

## Analyse hydro-pluviométrique des crues du Gard et du Vidourle des 8 et 9 septembre 2002

*Hydrological analysis of the Gard and Vidourle river floods  
on the 8<sup>th</sup> and 9<sup>th</sup> September 2002*

Eric Gaume

CEREVE-ENGREF-ENPC<sup>1</sup>

Christophe Bouvier

Hydrosciences Montpellier UMR 5569 (UM II-CNRS-IRD)

*On the 8<sup>th</sup> and the 9<sup>th</sup> of September 2002, the Gard region received rainfall amounts locally exceeding 600 millimetres over 48 hours. This extreme rainfall event induced the most important flood of the Gard river of the century and major floods of the nearby Vidourle and Cèze rivers. The peak discharge of the Gard river is estimated between 5 000 and 6 000 m<sup>3</sup>/s for a watershed area of 1 855 km<sup>2</sup>. It also produced remarkable flash floods of some of the Gard, Vidourle and Cèze river tributaries. Peak flood discharges of some upstream watersheds (areas smaller than 100 km<sup>2</sup>) seem to have exceeded 20 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. An extensive post flood investigation has been conducted by research teams involved in the "Cévennes-Vivarais Mediterranean Hydro-Meteorological Observatory" (Delrieu et al., 2003) to collect information about the floods of most of the tributaries of the Gard river and to analyse the hydrological behaviour of the watersheds during this extreme rainfall event. Beside the analysis of the available rainfall data and the estimations of peak discharges on the basis of the high water marks, elements concerning the timing of the floods given by eyewitnesses have been gathered. Simple hydrological models have been used to guide the hydrological interpretation. This type of study aims at increasing the sparse knowledge about the dynamics of the watershed responses during flash floods which is absolutely necessary to improve the flood warning and prediction methods. The comparison of the observed behaviours of various watersheds also reveals the effective influence of the land use, the geology and the soil types on flash floods. The investigation procedure as well as some hydrological interpretation results are presented herein*

### I ■ INTRODUCTION

L'amélioration des techniques de prévention et de prévention des crues en général, et des crues éclair méditerranéennes en particulier, doit pouvoir s'appuyer sur une meilleure compréhension du fonctionnement hydrologique des bassins versants lors des épisodes de pluies intenses : quelle est la dynamique de réponse des bassins versants aux pluies, quelle est l'influence éventuelle de la géologie, de la pédologie, de l'occupation des sols ou encore de l'aménagement des cours d'eau ? Pour tenter de répondre à ces questions il est nécessaire de documenter de manière aussi détaillée que

possible ces événements et de valoriser d'un point de vue hydrologique les données collectées.

C'est dans ce but qu'a été conduite une vaste campagne de retour d'expérience hydrologique à la suite des crues des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard. Une méthodologie mise au point dans le cadre de l'analyse des crues de l'Avène de 1997 et de l'Aude de 1999 (Gaume, 2002) a été employée. Au-delà de la collecte et de l'analyse critique des données pluviométriques, radar et limnimétriques disponibles, d'estimations de débits de pointe de crues à partir de levés de sections d'écoulement et de l'application de formules hydrauliques empiriques, cette approche vise à exploiter l'ensemble des informations disponibles sur l'évolution des niveaux d'eau au cours du temps, y compris celles qui sont fournies par les témoins oculaires des crues.

1. ENPC-CEREVE, 6, av. Blaise Pascal, 66455 Marne-la-Vallée Cedex 2.

## II ■ L'ENQUÊTE DE TERRAIN

### ● I.1 Description

Une vingtaine de chercheurs, la plupart membres de l'Observatoire Hydrométéorologique Cévennes-Vivarais, ainsi que des élèves de l'École Nationale Supérieure des Mines d'Alès, ont participé aux campagnes de collecte des données de terrain qui se sont déroulées entre novembre 2002 et janvier 2003. 93 sections d'écoulement et 143 témoignages ont été relevés (fig. 1). Une quinzaine de documents vidéos ont aussi été rassemblés : certains ont été analysés pour évaluer les vitesses d'écoulement au cours de la crue et valider les estimations de débit proposées (Thèse de Guillaume Fourquet, LTHE, Grenoble). Ces relevés font presque tous l'objet d'une fiche de synthèse et peuvent être consultés à partir d'une base de données géographiques au format MapInfo<sup>2</sup>.

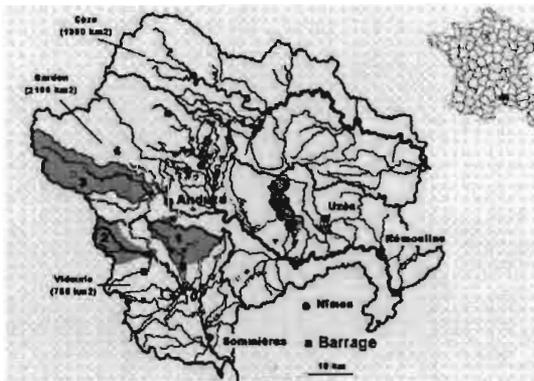


Figure 1 : Les bassins versants du Vidourle, du Gard et de la Cèze, localisation des bassins du Criulon (1) et du Vidourle amont (2), Gardon de Saint-Jean (3), Bourdic (4) et données collectées : témoignages (triangles) et levés de sections d'écoulement (losanges).

Ces informations collectées complètent le jeu de données mesurées disponibles : données pluviométriques (cf. article de Delrieu *et al.* dans ce volume) et limnimétriques. Elles permettent de proposer des estimations de débits de crue ainsi que des points de repère chronologiques pour la plupart des affluents du Gard et du Vidourle qui ne sont pas équipés de station de mesure.

