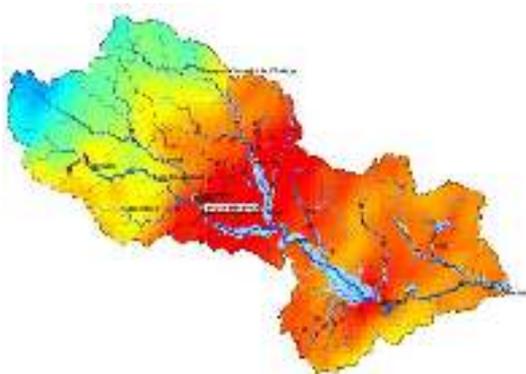
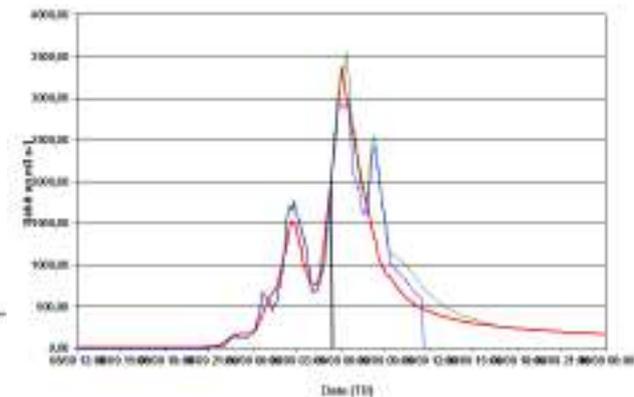


Analyse hydrologique de la crue de septembre 2002 sur les Gardons

Le Pont St Nicolas, pendant et après la crue (source : SMAGE des Gardons).



Carte des pluies cumulées.



Modèle de prévision pluie-débit Alhtair.

Auteur :

GETTVERT Florian

Intervenant :

PAYRASTRE Olivier

La crue des 8 et 9 septembre 2002 du Gardon et de ses affluents constitue un des plus violents événements de crue subis depuis ces 40 dernières années en France : 23 victimes, 4200 sauvetages effectués, 299 communes sinistrées, plus de 800 millions d'euros de dégâts dans le Gard, ...

Dans ce rapport, une analyse détaillée des données hydrologiques enregistrées lors cette crue de septembre 2002 sera effectuée au niveau du bassin versant des Gardons (département du Gard). Elle permettra d'illustrer la genèse et la propagation de cette crue, le fonctionnement hydrologique des bassins versants concernés et d'aborder diverses questions liées par exemple à la mesure des débits et aux capacités de prévision de ce type d'événement.

Remarque : la numérotation des parties de ce rapport suit la même numérotation que celle de l'énoncé.

PREMIERE PARTIE : GARDON D'ANDUZE 3

- | | |
|--|---|
| 1. Évolution des hauteurs d'eau à Anduze pendant la crue | 3 |
| 2. Courbe de tarage au droit de la station d'Anduze | 5 |
| 3. Hydrogramme des 8 et 9 septembre 2002 à Anduze | 6 |
| 4. Analyse de l'évènement pluies-débits | 7 |
| 5. Analyse détaillée des écoulements | 7 |
| 6. Temps de réponse du bassin du Gardon d'Anduze | 8 |
| 7. Modèle de prévision pluie-débit Alhtair | 8 |

DEUXIEME PARTIE : GARDONS REUNIS 10

- | | |
|---|----|
| 8. Analyse des hydrogrammes de Ners, Russan et Remoulins | 10 |
| 9. Débits de pointe estimés sur les affluents à partir d'enquêtes post-crue | 11 |
| 10. Propagation de ces différentes pointes de débit | 13 |

PREMIERE PARTIE : GARDON D'ANDUZE

Cette première partie permet d'analyser le fonctionnement hydrologique du bassin versant du Gardon d'Anduze au cours de la crue de 2002. Le Gardon d'Anduze correspond à l'une de deux branches amont des Gardons. Il traverse dans sa partie aval le village d'Anduze où la surface drainée s'élève à environ 530 km². Lors de la crue de septembre 2002, ce village a été largement inondé (*Figure 1*).



Figure 1 : Le quai, 9 septembre 2002 – 8:00 (photo J.P. Mercier).

1. Évolution des hauteurs d'eau à Anduze pendant la crue

Une station hydrométrique (Anduze télémessure) est installée dans la traversée du village, au niveau d'un pont de chemin de fer. Des lectures de hauteur ont aussi été réalisées directement par un observateur à une échelle d'annonce de crues (EAC) située quelques centaines de mètres plus à l'aval (au niveau du pont routier). On peut ainsi retracer l'évolution de ces hauteurs d'eau au cours du temps (*Figure 2*).

