

## Modélisation statistique des apports de MES associés au régime des crues d'un sous-bassin du Timis-Béga (Roumanie)

Statistical modelling of the wash load associated with the flood regime in a sub-basin of the Timis-Bega Rivers (Romania)

G. GALÉA\*<sup>1</sup>, P. RAMEZ<sup>1</sup>, M.-J. ADLER<sup>2</sup> et E. ROTARU<sup>2</sup>

Reçu le 6 octobre 2003, accepté le 10 juin 2004\*\*.

### SUMMARY

With respect to sediment transport, we detailed the general framework and how our approach contributes to these developments. Starting from the single traditional relation for the bed material load, specialists in river hydraulics cannot assess sediment yield of basins, when it involves the auto-suspension of fine sediments coming mainly from slope erosion (wash load). This latter estimate is needed for simulating the transfer of sediments and possible deposition in certain areas, particularly when a strong slowing down occurs. The Timis-Bega drainage basin (Romania) is fairly well equipped for the monitoring of discharge and suspended materials (sediment discharge). The hydrometric network includes 28 stations, of which 12 allow a monitoring of wash load. Moreover, its physiographic characteristics led us to think that the wash load dominates. Thus we assumed that sediment discharge was correlated with the physiographic features of the catchment area. The protocol for the measurement of the suspended sediment load was intensified during the floods. Thus, statistical modelling of the sub-basin sediment yields could be performed.

The current study was directly inspired by the knowledge obtained in the domain of statistical modelling that describes hydrological regimes. The approach adopted was based on the flood-duration-frequency (QdF) analysis that takes into account the temporal variability of floods. The QdF approach analyses maximum average flows ( $Vd$ ) over various durations ( $d$ ), equivalent to intensity-duration-frequency (IdF) curves commonly used for rainfall analysis. The proposed model allows QdF curves  $V(d, T)$  for a given basin to be estimated using a minimum number of parameters. When the statistical law is the exponential law, this model contains only three parameters, due to

1. Cemagref-Lyon, Unité de Recherche Hydrologie Hydraulique, 3 bis, quai Chauveau, 69336 Lyon Cedex 09.
2. National Institute of Hydrology and Water Management (NIHWM), Sos Bucuresti, Ploiesti 97, 71522 Bucharest, Romania.

\* Correspondance: gilles.galea@cemagref.fr

\*\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 avril 2005.

observed scale invariance properties. The  $\Delta$  parameter that informs about the shape of the flood hydrograph is consequently the flood characteristic duration of the studied basin. The two parameters of the exponential maximum flood distribution for  $d=0$  ( $a_0$  and  $x_0$ ) and  $\Delta$  were fitted to sample discharges ( $Vd$ ). This model is called a converging QdF model because of the observed convergence of distributions towards small return periods. This model is also useful for the determination of threshold discharges ( $Qd$ ). The analytical formulation of the  $V(d, T)$  model can be derived according to  $d$ , in order to obtain a  $Q(d, T)$  model. This model then permits the calculation of the hydrograph for any return period ( $T$ ) and any duration ( $d$ ).

The regionalization of the sediment yield was achieved within the framework of the Riverlife European project, in collaboration with NIHW (National Institute of Hydrology and Water Management of Romania). Initially, local models were built. As an example, starting from the Bega sub-basin at Balint, with a surface of 1.064 km<sup>2</sup>, our intent was to present the transposition of the discharge-duration-frequency analysis concept (or QdF) to the wash load  $Q_{MES}dF$ . The latter relates to the measurement procedure, the statistical processing of the observed data  $Q_{MES}(t)$ , and to the building of the discharge hydrographs of the associated projects.

The main results were:

- The statistical analyses of floods and sediment discharges show that the wash loads were not simply proportional to the discharge, but rather they increased more rapidly. The selection of the appropriate distribution laws (Pareto generalised for the  $Q_{MES}dF$  model (four parameters) and exponential for the QdF model) reinforced this result.
- The lag-time was the same for both hydrographs with respect to flood and sediment discharge. This result can be achieved if the sediment transport comes primarily from the scrubbing of the slopes (wash load), which was hypothesised *a priori*. However, falling limb of the sediment hydrograph decreases more quickly than for the discharge hydrograph ( $\Delta_{MES}$  is lower than  $\Delta$ ).

The Bega sub-basin example at Balint was a first test towards the regional modelling of the contributions to sediment discharge in the catchment area of Timis-Béga. This flood and sediment discharge regionalization is necessary for the study of the protection of the town of Timisoara against flooding.

**Key-words:** *QdF curves, flood discharge, sediment discharge, wash load, Timis-Béga, Romania.*

## RÉSUMÉ

Dans cette thématique concernant le transport solide des cours d'eau, il nous semble opportun de résumer le cadre général et d'y situer notre approche. Les formules classiques du transport solide évaluent le débit en matériaux du lit (charriage et suspension) à partir de ses déformations. Elles ne permettent pas d'estimer le débit des matériaux provenant directement du lessivage des versants et qui transite sans interaction avec le lit. Dans cet article, nous considérons uniquement la phase en suspension « MES » mesurée sans distinction *a priori* de l'origine des grains qui la constituent : provenance directe du bassin versant (phase directe) et (ou) reprise des stocks disponibles dans le lit (phase différée). Le bassin hydrographique du Timis-Béga (Roumanie) est particulièrement bien équipé pour le suivi des débits de 28 sous-bassins et le contrôle des flux de MES de douze d'entre eux. De plus, son contexte physiographique nous permet de penser que la phase directe est prépondérante. Le protocole de mesure des flux de MES prévoit, entre autres, une densification variable des observations selon l'intensité des crues liquides. Ces considérations précédentes nous permettent d'envisager une modélisation statistique

des apports solides en MES des sous-bassins du Timis-Béga. Celle-ci est directement inspirée des connaissances acquises sur la modélisation statistique « QdF » des régimes hydrologiques des bassins versants. Sur l'exemple du sous-bassin du Béga à Balint, qui draine une superficie de 1 064 km<sup>2</sup>, nous retiendrons deux principaux résultats issus de la transposition du concept QdF aux débits solides  $Q_{MES}dF$  : les analyses statistiques des régimes liquide et solide montrent que les débits solides de MES ne sont pas simplement proportionnels aux débits liquides mais croissent plus rapidement. Les deux lois de distributions privilégiées, Pareto généralisée pour les MES et exponentielle pour les débits, permettent de le justifier. Le temps de montée des hydrogrammes de projet liquide ou solide est quasiment-identique, autrement dit nous vérifierons la quasi concomitance de leurs débits de pointe. Ce résultat n'est possible que si le débit solide de MES provient essentiellement du lessivage des versants, ce qui était supposé *a priori*.

