

ANALYSE DIRECTE DES CRUES EN VUE D'UNE MEILLEURE COMPRÉHENSION DE LA RÉPONSE HYDROLOGIQUE DES PETITS BASSINS VERSANTS TORRENTIELS

Benjamin GRAFF ⁽¹⁾, Maurice MEUNIER ⁽²⁾, Jacques LAVABRE ⁽¹⁾ et Didier RICHARD ⁽²⁾

(1) : Cemagref, Le Tholonet, B.P. 31, 13 612 AIX-EN-PROVENCE cedex 01.

Mél : Benjamin.Graff@aix.cemagref.fr .

(2) : Cemagref, Domaine Universitaire, B.P. 76, 38 402 SAINT-MARTIN-D'HÈRES cedex 01.

RÉSUMÉ : L'estimation des débits et des volumes de crues sur les petits bassins versants torrentiels souffre de nombreuses indéterminations. Le manque de données pluie-débit explique cette méconnaissance. À partir de séries de données collectées sur six petits bassins versants torrentiels, nous avons cherché à mieux comprendre les fonctionnements hydrologiques et les réponses en crue de ces bassins versants. Pour cela, nous avons conduit une analyse systématique des couples averse-crue. Une telle analyse permet de dégager les principales caractéristiques hydrologiques des bassins. Quatre phénomènes élémentaires permettent de représenter le déroulement des crues et la réponse hydrologique des bassins. Ces caractéristiques ont pu être incorporées dans un modèle pluie-débit conceptuel et global. Ce modèle est représentatif de la réponse hydrologique des bassins lors des crues. Il pourrait être utile en prédétermination des débits, par exemple en association avec un générateur stochastique de pluie.

MOTS-CLÉS : bassins versants torrentiels, analyse directe des crues, modèle conceptuel pluie-débit.

ABSTRACT : Peak discharge and flood volume estimations on small torrential basins suffer from numerous uncertainties. This misunderstanding is mainly due to a lack of rainfall-runoff data. Using rainfall-runoff data monitored on six small torrential basins, we have tried to better understand their hydrological responses during floods. That is why we have done an analysis of flood events. Such an analysis allows us to point out the main hydrological characteristics of the basins. Four basic phenomena allow us to characterize the hydrological responses of the basins. These characteristics have been used to develop a conceptual rainfall-runoff model. This model is representative of the hydrological response of the basins. In association for example with a stochastic rainfall generator, this modeling tool could be useful for flood predictions.

KEY-WORDS : torrential catchments, flood analysis, conceptual rainfall-runoff model.

I - INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

Contrairement aux grands bassins versants d'une centaine de km², on n'observe pas de lissage des variabilités et des hétérogénéités locales sur les petits bassins versants de 1 à 10 km² (B. AMBROISE, 1999). L'effet de moyenne des processus hydrologiques à l'origine des crues sur les grands bassins diminue sur les petits bassins versants. Les crues des petits bassins versants sont davantage liées à des phénomènes hydrologiques "purs", notamment les crues les plus fortes. De plus, la variabilité des mécanismes à l'origine des fortes crues est généralement faible (J.P. JORDAN, 1994).

Par ailleurs, l'effet de moyenne des processus mélange à l'exutoire des grands bassins versants toutes les réponses disparates des éléments de surface de petite échelle. Ce brouillage empêche la lecture du fonctionnement des grands bassins versants directement à partir des données disponibles (M. KIRKBY, 1993). L'interprétation physique de la réponse hydrologique mesurée à l'exutoire d'un grand bassin versant est donc souvent insatisfaisante. À l'inverse, sur les petits bassins versants, les caractéristiques de la réponse hydrologique sont plus facilement détectables à partir de l'analyse des données et interprétables en fonction de caractéristiques physiques simples.

Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons aux petits bassins versants torrentiels. Ces bassins se situent en montagne et sont caractérisés essentiellement par des surfaces réduites et des pentes moyennes fortes. Les écoulements y sont fréquemment constitués d'un mélange d'eau et de sédiments (R. WEINGARTNER *et al.*, 2003).

La rareté des informations disponibles sur ces bassins versants est à l'origine d'une méconnaissance de leurs fonctionnements hydrologiques. Cette rareté s'explique par la difficulté d'effectuer des mesures sur le terrain, particulièrement sur des zones situées en altitude (J. BANDYOPADHYAY *et al.*, 1997 ; M. SPREAFICO, 2002). Cependant les enjeux humains et matériels justifient qu'on s'intéresse aux crues soudaines et brutales des petits bassins versants torrentiels (I. BRAUD *et al.*, 1999 ; M. JACOB et P. JORDAN, 2001).

Nous nous proposons donc ici d'identifier le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants torrentiels au moyen d'une analyse directe des hydrogrammes de crue. Cette analyse a été réalisée sur six petits bassins versants suisses et français. Nous présenterons la méthodologie utilisée et les résultats obtenus. Parmi eux, on notera la mise en place d'un modèle pluie-débit conceptuel simple qui pourrait

être utilisé en prédétermination des débits de crue, notamment en association avec un générateur stochastique de pluie.

II - CONTEXTE HYDROLOGIQUE DES PETITS BASSINS VERSANTS TORRENTIELS

1) Données pluie-débit

Notre échantillon de petits bassins versants torrentiels est réduit (Tab. I). Il présente néanmoins des situations hydrologiques contrastées, avec des bassins versants sub-méditerranéens (D. RICHARD et N. MATHYS, 1999), alpins (D. RICKERMANN, 1997) et tropicaux (J. GUISCAFRE *et al.*, 1975 ; M. MEUNIER, 1999).

Ces six bassins versants sont instrumentés et suivis depuis plusieurs années. Nous disposons de chroniques de pluie et de débit d'une durée comprise entre 10 et 15 ans. Dans le cadre de cette étude, seules sont retenues les vingt plus fortes crues de chaque bassin. Elles seront analysées au pas de temps de 10 minutes, qui est le plus petit pas de temps commun aux six séries de données pluie-débit.

Tableau I - Principales caractéristiques des bassins versants étudiés.

Site	Bassins	Surface (km ²)	Géologie	Surfaces couvertes de forêt (%)	Indice de compacité de GRAVELIUS	Gestionnaire
Draix (France)	Laval	0,86	Marnes noires	23	1,25	Cemagref, Grenoble
	Brusquet	1,08		87	1,17	
Vallée de l'Alptal (Suisse)	Erlenbach	0,64	Flysch	39	1,72	WSL, Birmensdorf
	Lumpenbach	0,93		19	1,39	
Martinique (Antilles françaises)	Alma	4,31	Bedrock volcanique	Forêt, broussailles et plantations de bananes	1,14	DIREN, Martinique
	Lézarde	12,99			1,15	

2) Principales caractéristiques hydrologiques des bassins versants

Le bassin versant du Laval est caractérisé par des sols peu développés et dénudés à 80 % environ. Les crues les plus fortes sont surtout provoquées par les orages brefs et intenses de fin d'été. Le bassin du Laval est le seul des bassins de notre échantillon à posséder un fonctionnement presque exclusivement hortonien lors des crues extrêmes (D. RICHARD et N. MATHYS,

1999). Ce type de fonctionnement se retrouve plus généralement sur les petits bassins versants dénudés en zone de badlands lors des crues les plus fortes (F. GALLART *et al.*, 1997).

Le bassin versant voisin du Brusquet est végétalisé à près de 90 %. Il possède un fonctionnement hydrologique plus complexe que le Laval. En effet, on y enregistre des crues liées à plusieurs types de pluie :

- Des orages brefs et intenses.

- Une succession d'averses de plus en plus intenses, la première contribuant à la saturation progressive du bassin (N. MATHYS *et al.*, 1999).
- Des pluies longues et saturantes au cours desquelles une averse plus intense est enregistrée. Cela correspond à des pluies d'environ 100 mm en 48 heures.

La différence essentielle entre les bassins du Laval et du Brusquet vient du pourcentage de couverture végétale. Ces deux bassins sont par ailleurs assez similaires. La couverture végétale explique que les débits de pointe de crue entre les deux bassins évoluent dans un rapport de 1 à 5 et les volumes écoulés en crue dans un rapport de 1 à 2 (C. COSANDEY *et al.*, 2002).

Les principales crues des bassins de la vallée de l'Alptal sont enregistrées lors d'orages estivaux de début d'été, d'environ 30 à 40 mm en une heure. Les sols de ces bassins sont épais. Les crues ont lieu lorsque le bassin est déjà partiellement saturé par la fonte des neiges ou par les pluies antérieures. Les montées de crues sont rapides et les décrues soutenues. Les apports à l'écoulement en décrue représentent une part importante de la lame écoulee totale. Le WSL de Birmensdorf, gestionnaire du bassin, indique des proportions de zones humides de 60 % sur l'Erlenbach et de 25 % sur le Lumpenenbach. Le pourcentage de zones humides est la caractéristique principale permettant de distinguer les deux bassins versants.

Enfin, les sols volcaniques de la Martinique étant épais et filtrants, la rétention est forte et les débits sont soutenus durant les périodes sèches. Les plus fortes crues des bassins martiniquais sont dues à de forts abat-pluvieux d'environ 100 mm en une à deux heures, pour des pluies antérieures avoisinant ou dépassant 300 mm en 15 jours. Ces fortes pluies sont enregistrées durant la saison d'hivernage, de juin à novembre (J. GUISCAFRE *et al.*, 1975). La surface est cette fois le paramètre qui permet de distinguer les deux bassins versants de l'Alma et de la Lézarde.

Notre échantillon de bassins est donc constitué de trois groupes de deux bassins versants. Les deux bassins versants de chaque paire sont voisins et présentent des caractéristiques physiques et climatiques similaires. Au sein de chaque groupe, seule une caractéristique physique diffère significativement entre les deux

bassins et permet de les distinguer : la couverture végétale à Draix ; le pourcentage de zones humides dans la Vallée de l'Alptal ; la superficie du bassin à la Martinique. Entre les groupes de bassins, les caractéristiques climatologiques, géologiques et pédologiques sont très contrastées.

III - MÉTHODOLOGIE

1) Principe de l'analyse directe des crues

Les écoulements des petits bassins versants torrentiels sont caractérisés par des seuils de déclenchement aussi bien en intensité de pluie qu'en cumul. Le seuil fonction de l'intensité de la pluie détermine la vitesse de la réponse du bassin (R. WEINGARTNER *et al.*, 2003) ; le seuil fonction du cumul de pluie détermine le début de l'écoulement (A.L. BORGES, 1993). Ces seuils varient d'un bassin versant à l'autre en fonction de caractéristiques physiques propres à chaque bassin. D'une crue à l'autre, ils sont fonction des caractéristiques de la pluie et de l'état de saturation initial du bassin (C. COSANDEY, 1999).