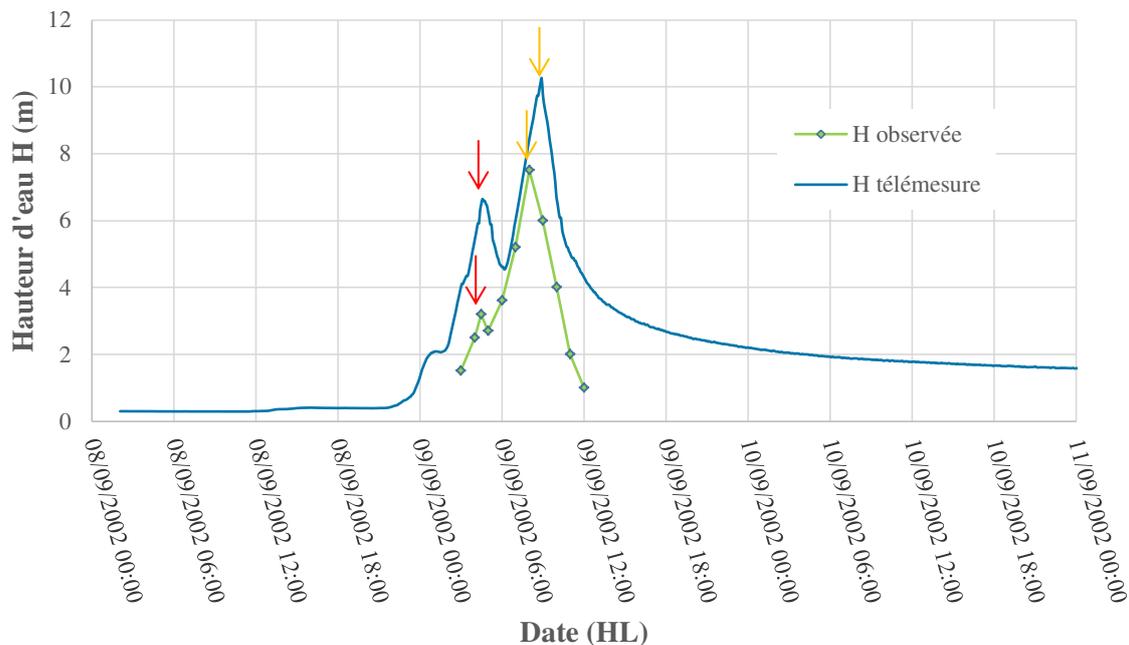


Figure 2 : Évolution des hauteurs d'eau au cours du temps dans la traversée d'Anduze.

Les deux courbes de hauteurs d'eau (H observée et H télémessure) présentent de fortes similitudes : deux pics observés, variations des courbes presque identiques, pentes similaires, etc. Elles permettent de valider mutuellement les variations de hauteurs d'eau observées.

Cependant, deux différences peuvent être observées. La première concerne l'écart entre les hauteurs d'eau mesurées par l'observateur et celles par la station hydrométrique : les hauteurs mesurées par l'observateur sont plus faibles que celles fournies par la station. Cette différence s'explique du fait que les mesures n'ont pas été faites au même endroit. Elles sont réalisées à quelques centaines de mètres l'une de l'autre. La section au droit des points de mesure n'est donc pas la même, d'où l'écart observé entre les hauteurs d'eau des deux courbes.

La deuxième différence est plus préoccupante et concerne les pointes de crue. En effet, alors que les premiers pics de chaque courbe repérés par une flèche rouge sont espacés de 5 minutes l'un de l'autre, les seconds pics de crue (flèches oranges) présentent un écart de 55 minutes ! Selon l'observateur qui a suivi en continu le déroulement de la crue, le maximum de hauteur a été atteint à 08:00 HL alors que les enregistrements de la station hydrométrique (télémessure) donne le maximum à 8:55 HL. Après vérification sur le site de la station, le capteur avait un dysfonctionnement : il enregistrerait les bonnes hauteurs d'eau (maximum de hauteur d'eau confirmé lors de la visite sur la station) mais transmettait les informations avec un décalage temporel. Les enregistrements issus de la télémessure ont donc été corrigés *a posteriori* pour correspondre avec le pic observé par l'observateur (Figure 3).

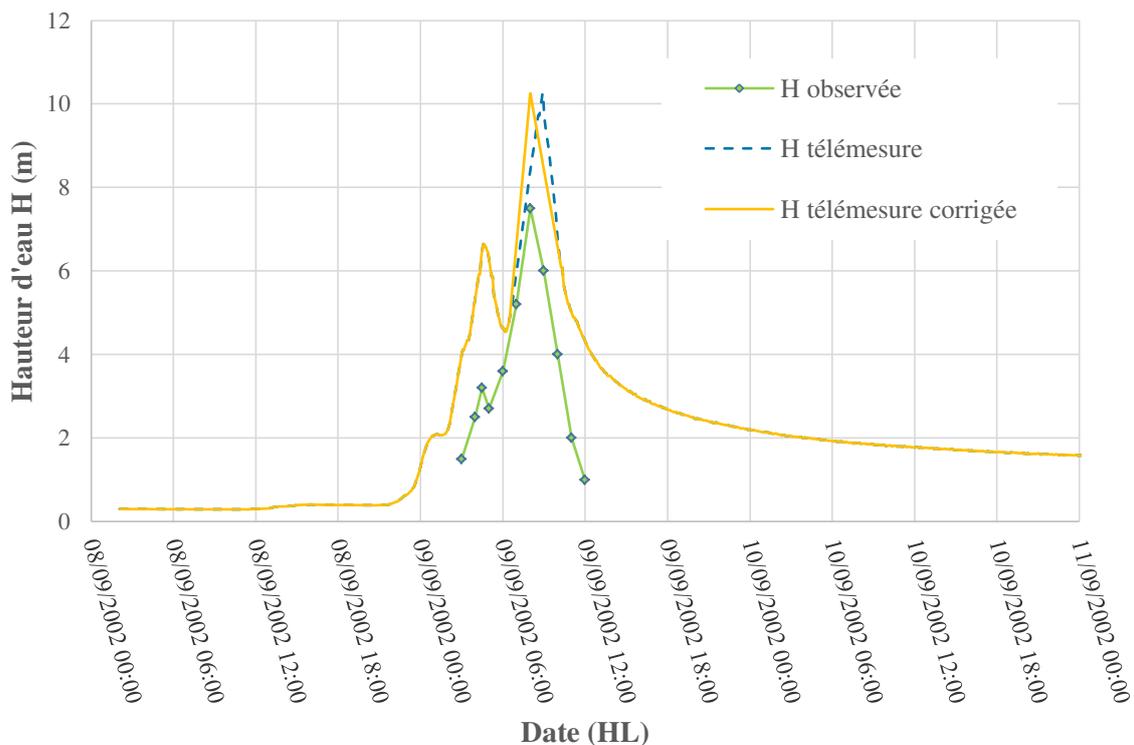


Figure 3 : Évolution des hauteurs d'eau corrigées au cours du temps dans la traversée d'Anduze.

