



Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

ANALYSE DES PROCESSUS HYDROLOGIQUES SUR DE PETITS BASSINS VERSANTS DE MONTAGNE POUR UNE MEILLEURE PRISE EN COMPTE DE LEURS CARACTERISTIQUES DANS LES MODELES

ANALYSIS OF HYDROLOGICAL PROCESSES ON SMALL MOUNTAINOUS BASINS FOR BETTER INTEGRATION OF THEIR CHARACTERISTICS INTO MODELS

Benjamin Graff¹, Jacques Lavabre¹, Didier Richard² et Eric Servat³

RESUME

L'objectif de cette étude est de présenter les premiers résultats obtenus dans le cadre du développement d'une méthodologie d'estimation des débits de pointe et des volumes de crue spécifiquement adaptée aux petits bassins versants de montagne. Le Cemagref a déjà développé la méthode SHYPRE, basée sur l'association d'un générateur stochastique de pluies horaires et d'un modèle pluie-débit conceptuel. Des recherches sont menées actuellement pour comprendre comment ces petits bassins versants de montagne fonctionnent lors des épisodes pluvieux. Il s'agit donc d'élaborer un modèle pluie-débit simple correspondant aux situations rencontrées. L'analyse des couples averse-crue a permis de mettre en évidence les principales caractéristiques hydrologiques de ces bassins. Par la suite, ces observations ont débouché sur le développement d'un outil de modélisation pluie-débit conceptuel.

Key words: Petits bassins versants de montagne, Modèle pluie-débit, Prédétermination.

ABSTRACT

The aim of this study is to present the first results obtained in keeping with the development of a methodology dedicated to the assessment of peak discharges and flood volumes on small mountainous basins. The Cemagref has already evolved the SHYPRE method, based on the association of a stochastic rainfall model for generating hourly hyetographs and a conceptual rainfall-runoff model. Efforts are now made to understand how small mountainous watersheds respond during rainfall events. The main objective of this work is to develop a rainfall-runoff model that would suit to them. The analysis of rainfall-runoff events allowed us to point out

1 Cemagref, Groupement d'Aix-en-Provence, Le Tholonet, B.P. 31, 13612 Aix-en-Provence Cedex 1, France
(Tel. : 00-33-4-42-66-99-52 ; Fax : 00-33-4-42-66-88-65 ; Email : benjamin.graff@aix.cemagref.fr)

2 Cemagref, Groupement de Grenoble, Domaine Universitaire, B.P. 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex, France

3 Maison des Sciences de l'Eau, UMR 5569 HydroSciences, B.P. 5045, 34032 Montpellier Cedex, France

the main hydrological characteristics of those basins. The observations led to the development of a simple conceptual rainfall-runoff model.

Key words: Small mountainous basins, Rainfall–runoff model, Flood frequency estimation.

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

L'estimation des débits et des volumes de crues sur les petits bassins versants de montagne souffre de nombreuses indéterminations. Or, ces indications sont utiles notamment dans le cadre de la gestion du risque torrentiel ou des études de transport solide. Compte tenu des difficultés pour effectuer des mesures sur le terrain, particulièrement sur des zones situées en altitude, la rareté des informations disponibles explique en partie cette méconnaissance.

Les approches classiques, méthodes statistiques ou rationnelles, ne permettent alors pas une estimation fiable et précise des débits pour les bassins versants non jaugés. Par ailleurs, elles ne tiennent pas ou peu compte des caractéristiques des bassins versants, telles que la géomorphologie, la végétation, la pédologie ou la géologie, susceptibles d'influencer de manière non négligeable la génération des crues. Enfin, elles ne permettent pas non plus d'accéder à la connaissance de l'hydrogramme complet, qui aide à affiner le dimensionnement des aménagements et leur gestion, au quotidien et en situation de crue.

A l'inverse, une approche basée sur une modélisation conceptuelle et déterministe du processus de transformation de la pluie en débit au sein du bassin versant peut améliorer la connaissance des crues, fournir l'intégralité de l'hydrogramme et faciliter la compréhension des processus de génération du débit. La connaissance des pluies étant souvent meilleure que celle des débits, il est possible de générer stochastiquement des scénarios d'événements pluvieux dont découlent ensuite des scénarios de crues. L'extrapolation des valeurs débimétriques vers les fréquences rares est alors plus aisée (Arnaud & Lavabre 1999, Arnaud & Lavabre 2002).

Une telle méthodologie a déjà été développée et utilisée à une échelle régionale pour des bassins versants de quelques dizaines à plusieurs centaines de km² (Lavabre et al., 2002). Malheureusement, sur les petits bassins versants torrentiels, l'effet de moyenne des processus hydrologiques à l'origine des crues sur des bassins plus grands a tendance à s'estomper. On y est davantage confronté à des phénomènes «purs». Il est alors nécessaire de reconnaître les mécanismes de formation des crues sur les petits bassins afin de développer un outil de modélisation pluie-débit spécifiquement adapté à leurs problématiques (Graff et al., 2003).