Lorsque l'écoulement démarre, la réponse du bassin aux pluies intenses est rapide et pointue. La dynamique des crues des petits bassins versants torrentiels est également marquée par des décalages temporels courts entre la pluie et le débit (B. GRAFF *et al.*, 2004).

En ce qui concerne la nature des écoulements, trois contributions principales à l'écoulement sont généralement observées : un écoulement de base, un écoulement lent et retardé par rapport à la pluie et un écoulement rapide (S. HOEG *et al.*, 2000 ; M.R. PUTTY et R. PRASAD, 2000 ; F. NAEF *et al.*, 2002 ; S. SCHERRER et F. NAEF, 2003). Les auteurs interprètent souvent l'écoulement lent comme un écoulement hypodermique et l'écoulement rapide comme un écoulement sur surfaces saturées ou comme un écoulement hortonien.

Sur un petit bassin versant de caractéristiques physiques assez homogènes, on peut penser que le ou les processus hydrologiques principaux de la formation du ruissellement sont suffisamment dominants pour qu'ils soient reconnaissables sur les enregistrements de débits. Notre approche consiste donc à pratiquer une reconnaissance des mécanismes de la formation

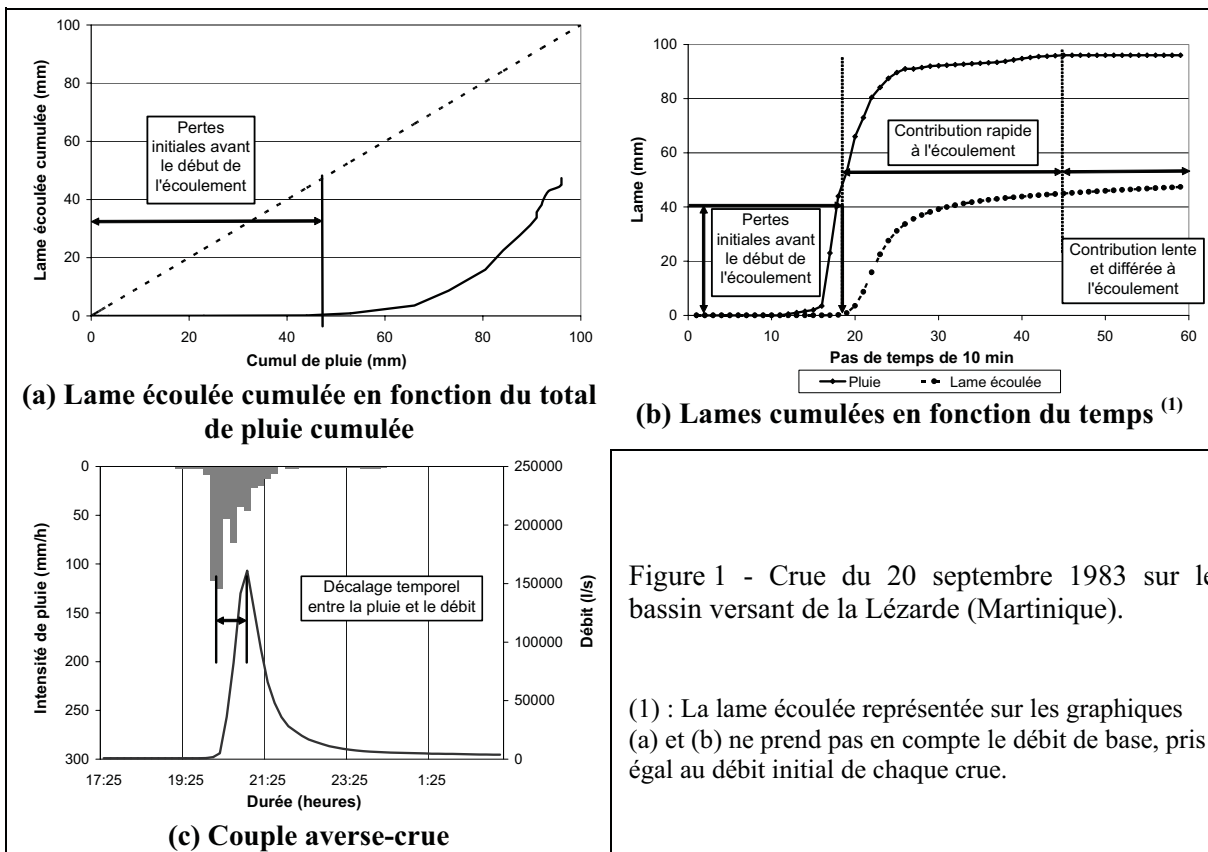
des crues par une lecture des couples averse-crue. Cette phase de reconnaissance des mécanismes constitue l'analyse directe des crues (Fig. 1).

L'analyse directe des crues s'appuie sur trois graphiques. Sur chacun des graphiques, on reconnaît les mécanismes hydrologiques du déroulement de la crue. À partir de l'analyse des graphiques, on quantifie les phénomènes explicatifs qui permettent de tenir compte de ces mécanismes :

- Évolution du volume écoulé total en fonction du cumul de pluie [Fig. 1(a)] : l'écoulement ne démarre pas avec la pluie. Il faut un phénomène explicatif pour en rendre compte. Il s'agit des pertes initiales. Ces pertes initiales sont estimées en identifiant le début de l'écoulement sur le graphique (a).

- Évolution comparée des cumuls de pluie et du volume écoulé en fonction du temps [Fig. 1(b)] : une fois que l'écoulement a démarré, la lame écoulée et le cumul de pluie sont proportionnels. La pente des débits est inférieure à celle des pluies. Un coefficient d'écoulement permet de les relier. Lorsque la pluie s'arrête, la lame écoulée augmente encore. Il faut en effet tenir compte d'un apport à l'écoulement total sous la forme d'un écoulement différé dans le temps.

- Hyétochrome et hydrogramme de la crue [Fig. 1(c)] : ils permettent d'apprécier la structure fine de la pluie et la réponse du bassin en fonction du temps. À partir du graphique (c), on observe et on quantifie le décalage temporel entre la pluie et le débit.



2) Les phénomènes élémentaires

Les caractéristiques des écoulements peuvent être traduites sous la forme d'hypothèses de fonctionnement des bassins versants. Ces hypothèses de fonctionnement seront appelées phénomènes élémentaires. Les phénomènes élémentaires considérés sont indépendants :

- Pour représenter la contribution rapide aux écoulements : un ruissellement direct plus ou moins proportionnel aux pluies. On le traduit par un coefficient d'écoulement constant, noté X_1 (Fig. 2).

- Pour représenter le seuil de déclenchement de l'écoulement : des pertes initiales avant le début

de l'écoulement. Une fois les pertes initiales satisfaites, toute la pluie s'écoule. On traduit les

pertes initiales par un phénomène élémentaire noté X2 (Fig. 3).

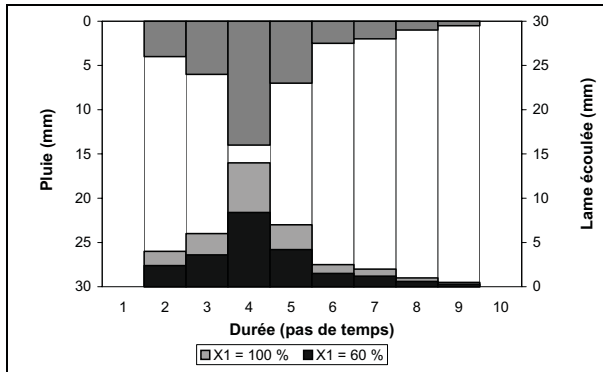


Figure 2 - Coefficient d'écoulement constant (phénomène élémentaire X1).

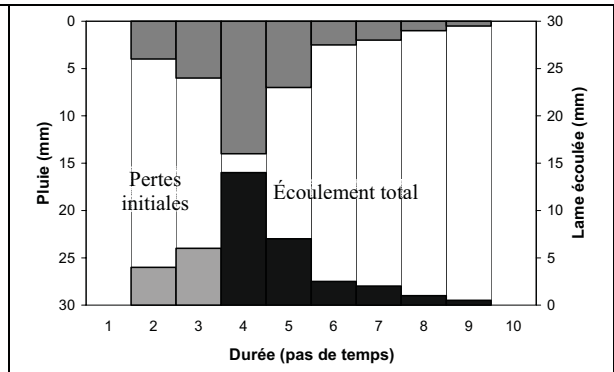


Figure 3 - Pertes initiales (phénomène élémentaire X2).

- Pour représenter la contribution lente aux débits : un écoulement différé dans le temps. On traduit cet écoulement par la vidange linéaire d'un réservoir. Le paramètre de la vidange du réservoir est noté X3. Ce réservoir collecte toute la pluie ne participant pas à l'écoulement rapide (y compris les éventuelles pertes initiales). Au début de l'épisode pluvieux, le réservoir est vide. L'équation de bilan du réservoir peut s'exprimer de la façon suivante (C. MICHEL *et al.*, 2003) :

$$S_i = (1 - X3) \times S_{i-1} + (1 - X1) \times P_i$$

où S_i (mm) est le niveau du réservoir et P_i (mm) la pluie brute du pas de temps i .

- Pour tenir compte de la dynamique des crues : un transfert de la pluie nette dans le bassin versant. Pour les petits bassins versants possédant des réponses rapides et intenses, il

n'est pas indispensable d'utiliser une fonction de transfert très élaborée. La fonction de production joue un rôle très important dans ce cas (P. RIBSTEIN, 1992). Nous choisissons donc de traduire le transfert sous la forme d'un hydrogramme unitaire (HU) symétrique défini uniquement par son temps de montée. Le temps de montée de l'HU est noté X4. L'HU retenu est celui proposé par EDIJATNO et C. MICHEL (1989) dans le modèle conceptuel global GR3H (Fig. 4). L'expression analytique du HU est la suivante :

$$\text{pour } 0 \leq t \leq X4, \quad q(t) = \frac{3 \cdot t^2}{2 \cdot X4^3}$$

$$\text{pour } X4 < t \leq 2 \cdot X4, \quad q(t) = \frac{3(2 \cdot X4 - t)^2}{2 \cdot X4^3}$$

$$\text{pour } t > 2 \cdot X4, \quad q(t) = 0$$

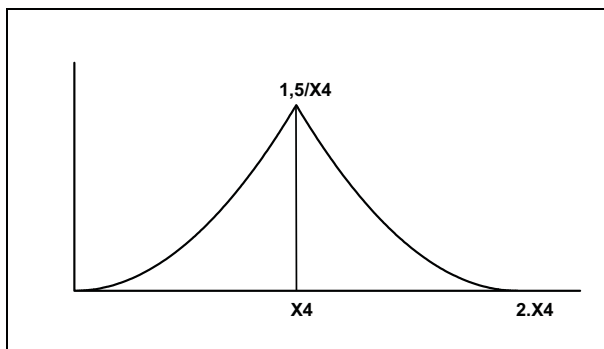


Figure 4 - Hydrogramme unitaire.