2. Courbe de tarage au droit de la station d'Anduze

Pour évaluer les débits au droit de la station hydrométrique d'Anduze, on se reporte à la courbe de tarage de la station. En effet, la courbe de tarage décrit la relation expérimentale entre les hauteurs d'eau et les débits correspondants d'un cours d'eau au droit d'une station hydrométrique. Elle est donc établie à partir de mesure de vitesses à travers une section de référence.

Pour la station d'Anduze, plusieurs courbes de tarage sont disponibles (*Figure 4*) :

- la courbe du service de prévision des crues Grand Delta qui exploite la station (courbe SPC) ;
- les courbes issues d'une modélisation hydraulique du site de mesure réalisée suite à la crue de 2002 (courbes SIEE) ;
- les jaugeages (mesures directes du débit) ayant servi de support à l'établissement de ces courbes.

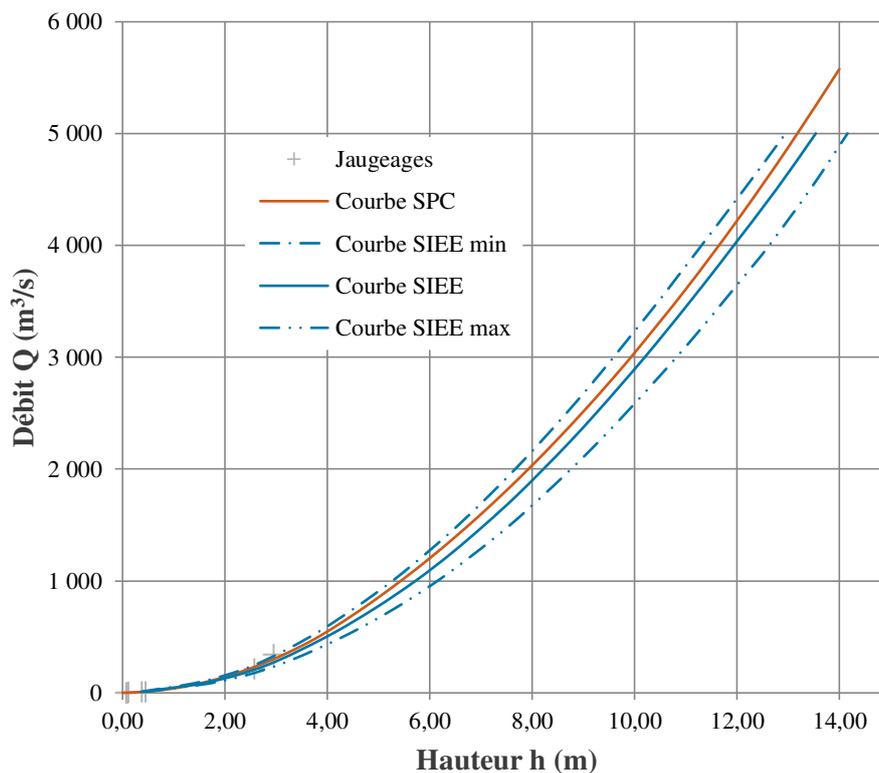


Figure 4 : Courbes de tarage, station hydrométrique d'Anduze.

Pendant la crue de septembre 2002, le maximum de hauteur d'eau mesuré au droit de la station hydrométrique d'Anduze a été de 10,25 mètres. On peut ainsi estimer le débit de pointe pour la crue des septembre 2002 (*Figure 5*) à l'aide des courbes de tarage.

Station de mesures : Anduze TM, $h_{\max} = 10,25$ m				
Modèle	SIEE min	SIEE	SIEE max	SPC
Débit (m^3/s)	2700	3000	3400	3200

Figure 5 : Débits estimatifs de pointe de la crue de 2002 selon les modèles.

L'estimation donnée de $3200 m^3/s$ pour le débit de pointe de la crue de 2002 (modèle SPC) paraît donc fiable vis-à-vis des modèles hydrauliques SIEE : le plus grand écart entre les différentes estimations ci-dessus étant de 15% entre l'estimation SPC et celle SIEE min, et la valeur de $3200 m^3/s$ est comprise dans la fourchette haute du modèle SIEE : $[3000 ; 3400]$.

3. Hydrogramme des 8 et 9 septembre 2002 à Anduze

A partir de la courbe SPC et des hauteurs d'eau corrigées, il est possible d'estimer les débits à Anduze au cours de la crue de septembre 2002 (Figure 6).