METHODOLOGIE

A partir de plusieurs séries de données pluie-débit collectées en Suisse et en France, nous avons étudié le comportement hydrologique de petits bassins versants torrentiels. L'analyse systématique des couples averse-crue devrait faciliter la compréhension de leur fonctionnement en crue et l'identification des paramètres hydrologiques caractéristiques des événements. Au regard de propriétés physiques et d'occupation de l'espace simples, l'interprétation des différences constatées entre bassins voisins pourra aussi être envisagée.

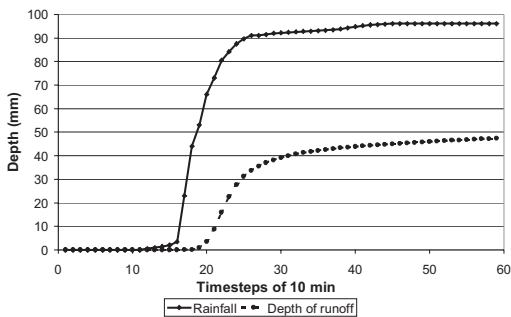
Les 8 bassins versants retenus pour cette étude sont issus de régions aux caractéristiques climatologiques, géologiques et pédologiques très contrastées. L'occupation de l'espace change aussi énormément d'un bassin à l'autre (tableau 1). Grâce à ces situations très différentes, nous disposons d'un échantillon certes réduit mais suffisamment varié pour être considéré comme représentatif des petits bassins versants de montagne.

Tab.1: Caractéristiques des bassins versants étudiés

Tab.1: Characteristics of the watersheds

Site	Basins	Surface (km ²)	Geology	Forested areas (%)	Management agency
Draix (France)	Laval	0,86	Marne Noire	23	Cemagref, Grenoble
	Brusquet	1,08		87	
Collobrières (France)	Rimbaud	1,5	Gneiss	80 (incendie en 1990)	Cemagref, Aix-en-Provence
Vallée de l'Alptal (Suisse)	Erlenbach	0,64	Flysch	39	WSL, Birmensdorf
	Lumpenbach	0,93		19	
Martinique (Antilles Françaises)	Vogelbach	1,55	Roche volcanique	63	DIREN, Martinique
	Alma	4,31		Bassins couverts de forêt et de broussailles	
	Lézarde	12,99			

Afin de chercher les caractéristiques des écoulements en crue sur ces bassins, on utilise entre autres les graphiques montrant l'évolution du hétérogramme et de l'hydrogramme correspondant en fonction du temps ou mettant en parallèle la pluie cumulée et la lame écoulée en fonction du temps. Ils permettent d'extraire des informations très précises des couples averse-crue concernant les décalages temporels enregistrés entre la pluie et le débit, les estimations de la rétention initiale et l'évolution du coefficient d'écoulement au cours de la crue.



Illustr.1: Crue du 20 septembre 1983 sur la Lézarde (Martinique), représentation cumulée

Fig.1: Flood event of september 20th, 1983, River Lezarde (Martinique), total depth

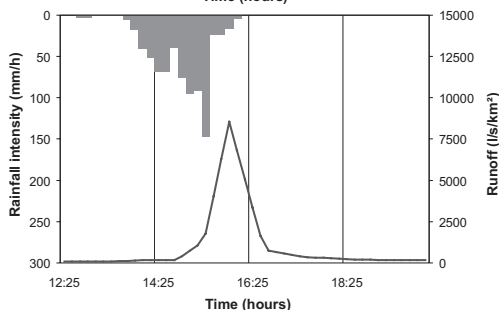
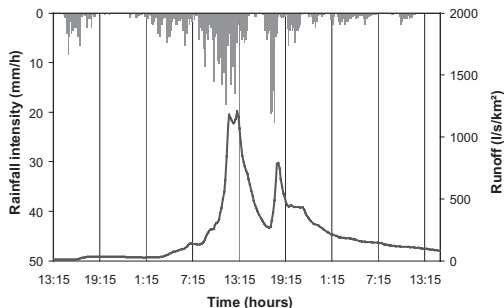
FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DES BASSINS

Les différentes analyses montrent que les hydrogrammes possèdent une structure similaire à celle des hétérogrammes. La plupart des pics d'intensité pluvieuse sont suivis d'un pic de débit, dont la valeur dépend de l'intensité elle-même et du cumul de pluie déjà précipité au cours de l'événement. Ces bassins versants sont donc sensibles à la fois aux intensités de pluie mais

également à la saturation progressive des sols. De plus, les crues peuvent présenter plusieurs pics secondaires non négligeables.