## III ■ RÉSULTATS

### ● II.1 Répartition spatiale des écoulements

Une carte des débits de pointe de crue des affluents du Vidourle et du Gard a pu être dressée à partir des débits estimés (fig. 2). Il s'agit d'estimations de débits dont le niveau d'incertitude est difficile à évaluer mais relativement élevé. Chaque valeur est à affecter d'un niveau d'incertitude d'au moins +/- 50 %. Toutefois les tendances sont suffisamment

nettes pour pouvoir tirer des enseignements de ces ordres de grandeur. Tous les affluents considérés drainent des bassins versants de surface inférieure à 100 km<sup>2</sup> (cf. tab. 1).

La répartition spatiale des contributions des affluents recoupe celle des cumuls de pluie. Les ordres de grandeur des débits estimés sont en accord avec les intensités de pluie observées et suggèrent des rendements marginaux d'écoulement au paroxysme de la crue très élevés sur de nombreux affluents du Gard ou du Vidourle<sup>3</sup> (i.e. rendements supérieurs à 70 ou 80 %). Deux grands traits caractéristiques des crues du Gard apparaissent, de plus, sur la figure 2.

D'une part, les débits de pointe de la plupart des affluents du Gard et du Vidourle sont très élevés : vraisemblablement plus de 5 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> pour la quasi totalité d'entre eux, et plus de 10 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> pour des affluents dont les bassins versants couvrent près de la moitié de la surface totale des bassins du Gard et du Vidourle. L'extension spatiale tout à fait exceptionnelle des pluies intenses des 8 et 9 septembre 2002 et des crues éclair qu'elles ont provoquées explique les valeurs remarquables des débits estimés des crues du Gard à Remoulins et du Vidourle à Sommières : 5 000 à 6 000 m<sup>3</sup>/s, voire plus, pour un bassin versant de 1 855 km<sup>2</sup> dans le cas du Gard et 2 500 à 3 000 m<sup>3</sup>/s pour un bassin versant de 620 km<sup>2</sup> dans le cas du Vidourle<sup>4</sup>. D'autre part, les débits de certains affluents de petits bassins versants, situés sur les premiers contreforts des Cévennes entre Anduze et Alès, auraient dépassé, selon les estimations réalisées, 20 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>. Une telle valeur place ces épisodes parmi les plus importants répertoriés pour des bassins versants de surface comparable : de 10 à 100 km<sup>2</sup> (Costa, 1987; Pardé, 1961).

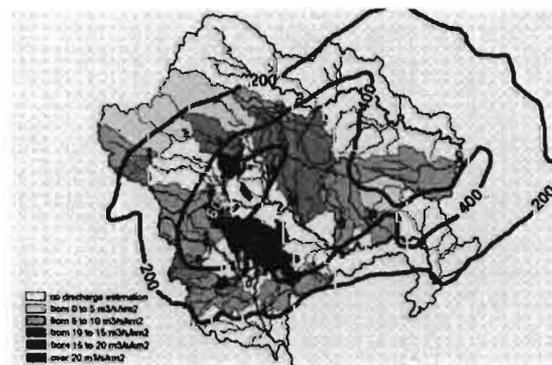


Figure 2. Débits spécifiques de pointes de crue estimés (incertitude de +/- 50 %) pour différents affluents du Vidourle, du Gard et de la Cèze.

### ● II.2 Répartition temporelle des écoulements

Les enregistrements pluviométriques et radar ainsi que les données chronologiques sur les crues des différents affluents du Gard, reconstituées à partir des témoignages, indiquent que le déroulement de la crue a été particulièrement défavo-

3. 1 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup> équivaut à 3,6 mm/h.

4. A titre de comparaison, le débit de pointe de la crue de l'Aude de 1999 à la station de Moussoulens a été estimé à 3 200 m<sup>3</sup>/s pour un bassin versant de 4 800 km<sup>2</sup> et celui de la crue de l'Ardèche de 1 890 à Vallon Pont d'Arc entre 6 000 et 7 000 m<sup>3</sup>/s pour un bassin versant de 1 950 km<sup>2</sup> (Sheffer *et al.*, 2003 ; Pardé, 1959).

2. Cette base de données est disponible à l'adresse : <http://www.cnpc.fr/cereve/HomePages/gaume/gard02b.zip>.

nable sur la partie aval du cours du Gard dans la matinée du 9 septembre (tab. 1). Des pluies intenses et localisées se sont développées dans la nuit à partir de 4 h TU, tout d'abord sur les Cévennes à l'amont du bassin, avant de se décaler vers le

sud-est, c'est-à-dire en suivant le cours du Gard. Les pointes de crues des différents affluents (Avène, Droude, Bourdic, Alzon) se sont succédées dans le temps de l'amont vers l'aval comme l'illustre la figure 3.

Tableau 1. Synthèse des données reconstituées pour les affluents du Vidourle, du Gard et de la Cèze étudiés.

