

Inondations de septembre 2002 dans le Sud de la France : analyse hydrologique et hydraulique au niveau des barrages écrêteurs du Vidourle

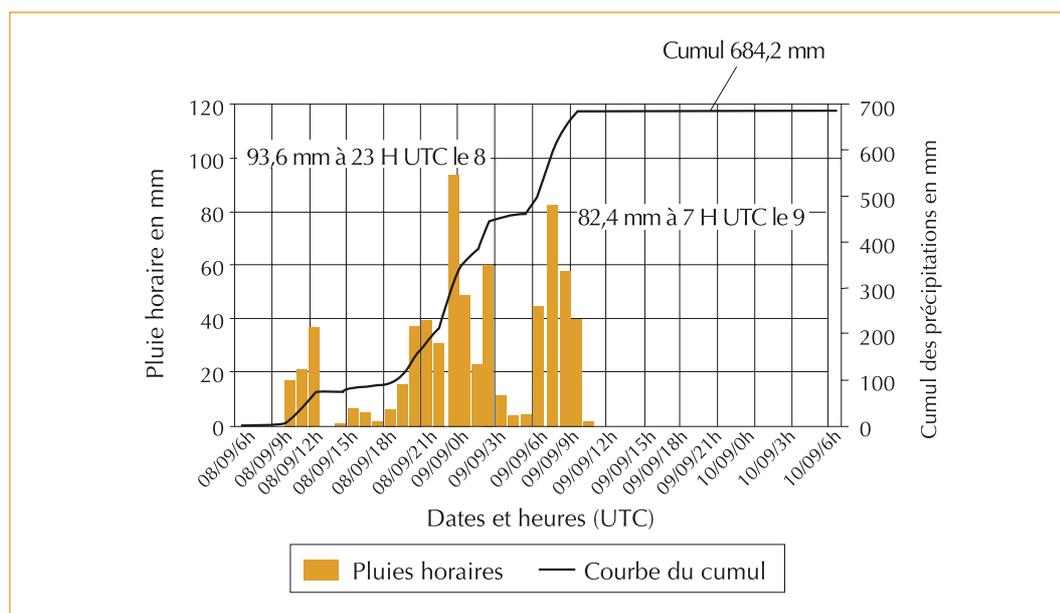
Catherine Fouchier, Jacques Lavabre, Paul Royet et Huguette Félix

Comme pour tous les ouvrages de régulation des crues, les barrages écrêteurs sont conçus et dimensionnés en fonction de l'intensité prévisible des précipitations et de leur période de retour. L'étude présentée ici s'attache à analyser les effets des précipitations exceptionnelles du Gard en 2002 sur trois barrages construits depuis environ 40 ans sur le Vidourle. Outre le fait que cette analyse a permis d'estimer l'occurrence de l'événement et de confronter les études hydrologiques initiales avec cette crue majeure, les auteurs montrent que l'efficacité des ouvrages s'est révélée moindre que celle estimée lors de leur construction. Ils proposent des consignes pour la conduite de nouvelles études de ces ouvrages.

Les inondations de décembre 2003 ont durement frappé une région qui se relevait tout juste des inondations de l'année précédente. Les 8 et 9 septembre 2002, le Sud de la France était en effet touché par des précipitations intenses suivies de crues catastrophiques, tant sur le plan humain, avec la mort de 23 personnes, que sur le plan matériel, avec 1,2 milliards d'euros de dégâts et 395 communes

déclarées en état de catastrophe naturelle sur six départements : le Gard, l'Ardèche, l'Hérault, le Vaucluse, la Drôme et les Bouches-du-Rhône (Huet *et al.*, 2003). En termes climatiques, quelques chiffres donnent une idée de l'ampleur du phénomène :

– plus de 680 mm en 24 h enregistrés au pluviomètre d'Anduze et au pluviographe de Cardet (figure 1) ;



◀ Figure 1 – Hyéto-gramme du pluviographe de Cardet du 08/09/2002 à 6 h au 10/09/2002 à 6 h TU (temps universel) – Source : Météo-France.

Les contacts

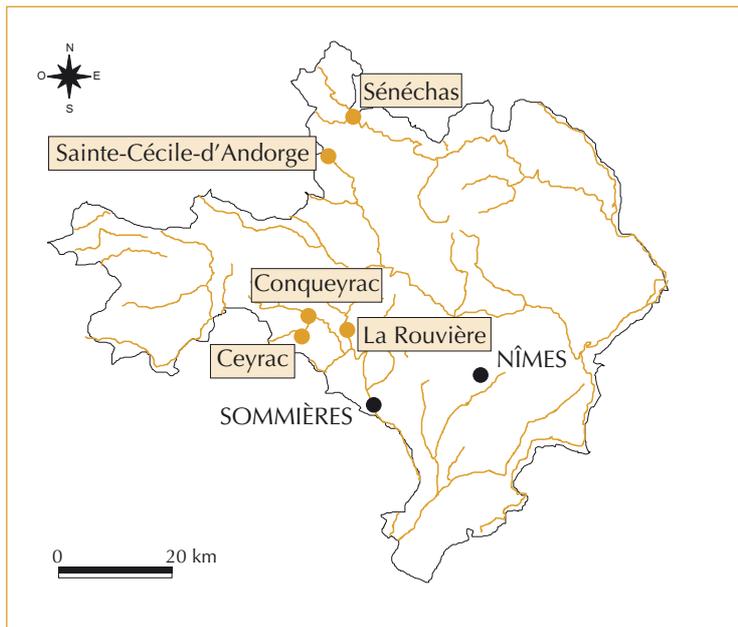
Cemagref, UR Ouvrages hydrauliques et équipements pour l'irrigation, Le Tholonet, BP 31, 13612 Aix-en-Provence.

- une intensité maximale horaire de plus de 100 mm à Cardet ;
- les deux tiers du département du Gard touchés par des cumuls de précipitations dépassant 300 mm sur la totalité de l'événement.

Les synthèses historiques nous rappellent que la façade sud-est du Massif-Central est coutumière de ces crues violentes avec leur lot de destructions (Champion, 1862 ; direction départementale de l'Équipement du Gard). Ce sont d'ailleurs deux crues sévères, en septembre et en octobre 1958, qui ont motivé le département du Gard à équiper de barrages écrêteurs ses cours d'eau les plus tempétueux : le Vidourle, les Gardons et la Cèze. Cinq barrages furent ainsi édifiés entre 1964 et 1982 : le barrage de Sénéchas sur la Cèze, celui de Sainte-Cécile-d'Andorge sur le Gardon d'Alès et ceux de Conqueyrac, Ceyrac et La Rouvière sur la partie amont du bassin versant du Vidourle (figure 2).