D'autres choix seraient possibles pour traduire les phénomènes élémentaires de la réponse hydrologique des petits bassins versants

torrentiels sous la forme de modèles théoriques. Les choix que nous avons faits sont volontairement simples.

3) Critères de qualité utilisés

Par rapport à notre objectif de compréhension de la réponse hydrologique des petits bassins versants torrentiels lors des crues, nous cherchons en premier lieu à reproduire le volume de la crue et le débit de pointe. Par conséquent, pour définir l'intérêt de tenir compte d'un phénomène élémentaire, nous utilisons dans un premier temps les critères simples suivants :

$$\text{Pointe} = 100 \times \frac{QX_{\text{cal}}}{QX_{\text{obs}}}$$

$$\text{Volume} = 100 \times \frac{\overline{Q}_{\text{cal}}}{\overline{Q}_{\text{obs}}}$$

Ces deux critères permettent de comparer les débits de pointe (QX) ainsi que les débits moyens (\overline{Q}), observés et calculés.

Ensuite, pour estimer la qualité de la reproduction temporelle d'un couple averse-crue, nous avons utilisé le critère de NASH, mesurant la part de la variance des mesures expliquée par un modèle :

$$\text{Nash}(\%) = 100 \times \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}}(i) - Q_{\text{cal}}(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}}(i) - \overline{Q}_{\text{cal}})^2} \right)$$

où $Q_{\text{obs}}(i)$, $Q_{\text{cal}}(i)$ et n représentent respectivement les débits observés et calculés à l'instant i , ainsi que le nombre de pas de temps de la crue observée.

Ces trois critères tendent vers 100 % pour une adéquation parfaite entre la crue observée et la crue calculée. Des valeurs comprises entre 80 et 120 % pour Pointe et Volume ou entre 80 et 100 % pour NASH seront considérées comme étant représentatives d'une qualité acceptable.

IV - ANALYSE DIRECTE DES COUPLES AVERSE-CRUE

Plusieurs étapes successives permettent d'identifier le nombre de phénomènes élémentaires capable de représenter le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants torrentiels.

1) Étape n° 1 : un phénomène élémentaire

Dans certains cas, le fonctionnement hydrologique peut être représenté par un seul phénomène élémentaire. L'interprétation est alors très simple. Les deux premiers phénomènes sont :

- Des pertes initiales puis tout s'écoule : pour la crue du 20 septembre 1983 sur la Lézarde, les pertes initiales sont évaluées à 50 mm [Fig. 5(a)]. Les critères de Volume et de Pointe valent respectivement 92,5 % et 186 %.
- Un coefficient d'écoulement constant tout au long de la crue sans pertes initiales : le coefficient d'écoulement est évalué de telle manière que le critère de Volume soit égal à 100 %. Pour la crue de la figure 5(b), le coefficient d'écoulement vaut 52 %. Les critères de Volume et de Pointe valent respectivement 100 % et 156,3 %.

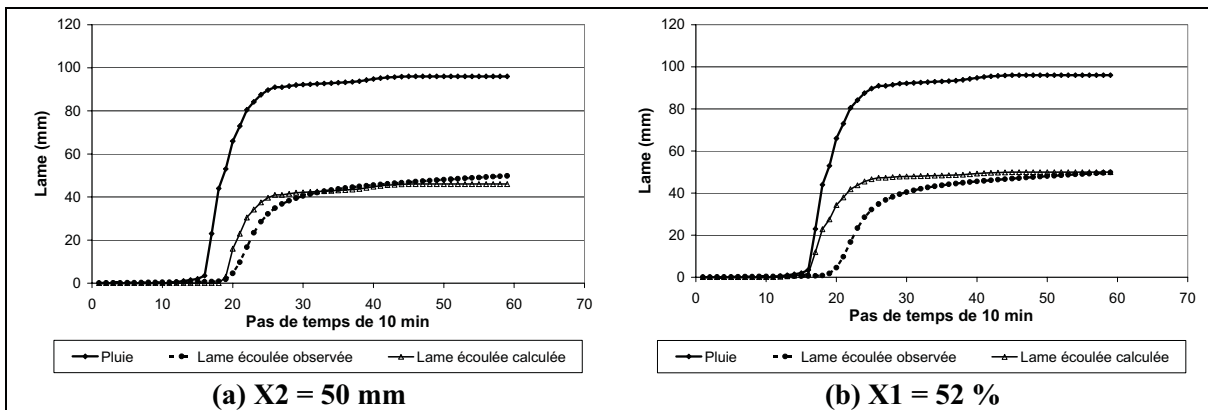


Figure 5 - Crue du 20 septembre 1983 sur le bassin de la Lézarde reconstituée avec un seul phénomène élémentaire.

De ces deux façons, le volume écoulé est estimé correctement mais le débit de pointe est surestimé. Au tableau II, on met en évidence que sur ce bassin et, plus généralement, sur les cinq autres bassins, l'utilisation d'un phénomène élémentaire ne fournit des résultats satisfaisants simultanément suivant les critères de Pointe et de

Volume que dans de très rares cas, sauf avec X1 sur les bassins versants du Laval (9 crues sur 20) et de l'Alma (15 crues sur 20). On constate également que l'utilisation d'un coefficient d'écoulement constant donne de meilleurs résultats que l'utilisation de pertes initiales, notamment sur le bassin de l'Alma.

Tableau II - Reconstitution des crues avec un phénomène élémentaire.

Site	Bassins	Nombre de crues où un phénomène élémentaire est insuffisant	
		X1	X2
Draix (France)	Laval	11/20	14/20
	Brusquet	16/20	20/20
Vallée de l'Alptal (Suisse)	Erlenbach	18/20	20/20
	Lumpenenbach	20/20	20/20
Martinique	Alma	5/20	19/20
	Lézarde	15/20	19/20

Un phénomène élémentaire est considéré comme étant insuffisant pour reconstituer une crue, dès lors que l'un des critères de Pointe et de Volume ou bien les deux ne sont pas de bonne qualité.

De manière générale, il faut donc interpréter avec au minimum deux phénomènes élémentaires la réponse hydrologique des petits bassins versants torrentiels.

2) Étape n° 2 : deux phénomènes élémentaires

À cette étape, on considère des pertes initiales associées à un coefficient d'écoulement constant. Dans le cas de la crue du 8 septembre 1994 sur le Laval, les pertes initiales sont

estimées à 12,5 mm par lecture de la figure 6(a). Une fois que ces pertes initiales sont satisfaites, on écoule sans transfert une quantité de pluie, égale au volume total de pluie moins les pertes initiales, que multiplie un coefficient d'écoulement constant. Le coefficient d'écoulement est évalué de telle manière que le critère de Volume soit égal à 100 %. Dans le cas de la crue de la figure 6(b), le coefficient d'écoulement vaut 65,3 %.

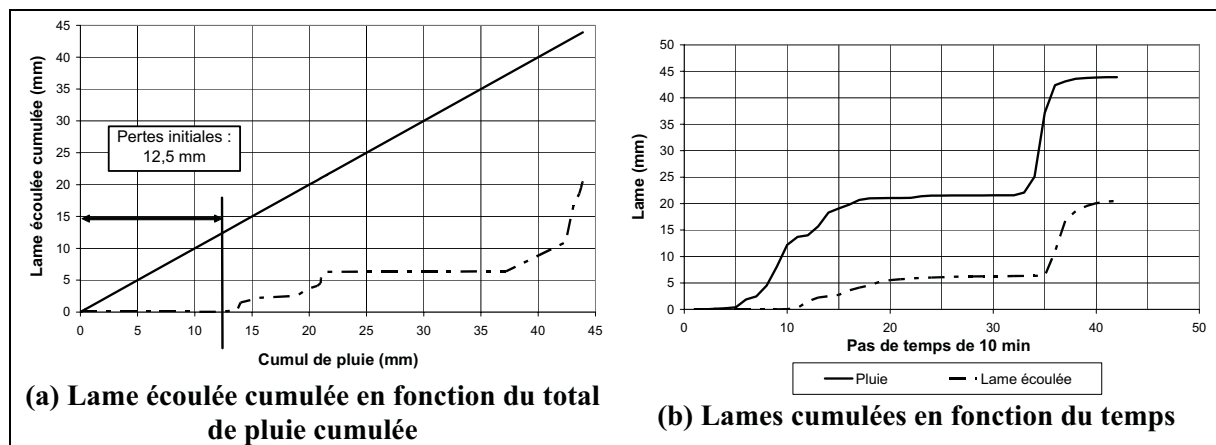


Figure 6 - Lecture des deux phénomènes élémentaires.

La figure 7(a) montre qu'à un décalage temporel près (environ deux pas de temps, soit vingt minutes), le déroulement de l'événement est

parfaitement reproduit avec deux phénomènes élémentaires. En revanche, nous enregistrons une nette surestimation de la lame écoulée maximale.

Le critère de Pointe vaut environ 137 %.

En conservant la valeur des pertes initiales, il faudrait diminuer le coefficient d'écoulement pour estimer plus précisément le débit de pointe. Dans ces conditions, la qualité de l'estimation du

volume écoulé serait moins bonne. Nous pouvons également diminuer les valeurs des pertes initiales et du coefficient d'écoulement constant afin de tendre vers des valeurs des critères de Volume et de Pointe proches de 100 % (figure 7(b)).

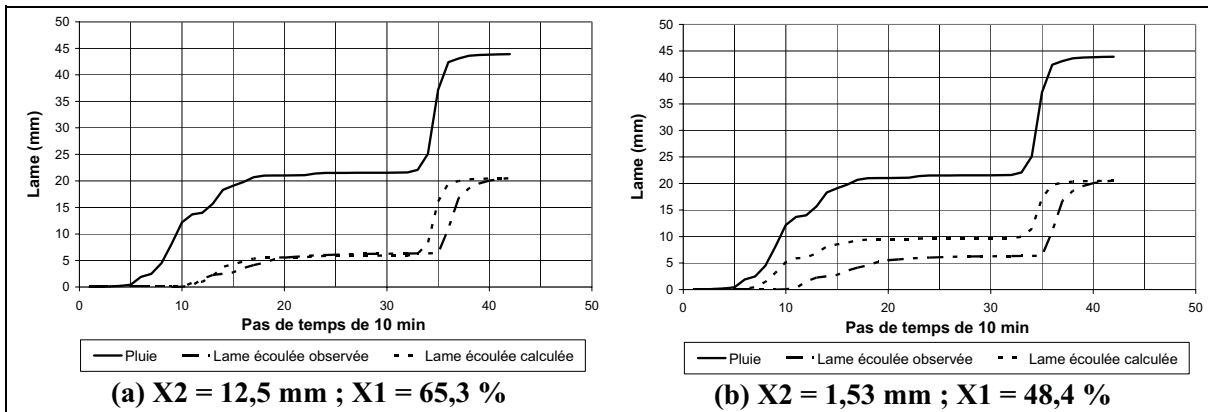


Figure 7 - Reconstitution de la crue du 8 septembre 1994 enregistrée sur le bassin du Laval au moyen de deux phénomènes élémentaires.

