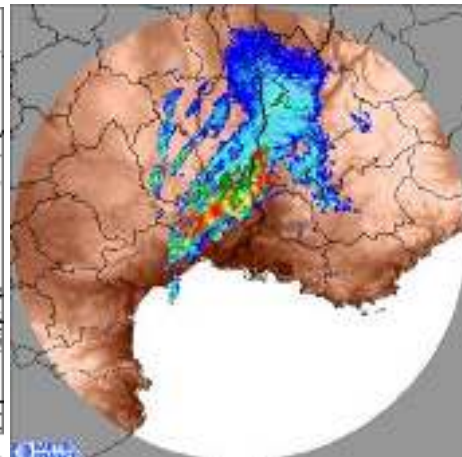
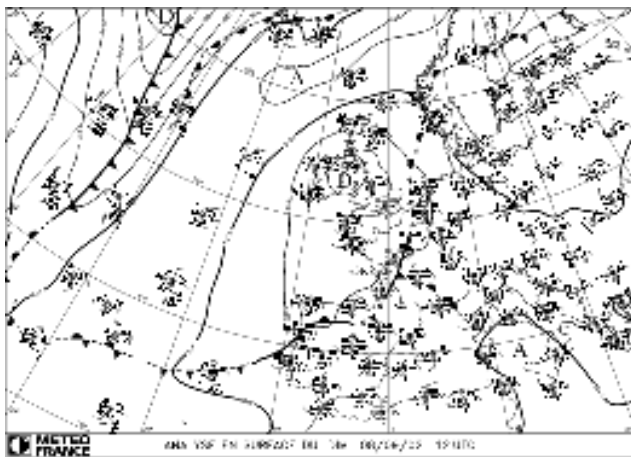


## THE 2002 GARD FLASH FLOOD EVENT



**Auteur :**

GETTVERT Florian

**Intervenant :**

CREUTIN Jean-Dominique

Les 8 et 9 septembre 2002 arrivés dans le sud-est de la France un des plus importants événements de crue subis depuis ces 40 dernières années. Il a abouti à 23 pertes humaines et à des dégâts économiques évalués à 1,2 milliards d'euros.

Les objectifs de ce rapport sont d'évaluer les incertitudes associées à l'évaluation d'averses obtenue d'instruments et de réseaux différents et leurs impacts sur l'évaluation de la réponse hydrologique.

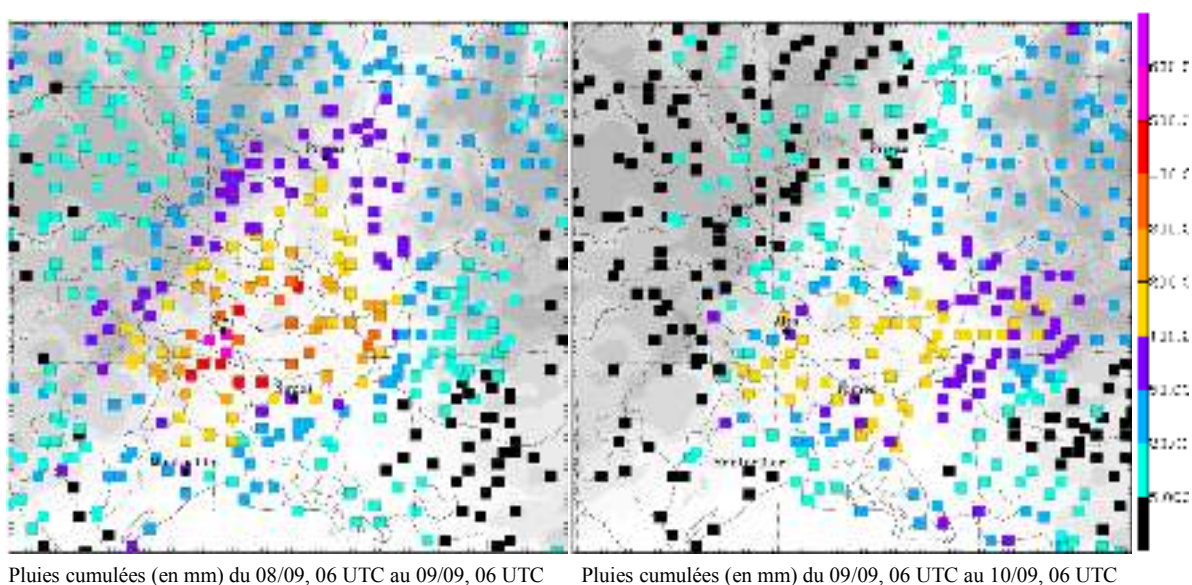
*Remarque : la numérotation des parties de ce rapport suit la même numérotation que celle de l'énoncé.*