**Mots clés :** courbes QdF, débit de crue, débit solide MES, Timis-Béga, Roumanie.

## 1- INTRODUCTION

Les formules classiques du transport solide évaluent le débit en matériaux du lit entraînant effectivement une déformation mesurable ou observable de sa géométrie (YALIN, 1992 ; RAMEZ, 1995). Le débit solide (bed material load) peut être transporté par charriage (bed load) et/ou suspension (suspended load). Le débit solide de matériaux transporté sans interaction avec le lit n'est pas estimable par les formules (WALLING, 1983). Il est toujours transporté en suspension et provient essentiellement du lessivage des versants (wash load). Nous supposons donc qu'il est corrélé avec les caractéristiques physiographiques du bassin versant. Dans cet article nous considérons uniquement la phase en suspension « MES » mesurée sans distinction *a priori* de l'origine des grains qui la constituent : provenance directe du bassin versant (phase directe) ou (et) par reprise des stocks disponibles dans le lit (phase différée). Les hydrauliciens négligent souvent l'estimation de cette phase directe, représentée essentiellement par des fines, car l'état de l'art est assez pauvre sur la question. Cette estimation est pourtant nécessaire pour simuler leur transit et leur dépôt éventuel dans certaines zones particulières comme les grandes retenues (BESSENASSE *et al.*, 2003).

D'un point de vue général, notre intention est de faire bénéficier l'évaluation de la qualité de l'eau des cours d'eau et des MES en particulier des connaissances acquises sur la modélisation statistique « QdF » des régimes hydrologiques des bassins versants (GALÉA *et al.*, 2000 ; JAVELLE, 2001). Notre objectif immédiat est de montrer, à partir de l'exemple du sous-bassin du Béga à Balint qui draine une superficie de 1 064 km<sup>2</sup>, l'adaptabilité du concept d'analyse des débits liquides « QdF » aux débits solides en MES «  $Q_{MES}dF$  ». Les résultats concernent donc essentiellement la modélisation statistique locale des régimes de crue et de fine associés ainsi que les hydrogrammes de projet.

Cet objectif immédiat s'inscrit dans une action de collaboration avec le NIHWM de Bucarest dans le cadre du projet européen RIVERLIFE (2002). Elle

concernera à terme l'approche régionale des débits de crue et de *MES* du bassin hydrographique du Timis-Béga. Les modèles régionaux établis tant en débit liquide que débit solide (*MES*) permettront de définir les hydrogrammes de projet nécessaires à la modélisation hydraulique. L'enjeu de l'étude hydraulique est de protéger la ville de Timisoara contre les inondations et d'assurer une certaine pérennité aux aménagements qui seront proposés : autocurage des fines, stabilité des lits et des ouvrages, réduction de la formation des bancs.

## 2 – LE BASSIN HYDROGRAPHIQUE DU TIMIS-BÉGA ET LE SOUS-BASSIN DU BÉGA À BALINT

### 2.1 Présentation du Timis-Béga

Nous présentons ci-après l'ensemble du réseau hydrographique et ses points de contrôle en débit liquide  $Q(t)$  et débit solide  $Q_{MES}(t)$ . Les rivières du Timis et du Béga drainent une superficie de 13 000 km<sup>2</sup> à l'ouest de la Roumanie. Le réseau d'observations en débit  $Q(t)$  comprend 28 stations hydrométriques dont 12 (tableau 1) font l'objet d'un suivi continu des fines  $Q_{MES}(t)$ . Parmi ces 28 stations répertoriées par leur code hydrométrique (figure 1), deux jeux de sous-bassins sont distingués pour les besoins de la régionalisation des crues (RIVERLIFE, 2002).

**Tableau 1** Superficies contrôlées et chroniques disponibles en *MES*.

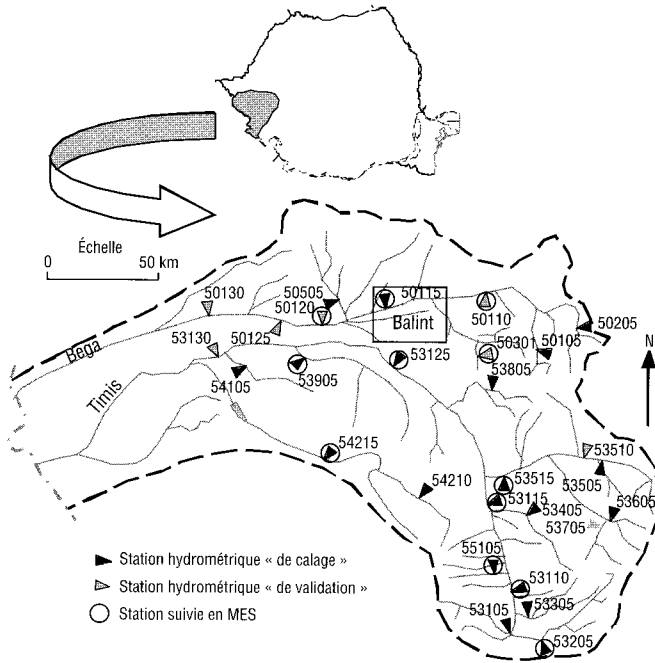
Table 1 *Controlled areas and observed data in MES.*

Rivière	BÉGA							TIMIS				
Code sous-bassin	50 301	50 110	50 115	50 120	55 105	53 205	54 215	53 905	53 110	53 515	53 115	53 125
S (km <sup>2</sup> )	57	474	1064	1660	41	163	406	434	560	863	1072	2 706
Chronique $Q_{MES}(t)$	1984 à 2001	1979 à 2001	1966 à 2001	1976 à 2001	1987 à 2001	1983 à 2001	1965 à 2001	1987 à 2001	1996 à 2001	1986 à 2001	1986 à 2000	1964 à 2001

### 2.2 Choix du Béga à Balint

Le sous-bassin du Béga à Balint présente plusieurs atouts :

- La durée des chroniques de débits liquide  $Q(t)$  et solide  $Q_{MES}(t)$  est respectivement de 44 ans (1958-2001) et de 36 ans (1966-2001). Les mesures de turbidité sont réalisées en continu, conformément à un protocole bien défini (cf. ci-après), et à un pas de temps adapté à l'intensité des crues liquides observées.
- Un bassin versant homogène en ce qui concerne la production de fines et un sol peu profond. Lors d'une visite de terrain nous avons pu évaluer le contexte physiographique propice au lessivage des versants et observer la prépondérance du transport de sédiments fins par la rivière Béga à Balint (57 000 tonnes/an, en moyenne sur 36 ans). Ces informations



**Figure 1** Localisation du Timis-Béga et présentation de son réseau hydrométrique.

*Location of the Timis-Béga basin and its hydrometric network.*

modestes devraient être ultérieurement complétées par une approche géomorphologique du sous-bassin et de manière plus générale des sous-bassins du Timis-Béga.

- Un lit recalibré assurant un bon transfert vers l'aval et limitant les zones de dépôt.
- Une turbidité significative pour une large gamme de débits liquides.

Ces différentes considérations donnent un sens au traitement statistique de la chronique observée  $Q_{MES}(t)$ , présenté ultérieurement.