L'évolution des critères de Pointe et de Volume en fonction des valeurs prises par $X1$ et $X2$ est donnée dans le tableau III. On a représenté sur fond gris les valeurs des critères compris entre 80 et 120 %, avec des caractères blancs sur fond gris foncé dans les cas où les deux critères sont simultanément de bonne qualité. L'analyse des résultats de ce tableau met en évidence que :

- À $X1$ fixé, le critère de Pointe ne change pas quand $X2$ augmente. $X1$ sert surtout à reconstituer le débit de pointe lorsqu'on cherche à obtenir les meilleures valeurs des deux critères simultanément.
- Lorsque $X1$ augmente, il faut diminuer les pertes initiales pour obtenir un critère de Volume de bonne qualité.

Si au lieu de lire les valeurs des phénomènes élémentaires sur les crues, on change d'objectif en décidant de reconstituer au mieux les critères de Pointe et de Volume, alors on déduit du tableau III qu'il existe un couple ($X1$, $X2$) pour lequel les deux critères prennent des valeurs voisines de 100 %. Pour cela, $X1$ doit être compris entre 45 et 50 % ; $X2$ doit être compris entre 0 et 2,5 mm. Les valeurs optimales de $X1$ et de $X2$ sont respectivement 48,4 % et 1,53 mm. Le critère de Pointe vaut alors 99,9 % tandis que le critère de Volume vaut 101,4 %.

La crue calculée avec $X1 = 48,4 \%$ et $X2 =$

1,53 mm est présentée à la figure 7(b). La reconstitution du déroulement de l'événement est de moins bonne qualité qu'à la figure 7(a). En outre, ce ne sont plus les valeurs lues directement sur les courbes qui sont utilisées. Néanmoins, avec seulement deux phénomènes élémentaires, le débit de pointe et le volume écoulé sont estimés parfaitement tout en conservant l'allure générale de la crue en fonction du temps.

Si on cherche à obtenir simultanément des valeurs acceptables pour les critères de Volume et de Pointe, deux phénomènes élémentaires suffisent pour 75 % des crues du bassin du Laval. Ces deux phénomènes élémentaires conduisent à des sous estimations du volume écoulé pour plus de 75 % des crues sur les cinq autres bassins versants (Tab. IV). Pour le bassin versant de l'Alma, les résultats obtenus sont identiques à ceux du Laval.

Si on compare les résultats obtenus avec deux phénomènes élémentaires à ceux obtenus uniquement avec un coefficient d'écoulement constant, il n'y a que sur le bassin du Laval que les résultats sont significativement améliorés entre les étapes 1 et 2 (Tab. II et Tab. IV). Sur le bassin de l'Alma, les résultats sont identiques entre les deux étapes. Sur les autres bassins, des apports supplémentaires à l'écoulement total sont nécessaires.

Tableau III - Évolution des critères de Pointe et de Volume en fonction des valeurs de X1 et X2 pour la crue du 8 septembre 1994 sur le Laval.

(a) Critère de Pointe (%)												
		X2 (mm)										
		0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	25	30
X1 (mm)	10	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
	20	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0	42,0
	30	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8
	40	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8	83,8
	45	94,3	94,3	94,3	94,3	94,3	94,3	94,3	94,3	94,3	94,3	94,3
	50	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7	104,7
	55	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2	115,2
	60	125,7	125,7	125,7	125,7	125,7	125,7	125,7	125,7	125,7	125,7	125,7
	70	146,6	146,6	146,6	146,6	146,6	146,6	146,6	146,6	146,6	146,6	146,6
	80	167,6	167,6	167,6	167,6	167,6	167,6	167,6	167,6	167,6	167,6	99,6
	90	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5	188,5	112,0
	100	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	209,5	124,5

(b) Critère de Volume (%)												
		X2 (mm)										
		0	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	25	30
X1 (mm)	10	21,4	21,0	19,0	17,7	16,5	15,3	14,1	12,9	11,6	9,2	6,8
	20	42,8	42,0	37,9	35,5	33,0	30,6	28,2	25,7	23,3	18,4	13,5
	30	64,2	62,8	56,9	53,2	49,6	45,9	42,2	38,6	34,9	27,6	20,3
	40	85,6	83,8	75,8	71,0	66,1	61,2	56,3	51,5	46,6	36,8	27,1
	45	96,3	94,3	85,3	79,8	74,3	68,9	63,4	57,9	52,4	41,4	30,5
	50	107,0	100,9	94,8	88,7	82,6	76,5	70,4	64,3	58,2	46,0	33,9
	55	117,7	111,0	104,3	97,6	90,9	84,2	77,5	70,8	64,1	50,7	37,3
	60	128,4	121,0	113,7	106,4	99,1	91,8	84,5	77,2	69,9	55,3	40,6
	70	149,7	141,2	132,7	124,2	115,6	107,1	98,6	90,1	81,5	64,5	47,4
	80	171,1	161,4	151,6	141,9	132,2	122,4	112,7	102,9	93,2	73,7	54,2
	90	192,5	181,6	170,6	159,6	148,7	137,7	126,7	115,8	104,8	82,9	61,0
	100	213,9	201,7	189,6	177,4	165,2	153,0	140,8	128,6	116,5	92,1	67,7

Tableau IV - Reconstitution des crues avec deux phénomènes élémentaires.

Site	Bassins	Nombre de crues où deux phénomènes élémentaires sont insuffisants (X1 et X2)
Draix (France)	Laval	5/20
	Brusquet	15/20
Vallée de l'Alptal (Suisse)	Erlenbach	18/20
	Lumpenenbach	20/20
Martinique	Alma	5/20
	Lézarde	15/20

Deux phénomènes élémentaires sont considérés comme étant insuffisants pour reconstituer une crue, dès lors que l'un des critères de Pointe et de Volume ou bien les deux ne sont pas de bonne qualité.

3) Étape n° 3 : trois phénomènes élémentaires

Pour la crue du 8 juillet 1987 sur le bassin de Lumpenenbach, les pertes initiales sont évaluées à 20 mm et le coefficient d'écoulement, une fois que les pertes initiales sont satisfaites, à

82,5 %. Avec deux phénomènes élémentaires, il est possible de modéliser le volume et d'obtenir un critère de Volume de 100 %. Cela conduit à une surestimation de plus de 500 % de la lame écoulee maximale en 10 minutes. Pour modéliser la lame écoulee maximale, avec un critère de

Pointe de 100 %, il faut prendre un coefficient d'écoulement de 15,5 %. Le volume modélisé ne

représente alors que 18,8 % du volume écoulé observé (Tab. V et Fig. 8).

Tableau V - Comparaison des résultats obtenus avec deux et trois phénomènes élémentaires pour la crue du 8 juillet 1987 sur le bassin de Lumpenenbach.

	X1 et X2		X1, X2 et X3
Pertes initiales (mm)	20	20	20
Coefficient d'écoulement (%)	82,5	15,5	15,5
Paramètre de vidange	-	-	2,75
Pointe (%)	533	100,1	100,5
Volume (%)	100,1	18,8	101,3

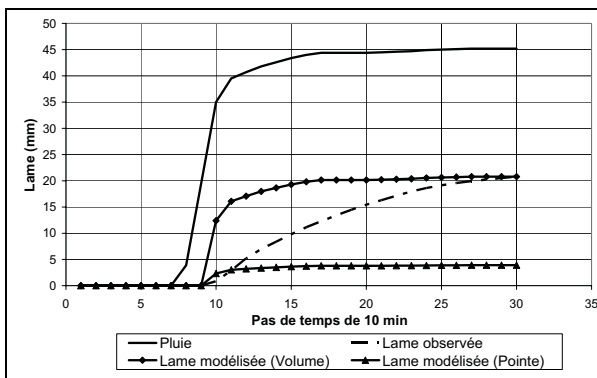


Figure 8 - Reconstitution de la crue du 8 juillet 1987 sur le bassin de Lumpenenbach avec deux phénomènes élémentaires.

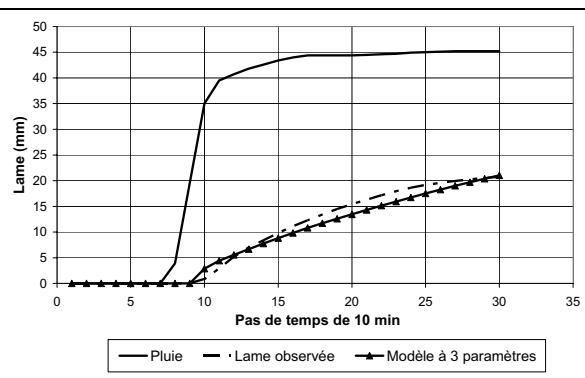


Figure 9 - Reconstitution de la crue du 8 juillet 1987 sur le bassin de Lumpenenbach avec trois phénomènes élémentaires.

Compte tenu de ces observations, nous ajoutons un troisième phénomène élémentaire par rapport à l'étape n°2. Ce phénomène élémentaire représente une contribution lente à l'écoulement. L'objectif est d'améliorer la reconstitution simultanée du volume écoulé et du débit de pointe observé. Outre des pertes initiales et un coefficient d'écoulement constant, nous utilisons maintenant le réservoir présenté au paragraphe III-2.

L'ajout des apports par vidange du réservoir améliore de manière significative la reconstitution de la crue (Tab. V et Fig. 9). Le critère de Pointe atteint alors 100,5 % et le critère de Volume 101,3 %. Les valeurs des pertes initiales restent égales à 20 mm et le coefficient d'écoulement est fixé à 15,5 %. En revanche, le troisième paramètre vaut 2,75 %. Il est obtenu en recherchant les meilleures valeurs de Pointe et de Volume. Une fois que les pertes initiales sont satisfaites, en plus des apports liés au coefficient d'écoulement, on vidange à chaque pas de temps le réservoir de 2,75 % de son contenu.

Sur tous les bassins versants, trois phénomènes élémentaires permettent d'obtenir des valeurs acceptables des critères de Volume et de Pointe dans 100 % des cas. Parfois, la forme de l'hydrogramme est décalée par rapport à l'hydrogramme observé. On peut en déduire la nécessité d'ajouter un quatrième phénomène élémentaire pour tenir compte du transfert dans le bassin versant. Néanmoins, si l'objectif ne concerne que l'obtention de valeurs acceptables des critères de Pointe et de Volume, trois phénomènes élémentaires suffisent.