<b>ÉVALUATION DES PRÉCIPITATIONS</b>	<b>3</b>
1. Maxima d'intensités d'averses enregistrés	3
2. Évaluation des précipitations grâce aux relevés pluviométriques	4
3. Évaluation des précipitations par radar météorologique	5
<b>LE SYSTÈME MÉTÉOROLOGIQUE</b>	<b>8</b>
1. Systèmes de précipitations	8
2. Développement vertical de la convection	9
<b>L'ENVIRONNEMENT MÉTÉOROLOGIQUE</b>	<b>11</b>
<b>LA RÉPONSE HYDROLOGIQUE</b>	<b>14</b>

## ÉVALUATION DES PRÉCIPITATIONS

### 1. Maxima d'intensités d'averses enregistrés

Les cartes ci-dessous (*Figure 1*) montrent la hauteur des précipitations journalières (en mm) pour les 8 et 9 septembre 2002 sur le haut Languedoc. Les données figurant sur ces cartes sont basées sur des relevés pluviométriques.

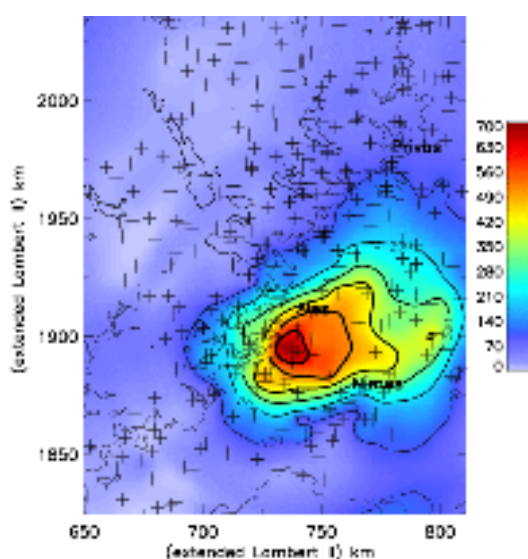


*Figure 1 : Cartes des pluies cumulées des 8 et 9 septembre 2002.*

La perturbation des 8 et 9 septembre 2002 a affecté un vaste secteur géographique réparti sur le Gard, l'est de l'Hérault et l'ouest du Vaucluse. Les bassins versants des Gardons, du Vidourle et de la Dourbie-Tarn amont ont été les principaux bassins touchés par cet événement pluvieux.

Le bassin versant des Gardons est néanmoins le bassin le plus touché lors cet événement pluvieux, notamment dans les alentours d'Anduze et d'Alès. Il s'agit du bassin qui a reçu les précipitations maximales. La *Figure 2* permet d'observer les cumuls pluviométriques mesurés lors de cet événement. Le maximum d'intensité de pluie a été mesuré dans les environs d'Anduze (sous-bassin du Gardon d'Anduze) avec près de 700 mm de pluies enregistrées.