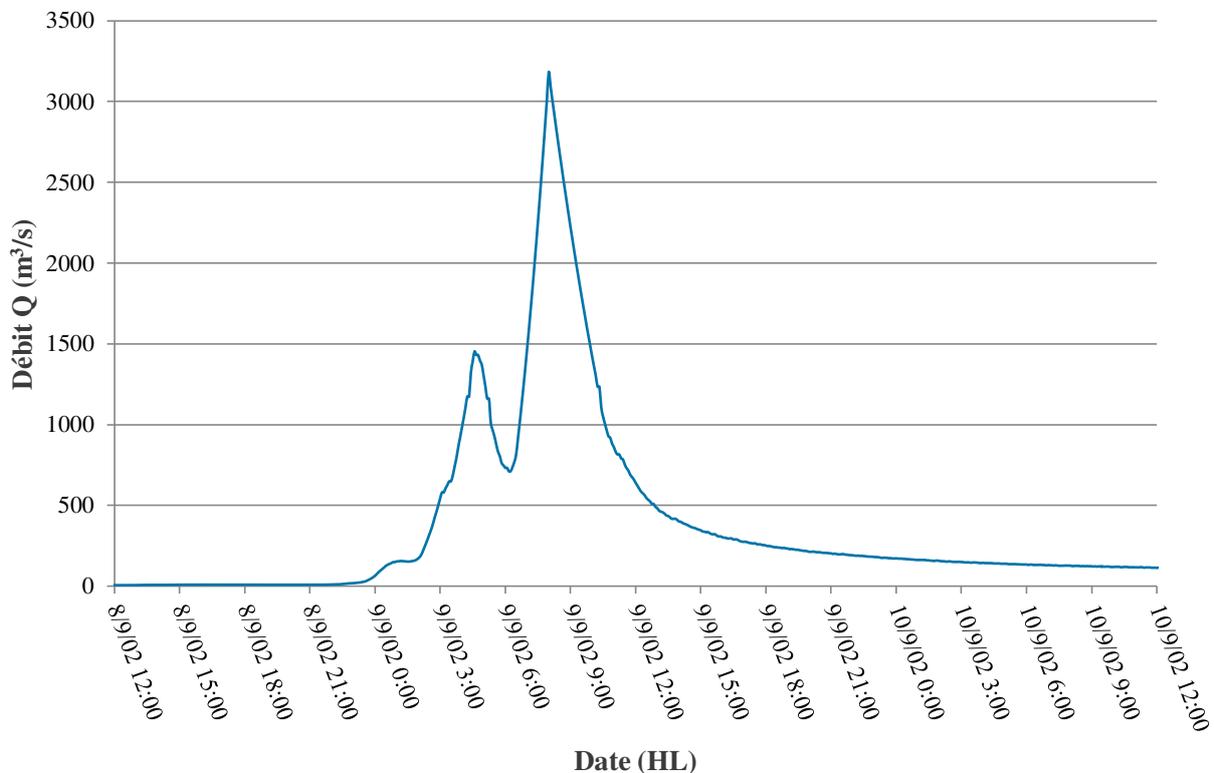


Figure 6 : Hydrogramme de la crue de 2002, station d'Anduze (Anduze TM).

On retrouve alors le débit de pointe de la crue égal à $3200 m^3/s$ pour le 9 septembre 2002 - 8:00 HL (deuxième pic) ainsi que le premier pic avec $Q = 1450 m^3/s$.

Cet hydrogramme résulte de la pluie nette puisque cette crue a pour origine les fortes pluies et averses orageuses des 8 et 9 septembre 2002. Dès lors, il apparaît pertinent de regarder les relations entre précipitations et débits afin d'obtenir des informations sur les couples pluies-débits.

4. Analyse de l'évènement pluies-débits

Si l'on superpose sur un graphique l'évolution temporelle des débits (ou hydrogramme) et le hyétogramme des intensités de pluie sur le bassin versant (*Figure 7*), on note que le bassin a une réponse en trois temps : chaque pic de l'hydrogramme est plus intense à chaque nouvel épisode pluvieux. Cela est causé par la saturation progressive du bassin.

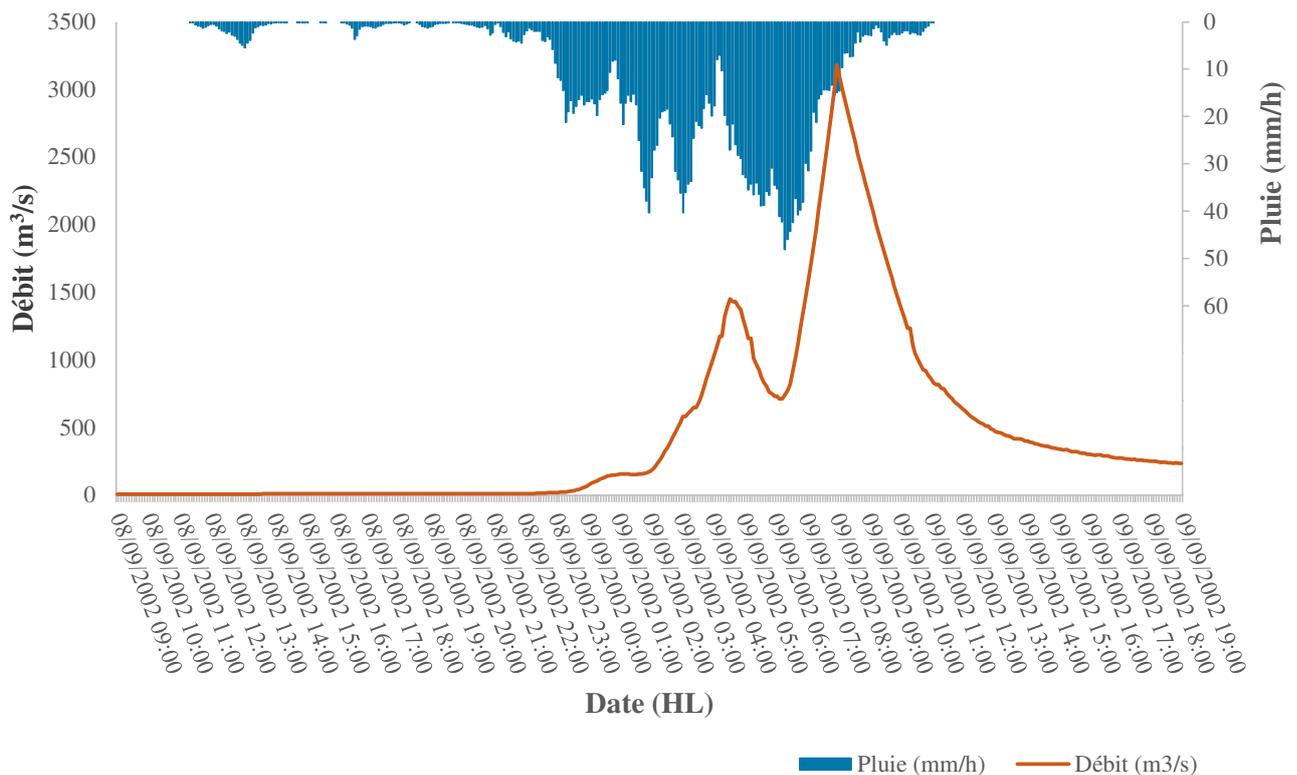


Figure 7 : Hyétogramme et hydrogramme résultant de l'évènement pluvieux des 8 et 9 septembre 2002, Anduze.