Ces cinq barrages ont connu des crues très variables à la suite des précipitations des 8 et 9 septembre 2002. Si les retenues des barrages de Sénéchas et de Sainte-Cécile-d'Andorge n'ont pas causé d'inquiétude, en restant très en deçà du niveau de déversement de leur évacuateur de surface, il n'en est pas de même pour les barrages du bassin versant du Vidourle. Ces derniers ont en effet connu leurs plus hauts niveaux depuis leur mise en service (Royet *et al.*, 2003b) avec

▼ Figure 2 – Localisation des barrages écrêteurs de crues du département du Gard.



▲ Figure 3 – Le barrage de la Rouvière, dans la matinée du 9 septembre 2002.

un déversement sur leur évacuateur de surface et même, pour le barrage de la Rouvière, sur le couronnement (figure 3).

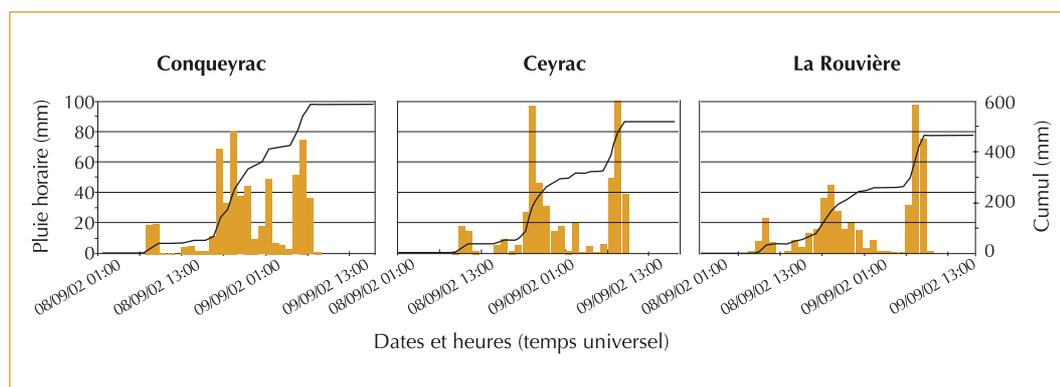
L'étude présentée a fait l'objet d'un rapport complet remis au ministère de l'Écologie et du Développement durable (Royet *et al.*, 2003a). Elle relève de deux activités de notre unité :

- la recherche et le développement d'outils de modélisation en hydrologie ;
- le contrôle de la sécurité des barrages dans le cadre des missions d'assistance du Cemagref au ministère de l'Écologie et du Développement durable.

L'objectif de cette étude a donc été de qualifier l'événement de septembre 2002 en termes climatiques, hydrologiques et hydrauliques au niveau des ouvrages écrêteurs de crue du département du Gard. Nous n'avons pas abordé dans le cadre de ce travail l'impact de la crue sur la structure intrinsèque des ouvrages, les aspects relatifs au génie civil ne sont donc pas évoqués dans cet article.

Nous avons plus particulièrement étudié les trois barrages équipant le bassin versant du Vidourle du fait de l'importance particulière des crues qui y ont été observées : le barrage de Conqueyrac sur le Vidourle, le barrage de La Rouvière sur le Criulon, affluent en rive gauche du Vidourle et le barrage de Ceyrac sur le Rieumassel, affluent en rive droite du Vidourle (figure 2). L'approche méthodologique employée comporte trois volets :

- une partie pluviométrique avec une estimation de la période de retour des précipitations,



◀ Figure 4 – Pluviogrammes au droit des barrages de Conqueyrac (relevé manuel), Ceyrac et La Rouvière (relevés automatiques) – Source : syndicat mixte interdépartemental d'aménagement et de mise en valeur du Vidourle et de ses affluents.

- une partie hydrométrique avec la reconstitution des débits à l'entrée des réservoirs,
- une synthèse sur l'estimation de la période de retour de l'événement.

Analyse de la pluviométrie de l'événement

Analyse des données disponibles

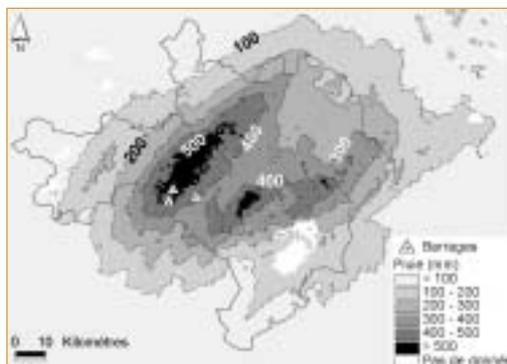
Les précipitations ont commencé le 8 septembre vers 9 h TU et ont duré environ 24 h sur la partie amont du bassin versant du Vidourle, comme le montrent les relevés des pluviographes des barrages de La Rouvière et Ceyrac ainsi que le relevé manuel du barragiste à Conqueyrac (figure 4). On identifie sur ces pluviogrammes deux épisodes de pluies intenses : le premier, dans la soirée du 8 septembre, et le second, en début de matinée du 9 septembre.

La station radar de Nîmes fournit des données de pluie radar dont deux calibrations¹ différentes sont disponibles. La première, produite par Météo-France, utilise un facteur de correction unique calculé *a posteriori* à partir des cumuls de pluie journalière recueillis dans les pluviomètres. Nous disposons des lames d'eau ainsi calculées au pas temps horaire, avec une résolution spatiale de 1 km². La figure 5 montre l'extension spatiale de l'événement à l'aide de cette calibration, pour une durée de 48 h à partir de 00 h 00 TU le 08/09/02 de façon à bien visualiser l'étendue de la totalité du phénomène. À l'échelle de la région touchée, l'événement s'est en effet prolongé au-delà de 24 h du fait du déplacement de la cellule pluvieuse. Des précipitations de plus de 20 mm/h ont ainsi affecté le Vaucluse jusqu'en fin d'après-midi du 9 septembre.

Une deuxième calibration, produite par le service CALAMAR² de la société Rhéa, est également disponible. La correction est effectuée à pas de temps fin et en temps réel, à partir des données télétransmises du réseau de pluviographes du service d'annonce de crues du Gard. Les lames d'eau CALAMAR sont calculées à la résolution spatiale du km² et au pas de temps de 5 mn. Elles nous ont été transmises à ce pas de temps, mais agglomérées à l'échelle des bassins versants.

La comparaison directe des résultats des calibrations Météo-France et CALAMAR n'est donc finalement possible qu'à l'échelle des bassins versants et au pas de temps horaire.

Nous disposons enfin des relevés journaliers d'un réseau de 75 pluviomètres situés dans les départements du Gard et de l'Hérault. Une interpolation spatiale par une fonction spline³ des cumuls des pluies journalières des 8 et 9 septembre permet d'estimer les lames précipitées sur les bassins versants pour la totalité de l'événement. Nous n'avons pas examiné les observations du réseau de pluviographes du service d'annonce de crues du Gard, non disponibles lorsque cette étude a été effectuée.