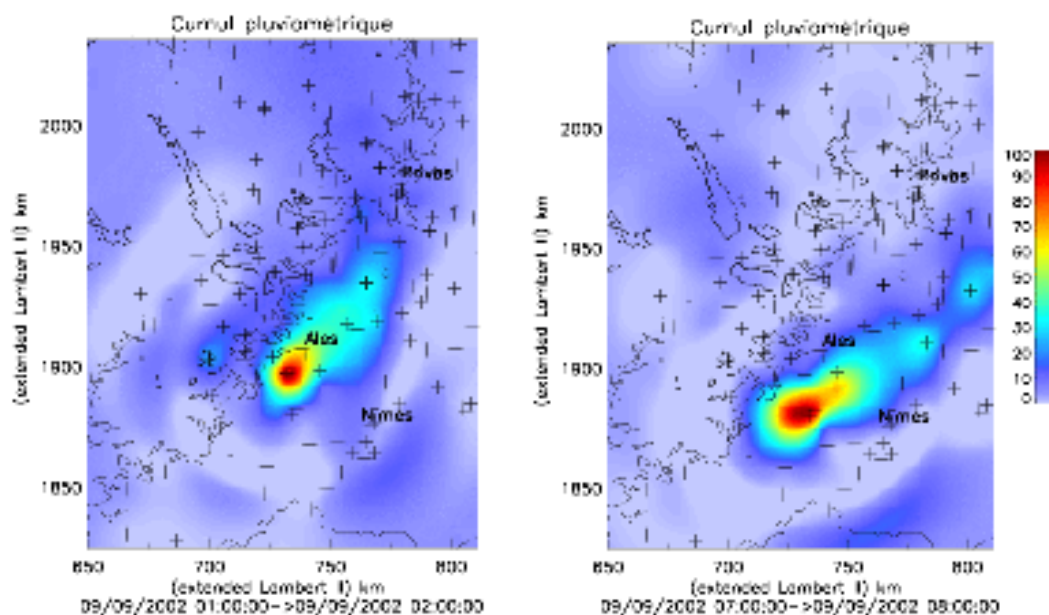
De plus, d'après la *Figure 2*, une des caractéristiques de cet événement pluvieux est la disparité spatiale des précipitations : près de 700 mm à Anduze alors qu'à 40 kilomètres, Gallargues n'a enregistré que 70 mm. Il s'agit là d'un événement pluvieux assez localisé.



*Figure 2 : Cumul pluviométrique (du 08/09/2002, 06 UTC au 10/09/2002, 06 UTC)*

Si l'on analyse maintenant les relevés pluviométriques au pas de temps horaire, ces derniers montrent deux situations où l'on a observé les plus fortes pluies (*Figure 3*) :

- le 9 septembre 2002 entre 1h00 et 2h00 où il est tombé environ 90 mm de pluie aux alentours d'Alès et d'Anduze, sur le bassin versant des Gardons ;
- le 9 septembre 2002 entre 7h00 et 8h00 où il est tombé de 90 à 100 mm de pluie au niveau de Sommières avec une zone de fortes précipitations plus étendue que précédemment et qui touche à la fois le bassin versant du Vidourle et celui des Gardons.



*Figure 3 : Exemples de 2 cumuls pluviométriques au pas de temps horaire<sup>1</sup>*

## 2. Évaluation des précipitations grâce aux relevés pluviométriques

Basées sur l'observation des pluviomètres, les hauteurs de lames d'eau ont été extraites au niveau de trois villes touchées lors de l'évènement pluvieux des 8-9 septembre 2002 : Remoulins, Anduze et Sommières (*Figure 4*).

D'après l'allure des courbes de lames d'eau sur ces trois villes (*Figure 4*), l'évènement pluvieux ne les a pas toutes touchées de la même façon. A Anduze et à Remoulins, on observe un seul épisode pluvieux qui a duré 8h et 12h respectivement pendant lequel la lame d'eau est estimée respectivement à 30 mm et 24 mm en moyenne alors qu'à Sommières, on observe plutôt deux forts épisodes pluvieux : le premier du 08/09 à 13h00 au 09/09 à 01h00 avec un pic à 37 mm et le second, plus court, du 09/09 à 05h00 au 09/09 à 11h00 avec un pic à 55 mm.

<sup>1</sup> Ces cartes sont issues de modélisations prenant comme source de données les valeurs relevées au niveau des pluviomètres dans la zone d'étude.