5. Analyse détaillée des écoulements

Au cours de la crue de 2002¹, on a pu observer un volume d'eau écoulé de près de $56,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, soit une lame d'eau écoulée de 104 mm sur le bassin versant du Gardon d'Anduze ($544,2 \text{ km}^2$) pour une lame d'eau précipitée de 246 mm. On a donc un déficit d'écoulement de 142 mm et un rendement d'écoulement du bassin de 0,42. Environ 58 % des précipitations (soit $32,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ d'eau) ont été stockés par le bassin (principalement par infiltration dans le sol).

¹ Entre le 8 septembre 9:00 HL et le 9 septembre 19:00 HL.

6. Temps de réponse du bassin du Gardon d'Anduze

L'hydrogramme unitaire du bassin d'Anduze (*Figure 8*) a été calculé à partir d'un modèle de transfert prenant notamment comme hypothèses que :

- la réponse hydrologique du bassin versant est uniforme sur tout le bassin versant ;
- la vitesse de transfert dans le bassin versant est indépendante de l'intensité de pluie.

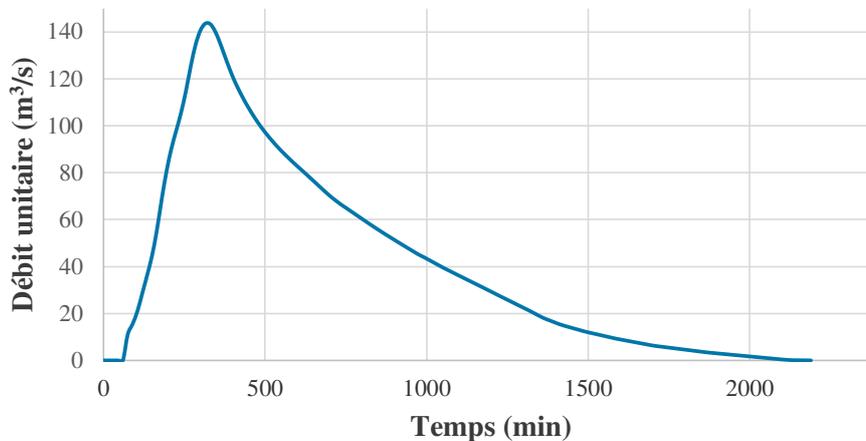


Figure 8 : Hydrogramme unitaire, station d'Anduze.

Le temps de réponse théorique, soit le temps de montée au pic de l'hydrogramme unitaire, est estimé à 5:15.

En réalité, si l'on se base sur les pluies générées le 9 septembre 2002 entre 4:15 et 9:20 (c'est-à-dire pour la deuxième pointe de crue), on constate l'horaire du pic de crue à 8:00 (*Figure 7*). L'horaire du barycentre de l'averse génératrice est quant à lui estimé à 6:11. Le temps de réponse du bassin versant observé durant cette crue est donc de 1:49.

Le temps de réponse du BV observé pendant la crue de 2002 est 2,8 fois plus faible que le temps de réponse théorique. Cela peut s'expliquer par le fait que les hypothèses prises pour réaliser l'hydrogramme unitaire ne sont pas valides pour l'évènement de crue des 8-9 septembre 2002 :

- la réponse hydrologique n'est pas uniforme sur l'ensemble du bassin (coefficient d'écoulement différent selon les zones);
- la vitesse de transfert dans le bassin versant est indépendante de l'intensité de pluie (infiltration différente selon les zones);
- la pluie n'est pas homogène sur l'ensemble du bassin versant.

7. Modèle de prévision pluie-débit Alhtaïr

On souhaite analyser les sorties du modèle de prévision pluie-débit Alhtaïr utilisé par le service de prévision des crues. Chacune des prévisions réalisées repose sur un scénario de pluies futures constitué d'une heure de prévision de pluie (fournie par les enregistrements radar), puis d'une pluie supposée nulle par la suite. Les débits observés et ceux obtenus avec le modèle (débits simulés puis débits prévus à +1h, +2h et +3h) ont été superposés sur un même graphique (*Figure 9*).