◀ Figure 5 – Pluies radar Météo-France en 48 h à partir de 00 h 00 TU le 08/09/02.

1. Le radar permet de localiser et de suivre le déplacement des cellules pluvieuses. Il fournit une information qualitative. Des mesures de pluie au sol sont nécessaires pour interpréter de manière quantitative l'information fournie par le radar, on parle de calibration.

2. CALAMAR : calcul de lames d'eau à l'aide du radar.

3. L'interpolation consiste à estimer des valeurs inconnues entre des valeurs ponctuellement connues. Différentes méthodes d'interpolation existent dont les fonctions spline, surfaces polynomiales ajustées aux valeurs connues tout en présentant le moins de rayon de courbure possible.

	Superficie	Interpolation des données sol (cumuls journaliers des 8 et 9)	Pluies radar sur la totalité de l'événement	
			Calibration Météo-France	Calibration CALAMAR
Conqueyrac	83 km ²	374	413	318
Ceyrac	44 km ²	371	436	382
La Rouvière	94 km ²	572	492	576

▲ Tableau 1 – Lames précipitées sur les bassins versants du haut Vidourle, estimations en mm.

Au final, l'étude des lames précipitées sur la durée totale de l'événement révèle l'incertitude qui entoure cette information (tableau 1). Les écarts entre les méthodes utilisées peuvent être importants. On relève ainsi près de 25 % d'écart entre les estimations Météo-France et CALAMAR sur le bassin du Vidourle à Conqueyrac. Les écarts relevés sur les pluies horaires sont encore plus importants avec des rapports sur les intensités horaires les plus fortes de l'ordre de 1 à près de 3 entre les deux types d'information radar.

On constate que les estimations radar CALAMAR de la pluie sur les bassins de Ceyrac et La Rouvière sont proches de celles obtenues par interpolation des cumuls journaliers. Cette adéquation est liée, de fait, au forçage du facteur de calibration CALAMAR par les observations au sol. Ce facteur est variable dans le temps et dans l'espace. Le mode de calcul retenu par Météo-France pour son facteur de calibration (constant sur l'événement et unique dans l'espace) ne permet pas une telle concordance. Pour l'estimation de la pluie sur le bassin de Conqueyrac, la défaillance du pluviographe du barrage à partir de 21 h TU le 9 septembre peut expliquer l'écart entre l'estimation CALAMAR et l'interpolation des cumuls journaliers.

Cette confrontation des informations disponibles sur les lames précipitées met en avant l'incertitude sur la connaissance des pluies sur les bassins versants. Elle est élevée malgré la bonne couverture de l'événement. Ceci traduit les problèmes auxquels se heurtent, d'une part, le traitement de l'imagerie radar pour restituer des hyétogrammes et, d'autre part, l'interprétation de la pluie de bassin à partir des données ponctuelles.

Estimation de l'occurrence de la pluie

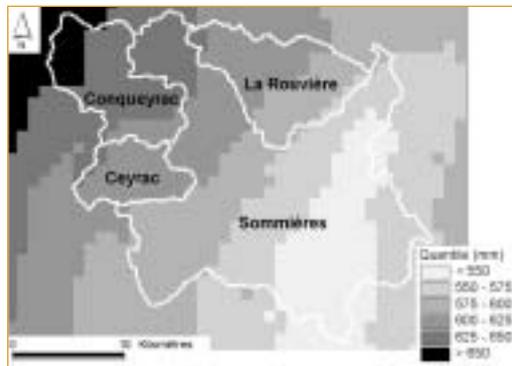
Nous avons cherché à caractériser l'importance de l'événement par l'estimation de sa période de retour. La pluie maximale a été étudiée à deux échelles spatiales :

- ponctuellement, à l'aide de mailles de 1 km² couvrant la zone étudiée,
- globalement, au niveau des bassins versants.

LE MODÈLE SHYREG

Le Cemagref a développé un modèle de simulation de scénarios de crues dénommé SHYPRE (simulation d'hydrogrammes pour la prédétermination des crues). Il consiste en un modèle stochastique de génération de pluies horaires associé à un modèle simple de transformation pluie-débit (Arnaud, Lavabre, 2002). Les distributions de fréquence des variables hydrologiques (pluies horaires, débits de pointe, pluies et débit de différentes durées) sont obtenues à partir de la simulation d'un nombre élevé de chroniques de pluies et de débits de très longue durée.

L'exploitation des données de 50 stations pluviographiques établies sur le pourtour méditerranéen a permis de dégager des tendances régionales basées sur la pluie journalière. Ceci a ouvert la voie à l'élaboration d'une version spatialisée de SHYPRE, dénommée SHYREG (Lavabre *et al.*, 2003). Développé avant l'événement de



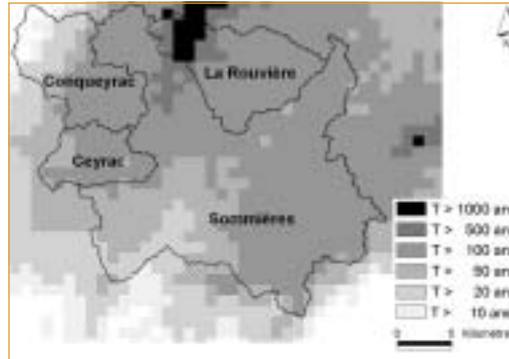
► Figure 6 – Estimations SHYREG de la pluie millénale maximale en 24 h.

septembre 2002, SHYREG fournit, pour les trois régions côtières de la Méditerranée, des cartes d'intensités-durées-fréquences (IDF) de pluies à la résolution du km² (Fouchier *et al.*, 2002). La figure 6 montre une estimation par cette méthode de la pluie millénale maximale en 24 h sur le bassin versant du Vidourle en amont de la ville de Sommières.

ESTIMATION DE L'OCURRENCE DES PLUIES PONCTUELLES

Dans un premier temps, nous avons confronté les cartes IDF de SHYREG à la carte de la pluie radar en 24 h à partir de 9 h TU le 08/09/2002 issue des cartographies radar horaires produite par Météo-France. En chaque maille de 1 km², nous avons interpolé la période de retour de la pluie radar à partir de la connaissance des différents quantiles de la méthode SHYREG. Pour les pixels où la pluie radar dépasse le quantile millénale, nous avons procédé à une extrapolation à partir des quantiles d'occurrence 500 et 1 000 ans. Pour chaque bassin versant, le tableau 2 synthétise les périodes de retour ainsi calculées localement par maille de 1 km² pour la pluie en 24 h. La figure 7 montre une cartographie de ces périodes de retour locales sur le bassin versant du Vidourle en amont de la ville de Sommières.