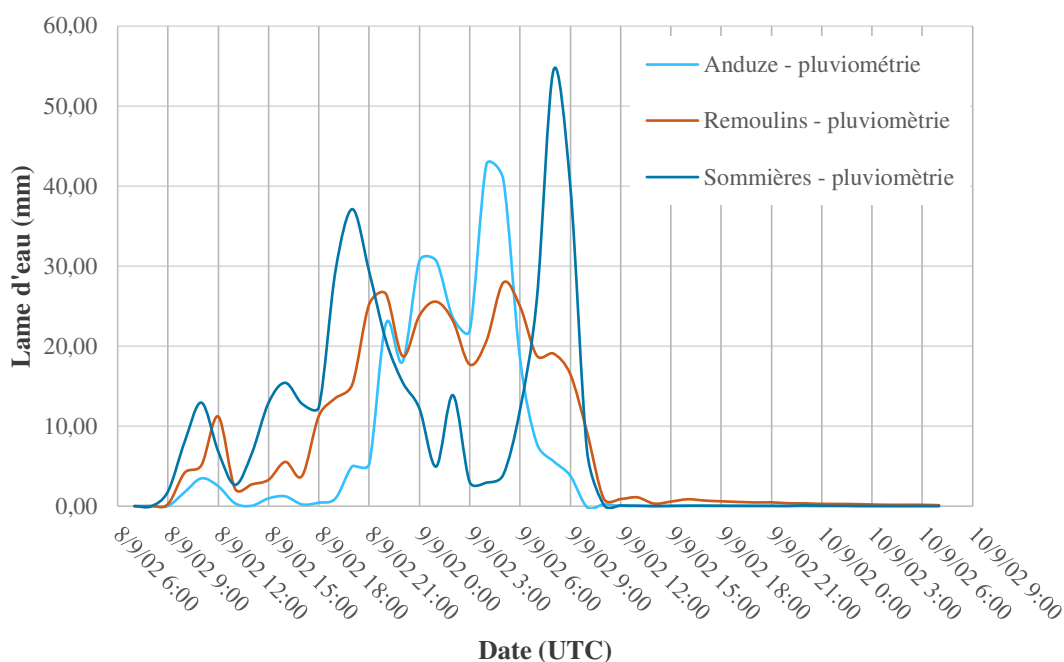


Figure 4 : Évolution des lames d'eau au cours de l'évènement <sup>2</sup>

Les hauteurs de lames d'eau cumulées donnent entre le 08 septembre 6h00 et le 10 septembre 6h00 les valeurs suivantes :

- Anduze : 274,73 mm
- Remoulins : 394,04 mm
- Sommières : 400,80 mm

Ainsi, d'après les lames d'eau observées au cours de l'évènement et leur cumul, Sommières apparaît comme la zone ayant reçu le plus de précipitations. On peut donc penser que le bassin de Sommières sera plus affecté par cet évènement que le bassin d'Anduze ou de Remoulins.

### 3. Évaluation des précipitations par radar météorologique

Cette fois-ci, les lames d'eau ont été évaluées à partir de données radar issues de la station radar de Nîmes. Connaissant la réflectivité des échos radar ( $Z$ ), la relation de Marshall-Palmer permet de déterminer le taux de précipitations ( $R$ ) :

$$Z_{pluie} = a \cdot R^b \text{ avec } a = 200 \text{ et } b = 1,6$$

Ces coefficients ( $a, b$ ) sont valables pour tout type de pluie et cette relation de Marshall-Palmer est la plus fréquemment utilisée dans les latitudes moyennes.

<sup>2</sup> Les lames d'eau sont évaluées à partir des relevés pluviométriques des stations d'Anduze, de Remoulins et de Sommières.

A partir du traitement des données de radar et en appliquant la relation Z-R ( $a = 200$  et  $b = 1,6$ ) susmentionnée, les lames d'eau au niveau d'Anduze, de Remoulins et de Sommières peuvent alors être évaluées (Figure 5).