| N° | Cours d'eau et localisation    | Bassin versant (km <sup>2</sup> ) | Débit de pointe (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> ) | Débit (m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> km <sup>-2</sup> ) | Première pointe (TU) | Seconde pointe (TU) |
|----|--------------------------------|-----------------------------------|---|--|----------------------|---------------------|
| 1  | Aigalade, Pondre               | 42                                | 250   | 6  | 15 h 00, 08/09       | 11 h 00, 09/09      |
| 2  | Brestalou, Brouzet-les-Quissac | 88                                | 500   | 5,5  | 21 h 00, 08/09       | 08 h 00, 09/09      |
| 3  | Courme, Montmirat              | 38                                | 650   | 17   | 17 h 00, 08/09       | 10 h 00, 09/09      |
| 4  | Crieulon, la Rouvière          | 95                                | 1 400   | 15   | 23 h 00, 08/09       | 08 h 00, 09/09      |
| 5  | Vidourle, Conqueyrac           | 83                                | 600   | 7  | 00 h 00, 09/09       | 06 h 00, 09/09      |
| 6  | Rieumassel, Ceyrac             | 45                                | 500   | 11   | 21 h 00, 08/09       | 09 h 00, 09/09      |
| 7  | Galeizon                       | 85                                | 1 200   | 14   | 06 h 00, 09/09       |                     |
| 8  | Gardon, Saint Etienne          | 84                                | 400   | 5  | 04 h 00, 09/09       |                     |
| 9  | Gardon, Saumane                | 67                                | 500   | 7,5  | 06 h 00, 09/09       |                     |
| 10 | Amous, Gènerargues             | 21                                | 400   | 19   | 04 h 00, 09/09       |                     |
| 11 | Alzon, Saint Jean du Pin       | 15                                | 450   | 30   | 05 h 00, 09/09       |                     |
| 12 | Ourne, Tornac                  | 11                                | 300   | 27   | 23 h 00, 08/09       | 06 h 00, 09/09      |
| 13 | Avène, Saint Hilaire           | 57                                | 600   | 10,5   | 03 h 00, 09/09       | 05 h 00, 09/09      |
| 14 | Droude, Brignon                | 99                                | 1 200   | 12   | 22 h 00, 08/09       | 09 h 00, 09/09      |
| 15 | Bourdic, Bourdic               | 39                                | 500   | 13   | 22 h 00, 08/09       | 10 h 00, 09/09      |
| 16 | Alzon, Uzès                    | 76                                | 250   | 3  | 22 h 00, 08/09       | 10 h 00, 09/09      |
| 17 | Auzonnet, Les Mages            | 46                                | 450   | 10   | 06 h 00, 09/08       |                     |

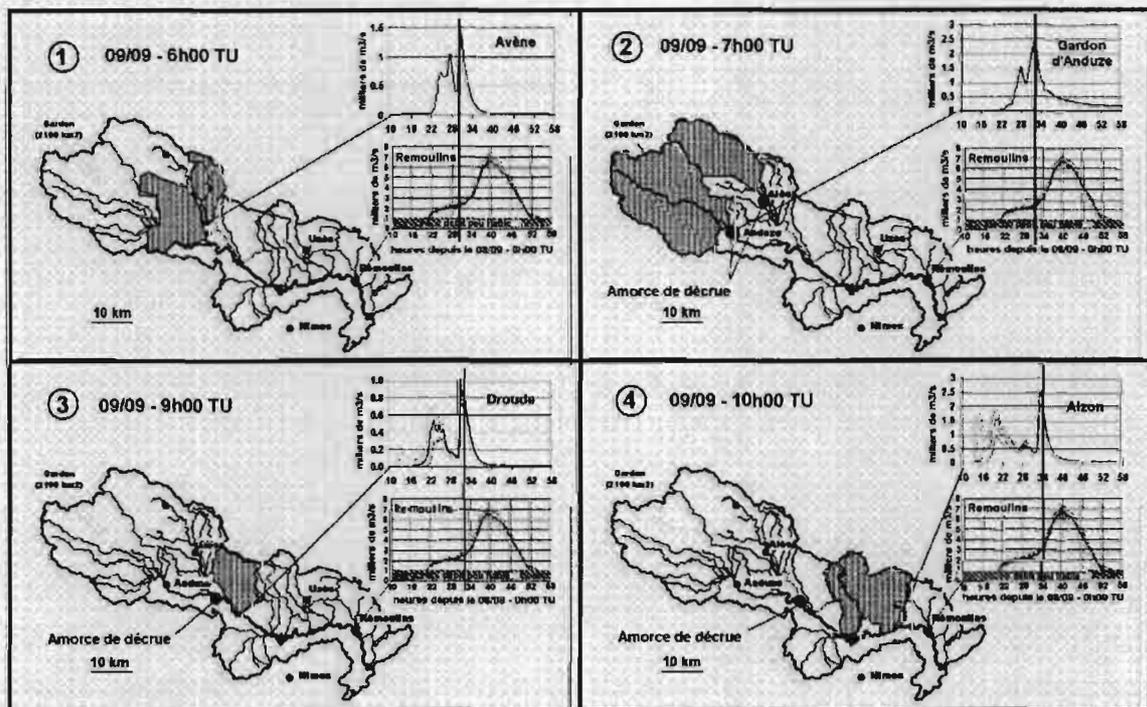


Figure 3. Chronologie de la crue du Gard, les bassins versants des affluents qui connaissent leur pointe de crue sont grisés. Exemples d'hydrogrammes reconstitués à partir de relevés limnimétriques (Anduze (SIEE, 2003), Remoulins (SOGREAH, 2003)) ou de simulations pluie-débit et témoignages (Avène, Droude, Alzon).

## Crues Méditerranéennes : l'aléa et la gestion de crise

A 10 h TU (midi en heure locale), les pluies se sont interrompues. Tous les affluents du Gard étaient alors en décrue alors que la montée de crue s'amorçait à peine à Remoulins. La forme de l'hydrogramme à Remoulins est donc uniquement le fruit du transfert le long du cours du Gard, des apports des différents affluents. En simplifiant, on peut dire que cet hydrogramme résulte de la composition des hydrogrammes des différents affluents dont les arrivées se sont succédées dans le temps à Remoulins. Son analyse détaillée donne des indications intéressantes sur le fonctionnement hydraulique de la vallée du Gard et en particulier sur le rôle important de la Gardonnenque : large vallée inondable occupant le cours intermédiaire du Gard entre la confluence des deux Gardons d'Alès et d'Anduze et l'entrée des gorges du Gard au nord de Nîmes.