On met ainsi en évidence deux types principaux de crues :

- celles consécutives à un orage estival bref et intense ;
- celles faisant suite à une longue période pluvieuse au cours de laquelle est enregistrée une averse plus intense.



Illustr.2: Crues du 4 novembre 1994 sur le Brusquet (en haut) et du 6 octobre 1963 sur la Lézarde (en bas)

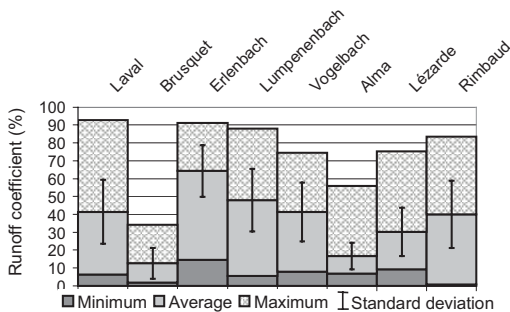
Fig.2: Flood events of november 4th, 1994, River Brusquet (top) and of october 6th, 1963, River Lezarde (bottom)

Cette remarque est à nuancer en fonction de la couverture végétale du bassin et de la climatologie locale. Ainsi, le bassin versant dénudé du Laval apparaît bien plus sensible aux intensités de pluie que celui du Brusquet. Ce dernier est boisé et de ce fait plus sensible aux cumuls pluviométriques. D'autre part, sur les bassins martiniquais, les crues fortes sont liées davantage à des périodes pluvieuses courtes mais présentant des intensités et des cumuls de pluie très élevés. Néanmoins, on notera que la pluie journalière décennale enregistrée sur le Laval (environ 80 mm) correspond pour certains postes de cette île à une pluie horaire décennale.

En terme de volume, les lames écoulées varient énormément et sont parfois très élevées. Ceci est mis en évidence par le coefficient d'écoulement dont la valeur évolue :

- non seulement d'un bassin à l'autre, essentiellement en fonction de l'occupation du terrain et des caractéristiques des sols ;
- mais également, pour un bassin donné, d'une crue à l'autre, suivant l'état de saturation initial du sol et le volume de pluie précipitée ;
- et enfin, au cours d'une crue, en fonction de l'intensité de la pluie, pour les bassins dénudés ou présentant les sols les moins épais.

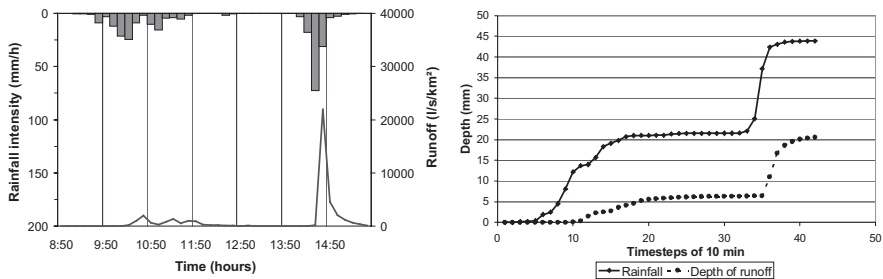
Les différences constatées sur l'illustration 3 pour les bassins de la vallée de l'Alptal en Suisse s'expliquent bien par l'occupation du terrain. Celle-ci change d'un bassin versant à l'autre tandis que pluviométrie, géologie et pédologie restent similaires. Ainsi, le bassin du Vogelbach est le plus boisé des trois et les coefficients d'écoulement y sont en moyenne les plus faibles. Quant au bassin de l'Erlenbach, 60 % de sa surface sont couverts de zones humides, qui fonctionnent comme des réservoirs de stockage. Tant qu'elles sont non saturées, l'écoulement



est réduit et, dès que la saturation est atteinte, le coefficient d'écoulement devient très élevé. C'est d'ailleurs sur ce bassin que sont enregistrées les crues les plus violentes, en terme de débit de pointe et de lame écoulée. En revanche, les temps de montée y sont généralement plus longs que sur les deux autres, à cause du remplissage de ces réservoirs naturels.