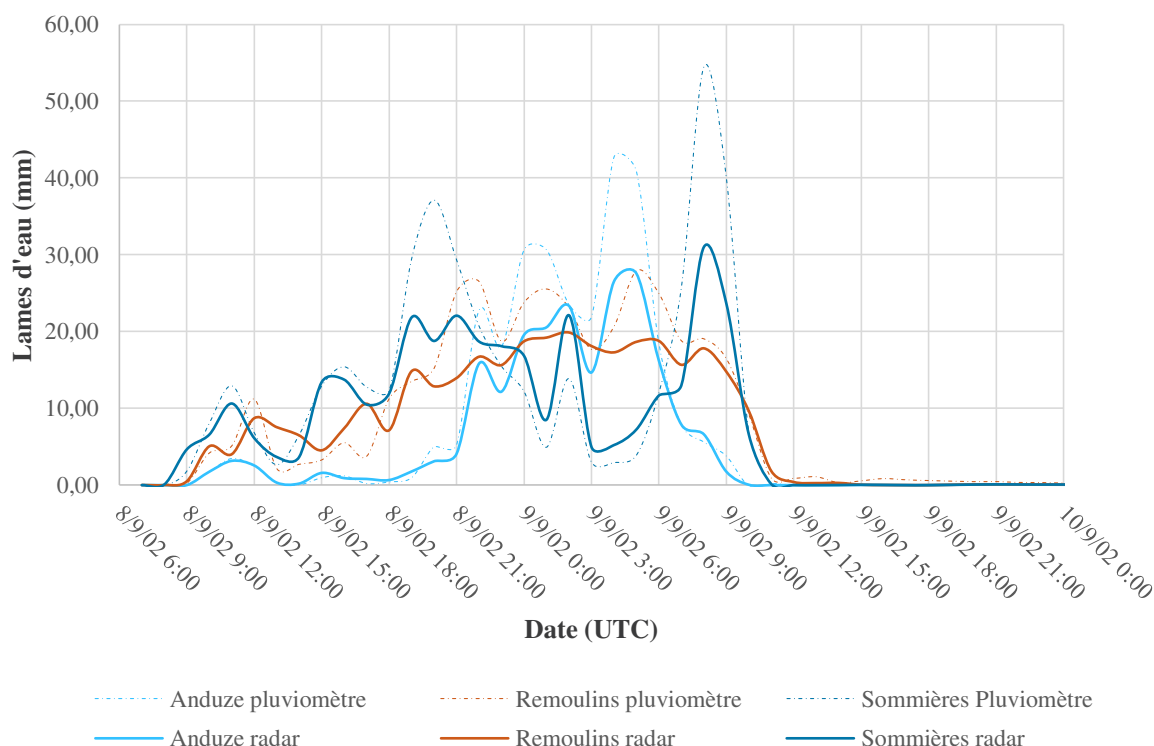


Figure 5 : Évaluation des lames d'eau par radar météorologique ( $a = 200$  ;  $b = 1,6$ ).

Les hauteurs de lames d'eau cumulées, suite au traitement des données radar, donnent entre le 08 septembre 6h00 et le 10 septembre 6h00 les valeurs suivantes (pour comparaison, les valeurs obtenus par les relevés pluviométriques précédents sont données en italique et entre parenthèses):

- Anduze : 215,50 mm (274,73 mm)
- Remoulins : 328,32 mm (394,04 mm)
- Sommières : 336,25 mm (400,80 mm)

Les données radar écrêtent les plus hautes valeurs relevées par les pluviomètres. Cela peut se comprendre du fait que les pluviomètres ne donnent qu'une mesure ponctuelle de la pluie dans une zone alors que le radar analyse la zone entière et offre une meilleure précision sur les valeurs (connaissance de réflectivités) et une vision plus globale sur la zone (possibilité de moyenner le taux de précipitation).

Cependant, les coefficients (a,b) choisis sont valables pour tout type de pluie. Il peut être plus pertinent d'évaluer la lame d'eau avec les coefficients (a,b) pour une pluie convective :  $a=300$  et  $b=1,4$  (Figure 6).