On constate une forte hétérogénéité spatiale de l'événement, avec des occurrences ponctuelles allant de moins de 10 ans à 2 000 ans sur une distance inférieure à 15 km entre le nord-ouest du bassin de Conqueyrac et le nord-ouest du bassin de La Rouvière. Ainsi, bien que géographiquement étendu, cet événement est loin d'être uniforme à l'échelle des bassins versants, même de tailles réduites.



◀ Figure 7 – Estimation locale de la période de retour de la pluie radar Météo-France en 24 h, à partir de 9 h 00 TU le 08/09/2003.

ESTIMATION DE L'OCURRENCE DES PLUIES DE BASSIN

L'estimation de l'occurrence des pluies de bassin est plus délicate, car elle demande la connaissance de l'abattement statistique. Sur un bassin versant de superficie S , pour une pluie de durée d et de fréquence F , cette notion permet de passer des quantiles de la pluie ponctuelle $P(d,F)$ aux quantiles de la pluie de bassin $L(S,d,F)$. À l'heure actuelle, seuls Neppel *et al.* se sont penchés sur cette question pour le Languedoc (2003). Nous utilisons leur expression du coefficient d'abattement statistique K :

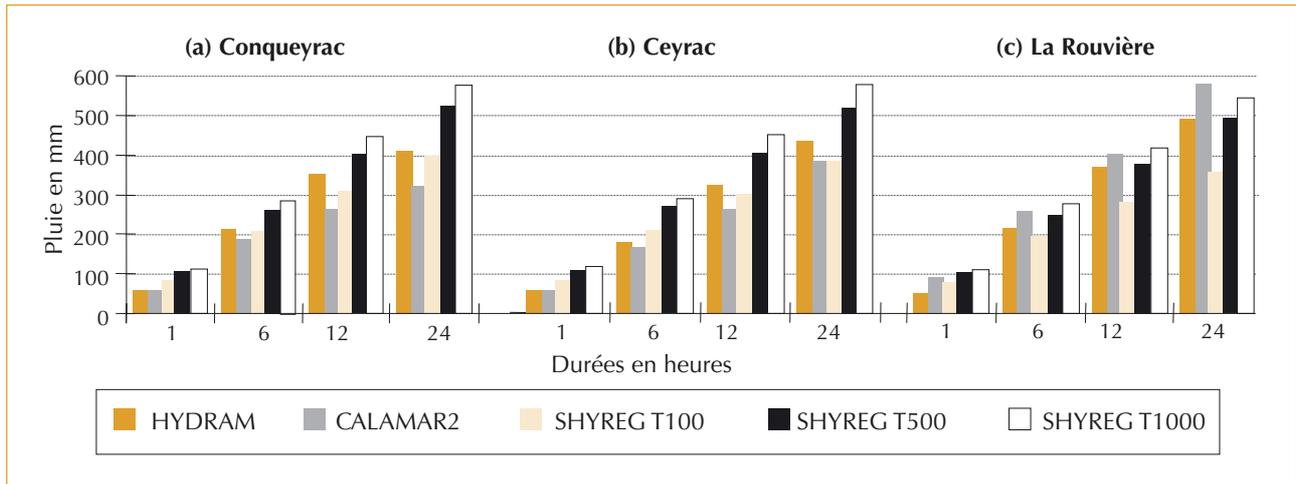
$$K = \frac{L(S, d, F)}{P(d, F)} = \frac{1}{1 + \frac{0,02 \sqrt{S}}{(1-F)^{0,07} d^{0,33}}} \quad (1)$$

avec $L(S,d,F)$: la lame d'eau (mm), de fréquence F , précipitée sur la superficie S pendant la durée d ;

$P(d,F)$: la pluie (mm) de fréquence F , précipitée pendant la durée d en un point donné

	Sommières	Conqueyrac	Ceyrac	La Rouvière
Minimum	6 ans	6 ans	54 ans	108 ans
Maximum	2 028 ans	498 ans	327 ans	2 028 ans
Moyenne	200 ans	140 ans	150 ans	410 ans

▲ Tableau 2 – Statistiques sur les périodes de retour des pluies radar ponctuelles pour une durée de 24 h à partir de 9 h TU le 08/09/2002. Pluies radar, calibration Météo-France.



▲ Figure 8 – Confrontation des pluies maximales de bassin en 1, 6, 12 et 24 h avec les quantiles rares de la pluie de bassin.

Cette formule a été calée sur trois zones circulaires disjointes du Gard et de l'Hérault grâce à la connaissance de la pluie journalière d'un réseau de 119 pluviomètres. En chacune des zones, le coefficient K a été calculé pour différentes gammes de superficie et pour une durée journalière. Le quantile L(S,d,F) résulte de l'ajustement d'une loi de Gumbel sur un échantillon de lames maximales annuelles issues d'un krigeage des observations ponctuelles. Le quantile P(d,F) provient du krigeage direct des quantiles ponctuels de la pluie.

Nous appliquons les coefficients K aux quantiles moyens fournis sur chaque bassin pour différentes durées par la méthode SHYREG pour les périodes de retour de 100, 500 et 1 000 ans. Nous obtenons ainsi, pour ces périodes de retour et ces durées, les quantiles de la pluie de bassin auxquels nous pouvons confronter les estimations radar maximales de l'événement agglomérées sur chaque bassin versant (figure 8).

L'estimation de la fréquence d'un événement pluviométrique est donc un exercice qui se confirme difficile. Outre les incertitudes liées à la

connaissance de la pluie réelle et aux pluies de référence, la période de retour de l'événement varie avec les durées de pluie étudiées.

C'est pour la pluie en 24 h sur le bassin versant de la Rouvière que l'événement des 8 et 9 septembre 2002 apparaît le plus exceptionnel, avec une estimation de la période de retour variant entre 500 et 1 500 ans (tableau 3).

Comparaison avec les pluies de projet des barrages

Les analyses pluviométriques, réalisées dans le cadre des études hydrologiques d'origine des barrages, ont été menées en 1959 (Ouvrard, 1959). Lors d'une étude de l'hydrologie du département, les pluies de projet des barrages ont été révisées en 1985 (Coyne et Bellier, CNABRL, 1985).

Si les estimations de la pluie ponctuelle horaire millénaire de ces études sont du même ordre de grandeur – 150 mm – que celles fournies par la méthode SHYREG, il n'en est pas de même pour les pluies de plus longue durée. À titre d'exemple, le tableau 4 confronte les estimations des études initiales aux quantiles SHYREG pour la pluie en 24 h de période de retour 1 000 ans.