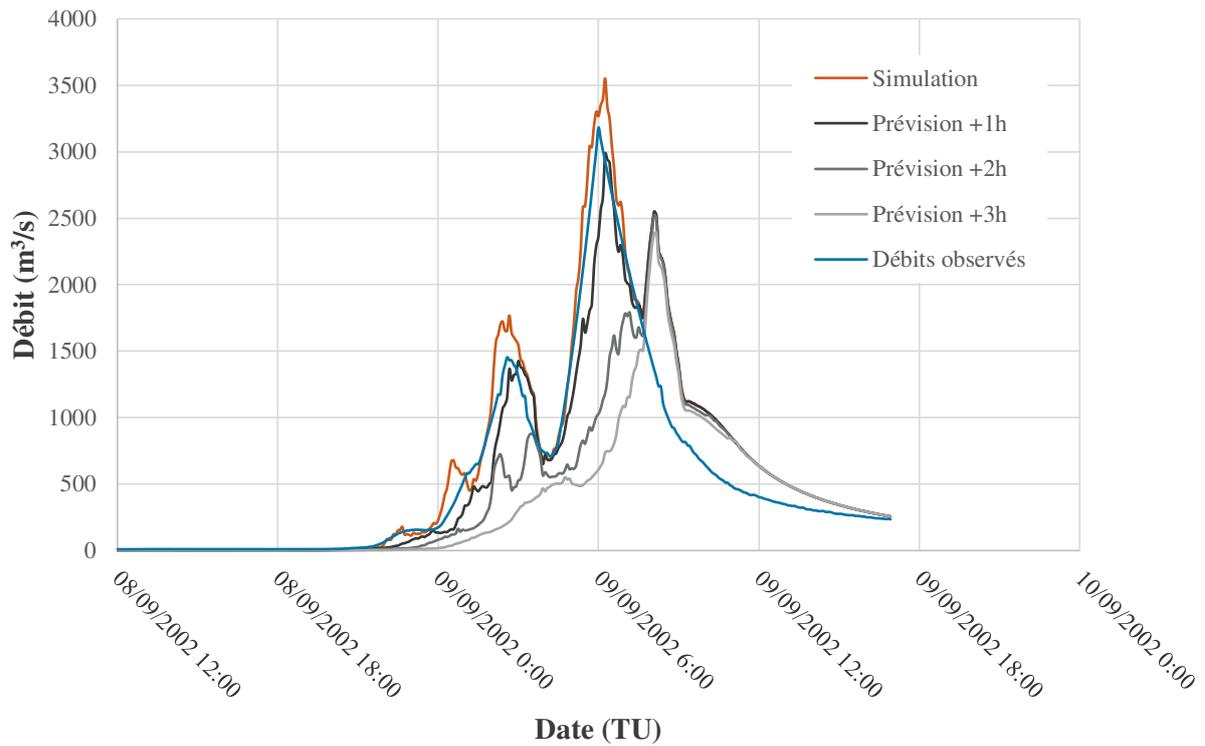


Figure 9 : Modèle de prévision pluie-débit Alhtair pour la crue des 8 et 9 septembre 2002, station d'Anduze TM (544,2 km²).

Les critères de Nash correspondant pour les prévisions précédentes ont été calculés suivant la formule suivante :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_t (Q_{sim}(t) - Q_{obs}(t))^2}{\sum_t (Q_{obs}(t) - Q_{obs})^2}$$

Ces critères de Nash sont fournis dans le tableau ci-dessous (Figure 10) :

	Simulation	Prévision +1h	Prévision +2h	Prévision +3h
$\overline{Q_{obs}}$ (m ³ /s)	464.16	478.06	492.84	508.57
Critère de Nash	0.88	0.86	0.56	0.29
Interprétation	Nash > 0.8	Nash > 0.8	Nash < 0.7	Nash << 0.7
Validité du modèle	Modèle validé	Modèle validé	Modèle rejeté	Modèle rejeté

Figure 10 : Critères de Nash.

La simulation et la prévision +1h sont des modèles plutôt bien calés sur la réalité contrairement aux modèles de prévision +2h et +3h qui présentent des écarts importants (Nash inférieur à 0.7) et qui sont à rejeter.

D'ailleurs, la représentation graphique (*Figure 9*) montre bien une bonne adéquation des modèles Simulation et Prévision +1h avec les débits observés alors qu'il y a une incohérence des modèles de Prévision +2h et +3h avec les débits réellement observés. L'incertitude sur les scénarios de pluie pour les modèles de Prévision +2h et +3h est trop importante (délai d'anticipation trop élevé).

Ainsi, pour ce type d'événement, les délais de prévision possibles sont de l'ordre de l'heure.

DEUXIEME PARTIE : GARDONS REUNIS

Les Gardons réunis correspondent à la partie aval du bassin versant (aval de la confluence entre Gardon d'Anduze et Gardon d'Alès). Cette deuxième partie de la séance est destinée à l'analyse de la propagation de la crue et de la contribution des bassins intermédiaires, entre les stations de Ners et Remoulins.

8. Analyse des hydrogrammes de Ners, Russan et Remoulins

Les hydrogrammes estimés aux trois stations de Ners, Russan et Remoulins ont été tracés sur un même sur un même graphique (*Figure 11*).

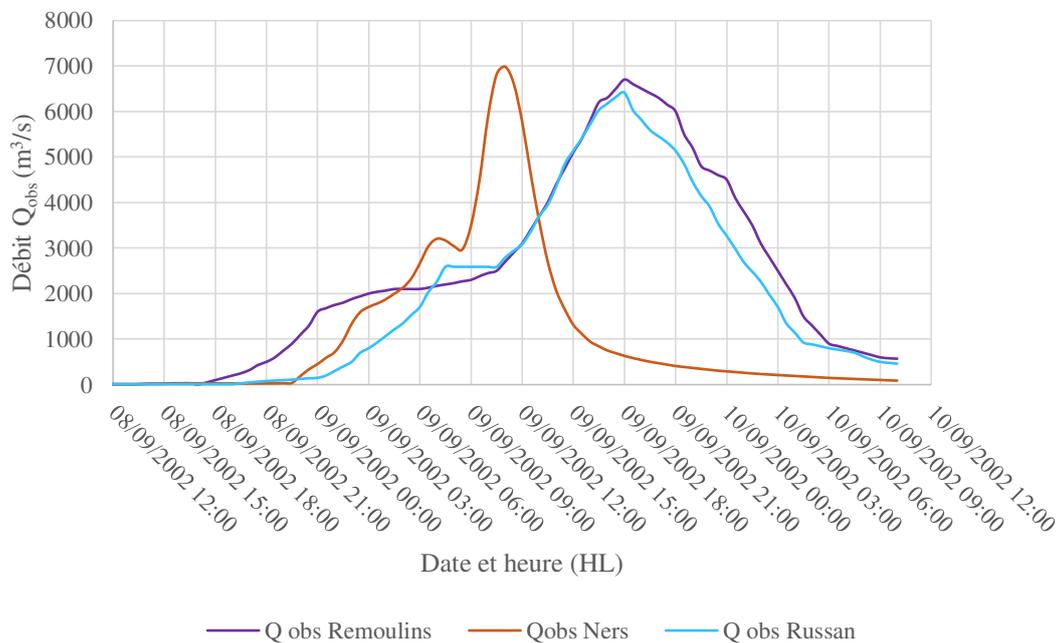


Figure 11 : Hydrogrammes observés à Remoulins, Ners et Russan.

Les hydrogrammes de Russan et Remoulins ont une allure similaire contrairement à celui de Ners. Selon l'allure des courbes et le positionnement des villes les unes par rapport aux autres le long des Gardons, on peut supposer qu'à l'amont de Russan, entre Ners et Russan, il puisse y avoir un lieu de stockage des eaux d'écoulement² puisqu'on observe un débit de pointe plus faible à Russan qu'à Ners, une pente de montée au pic plus faible, un retard du pic de crue (par comparaison entre la durée entre les trois pics observés sur le

² On peut faire l'hypothèse de l'existence d'une plaine inondable.

graphique de la *Figure 11* et la distance respective des villes entre elles). A contrario, les hydrogrammes de Russan et de Remoulins, par leur allure similaire et une faible durée entre les deux pics de crue, laissent supposer un écoulement direct des eaux sans stockage.