### 3 – FLUX DE MES ET CHRONIQUE DE DÉBIT SOLIDE $Q_{MES}(t)$

#### 3.1 Protocole de mesure des MES et méthode de calcul des débits solides $Q_{MES}$

La méthodologie utilisée en Roumanie pour estimer les débits en MES est basée sur une analyse réaliste des processus mis en jeu grâce à un protocole de mesure précis et une série d'expérimentations contrôlées *in situ* (DIACONU,

1997). Ce protocole est bien adapté aux mesures en fortes crues puisque les plus grandes quantités de sédiments en suspension (80 à 90 % des volumes annuels) sont transportés pendant ces événements. Quelques points essentiels de ce protocole et du calcul des MES, pouvant *a priori* donner un sens à notre choix de modélisation, sont résumés ci-après.

### 3.1.1 Protocole de mesure des MES

#### *Notations, définitions et unités de mesure*

Chaque point de contrôle du réseau hydrométrique est caractérisé par sa section transversale de superficie  $\Omega$ . Pour tout échantillon en un point  $u$  de cette section sont notés  $V_u$  (exprimé en  $m^3$ ) le volume « eau + sédiment » prélevé et  $G_u$  (exprimé en g) la masse des MES obtenue après séchage dans l'étuve. La turbidité ponctuelle  $\rho_u$  est définie comme la concentration en MES de l'échantillon ( $\rho_u = G_u/V_u$ ), elle est exprimée en  $g/m^3$ . Le flux en MES ponctuel  $\alpha_u$  est défini comme la quantité de sédiments en suspension qui passe par unité de temps et par unité de surface au point de prélèvement. Si  $v_u$  est la vitesse de l'écoulement en ce point, alors  $\alpha_u$  est donné par l'expression :  $\alpha_u = \rho_u v_u$  ( $g/m^2/s$ ).

Le débit solide en fines  $Q_{MES}$  dans toute la section transversale  $\Omega$  est exprimé en masse par unité de temps ( $kg/s$ ) et le débit liquide  $Q$  est exprimé en volume par unité de temps ( $m^3/s$ ). La turbidité moyenne dans la section  $\rho_m$  correspond donc au rapport  $Q_{MES}/Q$  (exprimée en  $kg/m^3$ ). Une notion de débit liquide minimum  $Q_{min}$  est aussi définie, telle que pour  $Q > Q_{min}$  70 % à 80 % du volume annuel des MES s'écoule.

#### **Mesure des MES**

Pour toute section transversale  $\Omega$  les mesures sont faites sur des verticales de hauteurs  $h$ , espacées uniformément et éventuellement sur des verticales supplémentaires liées à des zones à forte turbidité ou à l'irrégularité du profil transversal.

Il existe 3 sortes de mesures sur ces verticales :

- mesure complète, à partir d'un quadrillage de la section  $\Omega$  dans le sens de la largeur et dans le sens de la hauteur  $h$  des verticales ;
- mesure simplifiée, sur 2 niveaux des verticales, en surface et point situé à  $0,6 h$  en dessous de la surface de l'eau ;
- mesure simple, en un seul point sur une (ou deux) verticale(s) choisie(s) parmi celles des mesures complètes.

Les mesures complètes et simplifiées servent de référence. Elles permettent de définir les apports moyens de MES rapportés à toute la section. Elles sont réalisées plusieurs fois par an sur des crues (concentration, pointe et récession) couvrant une large gamme de débits en hautes et moyennes eaux. Pour des crues relativement moyennes à faibles, mobilisant néanmoins une quantité significative de sédiments, la mesure complète est bien adaptée. Le recours à la mesure simplifiée est utile pour les événements plus intenses et peut être réduite, lorsque les vitesses de l'écoulement deviennent trop fortes, aux seuls prélèvements de surface. Ces considérations pratiques se justifient dans la mesure où nous sommes dans des conditions de bon mélange.

La mesure simple réalisée ponctuellement sur une des verticales, de turbidité ponctuelle  $\rho_u$ , est censée représenter la turbidité moyenne  $\rho_m$  dans la section  $\Omega$ . Le choix de la verticale et du point de prélèvement résulte d'une comparaison entre  $\rho_u$  et  $\rho_m$  relatifs aux mesures complètes et simplifiées ( $Q > Q_{\min}$ ). Le prélèvement par mesure simple est représentatif de la section si le rapport  $K = \rho_m/\rho_u$  est compris entre 0,75 et 1,25. Une réactualisation du choix de l'emplacement de la mesure simple est effectuée périodiquement.

Lorsque  $Q < Q_{\min}$ , un seul prélèvement par semaine est suffisant.

### 3.1.2 Méthode de calcul des flux et débits solides de MES

Elle suppose au préalable une critique des profils de turbidité et de flux obtenus pour chacune des verticales. En principe la turbidité  $\rho$  augmente de la surface de l'eau vers le fond en raison de la gravité ; une certaine cohérence entre profils est vérifiée. L'analyse graphique du profil des flux  $\alpha$  sur chaque verticale est d'une interprétation plus délicate car elle résulte d'une composition des profils des turbidités et des vitesses.

#### Méthode de calcul analytique

Elle est analogue à celle des débits liquides et comprend plusieurs étapes :

– Estimation du flux moyen de MES  $\alpha_v$  par verticale de profondeur totale  $h$  :

Si  $15 < h \text{ (cm)} \leq 20$ , les mesures de la vitesse et de la turbidité sont faites en un seul point (situé à 0,6 h sous la surface de l'eau) et  $\alpha_v = \alpha_{0,6h} = \rho_{0,6h} v_{0,6h}$

Si  $20 < h \text{ (cm)} \leq 40$ , les mesures de la vitesse et de la turbidité sont faites en 2 points (situés à la surface de l'eau et au fond) et  $\alpha_v = (\alpha_{\text{surf.}} + \alpha_{\text{fond}})/2$

Si  $40 < h \text{ (cm)} \leq 80$ , les mesures de la vitesse et de la turbidité sont faites en 3 points (situés à 0,2 h puis 0,6 h et 0,8 h sous la surface de l'eau) et  $\alpha_v = (\alpha_{0,2h} + 2\alpha_{0,6h} + \alpha_{0,8h})/4$

Si  $h > 80 \text{ cm}$ , les mesures de la vitesse et de la turbidité sont faites en 5 points (en surface et au fond en passant par 0,2 h et 0,6 h puis 0,8 h) et  $\alpha_v = (\alpha_{\text{surf.}} + 3\alpha_{0,2h} + 3\alpha_{0,6h} + 2\alpha_{0,8h} + \alpha_{\text{fond}})/10$

À propos des relations précédentes nous précisons que les coefficients de pondération des flux  $\alpha_u$  mesurés à différents niveaux de chaque verticale ont été définis empiriquement pour décrire un profil de flux moyen  $\alpha_v$  par verticale (DIACONU, 1997). Nous rappelons que le profil relatif à  $\alpha_v$  résulte du produit des profils de la turbidité  $\rho_u$  et des vitesses  $v_u$ . La turbidité  $\rho_u$  augmente de la surface de l'eau vers le fond en raison de la gravité et des échanges avec les matériaux du lit et qu'inversement la vitesse  $v_u$  décroît.

