les caractéristiques envisagées sont présentées dans le tableau 1. Grâce à un Modèle Numérique d'Altitude vous avez pu notamment établir la relation entre le niveau d'eau et le volume stocké par la retenue à l'emplacement projeté (tableau 1).

Tableau 4 : Caractéristiques de la retenue à dimensionner

<p><b>Relation Hauteur/Volume de la retenue :</b></p> $V = 65'500 \cdot \sqrt{H} + 35'000 \cdot H$	<p><math>V</math> : le volume d'eau stocké, en [m<sup>3</sup>]</p> <p><math>H</math> : Hauteur d'eau mesurée à partir du centre de l'orifice, en [m]</p>
<p><b>Orifice de vidange circulaire situé à la base de la retenue :</b></p> 	<p>Nombre : 1</p> <p>Diamètre : à dimensionner [m]</p> <p>Altitude de l'axe : 842 [m]</p> <p>Débit de vidange :</p> $O(t) = C_c \cdot \left( \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right) \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot H}$ <p>Avec :</p> <p><math>C_c</math> : Coefficient de débit (estimé à 0.8), adimensionnel</p> <p><math>D</math> : Diamètre de l'orifice de vidange, en [m]</p> <p><math>H</math> : Hauteur d'eau mesurée à partir du centre de l'orifice, en [m]</p> <p><math>g = 9.81 \text{ m/s}^2</math></p>
<p><b>Remarque :</b> Il est à noter que l'expression du débit ci-dessus, pour un orifice circulaire, est théoriquement valable uniquement pour un réservoir dont le rapport surface – profondeur est grand (<math>H \gg D</math>) <u>et</u> lorsque l'orifice de vidange fonctionne en régime dénoyé.</p>	

Dans un premier temps, vous devez fournir une première estimation des dimensions de l'orifice de vidange circulaire de la retenue, de telle sorte que le débit de sortie  $Q_s$  soit limité à 10 m<sup>3</sup>/s. Pour cela, il vous faudra estimer le volume de stockage maximum et la hauteur du plan d'eau maximum derrière la retenue.

Par la suite, vous devez vérifier la capacité du réservoir à laminar la crue de projet pour cette première estimation (utiliser la méthode de la « Storage Indication Curve »).



*Quelles critiques pouvez-vous faire sur l'approche événementielle adoptée ici ? Quelle autre approche proposeriez-vous ?*