Illustr.3: Evolution du coefficient d'écoulement sur les 8 bassins versants étudiés

Fig.3: Runoff coefficient evolution on the 8 studied basins



Illustr.4: Crue du 8 septembre 1994 sur le Laval (Draix)

Fig.4: Flood event of september 8th, 1994, River Laval (Draix)

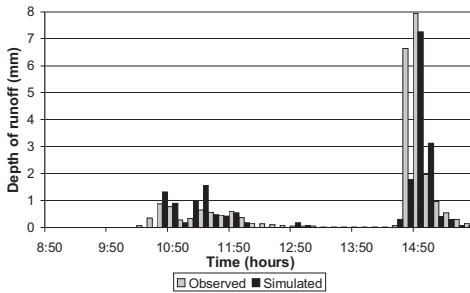
Chaque bassin versant possède un fonctionnement hydrologique qui lui est propre et les différences enregistrées d'un site à l'autre sont parfois très importantes. Cependant, nous retrouvons que l'intensité, le cumul et la répartition des pluies expliquent systématiquement une part importante du déroulement des crues. En terme de modélisation, cela signifie que la gestion du stock d'eau disponible pour l'écoulement doit tenir compte de ces paramètres, essentiellement par le biais de la fonction de production.

Pour progresser dans ce sens, l'analyse des couples averse-crue donne quelques indications sur l'intérêt d'utiliser des outils simples, tels qu'une rétention initiale et/ou un coefficient de débit. Une estimation de ces paramètres peut même être réalisée directement à partir des enregistrements. A titre indicatif, pour la crue de l'illustration 4, il apparaît qu'une valeur d'environ 10 mm pour la rétention initiale et un coefficient d'écoulement de 60 % correspondent bien au déroulement de l'événement. Pour le transfert, on observe un décalage de 20 minutes, correspondant à 2 pas de temps, entre l'écoulement et la pluie.

DEVELOPPEMENT D'UN MODELE PLUIE-DEBIT

Remarques préliminaires

Compte tenu des observations précédentes, une réflexion a été menée sur la capacité d'une modélisation pluie-débit conceptuelle simple susceptible de reproduire les crues majeures enregistrées sur les 8 bassins étudiés. Nous nous sommes intéressés dans un premier temps à des modèles volontairement frustes utilisant soit une rétention initiale (puis toute la pluie ruisselle), soit un coefficient d'écoulement constant. Très vite, l'utilisation de ces deux paramètres élémentaires s'est avérée limitée. Cependant, pour de nombreuses crues, leur association en reconstitution des événements fournit de bonnes estimations des lames totales



écoulées et des lames maximales observées sur le pas de temps utilisé.

Illustr.5: Modélisation des lames écoulées de la crue du 8 septembre 1994 sur le Laval (Draix)

Fig.5: Simulated depths of runoff of the september 8th 1994 flood event, River Laval (Draix)

C'est le cas par exemple de la crue représentée à l'illustration 5. A partir des valeurs estimées à l'illustration 4, autant pour la rétention initiale et le coefficient d'écoulement que pour le décalage temporel entre la pluie et le débit, on constate qu'on sous-estime la lame totale écoulée de 18 % et la lame maximale écoulée sur un pas de temps de seulement 8,5 %. Ces résultats peuvent être améliorés avec un coefficient d'écoulement de 70 %. Quoi qu'il en soit, vu la simplicité des concepts hydrologiques mis en œuvre, ils sont encourageants.

Sur les autres bassins versants, le même principe de modélisation fournit également des résultats correspondant aux volumes écoulés observés, aux lames maximales enregistrées et au déroulement des événements. Néanmoins, le besoin de complexifier légèrement cette méthode se fait souvent sentir. En effet, outre un décalage temporel, il est nécessaire de tenir compte également d'un laminage des pointes. Un hydrogramme unitaire peut permettre de résoudre ce problème.

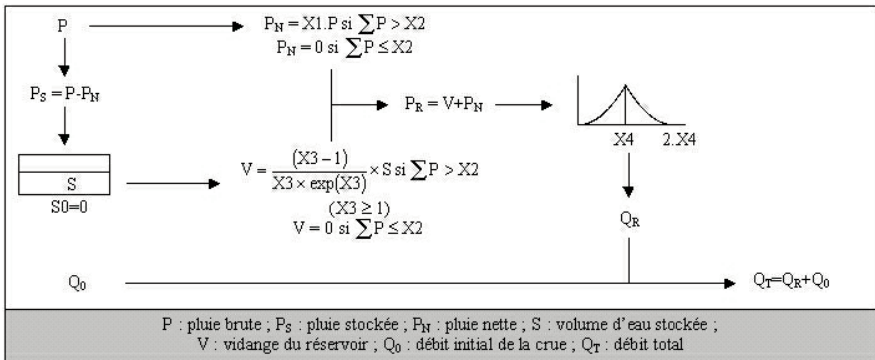
D'autre part, les bassins dont les sols sont épais et filtrants présentent des décrues lentes et représentant parfois une partie importante du volume total écoulé. Sur l'illustration 1, par exemple, le bassin versant de la Lézarde se ressuie visiblement après la fin de la pluie. Entre les 40^{ème} et 60^{ème} pas de temps de l'événement, la quantité de pluie précipitée est nulle alors que la lame écoulée pendant cette période est d'environ 3,5 mm. Il semble donc nécessaire de tenir compte à la fois d'un écoulement rapide mais également d'apports à l'exutoire du bassin sous forme d'un écoulement différé et diffus, s'apparentant davantage à un écoulement de sous-surface ou au ressuyage du bassin.