– Estimation du flux moyen de MES  $\alpha_{v(X,Y)}$  entre deux verticales X et Y à partir de  $\alpha_{v(X,Y)} = (\alpha_{v(X)} + \alpha_{v(Y)})/2$ . L'estimation du flux moyen entre bord de rive et verticale la plus proche sera déduite des relations  $\alpha_{v(0,X)} = 2/3 \alpha_{v(X)}$  et  $\alpha_{v(Y,0)} = 2/3 \alpha_{v(Y)}$  ;

– Calcul des surfaces partielles  $\Omega_{(X,Y)}$  comprises entre deux verticales : pour simplifier les notations nous référençons la verticale X à l'indice  $i$  et la verticale Y à l'indice  $i + 1$ , alors :  $\Omega_{(X,Y)} = \Omega_{i,i+1} = (B_{i+1} - B_i) \cdot (h_i + h_{i+1})/2$  ;

avec :

$h_i$  : profondeur maximale de la verticale X

$h_{i+1}$  : profondeur maximale de la verticale Y

$(B_{i+1} - B_i)$  : largeur entre les verticales X et Y

– Estimation du débit partiel de fines entre 2 verticales X et Y :

$$Q_{\text{MES}(X,Y)} = \Omega_{(X,Y)} \cdot \alpha_{v(X,Y)}$$

– Estimation du débit total en MES :  $Q_{\text{MES}} = \sum Q_{\text{MES}(X,Y)}$  ;

– Estimation de la turbidité moyenne dans la section :  $\rho_m = Q_{\text{MES}}/Q$  ;

– Détermination des turbidités minimale et maximale : les valeurs de turbidité extrêmes sur la section sont déterminées à partir de toutes les valeurs de turbidité ponctuelle  $\rho_u$ .

### **Méthode de calcul graphique**

Cette méthode, basée sur le report graphique des profils de vitesse, de turbidité et de flux, permet d'évaluer les valeurs moyennes directement par planimétrie.

Elle est surtout utilisée lorsque le profil des vitesses  $v$  et le profil des turbidités  $\rho$  n'ont pas une forme « classique », lorsqu'il y a trop de lacunes dans la série des prélèvements ou lorsque les débits liquides sont eux-mêmes estimés graphiquement.

## **3.2 Chronique de débit $Q_{\text{MES}}(t)$**

L'application du protocole de mesure et les calculs précédemment décrits permettent d'obtenir les débits solides  $Q_{\text{MES}}(t)$ . Pour les mesures simples en particulier, le débit solide est estimé à partir de la relation  $Q_{\text{MES}}(t) = K \rho_u Q(t)$ .

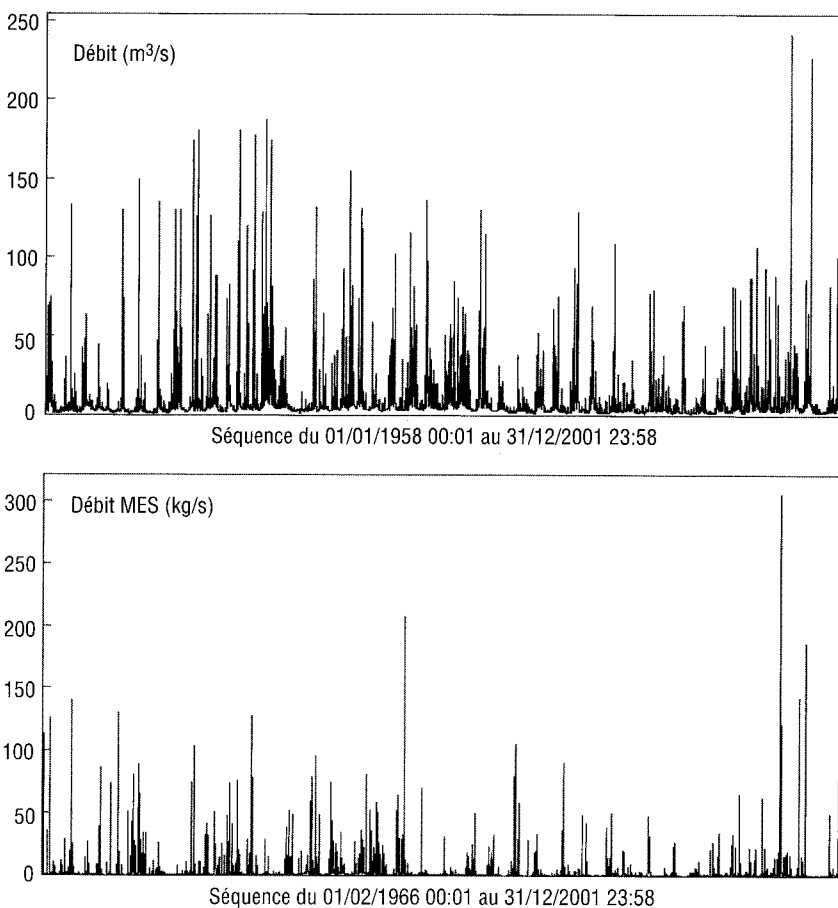
Nous présentons ci-après les chroniques  $Q(t)$  et  $Q_{\text{MES}}(t)$  du sous-bassin du Béga à Balint (figure 2).

Pour plus de détails, deux couples des principaux événements observés sont présentés à la figure 3. Les pollutogrammes  $Q_{\text{MES}}(t)$  sont déduits des courbes expérimentales respectives (figure 4), tracées entre les valeurs de  $Q_{\text{MES}}(t)$  mesurées<sup>1</sup>, selon le protocole présenté antérieurement, et de  $Q(t)$  observées.

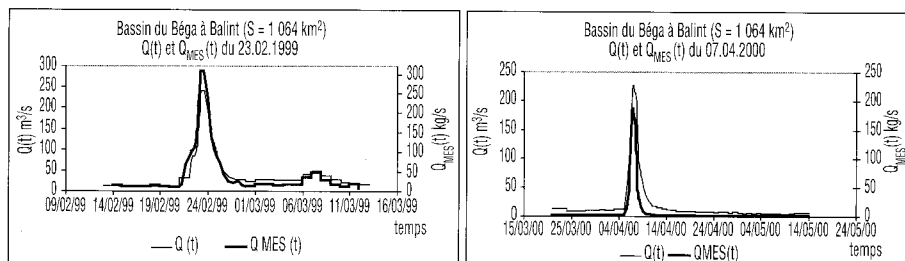
Pour le pollutogramme du 7 avril 2000, le transport solide de MES est essentiellement représenté par une phase directe, ce qui n'est pas tout à fait le cas pour le pollutogramme du 23 février 1999 (figure 4).