4) Étape n° 4 : quatre phénomènes élémentaires

À cette étape, nous nous intéressons à la reconstitution des hydrogrammes de crue en fonction du temps. Avec trois phénomènes élémentaires dans le cas de la crue du 8 juillet 1987 sur le Lumpenenbach, on obtient l'hydrogramme calculé de la figure 10. L'allure générale de la crue est conservée. Cependant la montée de crue calculée est brutale ; le débit de pointe

calculé est en avance de deux pas de temps par rapport au débit de pointe observé ; le volume autour du débit de pointe calculé est plus faible que le volume autour du débit de pointe observé.

a . Hypothèse d'un simple décalage temporel entre la pluie et le débit

Avec un décalage temporel, on ne tiendra pas compte du volume écoulé autour de la pointe de débit. Un décalage temporel ne suffit donc pas à reconstituer une crue similaire à la crue

observée. Plus généralement, un décalage temporel ne suffit pas à reconstituer une crue calculée similaire à la crue observée dans 50 % des cas sur le bassin du Lumpenenbach (Tab. VI).

De la même manière que sur le bassin du Lumpenenbach, on constate qu'un décalage temporel ne permet d'obtenir une crue calculée similaire à la crue observée que dans 25 à 50 % des cas sur les autres bassins versants (Tab. VI). Sur le bassin du Laval, un décalage de deux pas de temps convient dans 95 % des cas (Fig. 11).

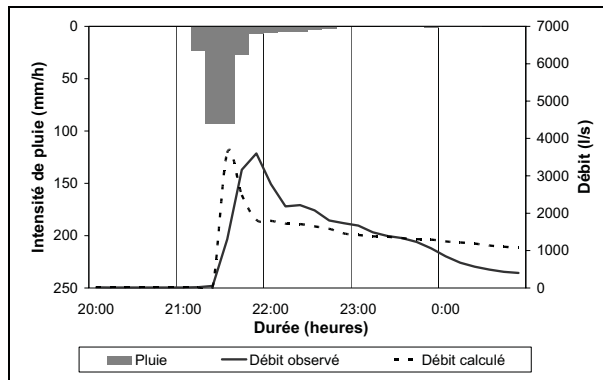


Figure 10 - Reconstitution de la crue du 8 juillet 1987 sur le bassin du Lumpenenbach avec trois phénomènes élémentaires.

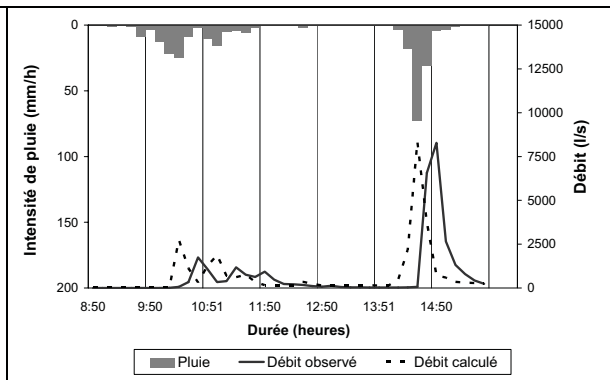


Figure 11 - Reconstitution de la crue du 8 septembre 1994 sur le bassin du Laval avec trois phénomènes élémentaires.

Tableau VI - Reconstitution temporelle des crues avec trois phénomènes élémentaires.

Site	Bassins	Nombre de crues où un décalage temporel est insuffisant
Draix (France)	Laval	1/20
	Brusquet	16/20
Vallée de l'Alptal (Suisse)	Erlenbach	14/20
	Lumpenenbach	10/20
Martinique	Alma	8/20
	Lézarde	9/20

Ces résultats indiquent que pour reconstituer le déroulement des crues des petits bassins versants torrentiels en fonction du temps, il faut envisager, dans 50 à 75 % des cas, un transfert plus élaboré qu'un décalage temporel de plusieurs pas de temps. Dans ces conditions, ce ne sont plus seulement les critères de Volume et de Pointe qui sont pris en compte, mais aussi le critère de NASH.

b . Utilisation d'un hydrogramme unitaire (HU)

Une fonction de transfert permet de décaler et de répartir dans le temps la pluie nette

calculée. Pour rester cohérent avec notre volonté de représenter le déroulement des crues de manière simple, la fonction de transfert se réduit à un HU défini par un seul paramètre, son temps de montée au pic (Fig. 4). Outre une meilleure prise en compte des mécanismes de transfert au sein du bassin versant, cet HU permet aussi d'évaluer les caractéristiques de la dynamique des crues grâce aux valeurs prises par le temps de montée.

L'ajout d'un HU permet d'obtenir simultanément des valeurs acceptables pour les trois critères de qualité dans plus de 75 % des cas sur cinq des sept bassins versants étudiés (Tab. VII).

Dans le cas des bassins versants de Draix, on n'obtient pas simultanément des valeurs acceptables pour les trois critères dans près d'une crue sur trois. Sur le bassin du Brusquet, sept crues présentent des critères de NASH compris entre 65 % et 80 %. Sur le bassin du Laval, on

enregistre cinq crues avec des critères de Pointe compris entre 65 % et 80 %, une crue pour laquelle le critère de Pointe ne dépasse pas 50 % et une crue pour laquelle le critère de NASH ne dépasse pas 77 %.

Tableau VII - Reconstitution des crues avec quatre phénomènes élémentaires.

Site	Bassins	Nombre de crues où au moins un des trois critères n'est pas de bonne qualité
Draix (France)	Laval	7/20
	Brusquet	7/20
Vallée de l'Alptal (Suisse)	Erlenbach	1/20
	Lumpenenbach	4/20
Martinique	Alma	1/20
	Lézarde	5/20

Les résultats sont donc meilleurs à la Martinique et dans la vallée de l'Alptal. Cela s'explique sûrement par une plus faible variabilité des facteurs à l'origine des crues dans ces deux régions qu'à Draix. À la Martinique, les crues se produisent pendant la saison des pluies, suite à des averses très intenses. Dans la vallée de l'Alptal, ce sont presque exclusivement les orages d'été qui provoquent les crues les plus importantes.

À l'inverse, on peut avoir plusieurs déterminismes à l'origine des crues sur le Brusquet en fonction des caractéristiques de la pluie et de l'état de saturation initial du bassin. En ce qui concerne le bassin du Laval, l'intensité joue un rôle très important durant les crues. Une valeur constante pour X1 ne permet pas de rendre compte de l'augmentation du coefficient d'écoulement en fonction de la saturation progressive des sols dans le cas du bassin du Brusquet ou de l'augmentation de l'intensité des pluies dans le cas du bassin du Laval.

5) Conclusion de l'analyse directe

L'étape d'analyse des couples averse-crue permet de montrer que suivant les besoins ("Volume et Pointe" ou "Volume, Pointe et NASH") et suivant les bassins, nous pouvons utiliser de un à quatre phénomènes élémentaires :

- Un phénomène élémentaire (X1) : Seul le bassin de la rivière Blanche à l'Alma est concerné. Cela traduit des évolutions temporelles similaires des crues observées et des crues calculées sans retard important entre la

pluie et l'écoulement. L'ajout de pertes initiales ne modifie d'ailleurs pas les résultats pour ce bassin.

- Deux phénomènes élémentaires (X1 et X2) : Seul le bassin du Laval est concerné.

- Trois phénomènes élémentaires (X1, X2 et X3) : Les quatre autres bassins versants sont concernés. Des apports à l'écoulement total sont enregistrés après l'arrêt des pluies. Ils peuvent représenter une part importante du volume écoulé (80 % du volume le 8 juillet 1987 sur le bassin du Lumpenenbach).

- Quatre phénomènes élémentaires (X1, X2, X3 et X4) : Tous les bassins sont concernés. On change alors le niveau d'analyse. Ce ne sont plus seulement le débit de pointe et le volume écoulé qu'on cherche à reproduire, mais également le déroulement de l'événement. Sur le bassin du Laval, le déroulement des crues peut se traduire par un décalage temporel de vingt minutes.

Pour représenter les phénomènes élémentaires, des choix ont été effectués. D'autres choix sont possibles (X1 variable, X3 quadratique...). Néanmoins, même en restant à un niveau très simple de traduction des phénomènes élémentaires par des modèles théoriques, on constate que trois phénomènes élémentaires permettent de reproduire les débits de pointe et les volumes écoulés de la totalité des crues des sept bassins versants étudiés. D'un point de vue scientifique, les quatre phénomènes élémentaires sont nécessaires.

Ces quatre phénomènes élémentaires représentent le déroulement des crues. Leur traduction sous la forme d'un modèle pluie-débit est immédiate. L'utilisation du modèle ainsi construit devrait permettre de quantifier les quatre phénomènes élémentaires bassin par bassin. Sans parler des processus hydrologiques, la mise en parallèle des phénomènes élémentaires et des caractéristiques physiques des bassins versants devrait permettre de les interpréter en terme de réponses hydrologiques moyennes des bassins.

V - TRADUCTION DES PHÉNOMÈNES ÉLÉMENTAIRES EN MODÈLE PLUIE-DEBIT

1) Le modèle pluie-débit

La traduction des phénomènes élémentaires sous la forme d'un modèle pluie-débit fait de ce modèle un outil représentatif du fonctionnement des petits bassins versants torrentiels lors des crues les plus fortes. En effet, le modèle est de cette façon issu de l'analyse directe des couples

averse-crue. Ce modèle peut être utilisé comme un outil d'aide à la compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins. Nous nous plaçons dans une optique scientifique en tenant compte des quatre phénomènes élémentaires.

Le modèle s'articule autour des quatre phénomènes élémentaires précédents. Il comporte donc quatre paramètres (Fig. 12) :

- X1, le coefficient d'écoulement constant (%). Ce coefficient ne porte que sur les pluies une fois que les pertes initiales sont satisfaites. Il ne faut pas confondre X1 avec CE qui est le coefficient d'écoulement global de la crue. Dans la suite, X1 sera nommé coefficient d'écoulement direct.
- X2, les pertes initiales avant le début de l'écoulement (mm).
- X3, le paramètre de vidange linéaire du réservoir (%). On rappelle que le réservoir collecte toute la pluie ne participant pas à l'écoulement produit par X1 ainsi que les pertes initiales. Au début de l'épisode pluvieux, le réservoir est vide.
- X4, le temps de montée de l'HU (h).