Présentation du modèle pluie-débit

En définitive, nous avons choisi d'associer les deux phénomènes élémentaires précédents et de leur ajouter un apport par vidange d'un réservoir de stockage de la pluie ne participant pas directement à l'écoulement, afin de modéliser essentiellement les décrues, ainsi qu'un hydrogramme unitaire constitué de deux branches paraboliques symétriques pour le transfert. On aboutit à un modèle de transformation de la pluie en débit simple et représentatif du fonctionnement d'ensemble des bassins versants étudiés. Il permet aussi de tenir compte des caractéristiques des écoulements de crue mentionnées dans le paragraphe précédent, en privilégiant les apports par écoulement direct et par écoulement retardé.

Cette séparation des écoulements est cohérente avec certaines observations de terrain qui, pour expliquer les débits mesurés à l'exutoire des bassins, mettent en évidence l'importance du ruissellement sur les versants et des écoulements dans les couches superficielles du sol, en fonction de leur macroporosité (Scherrer & Naef 2003). De plus, autour du débit de pointe, c'est la lame alimentée par le coefficient d'écoulement direct qui représente la part la plus importante de la crue (Martin & Lavabre 2000).

Le débit initial de la crue, servant de débit de base, est considéré comme étant stable pendant la crue, sans être modélisé par la pluie de l'événement. Il constitue la troisième source des apports à l'exutoire. On considère donc qu'il est lié aux pluies antérieures à l'événement étudié. Scientifiquement, la validité d'une telle hypothèse est sans doute discutable mais cette approche présente l'avantage d'être simple et pratique en terme de modélisation.



Illustr.6: Schéma fonctionnel du modèle pluie-débit

Fig.6: Functional diagram of the rainfall-runoff model

Le modèle a été conçu pour reconstituer spécifiquement les crues les plus fortes et être sensible à la structure fine des hydrogrammes. Comme le montre l'illustration 6, il s'articule autour de 4 paramètres dont les valeurs sont interprétables de la façon suivante :

- X1 : un coefficient d'écoulement direct ;
- X2 : des pertes initiales exprimées en millimètres ;
- X3 : un paramètre de vidange, présentant l'avantage d'aboutir à une vidange nulle lorsqu'il vaut 1. Sinon, la fonction utilisée permet d'atteindre des valeurs de quelques pourcentages

plusieurs pourcents. Par la suite, on indiquera le pourcentage de la réserve vidangée à chaque pas de temps, notée $f(X3)$, plutôt que la valeur de $X3$ elle-même ;

- $X4$: le temps de montée de l'hydrogramme unitaire, exprimé en heures.

Optimisation des paramètres

Une optimisation des paramètres du modèle a été réalisée sur l'ensemble des crues des 8 bassins versants au pas de temps 10 minutes. Dans le tableau 2, on ne donne que les valeurs moyennes et médianes des paramètres ainsi que leurs écart-types pour les 20 crues maximales de chaque bassin. Dans le cadre de la prédétermination des crues, ce sont en effet la paramétrisation de ces événements qui est intéressante. On mentionne également le coefficient de Nash, afin d'apprécier la qualité des crues modélisées par rapport aux observées, et le ratio entre le volume total écoulé par le coefficient d'écoulement direct (correspondant à la somme des P_N) et le volume écoulé total (ou somme des P_R). Sur ce dernier point, il s'agit essentiellement d'évaluer la cohérence du modèle compte tenu de la connaissance qu'on a du fonctionnement des bassins versants.

Tab.2: Moyennes, médianes et écart-types des paramètres pour les 20 crues maximales de chaque bassin versant

Tab.2: Means, medians and standard deviations of parameters on the 20 maximum flood events of each basin