1. Pour l'événement du 23 février 1999, nous noterons les mesures complètes de MES (symboles clairs).

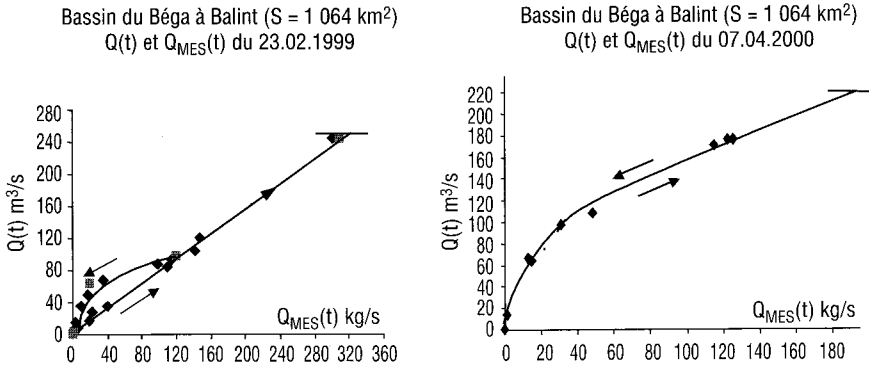




**Figure 2** Chroniques  $Q(t)$  et  $Q_{MES}(t)$  du Béga à Balint.  
*Observed data  $Q(t)$  and  $Q_{MES}(t)$  for the Bega sub-basin at Balint.*



**Figure 3** Exemple de couple  $Q(t)$ ,  $Q_{MES}(t)$ .  
*Example of the couple  $Q(t)$ ,  $Q_{MES}(t)$ .*

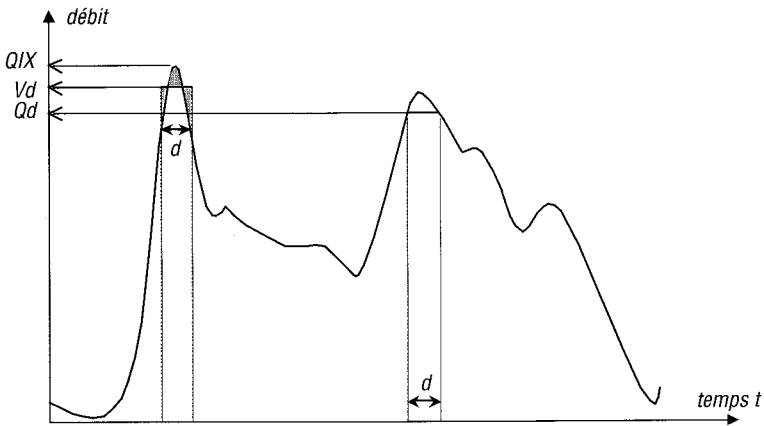


**Figure 4** Mesures et fonctions expérimentales entre  $Q_{MES}(t)$  et  $Q(t)$ .  
*Observed data and empirical relations between  $Q_{MES}(t)$  and  $Q(t)$ .*

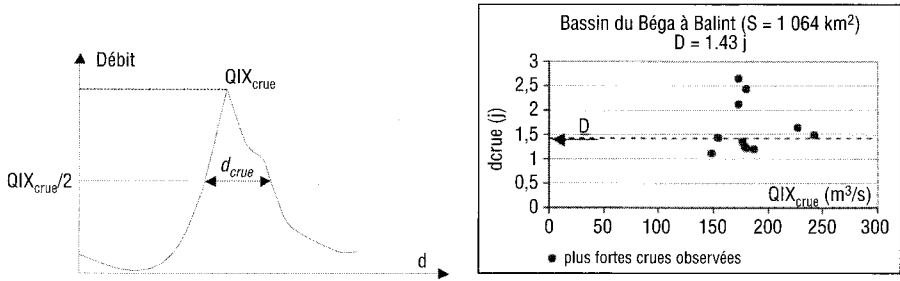
**4 – MODÉLISATIONS QdF ET  $Q_{MES}dF$  DU BÉGA À BALINT**

**4.1 Modélisation QdF**

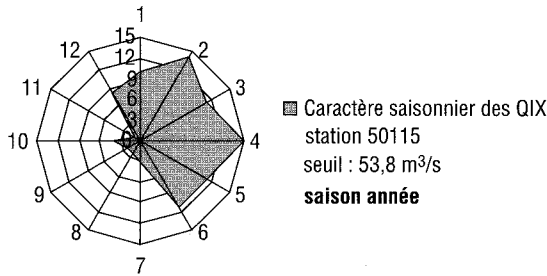
Elle exploite la variabilité temporelle des crues de la chronique  $Q(t)$  selon deux variables hydrologiques notées  $Vd$  et  $Qd$  :  $Vd$  est le débit moyen sur la durée continue  $d$ , maximal lors de l'épisode de crue, et  $Qd$  représente le débit seuil, continûment dépassé sur la durée  $d$ , maximal lors de l'épisode de crue. Lorsque  $d = 0$ , les deux variables sont égales au débit de pointe maximal  $QIX$  de l'épisode (figure 5).



**Figure 5** Définition des variables hydrologiques d'un épisode de crue.  
*Definition of flood hydrological variables.*



**Figure 6** Durée  $d_{crue}$  et estimation de  $D$ .  
Duration  $d_{crue}$  and estimation of  $D$ .



**Figure 7** Identification du caractère saisonnier des crues.  
Seasonal characteristics of floods.

Les durées  $d$  retenues doivent être compatibles avec la dynamique des crues observées. On définit pour cela une durée caractéristique de crue notée  $D$  (figure 6). Celle-ci est égale à la médiane des durées  $d_{crue}$  ( $D = d_{crue}$ ) des événements retenus dont le débit de pointe  $QIX_{crue}$  est supérieur à 80 % du débit de pointe décennal ;  $d_{crue}$  correspond au temps pendant lequel la moitié du débit de pointe  $QIX_{crue}$  est dépassé.

L'analyse QdF fournit une description fréquentielle théorique multi-durée ( $d \leq 5D$ ) des quantiles de crue. L'exploration annuelle des valeurs supérieures à un seuil indépendantes permet d'identifier la saison des crues, du mois 12 au mois 6 (figure 7).

Le régime des crues sera décrit par le binôme classique loi de Poisson et loi exponentielle (LANG *et al.*, 1999). On vérifie (figure 8) que le processus d'occurrence des crues sélectionnées (ex. : QIX) suit une loi de Poisson, autrement dit que l'indice de dispersion en fonction du seuil  $R(s)$  est compris dans l'intervalle de confiance à 90 %. Ce processus est stationnaire selon le test de LANG (1995) car la courbe  $Mexp(t)$  qui représente le report chronologique du numéro de la crue en fonction de sa date d'occurrence est située à l'intérieur de l'intervalle de tolérance à 90 % [M5 % ; M95 %]. Le test de Lang a été récemment

recadré par DINDAR (2003) pour passer d'une probabilité locale à une date donnée à une règle de décision pour un point quelconque de la chronique. Il en résulte qu'une chronique n'est pas stationnaire si plus de 22 % environ des points sont en dehors de l'intervalle de contrôle. La valeur critique de « 21,5 % de points sortants » a été déterminée par simulation, dont la procédure s'inspire des résultats obtenus par LEMAITRE (2002). La chronique de débit du Béga à Balint est donc stationnaire (figure 8).