Malgré des estimations de pluies de projet revues à la hausse (de l'ordre de 20 à 40 % entre les études initiales et la révision de 1985), on remarque qu'elles restent inférieures à celles de la méthode SHYREG. On peut également noter que les pluies de projet de 1985 sont du même ordre de grandeur que les pluies observées en septembre 2002 (tableau 5).

► Tableau 3 – Estimation des périodes de retour des pluies radar de bassin en 24 h à partir de 9 h TU le 08/09/02.

	Pluie radar Météo-France	Pluie radar CALAMAR
Sommières	440 ans	660 ans
Conqueyrac	120 ans	40 ans
Ceyrac	190 ans	100 ans
La Rouvière	500 ans	1 500 ans

Type de pluie	Étude 1959	Étude 1985	SHYREG	
	ponctuelle	ponctuelle	ponctuelle	de bassin
Conqueyrac	324 mm	460 mm	615 à 672 mm	579 mm
Ceyrac	320 mm	450 mm	600 à 627 mm	571 mm
La Rouvière	340 mm	400 mm	567 à 637 mm	541 mm

◀ Tableau 4 – Comparaison des pluies de projet en 24 h aux quantiles SHYREG pour la période de retour 1 000 ans (valeurs en mm).

Analyse de l'hydrométrie de l'événement

Méthodologie adoptée pour la reconstitution de la crue aux barrages

Les trois barrages sont équipés de limnimètres enregistreurs bulle à bulle qui permettent le suivi de la cote du plan d'eau au pas de temps cinq minutes. Ils sont dotés chacun de deux pertuis de fond ouverts, protégés par un batardeau. L'évacuateur de surface est constitué d'un seuil libre. À La Rouvière et à Ceyrac, une passerelle en béton est susceptible de provoquer la mise en charge du seuil.

Le débit évacué est nul tant que le niveau de la retenue reste inférieur à la cote du batardeau. Les formules hydrauliques reliant le niveau des retenues aux débits de différents organes d'évacuation des barrages permettent de calculer le débit total sortant. Les étapes de ce calcul sont les suivantes :

- quand la cote du batardeau est dépassée, le débit sortant est contrôlé par la loi de seuil de ce dernier ;
- à partir de la mise en charge des pertuis, leur loi d'orifice contrôle le débit en sortie du barrage ;
- lorsque la cote dans la retenue dépasse la cote du seuil de surface, l'écoulement à surface libre sur ce seuil s'ajoute au débit des pertuis.

Des adaptations sont apportées à cette méthodologie. Il s'agit, pour Ceyrac, de la modélisation

des pertes dans le réseau karstique au niveau de la retenue. Pour La Rouvière, nous avons pris en compte la mise en charge du seuil de surface lorsque le niveau de réservoir a atteint la passerelle. Puis, nous avons calculé l'écoulement sur la crête de ce barrage en considérant la présence d'embâcles.

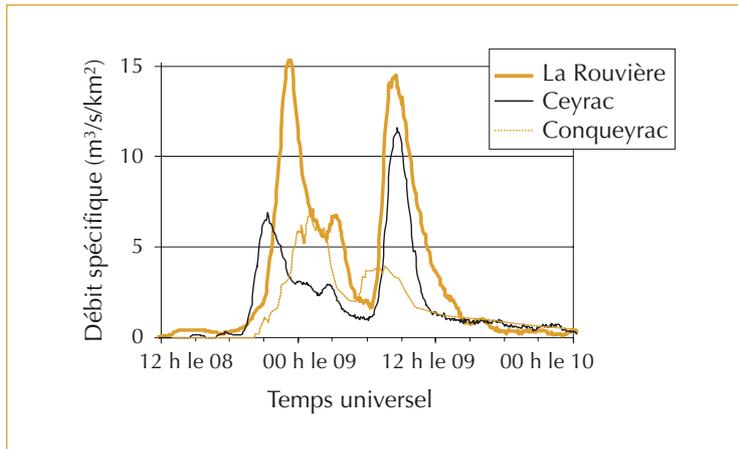
Le débit entrant est ensuite déduit du débit sortant en lui ajoutant le stockage dans la retenue dû à la montée du plan d'eau sur le pas de temps précédent. Cette montée est provoquée par les apports du bassin versant et par la pluie tombée directement sur la retenue. Le stockage est calculé à partir des relations établies entre le niveau de la retenue et son volume.

L'incertitude sur les valeurs des débits maxima entrants est essentiellement liée aux courbes cote-volume des retenues, issues des archives. Nous avons essayé, sans succès, de les retrouver par planimétrage des cartes au 1/25 000^e, puis à l'aide d'un modèle numérique de terrain avec une maille de 50 m.

Ces constatations nous amènent à recommander un nouveau calcul des courbes cote-volume. L'étude des laisses de crue révèle une inclinaison du plan d'eau à La Rouvière, où la pente amont-aval atteint 50 cm. Cette inclinaison n'a cependant pas été prise en compte du fait des doutes sur les relations cote-volume. L'incertitude sur la lame écoulée est, quant à elle, liée aux valeurs retenues pour les coefficients de débit des pertuis et des seuils.

	Pluie ponctuelle radar Météo-France en 24 h		
	Minimum	Maximum	Moyenne
Conqueyrac	230 mm	568 mm	413 mm
Ceyrac	362 mm	514 mm	432 mm
La Rouvière	341 mm	685 mm	488 mm

◀ Tableau 5 – Amplitude de variation et valeur moyenne de la pluie radar en 24 h à partir de 9 h TU le 08/09/2002 sur les bassins versants des barrages.



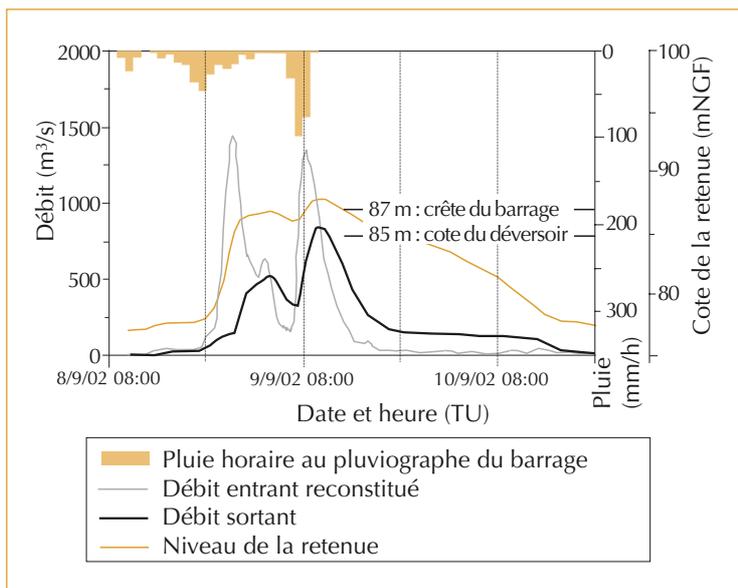
▲ Figure 9 – Débit spécifiques reconstitués à l'entrée des retenues des barrages écrêteurs du Vidourle.