Basins	X1 (%)	X2 (mm)	f(X3) (% of S/h)	X4 (h)	Ratio P_N/P_R (%)	Nash (%)
Laval	54.7	6.2	2.00	0.39	91.5	88.2
	51.7	7.1	0.44	0.38	95.5	88.7
	18.9	3.9	2.81	0.06	10.0	9.1
Brusquet	14.8	20.5	0.51	1.90	64.4	87.8
	13.6	14.0	0.42	1.60	63.3	90.2
	7.8	18.4	0.42	1.32	17.2	6.4
Rimbaud	30.1	36.2	2.47	1.20	49.8	86.3
	30.5	34.9	1.80	1.19	46.9	86.9
	6.9	22.0	2.06	0.60	13.1	7.0
Erlenbach	47.3	9.7	16.11	0.74	57.5	93.3
	48.5	10.1	12.94	0.74	60.3	94.8
	13.1	5.5	11.47	0.18	11.2	5.3
Lumpenbach	26.0	8.3	2.08	0.62	48.2	92.4
	24.1	7.3	0.84	0.63	46.1	94.4
	10.5	7.0	3.68	0.20	12.0	3.9
Vogelbach	30.0	10.0	6.30	0.69	54.0	90.9
	27.3	8.8	6.16	0.65	52.0	93.4
	13.6	5.7	3.74	0.29	14.7	7.9
Alma	25.4	20.1	1.89	0.47	83.4	92.0
	21.3	14.5	0.95	0.46	80.7	93.1
	10.0	12.4	2.26	0.16	11.2	6.3
Lézarde	41.6	22.0	3.21	0.75	74.4	90.0
	35.9	17.8	1.69	0.67	74.0	91.9
	12.6	16.7	6.21	0.31	16.4	8.0

Tout d'abord, il apparaît qu'on modélise de cette manière avec une bonne qualité les crues les plus fortes enregistrées. Les coefficients de Nash sont en moyenne d'environ 90 % avec une variabilité faible autour de cette valeur, de l'ordre de 7 %. Les résultats sont légèrement

meilleurs à la Martinique et dans la vallée de l'Alptal parce que les facteurs à l'origine des crues sont moins variables qu'à Draix ou à Collobrières. A la Martinique, les crues se produisent pendant la saison des pluies, suite à des averses très intenses pendant quelques dizaines de minutes et présentant des cumuls de l'ordre de 100 mm en 12 h. En Suisse, ce sont presque exclusivement les orages d'été qui provoquent les crues les plus importantes. A l'inverse, on peut avoir plusieurs déterminismes à l'origine des crues sur les 3 autres bassins, également soumis à des influences méditerranéennes. Enfin, le Laval est un bassin particulièrement sensible à l'intensité, qui est encore mal prise en compte avec un coefficient d'écoulement constant tout au long des crues.

De plus, les paramètres du modèle sont indépendants entre eux mais présentent une variabilité assez forte d'une crue à l'autre. Cela n'a rien d'étonnant étant donné que la paramétrisation d'une crue est liée à son propre déroulement par construction du modèle. Les valeurs prises par les paramètres sont donc difficiles à comparer entre elles. En revanche, elles facilitent la compréhension du déroulement des crues et mettent en évidence des tendances de fonctionnement plus spécifique de chaque bassin lorsque l'intensité des crues augmente.

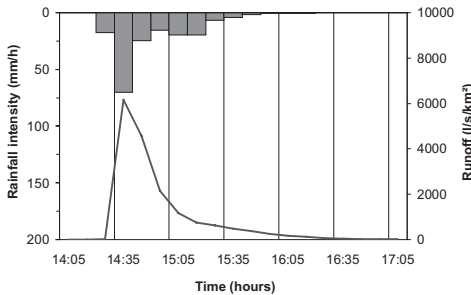
En ce qui concerne la production, le paramètre $X1$ correspond plus à un coefficient d'écoulement direct qu'à un coefficient d'écoulement classique, même s'il est bien corrélé linéairement avec les valeurs de ce dernier calculées sur les crues observées. Il donne une idée de la production du bassin, une fois que la rétention initiale a été prise en compte, et on constate aisément que les valeurs prises par ce paramètre sont bien plus fortes sur le Laval que sur le Brusquet. Il existe un lien entre ce paramètre et l'état de surface du bassin versant.

Pour expliquer ensuite, les valeurs observées au niveau de la séparation des écoulements, il faut également tenir compte du paramètre de vidange du modèle $f(X3)$. Celui-ci est représentatif des décrues enregistrées puisque plus sa valeur est élevée, plus le bassin se ressuie rapidement après l'arrêt de la pluie. Il est également fonction du découpage des couples averse-crue. Il est évident que des décrues longues contribuent à ce que ce paramètre prenne des valeurs importantes. En d'autres termes, si $f(X3)$ est faible, cela signifie soit que la part des écoulements issus du réservoir est faible, comme c'est le cas sur le bassin dégradé du Laval, soit que le bassin se ressuie longtemps après l'arrêt de la pluie, comme cela semble être le cas à la Martinique. En outre, s'il est particulièrement faible en moyenne sur le Brusquet, c'est simplement parce que sur les crues du type de celle de l'illustration 2, le ressuyage du bassin est très étalé dans le temps. Pour finir, les valeurs fortes obtenues pour le bassin de l'Erlenbach sont dues aux décrues très rapides de ce bassin, influencées par la présence des nombreuses zones humides, et celles du Vogelbach, vraisemblablement parce que les parties du bassin non recouvertes de forêt sont occupées également par des zones humides.