Pour les différents échantillons  $V_d$  constitués la distribution exponentielle permet d'en déduire les quantiles théoriques (1).

$$V_d(T) = a_d \ln(T) + x_{0,d} \tag{1}$$

avec :

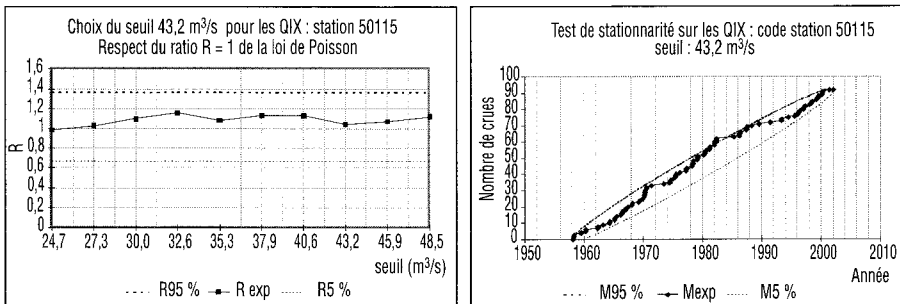
$a_d$  : gradex des débits ou encore paramètre d'échelle de la loi ;  
 $x_{0,d}$  : paramètre de position de la loi.

Une généralisation avec la durée  $d$  et la période moyenne de retour  $T$  peut être obtenue à partir du concept QdF « convergent » de JAVELLE *et al.* (1999, 2000). Ce concept ne privilégie pas une loi de distribution particulière. Pour ce qui concerne les débits de crue du Béga à Balint l'expression (2) est associée à la loi exponentielle.

$$V(d,T) = \frac{a_0 \ln(T) + x_0}{1 + d/\Delta} \tag{2}$$

Les trois paramètres,  $a_0$ ,  $x_0$  et  $\Delta$  sont ajustés sur l'ensemble des quantiles expérimentaux relatifs aux durées  $d$  étudiées (JAVELLE *et al.*, 2002). Les paramètres  $a_0$  et  $x_0$  sont les paramètres consolidés de la distribution des débits de pointe ( $d = 0$ ). Le paramètre  $\Delta$  est équivalent à un temps et renseigne sur la forme des crues. Ce paramètre permet de passer de la distribution exponentielle consolidée des débits de pointe aux distributions de durées  $d$  compatibles avec la dynamique de crue ( $0 \leq d(j) \leq 1,2\Delta$ ). Pour le sous-bassin du Béga à Balint, nous obtenons l'expression suivante (3) :

$$V(d,T) = \frac{39.\ln T + 73.2}{1 + d/5.8} \tag{3}$$



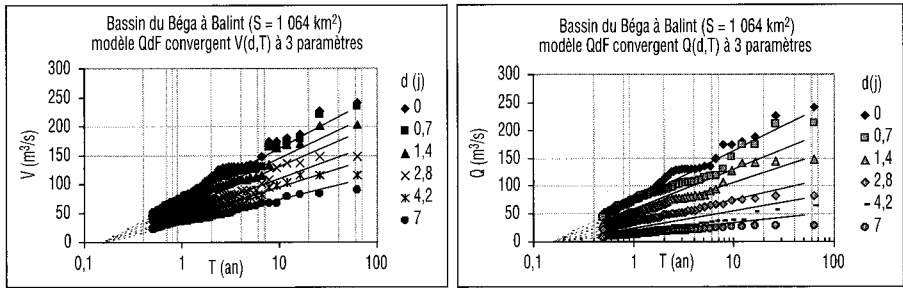
**Figure 8** Vérification de la stationnarité du processus de type Poisson.  
*Control of the stationarity of the Poisson process.*

À ces quantiles de débit moyen (3) peuvent être associés selon (4) des quantiles de débit seuil (5) qui vont permettre de construire des hydrogrammes de projet (GALÉA et PRUDHOMME, 1994 ; JAVELLE, 2001).

$$Q(d,T) = \frac{\partial \cdot (d \cdot V(d,T))}{\partial d} \tag{4}$$

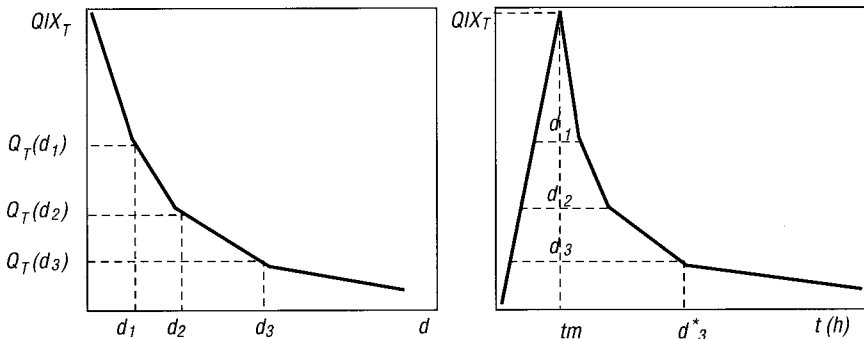
$$Q(d,T) = \frac{39.1 \ln T + 73,2}{(1+d/5,8)^2} \tag{5}$$

La figure 9 permet d'afficher les modélisations QdF correspondantes.



**Figure 9** Modélisation statistique du régime des crues du Bèga à Balint.  
*Statistical modelling of floods regime of Bèga sub-basin at Balint.*

De la relation (5) peuvent être déduits des Hydrogrammes de synthèse MonoFréquence (HSMF) dont le principe de construction est donné ci-après (figure 10). Par définition, ces hydrogrammes sont cohérents avec les volumes observés (3).