La décrue n'a débuté que vers 19 h TU à Remoulins, soit 9 h après l'interruption des pluies. Cette décrue est liée au passage des ondes de crues des Gardons d'Anduze et d'Alès qui, en quelque sorte, ferment la marche. Compte tenu des vitesses d'écoulement, ces ondes et donc le « signal » de l'amorce de la décrue se sont propagées probablement à plus de 10 km/h dans les parties « chenalisées » de la vallée du Gard : en dehors de la Gardonnenque. Les localisations probables de l'amorce de décrue sont indiquées sur les figures 2, 3 et 4. Cette onde de crue n'a probablement pas mis beaucoup plus de trois heures pour parcourir la distance qui sépare l'entrée des gorges de Remoulins. On en déduit donc que la traversée de la Gardonnenque par les ondes de crue amont a probablement mis près de six heures.

Ces ordres de grandeurs doivent être confrontés aux résultats d'une modélisation hydraulique réalisée actuellement par SOGREAH. On peut cependant d'ores et déjà conclure que l'inondation de la Gardonnenque a fortement ralenti la propagation des crues de l'amont du Gard et évité la concomitance avec les crues des affluents aval : si la propagation des ondes de crues le long du cours du Gard avait été plus rapide, le même volume de crue se serait écoulé en un temps plus court à Remoulins et le débit de pointe de crue aurait augmenté en proportion.

### II.3 Analyse de la réponse hydrologique des bassins versants

Les valeurs de débits estimées indiquent que les coefficients d'écoulement ont été très élevés sur la majeure par-

tie des bassins versants touchés par l'épisode de septembre 2002. Une analyse détaillée des données hydrologiques collectées semble cependant révéler une diversité de réponses hydrologiques aux pluies intenses comme l'illustrent la figure 4 et la figure 5.

La figure 4 permet de comparer des hydrogrammes reconstitués à partir de mesures limnimétriques et simulés avec un modèle pluie-débit très simple : modèle du SCS (Soil conservation service) pour le calcul du rendement d'écoulement des bassins versants et modèle d'onde cinématique pour le transfert des volumes écoulés vers l'exutoire du bassin. Les lames d'eau spatiales estimées à partir des images radar calibrées constituent l'entrée de ce modèle. Un seul paramètre est modifié : le Curve Number (CN) dont la signification est expliquée dans ce qui suit. Dans le cas de ces deux bassins versants, la station limnimétrique se situe au droit d'un barrage écrêteur de crues dont les lois de remplissage et de vidange sont relativement bien connues. La comparaison des débits reconstitués et des résultats de simulation fait apparaître deux types de comportement hydrologique bien différenciés.

Le modèle hydrologique proposé permet de reproduire de manière très satisfaisante l'hydrogramme de la crue du Criulon (A). Le bassin versant réagit avec un léger retard aux pluies (cf. simulation avec une valeur de paramètre CN = 100 impliquant un ruissellement à 100 % dès le début de l'événement). La valeur du paramètre CN la mieux ajustée aux données (CN = 70) indique une capacité modérée de rétention d'eau par le sol et le sous-sol du bassin : de l'ordre de 100 millimètres de pluie. Le coefficient d'écoulement semble avoir été très proche de 100 % au paroxysme de la crue.

En revanche, le coefficient d'écoulement reste très nettement inférieur à 100 % tout au long de l'événement dans le cas du Vidourle amont (B) : l'hydrogramme mesuré ne rejoint jamais l'hydrogramme simulé avec une valeur de CN égale à 100. Le bassin versant semble conserver des capacités de rétention d'eau. On peut observer, de plus, qu'un débit important, que ne simule pas le modèle pluie-débit, se maintient dans le Vidourle après l'interruption des pluies, au moins jusqu'au milieu de la journée du 11 septembre. Ce n'est pas le cas pour le Criulon. Une part de l'eau de pluie stockée temporairement sur le bassin versant est donc restituée après l'interruption des pluies : selon les débits reconstitués, près de 40 millimètres de pluie sont ainsi restitués par le bassin entre le 9 septembre à minuit et le 11 septembre à 12 h soit près du sixième de l'écoulement total. Si

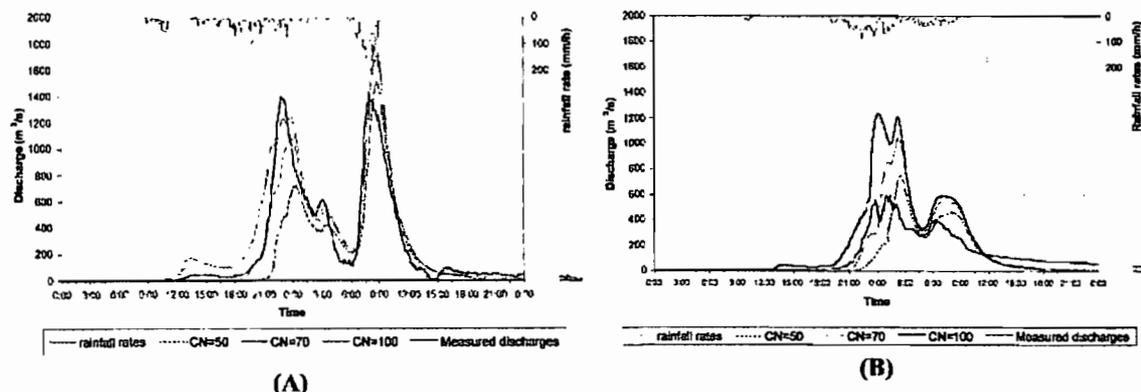


Figure 4. Hydrogrammes de la crue des 8 et 9 septembre 2002 simulés et « mesurés » : cas du Criulon (A) du Vidourle amont (B).