Ces remarques permettent de dire que la séparation des écoulements induite par le modèle s'explique par certaines caractéristiques des bassins. D'éventuelles observations de terrain qui valideraient ou non ces résultats ne sont pas disponibles. Néanmoins, ils ne sont pas dénués de sens et correspondent à l'idée qu'on se fait du fonctionnement des bassins. Ils montrent également que l'hypothèse selon laquelle les écoulements sur les petits bassins versants de montagne sont essentiellement de type hortonien n'est pas toujours vérifiée.

Les valeurs prises par les pertes initiales sont difficiles à interpréter. En effet, elles sont influencées par les cumuls de pluie antérieurs, par la structure de la pluie de l'événement et par les caractéristiques physiques des bassins versants. Elles sont ainsi faibles sur le bassin du

Laval, où l'intensité joue un rôle évident sur les crues, comme le montre l'illustration 7. En modélisation, le coefficient de Nash atteint 92,2 % avec des pertes initiales de l'ordre de 1 mm ($X1=32,5\%$, $f(X3)=0\%$, $X4=0,25\text{ h}$). Les pertes initiales sont généralement plus élevées sur



les bassins possédant des capacités de rétention fortes. Dans de tels cas, cette valeur augmente lorsque les cumuls de pluie enregistrés en début d'événement présentent des intensités modérées.

Illustr.7: Crue du 30 juillet 1994 sur le Laval (Draix)

Fig.7: Flood event of July 30th, 1994, River Laval (Draix)

Enfin, en ce qui concerne le paramètre de l'hydrogramme unitaire, celui-ci est directement représentatif du temps de montée de la crue. Dans la majorité des cas, les durées sont très courtes et la variabilité autour de la valeur moyenne faible. On nuancera cette remarque pour les bassins du Brusquet et du Rimbaud, où si les valeurs de $X4$ sont effectivement courtes lors des orages estivaux, elles sont beaucoup plus grandes lors des longs épisodes pluvieux d'automne ou de printemps. Ces caractéristiques de la pluie expliquent d'ailleurs bien les valeurs prises par ce paramètre, qui sur le bassin du Brusquet varie par exemple de 40 min le 16 juin 1996 à 4h30 le 8 avril 1987.

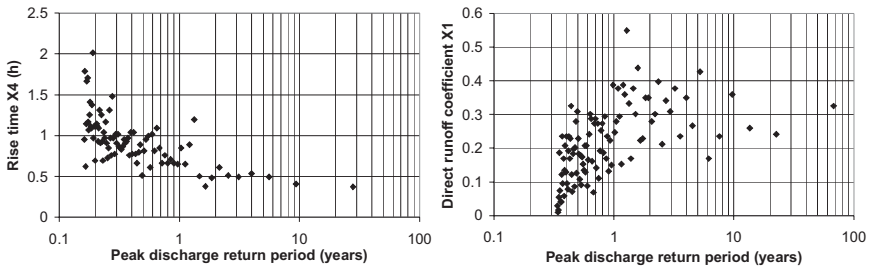
A ce stade de l'étude, nous disposons d'un outil de modélisation dont les résultats sont de bonne qualité, cohérents avec les observations et qui facilitent l'interprétation du déroulement des crues enregistrées. De plus, les valeurs des paramètres sont directement interprétables en fonction de caractéristiques simples, soit de l'événement pluvieux, soit du bassin versant lui-même.

Extrapolation des débits pour les fréquences rares

Notre objectif est de proposer à terme une méthode de prédétermination des débits de crue pour les petits bassins versants de montagne. Dans le cadre de l'estimation des débits de fréquences rares, il convient d'évaluer le fonctionnement des bassins lors des crues extrêmes. Une telle analyse peut être envisagée au moyen de l'outil de modélisation pluie-débit présenté ici. Cependant, cette étude n'a pas encore pu être conduite à son terme, notamment parce que la sensibilité du modèle aux valeurs des paramètres est pour l'instant mal connue.

Une nouvelle fois, les premiers résultats mis en évidence par le modèle sur le comportement asymptotique des débits sont très variables d'un site à l'autre et, pour un bassin donné, d'une crue à l'autre. Néanmoins, il est parfois possible d'observer des tendances d'évolution des paramètres qui pourront être très intéressantes par la suite. Ainsi, l'illustration 8 montre que les écoulements sont plus rapides, donc les valeurs du temps de montée plus faibles, pour les crues majeures que pour les crues courantes sur le bassin versant du Lumpenbach. D'autre part, il ressort également que le coefficient d'écoulement direct peut augmenter avec la valeur du débit

de pointe, comme l'illustre le cas du Rimbaud. La variabilité autour de ces tendances reste importante mais celles-ci ne sont pas négligeables pour autant.