**Figure 10** Principe de construction de l'HSMF.  
*Principle of construction of the HSMF.*

- le temps de montée  $tm$  de l'hydrogramme est linéaire,  $tm$  est égal à la durée caractéristique de crue  $D$  du bassin versant ( $tm \leq D$ ) ;
- la courbe de récession correspond aux débits seuils de même occurrence  $Q_T(d_i)$  et dont les abscisses  $d_i^*$  sont obtenues d'après la relation (6).

$$d_i^* = d_i + tm \cdot \frac{Q(d_i, T)}{QIX(T)} \tag{6}$$

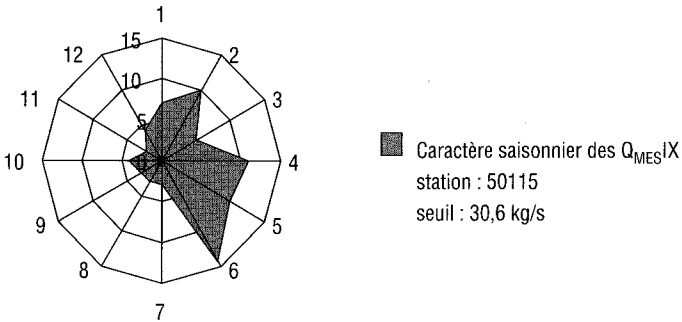
où :

- $d_i^*$  : abscisses des quantiles  $Q(d, T)$  de la courbe de récession de l'HSMF ;
- $d_i$  : durée  $d_i$  du quantile de débit seuil ;
- $tm$  : temps de montée de l'HSMF.

### 4.2 Modélisation $Q_{MES}dF$

La modélisation  $Q_{MES}dF$  relative aux débits solides est analogue à celle des débits liquides présentée au § 4.1.

La visualisation des apports de MES sur l'année (figure 11) permet de retenir la saison bien marquée du mois 1 au mois 6. Cette saison est préférée à celle prise pour les débits (12-6) car elle permet de retenir un échantillon plus homogène, ce qui améliore la stationnarité du processus de Poisson (figure 12).



**Figure 11** Apports des MES sur la saison année.  
Seasonal variability of the suspended sediment load.

Le ratio  $R = 1$  du Processus de Poisson est vérifié pour l'amplitude de l'intervalle de confiance à 90 %.

La loi de distribution choisie pour représenter les échantillons  $V_{MES}d$  est la loi de Pareto. L'expression générale du modèle  $Q_{MES}dF$  en  $V_{MES}d$  est donnée par (7). Les paramètres  $a_0$ ,  $x_0$  et  $k$  sont ajustés par la méthode des moments pondérés (HOSKING et al., 1985).

$$V_{MES}(d, T) = \frac{x_0 + \frac{a_0}{k} \left[ 1 - \frac{1}{(\mu T)^k} \right]}{1 + d/\Delta} \tag{7}$$

où :

- $\mu$  : nombre moyen d'événements retenus par an ;
- $a_0$  : paramètre d'échelle ;
- $x_0$  : paramètre de position ;
- $k$  : coefficient de forme.

On en déduit les expressions (8) et (9) du sous-bassin du Béga à Balint, respectivement pour  $V_{MES}^d$  et  $Q_{MES}^d$ .

$$V_{MES}(d,T) = \frac{33,5 + \frac{15,9}{-0,435} \left[ 1 - \frac{1}{(2T)^{-0,435}} \right]}{1 + d / 3,45} \tag{8}$$

$$Q_{MES}(d,T) = \frac{33,5 + \frac{15,9}{-0,435} \left[ 1 - \frac{1}{(2T)^{-0,435}} \right]}{(1 + d / 3,45)^2} \tag{9}$$

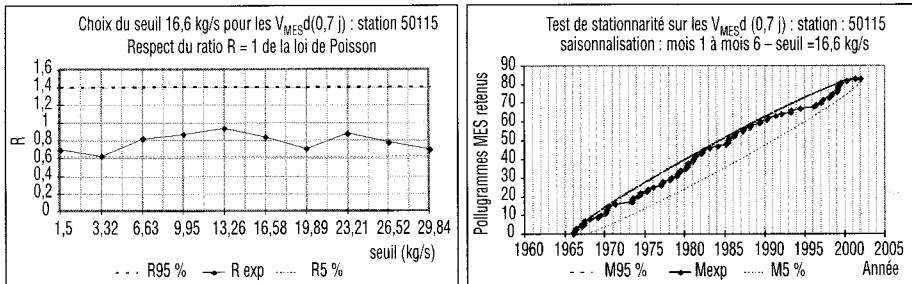
À partir des relations (8) et (9) nous pouvons donner une représentation du régime des apports en fines du Timis-Béga (figure 13).

Les analyses statistiques des régimes liquide (figure 9) et solide (13) montrent que les débits solides de MES ne sont pas simplement proportionnels aux débits liquides mais croissent plus rapidement.

### 4.3 Hydrogrammes de synthèse des apports liquides et solides

À partir des relations (5) et (9) et selon le principe de construction des HSMF (figure 10) nous pouvons donner une représentation des hydrogrammes de synthèse liquide et solide du Timis-Béga à Balint (figure 14).

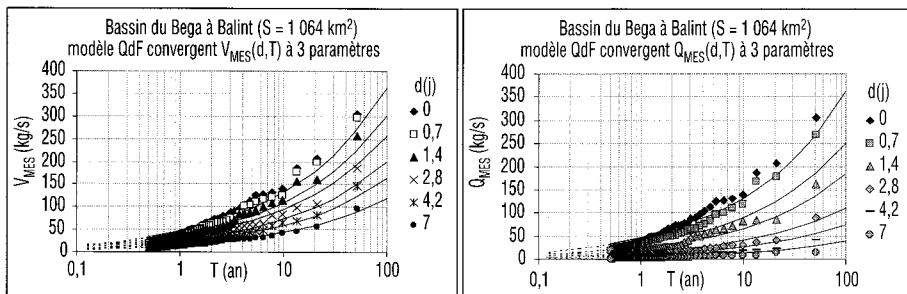
De manière analogue à l'estimation de la durée caractéristique de crue  $D$  (1,43 j) peut être estimée une durée caractéristique  $D_{MES}$  (1,39 j) des pollutogrammes de MES observés. Ces temps caractéristiques équivalents dénotent que la phase directe d'entraînement des fines par l'écoulement est prépondérante. Concernant la durée caractéristique de crue  $\Delta$  (5,80 j) et la durée caractéristique  $\Delta_{MES}$  (3,45 j) des pollutogrammes, la différenciation résulte d'une



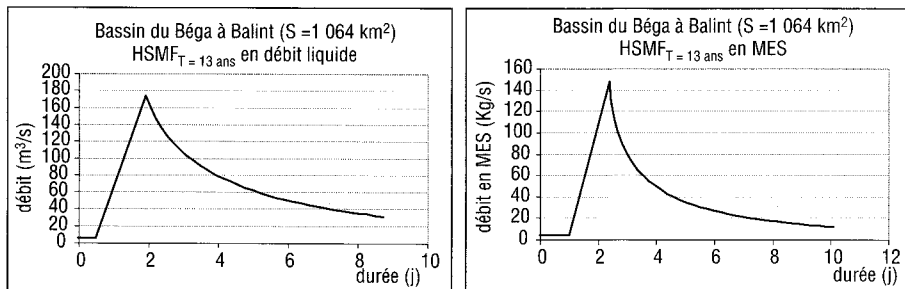
**Figure 12** Stationnarité du processus de Poisson pour  $V_{MES}^d = 0,7 j$ .  
*Stationarity of the Poisson process for  $V_{MES}^d = 0.7 d$ .*

récession plus rapide des pollutogrammes de MES que celle des hydrogrammes de crue.