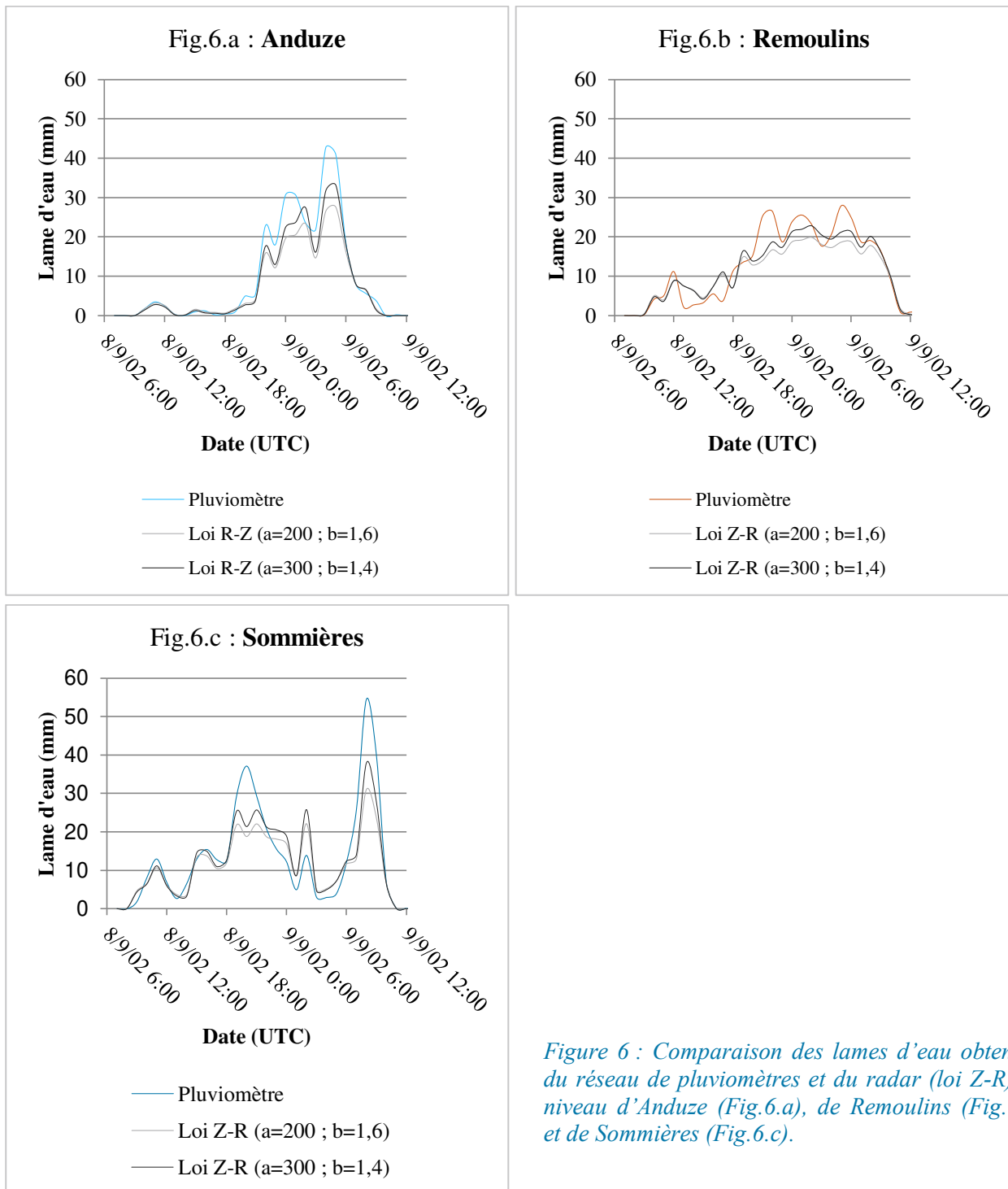


Figure 6 : Comparaison des lames d'eau obtenues du réseau de pluviomètres et du radar (loi Z-R) au niveau d'Anduze (Fig.6.a), de Remoulins (Fig.6.b) et de Sommières (Fig.6.c).