Résultats de la modélisation

Les hydrogrammes entrant calculés aux trois barrages présentent chacun deux corps de crue distincts (figure 9). Ceux-ci correspondent aux deux épisodes pluvieux de forte intensité de l'événement (figure 4, p. 25). La crue a été particulièrement forte sur la Rouvière, avec un débit spécifique de pointe atteignant par deux fois $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$. La contribution du bassin versant de Ceyrac, avec une pointe de crue à plus de $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$, se révèle également importante.

▼ Figure 10 – Hydrogrammes au barrage de la Rouvière.

La figure 10 présente les résultats de la simulation de la crue au barrage de La Rouvière en m^3/s . Les deux pointes successives de crue sont évaluées à environ $1\,400 \text{ m}^3/\text{s}$. La première pointe de crue



provoque une montée très rapide de la retenue et une mise en service de l'évacuateur de surface, avec une première pointe de débit sortant évalué à plus de $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit entrant chute ensuite à moins de $200 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui entraîne une légère baisse de la retenue et du débit relâché, mais sans provoquer d'interruption du déversement sur le seuil. Ce premier corps de crue apporte déjà $23 \times 10^6 \text{ m}^3$.

La deuxième pointe de crue arrive en fin de matinée sur une retenue déjà pleine. Elle provoque la surverse sur la crête du barrage pendant plus de 4 h. On souligne le caractère tout à fait anormal et dangereux de ce phénomène, la crête de l'ouvrage n'ayant en effet pas été conçue comme un ouvrage déversant. La cote maximale est atteinte à midi ; le débit évacué maximum est alors évalué à $840 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce deuxième corps de crue apporte plus de $20 \times 10^6 \text{ m}^3$. À titre de comparaison, la capacité de stockage de la retenue est de $8,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ sous l'évacuateur de surface, et de $5,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ supplémentaires entre cet évacuateur et la crête du barrage.

Ramenée à la superficie du bassin versant de La Rouvière, la lame totale ruisselée est de 480 mm avec un maximum de 447 mm en 24 h.

Au barrage de Ceyrac, la crue entrante présente également deux corps successifs, de volumes estimés à 5×10^6 à $6 \times 10^6 \text{ m}^3$. La capacité de stockage de la retenue est de $4,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ sous la cote du déversoir de surface. La première pointe de crue, estimée à $300 \text{ m}^3/\text{s}$, n'a pas provoqué de surverse sur le seuil de surface et a donc été très bien laminée. Elle a par contre fortement rempli le réservoir dont le niveau est arrivé à 2 m sous l'évacuateur de surface. La deuxième pointe est arrivée peu de temps après, sur une retenue dont le niveau avait à peine commencé à redescendre. Son débit entrant maximum est évalué à plus de $500 \text{ m}^3/\text{s}$. Elle a provoqué la mise en service du déversoir de surface. Le débit aval maximal a été de l'ordre de $180 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sur la durée totale de l'événement, la lame ruisselée sur le bassin versant de Ceyrac s'élève à 290 mm dont 250 mm en 24 h.

Au barrage de Conqueyrac, les deux corps successifs de la crue entrante présentent des volumes identiques d'environ $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ chacun. La capacité de stockage de la retenue est de $8,65 \times 10^6 \text{ m}^3$ sous la cote du déversoir de surface. La première pointe de crue est évaluée à un peu plus de $550 \text{ m}^3/\text{s}$ en entrée de retenue.

Ce premier corps de crue n'a pas provoqué le remplissage complet de la retenue et a donc été très fortement laminé avec un débit sortant estimé à 80 m³/s. Une décrue temporaire s'est ensuite produite, mais avec un débit entrant qui est resté supérieur au débit sortant. La retenue a donc continué à se remplir. De ce fait, l'arrivée du deuxième corps de crue, avec un débit entrant dépassant 320 m³/s, a provoqué la mise en service de l'évacuateur de surface et a entraîné un débit aval maximal de 230 m³/s.

La lame d'eau ruisselée s'élève à 247 mm sur le bassin versant de Conqueyrac, pour la totalité de l'événement, avec un maximum de 220 mm en 24 h.

Impact des retenues sur la crue

Les volumes écoulés ont excédé les capacités de stockage des retenues. Ceci est particulièrement frappant pour la retenue de la Rouvière pour laquelle le volume écoulé est de l'ordre de trois fois le volume correspondant au niveau des plus hautes eaux. L'impact des retenues sur les débits de pointe est variable. Si la première pointe de crue a été partout bien écrêtée, le coefficient d'écrêtement de la deuxième pointe atteint 63 % pour Ceyrac, 38 % pour La Rouvière et à peine 30 % pour Conqueyrac.

Confrontation avec les crues de projet

Les études hydrologiques spécifiques à chaque barrage ont été menées dans les années 1960 (Pradier, 1967a, b ; Villemagne, 1961). Les barrages ont été dimensionnés pour permettre l'évacuation de la crue de projet sans débordement sur le seuil de surface. Il s'agit de la crue millénale arrivant sur une retenue vide. La crue de sûreté est la crue la plus pénalisante que pourra subir l'ouvrage sans mettre en cause sa péren-

nité (Comité français des grands barrages, 2002). Elle est supérieure à la crue de projet. Pour les barrages écrêteurs du Vidourle, la crue de sûreté correspond à la crête de la partie non déversante. Elle a été calculée en prenant l'hypothèse d'une crue pentamillénale arrivant sur une retenue déjà pleine ; une telle crue devait être évacuée sans débordement sur la crête du barrage.

Pour les trois barrages, le tableau 6 indique le débit de pointe et le volume total de la crue de sûreté, le volume total étant ramené à la superficie du bassin versant. Ces caractéristiques sont comparées à celles des crues de projet de l'étude de révision de 1985.

Les études initiales aboutissent *a priori* à un ordre de grandeur correct des débits maximum. La sous-estimation marquée des volumes des hydrogrammes de sûreté entraîne cependant une forte surestimation des potentialités d'écrêtement des crues. C'est ce qui explique que la deuxième pointe de crue à La Rouvière, avec 1 350 m³/s, provoque la surverse sur la crête du barrage alors même qu'elle n'atteint pas le débit de pointe de la crue de sûreté (1 535 m³/s).