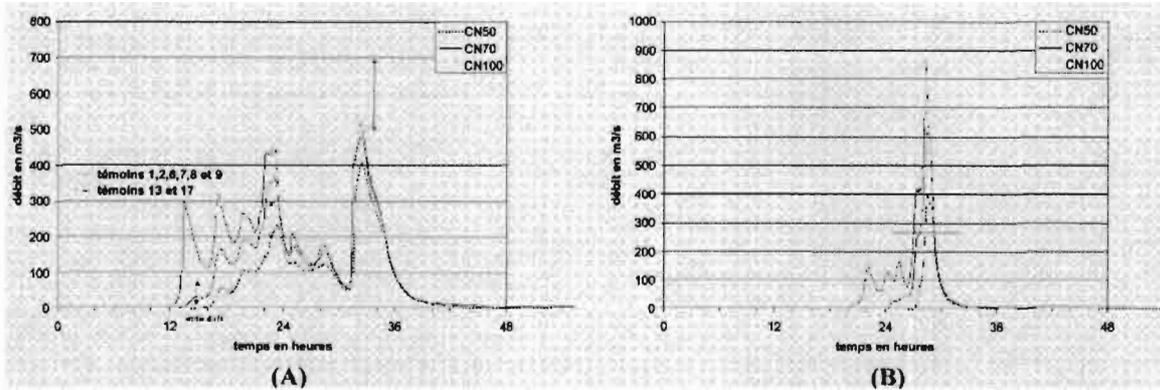


Figure 5. Hydrogrammes de la crue des 8 et 9 septembre 2002 simulés et débits estimés positionnés dans le temps grâce aux témoignages : cas du Bourdic à Bourdic (A) du Gardon de Saint Jean (B).

on prend en compte ce volume restitué de manière retardée, la capacité de rétention, ou déficit d'écoulement, du bassin versant du Vidourle amont apparaît comparable à celle du Criulon : de l'ordre de 100 millimètres. Ces valeurs de déficit d'écoulement sont sensiblement inférieures à celles qui avaient été estimées dans le cas d'autres crues éclair récentes (Gaume, 2002 ; Belmonte & Beltran, 2001 ; Cosandey, 1993). La nature karstique du sous-sol du bassin versant du Vidourle amont pourrait expliquer sa réaction hydrologique et en particulier l'existence de cet écoulement soutenu après l'interruption des pluies.

L'analyse d'autres données disponibles (fig. 5) montre que de fortes capacités de rétention et des coefficients d'écoulement nettement inférieurs à 100 % sont observés sur d'autres secteurs non karstiques du département du Gard. La réponse hydrologique du Bourdic situé sur des terrains calcaires et marneux de l'Eocène pourrait être rapprochée de celle du Criulon. La réponse retardée du bassin étant cependant plus nette : la première averse qui touche le bassin à partir de 14 h le 8 septembre est immédiatement intense et les témoignages permettent d'établir qu'elle a, à peine, fait sortir le Bourdic de son lit mineur. Le paramètre CN pourrait se situer entre 50 et 70.

Les débits estimés sur le Gardon de Saint-Jean du Gard (B) et sur tous les bassins versants situés en amont d'Anduze indiquent que les coefficients d'écoulement ont été modérés dans ce secteur, essentiellement situés sur schistes. D'autre part, un débit soutenu se maintient à la station d'Anduze durant quelques jours, après l'interruption des pluies, témoignant d'une restitution retardée d'une partie de l'eau

de pluie retenue par les sols et le sous-sol de ces bassins versants. Des travaux de recherche approfondis se poursuivent actuellement sur le Gardon d'Anduze. Le caractère très drainant des sols sur schistes des bassins versants cévenols est confirmé par des essais d'infiltrations menés sur une parcelle expérimentale par la DDE du Gard et l'École Nationale des Mines d'Alès dans le cadre d'une thèse en cours (Pierre-Alain Ayrat, thèse de l'ENSMA). Les capacités importantes de rétention d'eau des bassins situés en amont d'Anduze se confirment sur un échantillon plus large de crues et un modèle adapté à la dynamique de réponse hydrologique de ces bassins en période de crue a été mis au point : les essais de modélisation situent les valeurs du paramètre CN entre 45 et 55 (Marchandise et al., 2004).

#### ● II.4 Enseignements tirés du bilan hydrologique de la crue

Les hydrogrammes complets, lorsqu'ils ont pu être reconstitués à partir des données limnimétriques, permettent de dresser le bilan hydrologique de la crue des 8 et 9 septembre 2002 (cf. tab 2). Aucun jaugeage n'a pu être réalisé durant cette crue et les jaugeages existants, peu nombreux, correspondent à des débits bien plus faibles que ceux qui ont été observés en 2002. Les hydrogrammes ont été reconstitués après un important travail de simulation hydraulique. Les modèles n'ayant pu être réellement calés sur des crues comparables, ces estimations reposent donc en grande partie sur l'expertise des modélisateurs.

Tableau 2. Bilan de la crue des 8 et 9 septembre 2002 sur différents bassins versants. Lames d'eau estimées à partir des données calibrées du RADAR de Nîmes (1) et de Bollène (2). Débits et volumes de crue écoulés jusqu'au 11/09 midi et jusqu'au 9/09 minuit (entre parenthèses). Courbes de tarage issues des études SIEE (\*) et BRL (\*\*).

|                                   | La Rouvière        | Conqueyrac   | Sommières      | Anduze                | Remoulins  |
|-----------------------------------|--------------------|--------------|----------------|-----------------------|------------|
| Bassin versant (km <sup>2</sup> ) | 91                 | 83           | 620            | 544                   | 1 855      |
| Cumul pluie (mm)                  | (1) 560<br>(2) 593 | 406<br>354   | 404<br>402     | (1) 287<br>277        | 395<br>395 |
| Cumul écoulé (mm)                 | 452<br>(440)       | 253<br>(214) | 275**<br>(195) | 120-180*<br>(100-140) | 180-200    |
| Déficit (mm)                      | 110-150            | 100-150      | 125            | 100-160               | 195-215    |

Dans le cas de la crue du Gard à Remoulins, nous avons retenu le cumul reconstitué à partir des enregistrements limnimétriques de la Compagnie Nationale du Rhône sur la crue du Rhône, après correction des courbes de tarage (IGE, 2004). Les déficits d'écoulement calculés (différence entre le volume de pluie sur le bassin versant et le volume de crue) sont en accord avec les valeurs du paramètre CN calées à partir des données disponibles sur les différents affluents du Gard (généralement entre 65 et 50 soit une capacité potentielle de stockage de 140 à 250 millimètres de pluie sur le bassin versant). Dans le cas d'Anduze, le déficit d'écoulement n'est pas représentatif de la capacité potentielle de stockage du bassin versant, car les cumuls de pluie ont été plus faibles sur ce secteur et n'ont pas permis de saturer cette capacité.