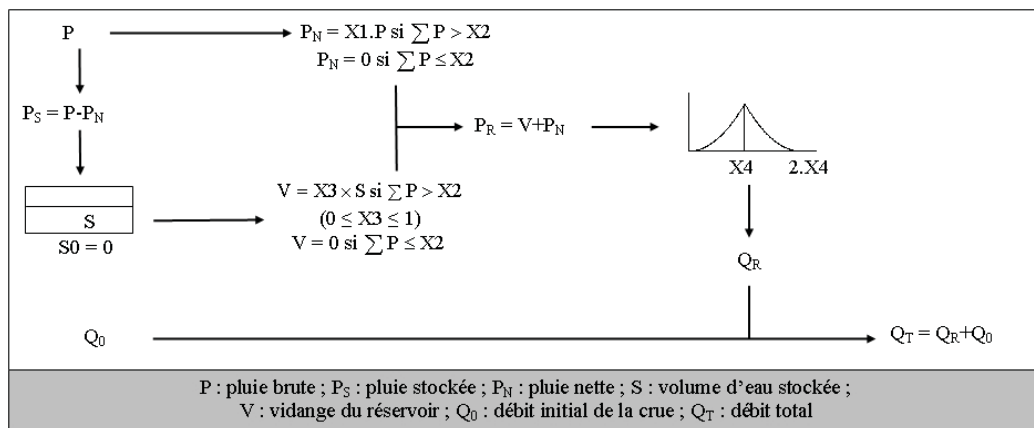


Figure 12 - Schéma fonctionnel du modèle pluie-débit.

Les apports par écoulement rapide et par écoulement lent sont privilégiés. La troisième contribution à l'écoulement total correspond au débit de base du bassin (V.T. CHOW *et al.*, 1988). Cet apport est constant au cours du temps et pris égal au débit initial de chaque crue. Une telle hypothèse est commode mais relativement forte. Elle se justifie surtout par le fait que, sur les bassins étudiés, le volume ainsi modélisé reste très faible en crue.

2) Application du modèle

Une optimisation des paramètres du modèle a été réalisée sur les 20 crues maximales des six bassins versants étudiés suivant les trois critères de Pointe, de Volume et de NASH. Les valeurs des critères sont données à la figure 13. Dans le tableau VIII, seules les valeurs moyennes (μ) et médianes (m) des paramètres, ainsi que leurs

écart-types (σ), sont représentées. Nous mentionnons également les ratios moyens calculés entre le volume total écoulé par X1 et le volume écoulé total.

L'optimisation des paramètres du modèle est de bonne qualité sur tous les bassins. Les critères

de Pointe, de Volume et de NASH sont compris en moyenne entre 80 % et 110 % avec une variabilité faible de l'ordre de 1 à 10 % autour de la moyenne. Pour les mêmes raisons que précédemment, les résultats sont meilleurs à la Martinique et dans la vallée de l'Alptal qu'à Draix.

Tableau VIII - Moyennes (μ), médianes (m) et écart-types (σ) des paramètres.

Bassins	X1 (%)			X2 (mm)			X3 (%)			X4 (h)			Ratio P _N /P _R		
	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ	μ	m	σ
Laval	57,6	52,3	23,0	7,28	7,69	4,51	0,40	0,12	0,61	0,38	0,37	0,06	0,91	0,94	0,10
Brusquet	13,8	12,9	7,60	22,4	18,4	18,2	0,12	0,11	0,12	1,63	1,09	1,43	0,54	0,56	0,17
Erlenbach	46,5	40,7	19,3	13,6	12,3	6,50	2,70	2,47	2,42	0,63	0,59	0,18	0,53	0,44	0,20
Lumpenenbach	22,6	22,3	5,00	12,2	13,1	4,94	1,60	1,13	1,24	0,50	0,50	0,13	0,41	0,40	0,11
Alma	26,0	22,3	9,70	18,9	14,7	11,9	0,30	0,12	0,31	0,46	0,47	0,14	0,84	0,85	0,10
Lézarde	40,8	36,8	13,3	24,4	19,3	21,1	0,42	0,28	0,43	0,67	0,61	0,26	0,72	0,70	0,19

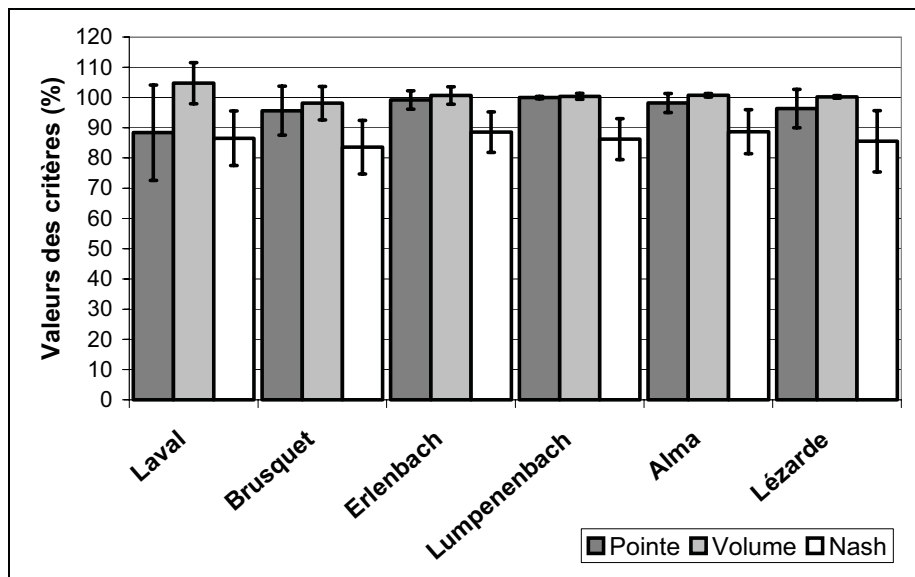


Figure 13 - Valeurs moyennes et écart-types des trois critères.

VI - RÉPONSES HYDROLOGIQUES DES BASSINS VERSANTS

Les quatre paramètres du modèle quantifient les quatre phénomènes élémentaires. Ils constituent quatre indicateurs du déroulement des crues. Les valeurs prises par les paramètres sont représentatives de la réponse hydrologique des bassins versants. L'interprétation des résultats sous forme de processus hydrologiques doit être faite avec précaution. Néanmoins, compte tenu des différences existant entre bassins versants voisins, des hypothèses sur le fonctionnement

hydrologique des bassins peuvent être avancées pour expliquer les valeurs des paramètres. De plus, le fonctionnement hydrologique peut être interprété en fonction des caractéristiques physiques des bassins versants (superficie, structure, pente, pédologie, géologie, état de surface, climatologie...). De cette manière, on va donner un sens physique aux paramètres du modèle.

1) Bassins versants de Draix

Pour le bassin du Laval, le coefficient d'écoulement direct X1 et les pertes initiales X2 expliquent en moyenne plus de 90 % de la lame

écoulée totale (Tab. VIII). Comme lors de l'analyse directe des crues, on retrouve que la contribution de la vidange du réservoir à l'écoulement total est très faible. Par ailleurs, la valeur médiane du temps de montée X_4 est d'environ 20 minutes avec un écart-type faible. Cela correspond au décalage temporel de deux pas de temps mis en évidence au cours de l'analyse directe des crues.

Les bassins versants dégradés en zones de badlands possèdent une réponse hydrologique de type hortonien (F. GALLART *et al.*, 1997 ; D. RICHARD et N. MATHYS, 1999). Ce schéma de fonctionnement par refus d'infiltration explique les montées de crue très brèves. Les valeurs élevées de X_1 et faibles de X_2 , ainsi que la valeur moyenne du ratio P_N/P_R vont aussi dans ce sens.

Le fonctionnement hydrologique du bassin du Brusquet est plus complexe. Lors d'orages brefs et intenses, on enregistre fréquemment des valeurs faibles de X_1 , X_2 et X_4 . Ces faibles valeurs caractérisent une réponse rapide et pointue du bassin, associée à un volume écoulé faible. Lors des longs épisodes pluvieux d'automne ou de printemps, on enregistre des valeurs plus importantes de X_1 , X_2 et X_4 . La réponse du bassin est alors plus lente, davantage retardée par rapport au début de la pluie et le volume écoulé est plus élevé. Ainsi la typologie des pluies de chaque événement joue-t-elle un rôle important dans le déroulement et donc dans la paramétrisation des crues (Fig. 14). La typologie des pluies explique la forte variabilité des paramètres X_2 et X_4 autour de leurs valeurs moyennes respectives.

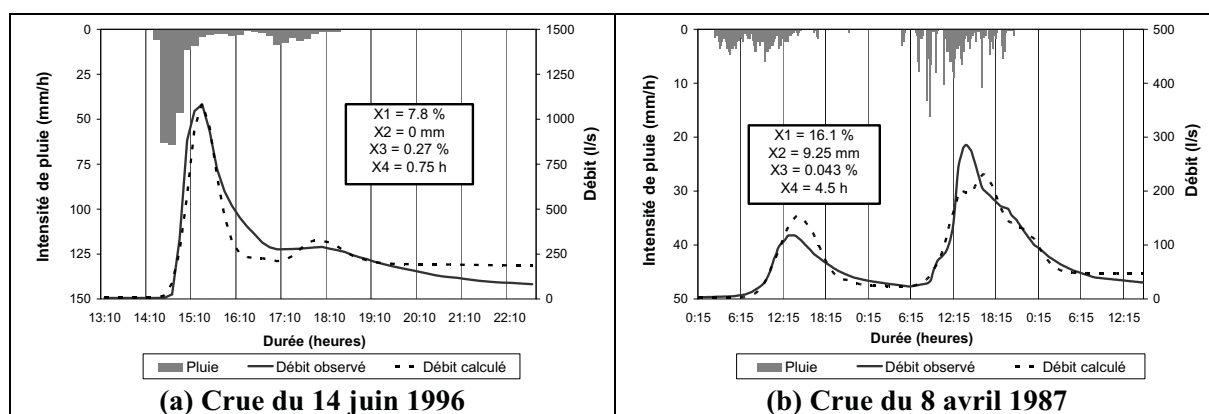


Figure 14 - Typologie des pluies et réponses hydrologiques du bassin du Brusquet.

Les apports par écoulement rapide représentent une part moins importante de l'écoulement total sur le Brusquet que sur le Laval (54 % en moyenne). Le volume écoulé produit par X_1 est en moyenne du même ordre de grandeur que le volume écoulé produit par X_3 . Cela signifie que le ressuyage du bassin est lent et soutenu.

La couverture végétale présente sur le bassin du Brusquet a favorisé le développement d'une couche de sol qu'on ne retrouve pas sur le bassin du Laval. La capacité de rétention du bassin du Brusquet est donc plus élevée que celle du Laval. La présence de la végétation explique que les pertes initiales soient plus fortes sur le Brusquet que sur le Laval et que la contribution à l'écoulement total sous forme d'un écoulement lent y soit plus importante.

Le pourcentage de zones dégradées est plus élevé sur le bassin du Laval que sur celui du Brusquet. Cela explique la diminution de X_1 . Une valeur constante de X_1 peut s'interpréter comme un pourcentage de la surface totale du bassin répondant à 100 % de la pluie. Toutefois cette interprétation de X_1 permet simplement de donner une signification du paramètre compréhensible et acceptable sur les bassins versants de Draix.