Comme précédemment pour Anduze, il est possible d'évaluer à partir de ces hydrogrammes les volumes d'eau enregistrés aux trois stations ainsi que les lames d'eau écoulées (LEE) sur les bassins intermédiaires suivants : sur le bassin versant situé entre Ners et Russan de superficie 424,7 km² et sur celui situé entre Russan et Remoulins avec un bassin versant intermédiaire de 337,8 km² (*Figure 12*).

Station	Remoulins	Ners	Russan
Volume d'eau enregistrée aux stations (en m ³)	405,07.10 ⁶	190,94.10 ⁶	336,35.10 ⁶
Volume d'eau provenant du BV (en m ³)	68,73.10 ⁶	190,94.10 ⁶	145,40.10 ⁶
Surface des BV (en km ²)	337,8	-	424,7
LEE (en mm)	203,45	-	342,37

Figure 12 : Lames d'eau écoulées sur les bassins intermédiaires.

Il est alors possible de comparer ces LEE avec les lames d'eau précipitées (LEP) sur les deux bassins versants intermédiaires cités précédemment (*Figure 13*). Une comparaison des déficits et rendements d'écoulements observés avec le bassin d'Anduze peut s'avérer intéressante.

Bassin versant (BV)	Anduze	BV _i Ners-Russan	BV _i Russan-Remoulins
Surface des BV (km ²)	544,2	424,7	337,8
LEE (en mm)	104,27	342,37	203,45
LEP (en mm)	245,58	570,80	511,51
Déficit d'écoulement (en mm)	141,31	228,43	308,06
Rendement d'écoulement (en mm)	0,42	0,60	0,40

Figure 13 : Déficits et rendements d'écoulements au niveau des bassins versants intermédiaires.

Alors que les bassins d'Anduze et de Russan-Remoulins ont stocké près de 60 % des pluies, le bassin intermédiaire de Ners-Russan en a stocké 40 %. Les bassins d'Anduze et de « Russan-Remoulins » semblent avoir des comportements hydrologiques comparables.

9. Débits de pointe estimés sur les affluents à partir d'enquêtes post-crue

Des débits de pointe ont été estimés après la crue sur certains cours d'eau affluents des Gardons (*Figure 15*) auxquels peuvent être rajoutés les débits de pointe calculés à Anduze, Ners, Russan et Remoulins (*Figure 14*).

Station hydrométrique	Anduze	Ners	Russan	Remoulins
Débit de pointe (m ³ /s)	3182	6984	6411	6700

Figure 14 : Débits de pointe observés au niveau des villes d'Anduze, Ners, Russan et Remoulins