Dans le cas du bassin du Vidourle, les déficits d'écoulement et les capacités de rétention apparaissent globalement plus faibles que dans le cas du Gard, qu'il s'agisse du bassin du Crieulon ou du Vidourle amont à Conqueyrac : l'origine exacte de ces apparentes différences de comportement reste à explorer. Par ailleurs, il semble que l'hydrogramme reconstitué à Sommières pose problème. Le volume global de la crue et le déficit d'écoulement sont compatibles avec ceux estimés dans le cas du Crieulon et du Vidourle amont. Mais leur répartition dans le temps est curieuse. Le volume écoulé retardé de près de 80 millimètres apparaît trop élevé si on le compare à celui du bassin versant karstique situé en amont de Conqueyrac (40 millimètres), probablement l'une des principales sources d'alimentation du Vidourle après la crue. Inversement, le volume d'écoulement rapide estimé (195 millimètres) est plus faible que tous ceux qui ont été estimés sur les affluents du Vidourle, soit à partir des relevés limnimétriques, soit à partir de simulations pluie-débit. L'hydrogramme reconstitué de la crue du Vidourle à Sommières, dans une section très délicate, avec un écoulement important en lit majeur, apparaît donc douteux. Il y a fort à penser que la relation hauteur-débit présente une forte hystérèse dans cette section : vitesses longitudinales beaucoup plus importantes durant la phase de montée de crue qu'à la décrue. Un tel phénomène de « stagnation » des eaux dans le lit majeur semble avoir été aussi observé lors de la crue de l'Avène de 1997 (Gaume, 2002).

#### IV ■ CONCLUSIONS

Les techniques de mesure et d'analyse ont évolué depuis la crue de 1958. Parmi les principales avancées, figurent l'automatisation et la télétransmission des mesures, la modélisation et, c'est certainement le plus important, la mesure de pluie par radar. Dans le cas de la crue de 2002, deux radars ont fonctionné (Bollène et Nîmes), et les intensités radar reconstituées se sont avérées cohérentes entre elles et avec les mesures au sol. Ces mesures radar permettent de reconstituer des lames d'eau à des échelles de temps et d'espace bien inférieures à la journée et au millier de kilomètres carrés. Ces échelles sont nécessaires à l'analyse détaillée de la réponse hydrologique de sous-bassins versants de petites surfaces.

Le principal facteur limitant réside désormais dans l'estimation des débits et des volumes écoulés, non seulement parce que le nombre de stations limnimétriques est limité, mais aussi et surtout parce que les courbes de tarage de ces stations sont peu fiables. La reconstitution hydraulique d'écoulements dans des sections naturelles non calibrées, sans mesures directes de vitesses pour caler les modèles, relève en grande partie du dire d'expert et n'est donc pas

une garantie de précision. Le réseau limnimétrique du Gard a été mis en place dans un objectif d'annonce de crues : il s'agissait de détecter le dépassement de niveaux d'eau prédéterminés et les tendances d'évolutions de ces niveaux. L'objectif actuel affiché est le passage à la prévision des crues, qui nécessite la mise en œuvre de modèles hydrologiques et hydrauliques, qu'il est nécessaire d'alimenter avec des valeurs de débits et de volumes. L'expérience de la crue du Gard démontre que ce passage à la prévision ne pourra se faire sans un important effort hydrométrique : multiplication des jaugeages afin de bien connaître les stations de mesure, choix des sites de mesure en fonction de critères hydrauliques plutôt que des critères d'accessibilité, aménagement des sections de mesure par la construction de seuils, élimination de la végétation... L'urgence réside certainement dans la consolidation des réseaux de mesure existants plutôt que dans la multiplication des sites de mesure. Le réseau hydrométrique du Gard avait temporairement été étoffé à la suite de la crue de 1958. De cet effort, il ne reste aujourd'hui presque rien : ni les stations, ni les données.

Quelles que soient la qualité et la densité des réseaux hydrométriques, le retour d'expérience hydrologique tel qu'il a été décrit ici constitue un complément important aux informations fournies par le réseau de mesure pérenne. Les données collectées sur l'événement des 8 et 9 septembre 2002 et leur analyse ont permis de révéler une certaine hétérogénéité spatiale des contributions des bassins versants. Les contributions les plus importantes avec des débits spécifiques tout à fait exceptionnels ayant pu dépasser localement  $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^{25}$  proviennent des parties intermédiaires des bassins du Gard et du Vidourle, sur un axe Alès-Anduze correspondant aux premiers reliefs des Cévennes : bassins versants du Galeizon, de l'Alzon, de l'Amous, de l'Ourne, mais aussi du Crieulon. La chronologie des apports des affluents du Gard reconstituée à partir de témoignages a permis de mieux comprendre la formation de la crue du Gard et le rôle qu'a joué le secteur de la Gardonnenque. Un autre constat important est la réponse assez rapide de certains bassins versants aux pluies et leur apparente faible capacité de rétention d'eau. Le déficit d'écoulement sur les sous-bassins du Vidourle sur lesquels on disposait de données précises est de l'ordre de 100 millimètres de pluie, soit sensiblement inférieur aux 200 millimètres estimés dans le cas des crues de l'Aude. Enfin des différences notables de comportement hydrologique des bassins versants semblent apparaître à la lumière des données collectées, dont l'origine reste à explorer.