L'étude de révision de 1985 propose des crues de projet plus importantes en volume, grâce à un allongement considérable de la durée de la crue qui passe à une trentaine d'heures. Il en résulte des estimations très faibles pour les débits de pointe. Ces faibles valeurs sont difficilement acceptables, d'autant plus que le cas d'une crue arrivant sur une retenue déjà pleine n'est pas envisagé.

Ces études apparaissent finalement critiquables tant pour leurs estimations des volumes de crue que pour leur surestimation des capacités d'écrêtement réelles des retenues.

Période de retour	Crue de sûreté (études initiales)		Crue de projet (révision 1985)	
	5 000 ans		1 000 ans	
Caractéristique	Débit instantané entrant (m ³ /s)	Volume total (mm)	Débit instantané entrant (m ³ /s)	Volume total (mm)
Conqueyrac	1 440	120	552	208
Ceyrac	1 072	140	278	198
La Rouvière	1 535	101	542	175

◀ Tableau 6 – Débit instantané entrant et volume total des crues de projet et de sûreté des études d'origine. Le volume total des hydrogrammes est ramené à la superficie du bassin versant.

Synthèse sur la période de retour de l'événement

Le débit de pointe de crue à Sommières a été estimé à 2 550 m³/s (BRL, 2003). Il aurait été de 3 140 m³/s en l'absence des barrages entraînant une élévation de la ligne d'eau de 50 cm (BRL, 2003). Cette crue « naturelle » de 3 140 m³/s a pu être déterminée grâce à une modélisation hydrologique et hydraulique. Le modèle hydrologique a été calé sur les crues entrantes reconstituées aux barrages. Il a été mis en œuvre sur 9 sous-bassins en amont de Sommières.

Un modèle hydraulique mono-dimensionnel permet ensuite le transfert de ces hydrogrammes modélisés pour reconstituer la crue telle qu'elle aurait pu être à Sommières en l'absence des barrages. Ce modèle hydraulique est calé sur les niveaux des plus hautes eaux observés en différents points du Vidourle.

L'occurrence de la crue « naturelle » a été estimée grâce à un ajustement statistique effectué selon la méthode du renouvellement⁴ (Miquel, 1984), sur une chronique de 43 crues majeures répertoriées à Sommières depuis 1890 (BRL, 2003). Les crues récentes, à l'exception de 6 d'entre elles, ont été reconstituées dans des conditions naturelles, c'est-à-dire en faisant abstraction de l'influence des barrages, grâce à une modélisation hydraulique.

La période de retour du débit maximum à Sommières ainsi calculée varie entre 200 ans et 380 ans selon la loi de probabilité adoptée pour l'ajustement. Elle relève du même ordre de grandeur que l'occurrence des pluies maximales de faibles durées (1 h à 12 h) précipitées sur le bassin de Sommières, estimée à une centaine d'années. C'est en considérant sa durée que l'on constate la rareté de l'événement, avec une période de retour de 440 à 660 ans pour la pluie maximale en 24 h et, en corollaire, des volumes écoulés exceptionnels comparés aux capacités de stockage des barrages.

Nous n'avons pas cherché à estimer précisément les périodes de retour des crues du Vidourle à Conqueyrac, du Rieumassel à Ceyrac et du Criulon à la Rouvière, mais nous y constatons le dépassement en volume des crues de sûreté des barrages. Pour Ceyrac et Conqueyrac, ce dépassement s'est produit pour une occurrence de pluie en 24 h inférieure à 200 ans. Il y a donc lieu de reconsidérer les crues de projet de ces ouvrages.

Cette conclusion s'impose encore plus pour le barrage de la Rouvière, où la crête du barrage a été dépassée.

Conclusion

L'événement hydrologique de septembre 2002 a été particulièrement important, tant en ce qui concerne son extension géographique que les intensités horaires des précipitations, leurs cumuls en 24 h ainsi que les débits observés. Avec des conséquences dramatiques en terme de perte en vies humaines et de dommages économiques, il s'inscrit dans la lignée de phénomènes semblables déjà enregistrés sur la façade méditerranéenne. L'analyse d'un tel épisode, pour lequel on dispose de données pluviométriques et hydrométriques abondantes a été menée de façon approfondie.

Cette analyse nous a permis de remplir le double objectif recherché : estimer l'occurrence de l'événement et critiquer les études hydrologiques des ouvrages à la lumière de cette crue majeure.

Le haut-bassin du Vidourle, et plus particulièrement le bassin versant du Criulon, figurent parmi les zones les plus touchées par la pluie, avec localement des pluies maximales en 24 h dont la période de retour dépasse 1 000 ans. L'attribution d'une période de retour à la pluie de bassin souffre encore de l'incertitude qui entoure les mesures radar des précipitations. L'occurrence de la pluie maximale en 24 h sur le bassin versant du Criulon varie ainsi entre 500 et 1 500 ans selon le type de calibration retenu.

En terme de capacité d'écrêtement, les barrages du Vidourle ont réduit de 30 à 63 % le débit de pointe de la crue à leur aval immédiat et en ont retardé l'écoulement vers l'aval. Cette efficacité, moindre que celle estimée lors de la construction de ces ouvrages, se réduit vers l'aval. L'écrêtement du débit de pointe atteint ainsi à peine 20 % à Sommières. Ces constatations et surtout le dépassement du volume des crues de sûreté nous ont conduit à recommander la révision complète des études hydrologiques des barrages du Vidourle ainsi que des deux autres barrages du département du Gard construits à la même époque, et à proposer des consignes pour la conduite de ces études (Royet *et al.*, 2003b).

Les études hydrologiques de révision devront tout d'abord s'appuyer sur les études régionales récentes, plus riches en données, réalisées sur le pourtour méditerranéen, et sur la modélisation de toute la série des plus fortes crues connues en prêtant une attention particulière aux volumes des crues.

4. La méthode du renouvellement permet l'étude du processus d'occurrence d'événements en associant le calage d'une première loi de probabilité sur les dates des événements et le calage d'une deuxième loi sur une grandeur hydrologique de l'événement (débit de pointe, lame maximale en 1 h...).

Ces études auront ensuite à bien distinguer trois notions :

- la crue d'aménagement, correspondant à une efficacité optimale du laminage, avec une retenue atteignant tout juste le seuil de surface ;
- la crue de projet, associée à une période de retour de 1 000 ans pour les barrages en béton ;
- la crue de sûreté, définissant le niveau de la retenue au-delà duquel on estime que l'intégrité du barrage ne peut plus être garantie. Déterminé pour chaque barrage en fonction de ses caractéristiques géomécaniques et de la résistance à l'érosion en aval, ce niveau constitue la cote de

danger prévue dans le cadre de l'établissement des plans particuliers d'intervention des barrages. Sur les cinq barrages du département du Gard, ceux de Sénéchas et de Sainte-Cécile-d'Andorge sont soumis à cette procédure.