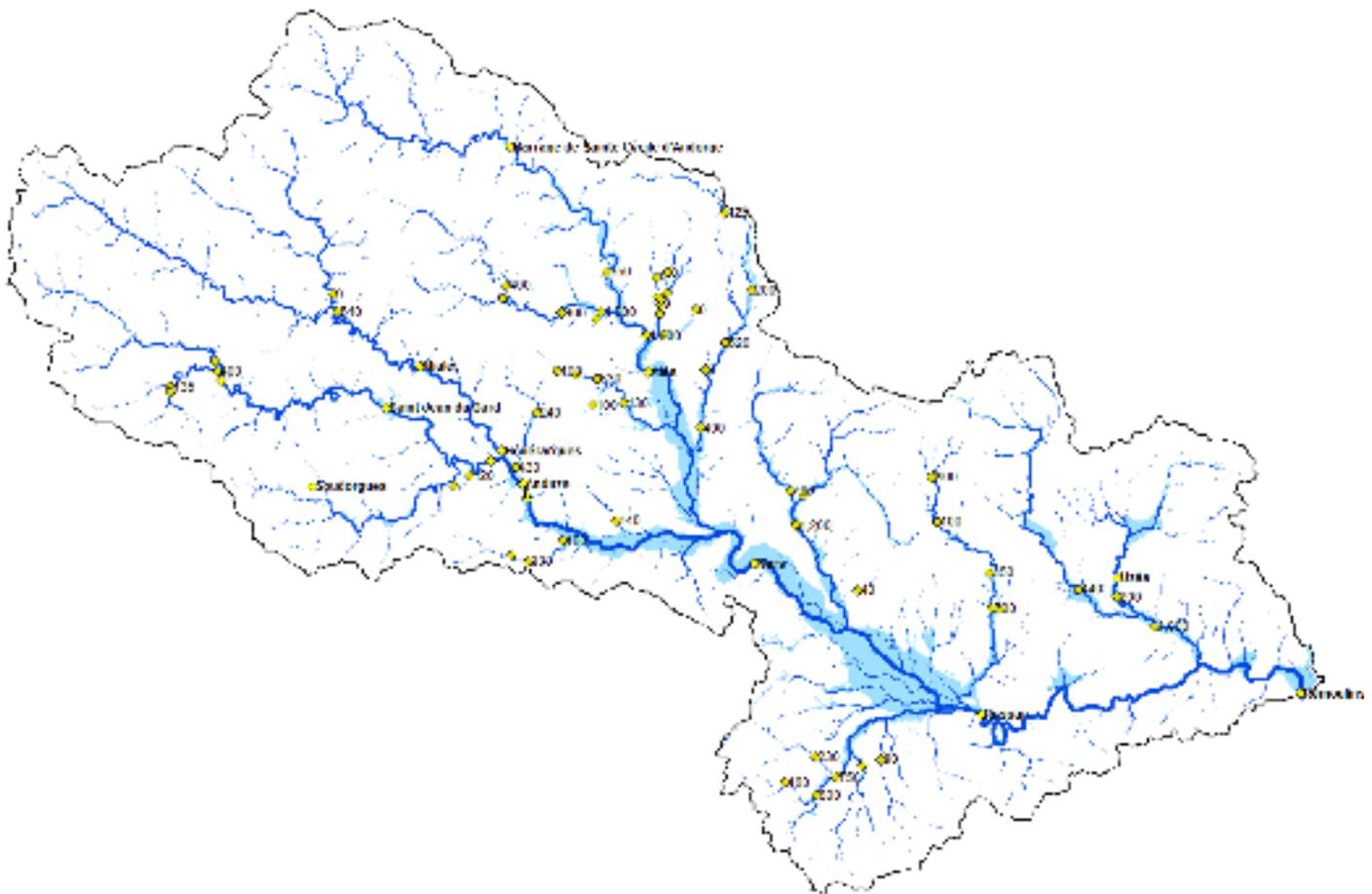


Figure 15 : Débits de pointe sur certains cours d'eau affluents des Gardons.

Si l'on additionne les débits des pointes de crue du Gardon d'Anduze ($\approx 3480 \text{ m}^3/\text{s}$) et du Gardon d'Alès ($\approx 3000 \text{ m}^3/\text{s}$), on retrouve quasiment le débit de pointe observés à Ners ($\approx 7000 \text{ m}^3/\text{s}$). Les deux pics de crue se rejoignent donc quasi simultanément à la confluence des Gardons d'Anduze et d'Alès.

Si on réitère la méthode précédente pour Russan, on obtiendrait un débit de pointe aux environs de $9000 \text{ m}^3/\text{s}$ (avec les débits des affluents), or on a observé un débit de pointe de $6400 \text{ m}^3/\text{s}$. D'après la Figure 15, la présence d'une large zone inondable pourrait être à l'origine de l'écrêtement du débit de pointe supposé et pourrait expliquer le « retard » du pic supposé lors de l'analyse des hydrogrammes (Figure 11).

Enfin, si on reprend la méthode précédente et en supposant l'absence de zones inondables entre Russan et Remoulins, le débit de pointe observé à Russan ($6400 \text{ m}^3/\text{s}$) ajouté au débit de pointe par le Gardon d'Uzès ($1000 \text{ m}^3/\text{s}$) donne une valeur trop éloigné par rapport à celle observé à Remoulins ($Q_{\text{supposé}} = 7400 \text{ m}^3/\text{s}$ si

simultanéité des pics de crue, $Q_{\text{réellement observé}} = 6700 \text{ m}^3/\text{s}$). Les deux pointes de crue n'arrivent pas simultanément à Remoulins.

10. Propagation de ces différentes pointes de débit

La visualisation de l'animation représentant la propagation de ces différentes pointes de débit paraît cohérente avec l'analyse qui a été faite sur les débits de pointe.

Les pointes de débit des Gardons d'Anduze et d'Alès arrivent simultanément à Ners. La présence d'une large zone inondable écrête et retarde l'onde de crue jusqu'à Russan. La pointe de crue provenant du bassin du Gardon d'Uzès atteint en première la ville de Remoulins (Figure 16), avant que la pointe de débit provenant de Russan n'arrive.

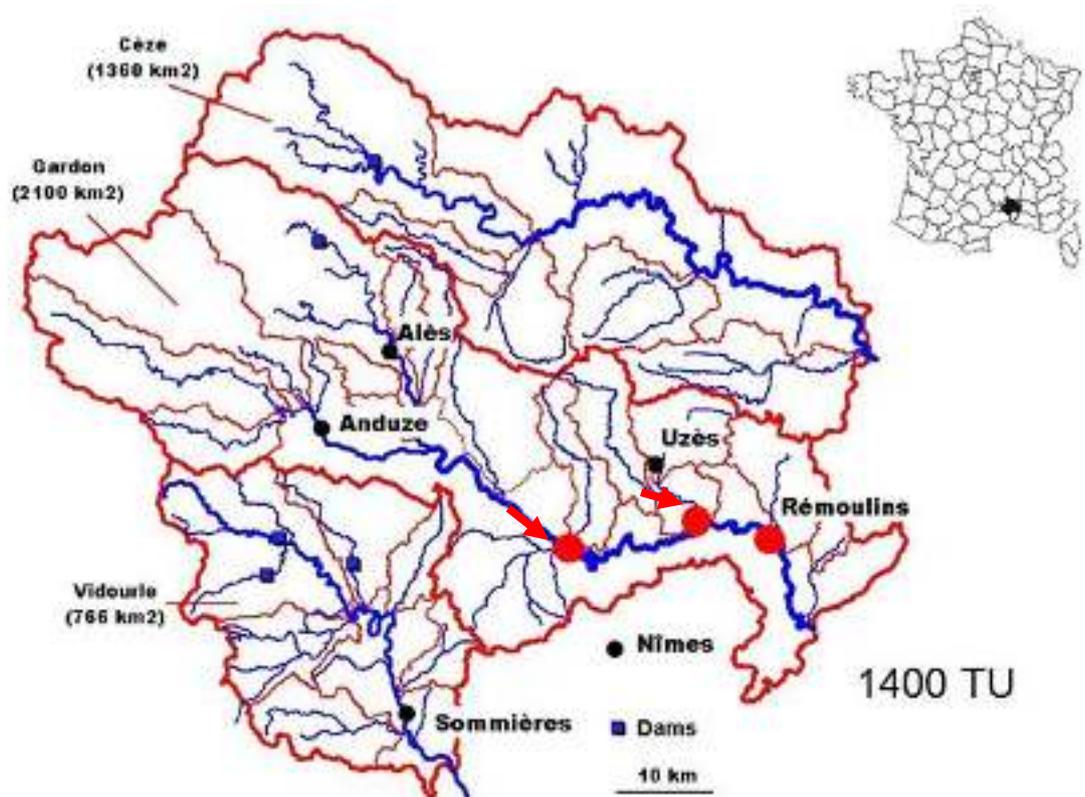


Figure 16 : Localisation des différentes pointes de crue.