Le retour d'expérience hydrologique fait essentiellement appel à des techniques simples et rustiques. La collecte des données disponibles sur les crues éclair, qui comme nous venons de le voir, peuvent être riches d'enseignements, ne doit pas pour autant être boudée par les hydrologues. A ce titre, les chercheurs d'autres disciplines telles que la vulcanologie et la sismologie montrent l'exemple et ont pris l'habitude d'observer les événements majeurs ou leurs conséquences. Les grandes crues récentes (Aude 1999, Gard 2002) ont éveillé l'intérêt de la communauté hydrologique scientifique et technique. Dix-huit chercheurs issus de dix institutions de recherche différentes ont pris part à la cam-

5. A titre de comparaison, les débits observés sur des bassins de superficie équivalente lors des crues de l'hiver 2000-2001 en Bretagne (crues centanales) étaient de l'ordre de  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ , le débit de pointe d'une crue décennale pour ces surfaces en région méditerranéenne se situe entre 1 et  $2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ .

pagne de collecte des données sur les crues 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard. Espérons que ce soit le premier pas vers la systématisation des retours d'expériences hydrologiques sur les crues éclair, outil, parmi d'autres, indispensable à l'amélioration des connaissances hydrologiques et donc des outils de prévention et de prévision des crues.

## REMERCIEMENTS

Cet article a largement bénéficié des réflexions menées par les membres d'un groupe de travail sur les crues des 8 et 9 septembre 2002, constitué à l'instigation de Roland Claudet de la DIREN Languedoc-Roussillon et de Daniel Duband de la SHF. Nous remercions vivement Philippe Bois, Guy Delrieu, Daniel Duband, Rémy Garçon et Charles Obléd pour leur contribution ainsi que Pierre-Emmanuel Kirsteter, Alexandra Lequien, Arthur Marchandise, Olivier Payrastré et Barbara Rosa Da Silva pour l'exploitation des données disponibles.

## BIBLIOGRAPHIE

- BELMONTE A.C., BELTRAN F.S. (2001). — Flood events in Mediterranean ephemeral streams (ramblas) in Valencia region. *Spain, Catena*, 45, 229-249.
- COSANDEY C. (1993). — La crue du 22 septembre 1992 sur le Mont Lozère. *Revue de Géomorphologie dynamique*, 2, 49-56.

COSTA J.E. (1987). — Hydraulics and basin morphometry of the largest flash floods in the conterminous United States. *Journal of Hydrology*, 93, 313-338.

GAUME E. (2002). — Eléments d'analyse sur les crues éclair, thèse de doctorat de l'Ecole nationale du génie rural des eaux et des forêts.

Inspection Générale de l'Environnement, 2004. Rapport du groupe d'appui d'expertise scientifique à la mission de l'IGE sur les crues du Rhône de 2003.

SHEFFER N.A., ENZEL Y., LANG M., NAULET R., CŒUR D. (2003). Paleofloods and historical floods of the Ardèche river, France. *Water Resources Research*, 39 (12).

MARCHANDISE, LEQUIEN, BRUNET, CRESPIY, BOUVIER (2004). — Distributed rainfall/runoff modelling of September 2002 flood in 2 southern France river basins. In Proc. BALWOIS 2004, Conference on Water Observation and Information System for Decision Support, Ohrid (Macedonia), 25-29 May 2004.

PARDÉ M. (1961). — Sur la puissance des crues en diverses parties du monde. *Geographica*, 8, 1-293.

PARDÉ (1959). — Quelques remarques sur les crues cévenoles de septembre et octobre 1958. *Mémoires et travaux de la SHF*, 1, 38-49.

SIEE (2003). — Validation des relevés hydrométriques de l'événement des 8 et 9 septembre 2002, rapport d'étude, DDE du Gard.

SOGREAH (2003). — Validation des relevés hydrométriques de l'événement des 8 et 9 septembre 2002, rapport d'étude, DDE du Gard.

River : The Livornak, right hand tributary of the Aisan river  
 Witness : Mr et Mme Maury  
 Coordinates : N 736812, Y 1902451 (Lambert II etendu)  
 Established by : Olivier Payrastré (CERUEVE)  
 Date : le 17 January 2003  
 Description of the site : House located on the left bank.

Location map



Photograph



**Summary of the interview:**

- The rainfall began on Monday the 8th of September during the day, and lasted without interruption until the evening of the evening.
- During the night, around midnight, the house of M. Boyiot, our neighbour, which is closer to the Livornak, began to be flooded. He drove us to our garden, and at one o'clock, M. Boyiot left his house to take refuge in our house for the rest of the night. The water level seems to have risen progressively between midnight and one o'clock.
- The maximum water level (level of the mailbox of M. Boyiot) occurred on Monday between 06:00 and 08:00.
- The water level dropped rapidly after 08:00. Within a quarter of an hour there was no water left on the road in front of the house.



The maximum water level of the mailbox of the house

**Other observations:**

**Previous floods along the bank:**

- The road in front of the house has been flooded twice : in 1958 and in 1995. But the maximum water level has never been as high than in 2002.

### Exemple de fiche de recueil de témoignages

Chaque témoignage fait aussi l'objet d'une fiche synthétique. Les entretiens étaient basés sur des questions ouvertes : « Racontez-moi en détail comment s'est déroulée la crue. A quelle heure avez-vous été inondé ? A quelle vitesse est montée l'eau ? Quand s'est-elle retirée ? » Les témoignages indirects ont systématiquement été écartés. La qualité et la quantité des informations sont bien entendu très variables.