Il est rare qu'un événement observé (liquide ou solide) soit monofréquence quelle que soit la durée  $d$ . L'HSMF donne simplement une représentation conceptuelle homogène en fréquence des quantiles  $V_{MES}(d, T)$  et  $Q_{MES}(d, T)$  susceptibles de se produire sur le bassin pour une même occurrence  $T$  et différentes durées  $d$ . Autrement dit, il résulte fondamentalement des événements observés et à venir (figure 15).

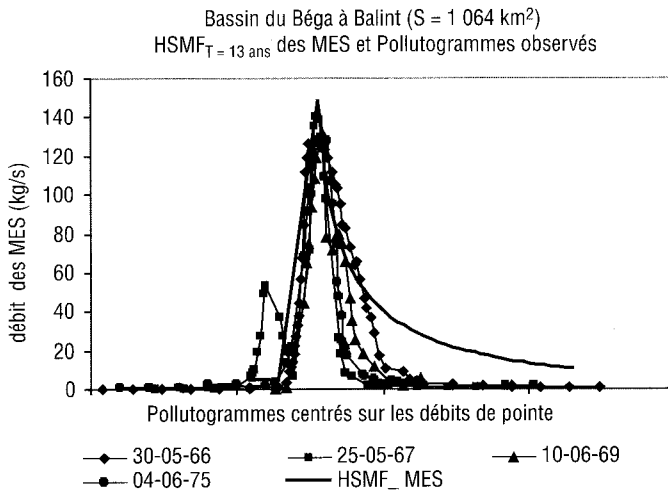


**Figure 13** Modélisation statistique du régime des apports solides en MES.  
*Statistical modelling of the wash load regime (suspended solids).*



**Figure 14** Exemple d'HSMF caractérisant les apports liquides et solides en MES.  
*Example of HSMF characterizing floods regime and MES regime.*





**Figure 15** HSMF<sub>T=13 ans</sub> et pollutogrammes d'occurrence proche en pointe.  
*Comparison HSMF<sub>T=13 years</sub> and observed MES hydrographs of same occurrence at a peak.*

## 5 – CONCLUSION

À partir de l'exemple du sous-bassin du Béga à Balint nous avons montré l'adaptabilité du concept de modélisation QdF, établi sur les débits, à l'analyse statistique des chroniques de fines  $Q_{MES}dF$ . Cette modélisation a un sens, du fait du protocole de mesure des flux de MES proche de celui des débits, et de la prépondérance du transport solide en phase directe. D'un point de vue général, c'est un premier élément de réponse à la demande hydraulique en matière de pollutogrammes locaux, utile pour les géomorphologues et les apports aux grandes retenues. D'un point de vue particulier, c'est un premier test vers la modélisation régionale des apports en MES du bassin hydrographique du Timis-Béga. Cette régionalisation des apports tant liquide que solide est prévue dans le cadre de l'étude de protection de la ville de Timisoara contre les inondations (projet européen RIVERLIFE, 2002).

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BESSENASSE M., KETTAB A., PAQUIER A., RAMEZ P., GALÉA G., 2003. Simulation numérique de la sédimentation dans les retenues de barrages : cas de la retenue de Zardezas, Algérie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 16 (1) : 103-122.
- DIACONU C., 1997. Instructiuni-Pentru statiile si serviciile hidrologice, debite de apa si aluviuni. National Institute of Hydrology and Water Management, Bucuresti 1997.
- DINDAR L., 2003. Analyse comparative de la puissance de tests de détection de ruptures dans des séries chronologiques de débit. DESS SITN (UCLB), UR Hydrologie-Hydraulique, Cemagref, groupement de Lyon, 90 pages.
- GALÉA G. et PRUDHOMME C., 1994. Modèles débit-durée-fréquence et conceptualisation d'un hydrogramme de crue synthétique : validation sur le BVRE de DRAIX - *Hydrologie Continentale*, 9, 2 : 139-151.
- GALÉA G., JAVELLE P., CHAPUT N., 2000. Un modèle débit-durée-fréquence pour caractériser le régime d'étiage d'un bassin versant. *Revue des Sciences de l'eau*, 13(4) : 421-440.
- HOSKING J.R., WALLIS J.R., WOOD E.F., 1985. Estimation of the generalized extreme value distribution by the method of probability-weighted moment. *Technometrics*, 27(3) : 251-261.
- JAVELLE P., GRÉSILLON J.M., GALÉA G., 1999. Modélisation des courbes débit-durée-fréquence en crues et invariance d'échelle. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, Sciences de la terre et des planètes, 329 : 39-44.
- JAVELLE P., GALÉA G., GRÉSILLON, J.-M., 2000. L'approche débit-durée-fréquence, historique et avancées, *Revue des Sciences de l'Eau*, 13(3) : 305-323.
- JAVELLE P., 2001. Caractérisation du régime des crues : le modèle débit-durée-fréquence convergent, approche locale et régionale. Thèse de doctorat INPG (MMGE), UR Hydrologie-Hydraulique, Cemagref, groupement de Lyon, 268 pages.
- JAVELLE P., OUARDA Taha B.M.J., LANG M., BOBÉE B. GALÉA G., GRÉSILLON J.-M., 2002. Development of regional flow-duration-frequency curves based on the index-flood method, *Journal of Hydrology*, 258 : 249-259.
- LANG M., 1995. Les chroniques en hydrologie - modélisation comparée par un système de gestion de bases de données relationnel et orienté-objet. Traitements de base et intervalles de confiance des quantiles de crues. Techniques d'échantillonnage par la méthode du renouvellement. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, Cemagref, Groupement de Lyon, Division Hydrologie-Hydraulique, ministère de l'Équipement, 296 pages.
- LANG M., OUARDA T., BOBÉE B., 1999. Towards operational guidelines for over-threshold modelling. *Journal of Hydrology*, 225 : 103-117.
- LEMAITRE F., 2002. Recensement des tests de détection de tendance ou de rupture adaptés à l'analyse de stationnarité des régimes de crue en France. Cemagref Groupement de Lyon, UR Hydrologie-Hydraulique, ENTPE, travail de fin d'études, 94 pages.
- RAMEZ P., 1995. Érosion et transport solide en rivière : Tome 1 : guide pour la compréhension des phénomènes. Cemagref Dicova, Antony, Série Études : Gestion des milieux aquatiques n° 8 : 130 pages.
- RIVERLIFE 2002. The protection of RIVERLIFE by mitigation of flood damages - RIVERLIFE - Technical interim report, Ref : LIFE99 ENV / RO : 000986 / NIHWM (Bucharest), 230 pages.
- WALLING D.E., 1983. The sediment delivery problem, *Journal of Hydrology*, 65 : 209-237.
- YALIN M.S., 1992. *River Mechanics*, Pergamon Press Ltd, England, 220 pages.