Par ailleurs, lors des longues périodes pluvieuses, on peut supposer que le bassin du Brusquet se sature progressivement. Sans parler d'écoulement sur surfaces saturées, la saturation progressive du bassin expliquerait les valeurs plus élevées de X_1 . Lors des épisodes orageux, les valeurs faibles de X_1 s'interpréteraient comme

la réponse des zones dégradées aux fortes intensités de pluie, qui s'effectue de la même manière que sur le Laval sous la forme d'un écoulement de surface par refus d'infiltration. On comprend aussi que les valeurs de X4 augmentent d'un type d'événement à l'autre : l'activation d'un bassin par refus d'infiltration est plus rapide que par saturation progressive du bassin.

2) Bassins versants de la vallée de l'Alptal

Les deux bassins versants suisses possèdent des fonctionnements où la part d'écoulement lent pour expliquer l'écoulement total est très importante. Les valeurs moyennes de X3 sont beaucoup plus fortes pour ces trois bassins que pour ceux de Draix ou de Martinique. Les débits restent donc soutenus sur ces deux bassins après la fin des pluies. Les valeurs plus fortes de X3 pour l'Erlenbach se traduisent par un tarissement plus rapide que sur l'autre bassins (Fig. 15).

Il faut noter qu'une valeur forte de X3 n'implique pas une contribution plus importante en volume de l'écoulement lent à l'écoulement total. Dans le cas de l'Erlenbach, les valeurs moyennes et médianes de X3 sont fortes. Pourtant, le ratio P_N/P_R moyen est de l'ordre de celui calculé sur le bassin du Brusquet, où les valeurs de X3 sont 20 fois plus faibles en moyenne. X3 est donc représentatif ici de la dynamique des décrues.

On peut interpréter les valeurs fortes de ce paramètre sur les bassins de l'Erlenbach et du Lumpenenbach en fonction de la forme de ces deux bassins versants. Ils sont tous deux de forme oblongue d'après la valeur de l'indice de compacité de GRAVELIUS (Tab. I). Ainsi les contributions à l'écoulement mesuré à l'exutoire des zones situées en tête de bassin ont des temps de transit dans le bassin plus longs que les zones proches de l'exutoire (A. MUSY et C. HIGY, 2004). Cette caractéristique des bassins pourrait expliquer l'allure des décrues.

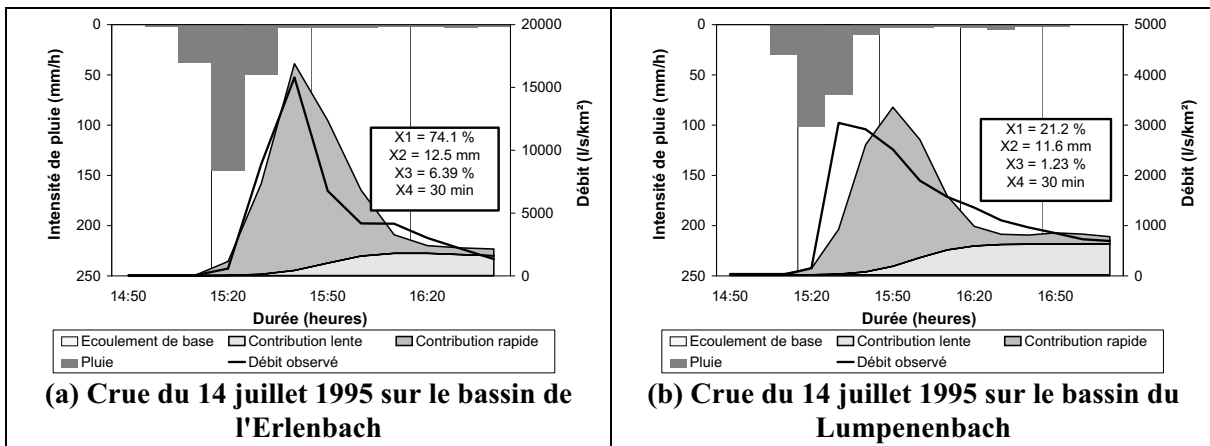


Figure 15 - Répartition des trois contributions à l'écoulement total.

Par ailleurs, les valeurs moyennes de X2 sont du même ordre de grandeur sur les deux bassins de la Vallée de l'Alptal. Les états initiaux ne présentent donc pas de différences majeures. En revanche, une fois que l'écoulement a commencé, les valeurs moyennes et médianes de X4 sont plus faibles sur le bassin versant le plus compact des deux.

Les valeurs moyennes de X1 sont plus fortes sur le bassin de l'Erlenbach que sur le bassin du Lumpenenbach. Pour ce dernier, on note même que les valeurs moyennes et médianes de X1 sont du même ordre de grandeur que le pourcentage

de zones humides référencées sur ce bassin. La variabilité de X1 autour de sa valeur moyenne est très faible.

Cette remarque tend à montrer que le pourcentage de zones humides joue un rôle important dans l'hydrologie des deux bassins. Le plus fort pourcentage de zones humides, enregistré sur l'Erlenbach, explique que les débits de pointe et les volumes écoulés y soient beaucoup plus élevés que sur l'autre bassin. Les valeurs moyennes et médianes de X1 vont dans ce sens.

Les deux paramètres X1 et X3 jouent un rôle important dans l'explication des écoulements de ces deux bassins versants. X1 pourrait correspondre cette fois encore à un pourcentage de la surface des bassins versants répondant à 100 % de la pluie une fois que les pertes initiales sont satisfaites. Ce pourcentage de la surface serait ici de l'ordre de grandeur du pourcentage de zones humides et pourrait s'interpréter comme un pourcentage de zones contributives à l'écoulement. Comme à Draix, cette interprétation de X1 reste une hypothèse pour comprendre la réponse hydrologique des bassins versants de la Vallée de l'Alptal.

3) Bassins versants de la Martinique

Les bassins versants martiniquais présentent les ratios P_N/P_R moyens les plus forts après celui enregistré sur le Laval. Sur le bassin de l'Alma, un coefficient d'écoulement constant explique le volume écoulé et le débit de pointe de crue dans 75 % des cas. On pouvait donc s'attendre à l'importance du paramètre X1 et à sa contribution au volume écoulé total, au moins sur le bassin de l'Alma. Si les ratios P_N/P_R sont élevés, les valeurs moyennes et médianes de X1 sont en revanche beaucoup plus faibles que celles calculées sur le bassin du Laval.

Ces deux bassins versants martiniquais sont caractérisés par une couverture végétale dense. Ils possèdent également des sols épais et filtrants dont les capacités de stockage et les conductivités hydrauliques sont très élevées (M. MEUNIER, 1999). Des hypothèses de fonctionnement de ces deux bassins sous forme d'écoulement hortonien ou d'écoulement par saturation de zones contributives ne seraient pas réalistes. Une interprétation de X1 sous la forme d'un pourcentage du bassin répondant à 100 % de la pluie n'est plus envisageable. En revanche, X1 pourrait correspondre à un pourcentage de la pluie affectant 100 % du bassin. Bien entendu, cette interprétation de X1 est aussi schématique que la précédente. Néanmoins, on comprend bien, de cette manière, les différences entre la signification de X1 à la Martinique et la signification de X1 à Draix ou dans la Vallée de l'Alptal.

Avec cette interprétation de X1, on pense, pour expliquer les écoulements, à une activation des drains sous l'effet des forts abats pluvieux ou à une contribution des sols sous forme d'écoulement activé par effet piston. Ces deux

types de fonctionnement expliqueraient que sur le bassin versant de la Lézarde, d'une superficie de près de 13 km², les valeurs moyennes de X4 soient du même ordre de grandeur que celles obtenues sur le bassin de l'Erlenbach (0,64 km²).

En ce qui concerne X2, il est intéressant de noter que les valeurs moyennes et médianes de ce paramètre sont du même ordre de grandeur que celles calculées sur le bassin du Brusquet. Ici aussi, la forte capacité de rétention des sols intervient. Pourtant, pendant la saison des pluies, les sols restent en permanence à un niveau de saturation élevé. On aurait donc pu s'attendre à des valeurs faibles de ce paramètre. Pour bien comprendre, il faut en fait rapporter les valeurs de X2 à la climatologie locale des bassins. À titre indicatif, la pluie décennale horaire estimée au poste pluviographique du bassin de l'Alma est égale à la pluie journalière décennale estimée à Draix (80 mm). Ainsi X2 représente-t-il en moyenne 20 % du cumul de pluie des vingt plus fortes crues sur les bassins de l'Alma et de la Lézarde. En comparaison, les valeurs de X2 représentent en moyenne 35 % du cumul de pluie des vingt plus fortes crues du Brusquet.

Durant la saison des pluies, les débits restent soutenus entre deux événements. L'eau stockée dans le bassin se ressuie lentement après l'arrêt des pluies. Ce ressuyage lent s'exprime en terme de phénomènes élémentaires avec des valeurs faibles de X3.

Enfin, J. GUISCAFRE *et al.* (1975) et M. MEUNIER (1999) insistent sur l'importance de la superficie des bassins pour expliquer les débits de pointe et les temps de montée des crues. La surface est un paramètre morphologique du bassin représentatif à lui seul de la forme et de la structure des bassins de l'île. Compte tenu de ces informations, on peut interpréter les valeurs de X4 en fonction de la superficie des bassins. À la figure 16, nous avons représenté les temps de montée moyens et les écart-types correspondants obtenus avec le modèle. La relation expérimentale proposée par J. GUISCAFRE *et al.* (1975) entre la surface et le temps de montée est aussi représentée. Cette relation fournit vraisemblablement un temps de montée limite correspondant au temps d'activation minimum des bassins, tandis que pour chaque crue le temps de montée dépend des caractéristiques des pluies. Malgré cela, les valeurs calculées par le modèle sont du même ordre de grandeur que celles obtenues avec la relation expérimentale.

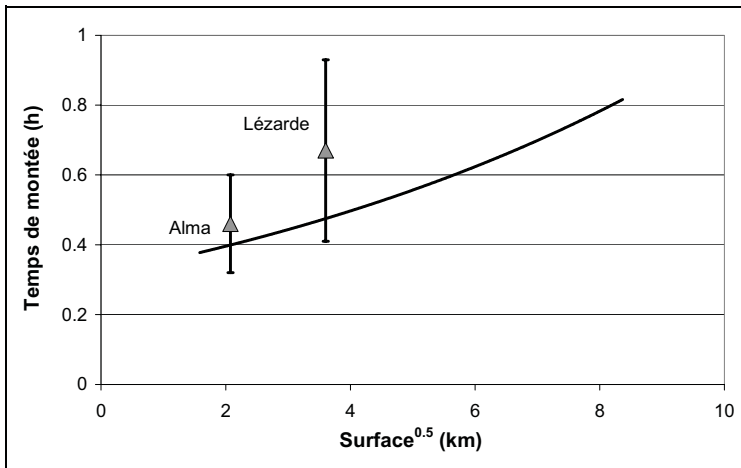


Figure 16 - Comparaison des temps de montée calculés par le modèle et des temps de montée obtenus en appliquant la relation expérimentale proposée par J. GUISCAFRE *et al.* (1975).