Illustr.8: Evolution du temps de montée (Lumpenenbach, à gauche) et du coefficient d'écoulement direct (Rimbaud, à droite) en fonction de la période de retour du débit de pointe

Fig.8: Rise time (River Lumpenenbach, on the left) and direct runoff coefficient (River Rimbaud, on the right) ordered by peak discharge return period

Des évolutions similaires sont notées sur les autres bassins. On constate par exemple que les valeurs du temps de montée sont relativement stables à la Martinique, de la normale à l'extrême, avec en revanche une augmentation du coefficient d'écoulement direct avec le débit de pointe. Dans la vallée de l'Alptal, on enregistre plutôt l'inverse, avec un coefficient d'écoulement direct stable et une accélération des écoulements pour les crues les plus fortes.

En ce qui concerne les deux autres paramètres du modèle, vidange et pertes initiales, on maîtrise mal leur évolution en fonction de la période de retour de la crue. Pour la vidange, il semble que lors des crues extrêmes on puisse envisager soit de l'éliminer en première approximation, en considérant donc que l'écoulement direct est le processus principal de ce type d'événement, soit de la fixer à partir des résultats du tableau 2, sachant que, dans les deux cas, elle ne représente pas la majorité de l'écoulement autour du débit de pointe. La paramétrisation des pertes initiales est en revanche plus problématique dans la mesure où elles sont liées à l'état de surface du bassin, à son état de saturation et à la structure de l'épisode pluvieux.

D'autres recherches sont actuellement nécessaires pour bien apprécier l'importance de la production ou l'accélération du transfert lors du passage de la normale à l'extrême sur un bassin versant donné. On peut également essayer d'interpréter l'évolution des paramètres en fonction des caractéristiques de la pluie.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le modèle pluie-débit développé pour cette étude est un outil simple d'aide à la compréhension du fonctionnement des petits bassins versants de montagne. Les résultats obtenus en optimisation des paramètres sont encourageants. De plus, ils sont facilement interprétables en fonction de certaines caractéristiques physiques des bassins versants et du déroulement des pluies de chaque événement. Enfin, ce modèle a été développé à partir des observations effectuées directement sur les couples averse-crue en notre possession.

Actuellement, le modèle est toujours en cours de développement et d'amélioration. Pour cela, nous envisageons de le schématiser davantage en réduisant le nombre de fonctions aux deux ou trois plus importantes pour un bassin versant donné. Cela permettrait de distinguer des grands types de bassins versants, compte tenu de leurs comportements en crue, et de disposer de plusieurs sous-modèles, ayant une base de modélisation commune. D'un point de vue opérationnel, cette démarche pourrait être très utile. En parallèle, il s'agirait également d'évaluer l'intérêt d'intégrer maintenant dans la méthode, outre des seuils de cumuls, des seuils d'intensité, autant pour la fonction de production que pour la fonction de transfert. Sur les petits bassins versants particulièrement sensibles à l'intensité de la pluie, cette modification améliorerait la qualité de la modélisation de certaines crues.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier 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.

BIBLIOGRAPHIE

- Arnaud P., Lavabre J. (1999): Using a stochastic model for generating hourly hyetographs to study extreme rainfalls, *Hydrological Sciences Journal*, 44 (3), pp. 433-446.
- Arnaud P., Lavabre J. (2002): Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation, *Water Resources Research*, 38 (6), 11 p.
- Graff B., Fouchier C., Lavabre J., Servat E. (2003): Connaissance régionale des crues en milieu méditerranéen : contrôle des performances sur 3 bassins versants de recherche. *Hydrology of mediterranean and semi-arid regions* Montpellier, IAHS, n° 278, pp. 290-297.
- Martin C., Lavabre J. (2000) : Décomposition des crues après un incendie de forêt : estimation de la part du ruissellement sur les versants, *Conséquences d'un incendie de forêt dans le bassin versant du Rimbaud*, Cemagref Editions, Chapitre V, pp. 59-72.
- Lavabre J., Folton N., Fouchier C., Faure-Soulet A. (2002): Prédétermination régionale des débits de crue. Cas de la zone méditerranéenne française. *4^{ème} Conférence Internationale FRIEND Mars 2002*, Cape Town (Afrique du Sud). AISH Publ. n° 274, pp. 123-130.
- Scherrer S., Naef F. (2003) : A decision scheme to indicate dominant hydrological flow processes on temperate grassland, *Hydrological Processes*, 17 (2), pp. 391-401.