C'est sur ces bases que le conseil général du Gard entreprend actuellement la réévaluation de la sécurité de ses barrages.

Enfin, en terme d'exploitation des plans d'eau, nous recommandons, au vu du déroulement des faits en septembre 2002 et en raison de l'absence de gardien, que le mode de gestion actuel soit maintenu, c'est-à-dire avec les pertuis maintenus totalement ouverts en automne et en hiver. □

Remerciements

Les auteurs remercient leurs différents partenaires pour la mise à disposition des nombreuses données qui ont permis la réalisation de ce travail :

- Météo-France, pour la fourniture des données de pluies radar et des pluies du réseau pluviométrique ;
- la direction départementale de l'Équipement du Gard, pour les enregistrements aux barrages, les données des pluviographes, les dossiers d'archives des ouvrages, les relevés de laisses de crues ;
- le syndicat mixte interdépartemental d'aménagement et de mise en valeur du Vidourle et de ses affluents, pour les données CALAMAR et pour son logiciel de reconstitution des crues entrant dans les retenues ;
- Coyne et Bellier, pour les données et les discussions fructueuses sur les barrages.

Les travaux présentés ont bénéficié du soutien du ministère de l'Écologie et du Développement durable dans le cadre des missions d'assistance du Cemagref en matière de contrôle de la sécurité des barrages.

Résumé

En septembre 2002, le Sud de la France a connu un événement hydrologique exceptionnel. Le bassin versant du Vidourle dans le Gard a été particulièrement affecté. Les réservoirs des trois barrages écrêteurs qui en équipent la partie amont ont atteint leur niveau maximum depuis leur mise en service dans les années 60. Il a semblé opportun d'examiner les études hydrologiques de projet des barrages à l'aide des données recueillies lors de cet événement majeur.

L'objectif de l'étude présentée ici a donc été de quantifier l'événement hydroclimatique subi par les barrages. Nous avons, dans un premier temps, tenté d'évaluer la période de retour des précipitations sur les bassins versants qu'ils contrôlent. Nous avons, dans un deuxième temps, cherché à reconstituer les hydrogrammes entrants dans les retenues. Les résultats obtenus ont été confrontés aux études hydrologiques réalisées lors de la conception des barrages.

Abstract

A major hydro-climatic event occurred in Southern France in September 2002. It was particularly severe on the upper catchment of the Vidourle River in the administrative district of the «département du Gard». The reservoirs of the three flood mitigation dams located in that area reached their highest level since they were built in the 60's thus arising interrogations about their safety. We used this significant event to examine the hydrological design studies of the dams.

The purpose of the present study was therefore to quantify the hydroclimatic event suffered by the dams. We have tried first to give an evaluation of the occurrence of the rainfall on the catchments controlled by each dam. We have then calculated the hydrographs at the entrance of the reservoirs. Both results were compared with the original hydrological design studies of the dams.

Bibliographie

- ARNAUD, P. ; LAVABRE, J., 2002, Coupled rainfall model and discharge model for flood frequency estimation, *Water Resources Research*, vol. 38, 6, p. 11.
- BRL, 2003, *Crue des 8 et 9 septembre 2002 sur le Vidourle*, BRL ingénierie, Nîmes, 47 p.
- CHAMPION, M., 1862, *Les inondations en France du VI^e siècle à nos jours*, vol n° 4 et 5, Dunod ; Cemagref Éditions, réédition 2000.
- Comité français des grands barrages, 2002, *Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*, Cemagref Éditions-ENGREF ed., 173 p.
- Coyne et Bellier, CNABRL, 1985, *Étude générale de l'aménagement hydraulique du Gard. Bassin du Vidourle*, département du Gard, DDE du Gard, DDA du Gard, Nîmes.
- Direction départementale de l'Équipement du Gard, *Recueil des crues historiques dans le Gard* (en ligne), disponible sur <<http://www.gard.equipement.gouv.fr/>>
- FOUCHIER, C. ; LAVABRE, J. ; SOL, B. ; DESOUCHE, C., 2002, *Synthèse des débits de crue sur les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur et Languedoc-Roussillon. Phase I : la pluviométrie*, Convention n° 57/2000, MEDD, Cemagref, Météo-France, CETE Méditerranée, 79 p.
- HUET, P. ; MARTIN, X. ; PRIME, J.-L. ; FOIN, P. ; LAURAIN, C. ; CANNARD, P., 2003, *Retour d'expérience des crues de septembre 2002 dans les départements du Gard, de l'Hérault, du Vaucluse, des Bouches-du-Rhône, de l'Ardèche et de la Drôme*, Inspection générale de l'environnement, Conseil général du génie rural, des eaux et des forêts, Conseil général des Ponts-et-Chaussées, Inspection générale de l'administration, 133 p.
- LAVABRE, J. ; FOUCHIER, C. ; FOLTON, N. ; GREGORIS, Y., 2003, SHYREG : une méthode pour l'estimation régionale des débits de crue. Application aux régions méditerranéennes françaises, *Ingénierie EAT*, numéro spécial Risques naturels, p. 97-111.
- MIQUEL, J., 1984, *Guide pratique d'estimation des probabilités de crues*, Collection de la direction des Études et Recherches d'EDF, vol. n° 53, Eyrolles Éd., Paris, 160 p.
- NEPPEL, L. ; BOUVIER, C. ; LAVABRE, J., 2003, Abattement spatial des précipitations en Languedoc-Roussillon, in *Hydrology of mediterranean and semi-arid regions*, Montpellier, International association of hydrological sciences, p. 276-283.
- OUVRARD, 1959, *Avant-projet des barrages écrêteurs de crue du département du Gard. Étude hydrologique*, Ponts et Chaussées du Gard, Nîmes.
- PRADIER, 1967a, *Notice hydrologique du barrage de Conqueyrac*, Ponts et Chaussées du Gard, Nîmes.
- PRADIER, 1967b, *Notice hydrologique du barrage de La Rouvière*, Ponts et Chaussées du Gard, Nîmes.
- ROYET, P. ; FOUCHIER, C. ; LAVABRE, J. ; FÉLIX, H., 2003a, *Analyse de l'événement des 8 et 9 septembre sur les barrages du Vidourle. Hydrologie et hydraulique*, Cemagref, 32 p.
- ROYET, P. ; LAVABRE, J. ; FOUCHIER, C., 2003b, Comportement hydrologique des barrages lors de la crue de septembre 2002 sur le Vidourle. Enseignements à en tirer, in *Colloque Technique Barrages et développement durable en France*, Paris, Comité français des grands barrages, ministère de l'Écologie et du Développement durable, p. 15-28.
- VILLEMAGNE, 1961, *Notice hydrologique du barrage de Ceyrac*, Ponts et Chaussées du Gard, Nîmes.