Dans le meilleur des cas, le témoin peut préciser s'il a observé une ou plusieurs pointes de crue, donner des niveaux d'eau repérés dans le temps qui permettront de proposer des valeurs de débit intermédiaires.

Dans la mesure du possible, plusieurs témoignages sont collectés en un même site pour permettre une validation croisée.

Les fiches peuvent aussi contenir, suivant les cas, d'autres observations (vitesses d'écoulement, observation de ruissellement des versants, origine des écoulements, mesures pluviométriques...) et des références à des crues antérieures.

River: The Lyonnais, right hand tributary of the Aizon  
 Town: Saint-Jean du Pin  
 Coordinates: X 708403 Y 1901783  
 Established by: D. Pignatelli E. Girard, 1997-98  
 Date: 1998-08-01  
 Description of site: Straight section with vegetation on the banks

**Cross-section**

**MEASUREMENTS**

Topographic points

| Station | X      | Y       | Z    |
|---------|--------|---------|------|
| 1       | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 2       | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 3       | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 4       | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 5       | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 6       | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 7       | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 8       | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 9       | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 10      | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 11      | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 12      | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 13      | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 14      | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 15      | 708403 | 1901783 | 1.00 |
| 16      | 708403 | 1901783 | 1.00 |

**COMPUTATIONS**

Wetted area

| Station | Wetted area | Wetted perimeter |
|---------|-------------|------------------|
| 1       | 1.00        | 1.00             |
| 2       | 1.00        | 1.00             |
| 3       | 1.00        | 1.00             |
| 4       | 1.00        | 1.00             |
| 5       | 1.00        | 1.00             |
| 6       | 1.00        | 1.00             |
| 7       | 1.00        | 1.00             |
| 8       | 1.00        | 1.00             |
| 9       | 1.00        | 1.00             |
| 10      | 1.00        | 1.00             |
| 11      | 1.00        | 1.00             |
| 12      | 1.00        | 1.00             |
| 13      | 1.00        | 1.00             |
| 14      | 1.00        | 1.00             |
| 15      | 1.00        | 1.00             |
| 16      | 1.00        | 1.00             |

**High water marks**

| Station | Water surface elevation | Channel bed elevation |
|---------|-------------------------|-----------------------|
| 1       | 1.00                    | 1.00                  |
| 2       | 1.00                    | 1.00                  |
| 3       | 1.00                    | 1.00                  |
| 4       | 1.00                    | 1.00                  |
| 5       | 1.00                    | 1.00                  |
| 6       | 1.00                    | 1.00                  |
| 7       | 1.00                    | 1.00                  |
| 8       | 1.00                    | 1.00                  |
| 9       | 1.00                    | 1.00                  |
| 10      | 1.00                    | 1.00                  |
| 11      | 1.00                    | 1.00                  |
| 12      | 1.00                    | 1.00                  |
| 13      | 1.00                    | 1.00                  |
| 14      | 1.00                    | 1.00                  |
| 15      | 1.00                    | 1.00                  |
| 16      | 1.00                    | 1.00                  |

**Water surface slope**

| Station | Water surface elevation | Channel bed elevation |
|---------|-------------------------|-----------------------|
| 1       | 1.00                    | 1.00                  |
| 2       | 1.00                    | 1.00                  |
| 3       | 1.00                    | 1.00                  |
| 4       | 1.00                    | 1.00                  |
| 5       | 1.00                    | 1.00                  |
| 6       | 1.00                    | 1.00                  |
| 7       | 1.00                    | 1.00                  |
| 8       | 1.00                    | 1.00                  |
| 9       | 1.00                    | 1.00                  |
| 10      | 1.00                    | 1.00                  |
| 11      | 1.00                    | 1.00                  |
| 12      | 1.00                    | 1.00                  |
| 13      | 1.00                    | 1.00                  |
| 14      | 1.00                    | 1.00                  |
| 15      | 1.00                    | 1.00                  |
| 16      | 1.00                    | 1.00                  |

**Documents graphiques**

## Exemple de fiche de levé de section d'écoulement

Chaque section fait l'objet d'une fiche de levé où sont bien distingués (a) les relevés de terrain (section, laisse de crue, pente de ligne d'eau) en partie gauche de la fiche et (b) les calculs conduisant à une estimation de débit en partie droite.

Dans la mesure du possible, une analyse de sensibilité est conduite sur l'estimation de débit afin de proposer une fourchette probable de valeurs. Le calcul est détaillé afin qu'il puisse être discuté et éventuellement contesté.

Ce n'est pas directement le débit, mais la vitesse moyenne, qui est calculée. Le réalisme de cette vitesse est plus facile à appréhender et est éventuellement vérifiable : analyse de films, traces d'érosion...

Ces calculs basés sur des formules empiriques (formule de Manning-Strickler, lois de déversoirs ou d'orifices) ne peuvent conduire qu'à des ordres de grandeur à dire d'experts. L'étude menée a permis de montrer qu'après quelques jours de travail en commun, afin de construire des références communes, les différentes équipes, travaillant séparément parfois sur les mêmes bassins versants, produisaient des estimations de débit cohérentes. Localement (cas du Criulon), des données mesurées fiables ont permis de vérifier la justesse des estimations proposées. Dans de nombreux cas, compte tenu des cumuls de pluie, les coefficients d'écoulement en pointe de crue étaient probablement proches de 1. La simulation pluie-débit, si l'on fait confiance aux hyétogrammes reconstitués à partir des données radar, est une autre voie de validation de ces ordres de grandeur de débits estimés.

Dans les sections à proximité desquelles on disposait de cotes intermédiaires données par les témoins, les mêmes fiches ont été reprises en modifiant la cote de la ligne d'eau pour reconstituer les débits intermédiaires correspondants. Ces estimations de débits intermédiaires, plus encore que celles des débits de pointe, sont imprécises, les témoignages correspondant rarement exactement aux sections levées.