4) Interprétation des paramètres

Compte tenu des contextes physiques et climatologiques très différents des bassins versants, une synthèse de l'analyse des réponses hydrologiques est délicate. Néanmoins l'analyse des réponses hydrologiques permet de proposer des interprétations possibles des paramètres et des valeurs obtenues en fonction des caractéristiques physiques des bassins. À présent, nous pouvons synthétiser ces différentes interprétations des quatre paramètres du modèle pluie-débit :

- Le coefficient d'écoulement direct X1 sert à reproduire le débit de pointe de la crue ainsi que le volume écoulé autour de la pointe. Nous l'avons interprété comme un pourcentage du bassin répondant à 100 % de la pluie pour des fonctionnements hydrologiques de type hortonien ou surfaces contributives. Pour les bassins martiniquais, une interprétation comme un pourcentage de la pluie entraînant une réponse de tout le bassin a semblé plus réaliste. Une valeur constante de X1 indique que le pourcentage de surface ou de pluie contribuant rapidement à l'écoulement n'évolue pas au cours de la crue. Une telle représentation de la production du bassin peut être limitée lors des crues provoquées par des pluies longues et saturantes. Les processus hydrologiques dominants sont liés aux caractéristiques physiques des bassins. L'activation des processus dépend des conditions initiales et des conditions de forçage. Pour un bassin versant donné, X1 devrait varier en fonction des conditions initiales de saturation au début de chaque événement et des caractéristiques des pluies de chaque événement.

- Les pertes initiales X2 correspondent au seuil de déclenchement de l'écoulement. Sur un petit bassin versant au fonctionnement hortonien, X2 est surtout fonction de l'intensité des pluies en début d'événement. Sur un petit bassin versant au fonctionnement de type surfaces contributives ou possédant une forte capacité de rétention, X2 varie aussi suivant les cumuls de pluies antérieures.

- La vidange du réservoir, définie par le paramètre X3, représente une contribution lente à l'écoulement total. Elle s'apparente au ressuyage du bassin après l'arrêt des pluies. Une valeur forte de X3 ($\geq 1\%$) indique que le volume écoulé en décrue est très important. À l'inverse, une valeur faible ($\leq 0,5\%$) indique soit que les apports par vidange sont très faibles, soit que le ressuyage du bassin est très lent. Le ratio calculé entre le volume total écoulé par le coefficient d'écoulement et le volume écoulé total permet de comparer les contributions rapide et lente à l'écoulement total. On retiendra que la forme des bassins et la dynamique des crues influencent l'allure des décrues et donc la valeur de X3.

- X4 correspond au temps de montée des crues. En général, les valeurs de ce paramètre sont faibles et peu variables sur les crues fortes. Elles caractérisent une réponse rapide des petits bassins versants torrentiels lors des crues. On rappellera le cas particulier du bassin versant du Brusquet où X4 semble varier en fonction de la typologie des crues. Une interprétation de X4 comme un temps d'activation des bassins peut être proposée. Ce temps d'activation dépend des conditions initiales de saturation, des conditions de forçages climatiques et de l'état de surface ou de la forme du bassin versant.

VII - CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Sur les petits bassins versants torrentiels, l'analyse directe des couples averse-crue aide à l'identification des phénomènes élémentaires caractéristiques du fonctionnement hydrologique des bassins en crue. L'étude des phénomènes élémentaires aboutit au développement d'un modèle pluie-débit à quatre paramètres. Ce modèle est conceptuel et représentatif du fonctionnement des bassins en crue. En outre, il est faiblement paramétré.

Les valeurs prises par les quatre paramètres du modèle sur une crue donnée fournit des informations précises sur la réponse hydrologique du bassin lors de cette crue. Les valeurs moyennes ou médianes prises par les paramètres du modèle sur les 20 plus fortes crues mettent en évidence des tendances de fonctionnement de chaque bassin versant. Cela implique que le modèle peut être utilisé de deux façons différentes selon que l'on souhaite comprendre le

déroulement d'une crue ou estimer le comportement hydrologique moyen d'un bassin versant. Ce modèle peut donc être utilisé sur un bassin versant où peu de crues ont été observées. En outre, les résultats traduisent des tendances de fonctionnement du bassin.

Nous souhaitons l'appliquer maintenant pour étudier l'évolution des valeurs prises par les paramètres de la crue normale à la crue extrême. De cette manière, on pourra extrapoler les valeurs des paramètres vers les crues extrêmes qui sont celles pour lesquelles les conséquences peuvent être importantes d'un point de vue humain et matériel.

En parallèle, nous avons la possibilité d'interpréter les valeurs des paramètres en fonction de caractéristiques physiques assez élémentaires des bassins versants. Il faudrait approfondir ce point. Néanmoins, cela devrait permettre d'étudier le fonctionnement hydrologique des petits bassins versants torrentiels non jaugés.

Remerciements : Les auteurs remercient la Direction Régionale de l'Environnement de la Martinique ainsi que l'Institut fédéral de recherche sur la forêt, la neige et le paysage de Birmensdorf (Suisse) pour leur avoir donné l'opportunité d'utiliser les données pluie-débit dont ils disposent.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AMBROISE B. (1999) - *La dynamique du cycle de l'eau dans un bassin versant – Processus, Facteurs, Modèles*. Éditions *H*G*A*, Bucarest, 170 p.
- BANDYOPADHYAY J., KRAEMER D., KUNDZEWICZ Z.W. et RODDA J. C. (1997) - Mountain water resources – The need for their proper assessment. *International Academy of the Environment and World Meteorological Organization*, Genève, 9 p.
- BORGES A.L. (1993) - *Modélisation de l'érosion sur deux bassins versants expérimentaux des Alpes du sud*. Thèse de l'Université Joseph FOURIER – Grenoble I, 205 p.
- BRAUD I., FERNANDEZ P. et BOURAOUI F. (1999) - Study of the rainfall-runoff process in the Andes regions using a continuous distributed model. *Journal of Hydrology*, vol. 216, p. 155-171.
- CHOW V.T., MAIDMENT D.R. et MAYS L.W. (1988) - *Applied Hydrology*. McGraw-Hill series in Water Resources and Environmental Engineering, New-York, 560 p.
- COSANDEY C. (1999) - Floods genesis and hydrological behaviour of headwaters basins in the Cévennes Mountains. *Actes du Séminaire "Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne"* (Digne, 1997), Cemagref Éditions, Antony, p. 29-39.
- COSANDEY C., LAVABRE J., MARTIN C. et MATHYS N. (2002) - Conséquences de la forêt méditerranéenne sur les écoulements de crue – Synthèse des recherches menées en France. *La Houille Blanche*, n°3, p. 38-42.
- EDIJATNO et MICHEL C. (1989) - Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*, n° 2, p. 113-121.
- GALLART F., LATRON J., LLORENS P. et RABADA D. (1997) - Hydrological functioning of Mediterranean mountains basins in Vallcebre, Catalonia: some challenges for

- hydrological modelling. *Hydrological Processes*, vol. 11, p. 1263-1272.
- GRAFF B., LAVABRE J., RICHARD D. et SERVAT É. (2004) - Analyse des processus hydrologiques sur de petits bassins versants de montagne pour une meilleure prise en compte de leurs caractéristiques dans les modèles. *In : Conférence INTERPRAEVENT* (Riva del Garda, Italie, 2004), p. II-33 à II-44.
- GUISCAFRE J., KLEIN J.C. et MONIOD F. (1975) - *Les ressources en eau de surface de la Martinique*. Monographie hydrologique de l'ORSTOM, 212 p.
- HOEG S., UHLENBROOK S. et LEIBUNDGUT Ch. (2000) - Hydrograph separation in a mountainous catchment combining hydrochemical and isotopic tracers. *Hydrological Processes*, vol. 14, p. 1199-1216.
- JAKOB M. et JORDAN P. (2001) - Design flood estimates in mountain streams – the need for a geomorphic approach. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 28, p. 425-439.
- JORDAN J.P. (1994) - Spatial and temporal variability of stormflow generation processes on a Swiss catchment. *Journal of Hydrology*, vol. 153, p. 357-382.
- KIRKBY M. (1993) - *Network hydrology and geomorphology*. *In : Channel Network Hydrology*, BEVEN K.J. et KIRKBY M., Chapitre 1, Édit. John Wiley & sons, p. 1-11.
- MATHYS N., CAMBON J.P. et OLIVIER J.E. (1999) - Formation des fortes crues dans les bassins versants expérimentaux de Draix : La crue exceptionnelle du 8 septembre 1994. *Actes du Séminaire "Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne"* (Digne, 1997), Cemagref Éditions, Antony, p. 65-76.
- MEUNIER M. (1999) - *Les torrents du nord-ouest de la Martinique : hydrologie des crues, érosion, hydraulique et dynamique torrentielles*. Cemagref Éditions, Antony, Coll. Études - Équipements pour l'Eau et l'Environnement, n° 24, 333 p.
- MICHEL C., PERRIN C. et ANDRÉASSIAN V. (2003) - Le réservoir exponentiel : une formulation améliorée pour la modélisation pluie-débit. *Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 48, n° 1, p. 109-124.
- MUSY A. et HIGY C. (2004) - *Hydrologie : une science de la nature*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne (Suisse), 302 p.
- NAEF F., SCHERRER S. et WEILER M. (2002) - A process based assessment of the potential to reduce flood runoff by land use change. *Journal of Hydrology*, vol. 267, p. 74-79.
- PUTTY M.R.Y. et PRASAD R. (2000) - Understanding runoff processes using a watershed model – a case study in the Western Ghats in South India. *Journal of Hydrology*, vol. 228, p. 215-227.
- RIBSTEIN P. (1992) - Modèles de crues et petits bassins versants au Sahel. *La Houille Blanche*, n° 1, p. 85-91.
- RICHARD D. et MATHYS N. (1999) - Historique, contexte technique et scientifique des BVRE de Draix. Caractéristiques, données disponibles et principaux résultats acquis au cours de dix ans de suivi. *Actes du Séminaire "Les bassins versants expérimentaux de Draix, laboratoire d'étude de l'érosion en montagne"* (Digne, 1997), Cemagref Éditions, Antony, p. 11-28.
- RICKENMANN D. (1997) - Sediment transport in Swiss torrents. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 22, p. 937-951.
- SCHERRER S. et NAEF F. (2003) - A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland. *Hydrological Processes*, vol. 17, n° 2, p. 391-401.
- SPREAFICO M. (2002) - Extreme floods in mountain areas – an overview. *IAHS Publ.*, n° 271, Actes du Symposium de Reykjavik (Irlande, 2002), p. 77-85.
- WEINGARTNER R., BARBEN M. et SPREAFICO M. (2003) - Floods in mountain areas – an overview based on examples from Switzerland. *Journal of Hydrology*, vol. 282, p. 10-24.