Les nouveaux coefficients choisis ( $a=300$  ;  $b=1,4$ ) paraissent plus pertinents vis-à-vis des valeurs de pluie réellement observées. On observe ainsi une “pondération” des valeurs avec ces nouveaux coefficients, les écarts sont réduits entre les valeurs pluviométriques (qui restent des valeurs réellement observées contrairement au modèle prenant en compte les données radar) et les valeurs traitées à partir des données brutes du radar. Mais, les radars ont cet avantage de donner une vision plus

générale de l'évènement et permettent une connaissance continue du champ de pluie. La pluie mesurée à l'aide des radars est donc plus conformes à ce qui peut être observé sur le terrain.

	Lames d'eau obtenues du réseau de pluviomètres	Lames d'eau obtenues par le radar de Nîmes (loi Z-R)	
		$a = 200 ; b = 1,6$	$a = 300 ; b = 1,4$
Anduze	274,73 mm	215,50 mm	237,03 mm
Remoulins	394,04 mm	328,32 mm	357,74 mm
Sommières	400,80 mm	336,25 mm	371,24 mm

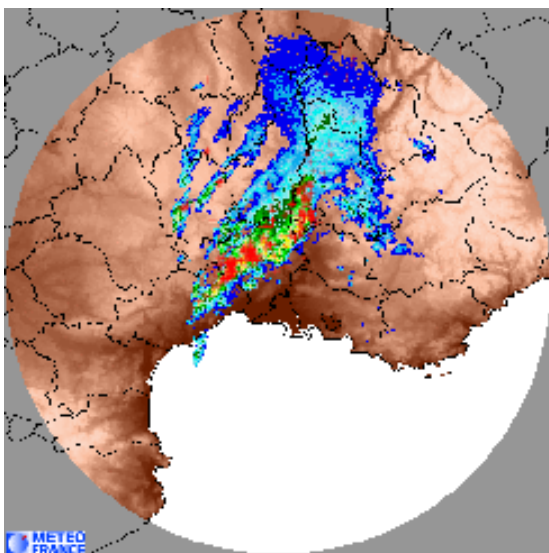
Figure 7 : Lames d'eau cumulées entre le 08 septembre 6h00 et le 10 septembre 6h00.

## LE SYSTÈME MÉTÉOROLOGIQUE

### 1. Systèmes de précipitations

Les images radar permettent de mieux identifier les différentes étapes et les systèmes de précipitations de cet évènement des 8 et 9 septembre 2002 (Figure 8).

L'analyse progressive des images radar (Figure 8) montre que la France est soumise à un flux de précipitations venant du sud-ouest. Ce front progresse lentement du sud-ouest vers le nord-est du pays. Le sud-est de la France reste la partie la plus touchée par cet évènement, notamment au niveau du Gard et dans la vallée du Rhône. D'ailleurs, de nombreux orages se forment lors de cet évènement et sont très localisés : on les retrouve principalement dans les départements du Gard, du Vaucluse et de la Drome (début de la foudre le 8 septembre à 13h00 au niveau du Gard).



Dans le nord du Gard, on voit que l'épisode pluvieux reste stationnaire durant 24 heures. De nombreux évènements orageux sont observés, la foudre « correspond » à de fortes précipitations. C'est au pied des Cévennes que se forme la cellule en V (Figure 9 ci-contre). Le nord du Gard est à la pointe de ce V, dans la partie où les pluies sont les plus intenses du fait de la naissance des « jeunes » cellules très actives (partie convective). C'est également à cet endroit que naissent les cellules orageuses. Ce système convectif, quasi-stationnaire durant les 24 heures au niveau du Gard, s'évacuera progressivement le 9 septembre en fin de matinée vers l'est (dernière image radar, Figure 8).

← Figure 9 : Image radar - Nîmes  
09/09/2002, 07h00 (avec orages)



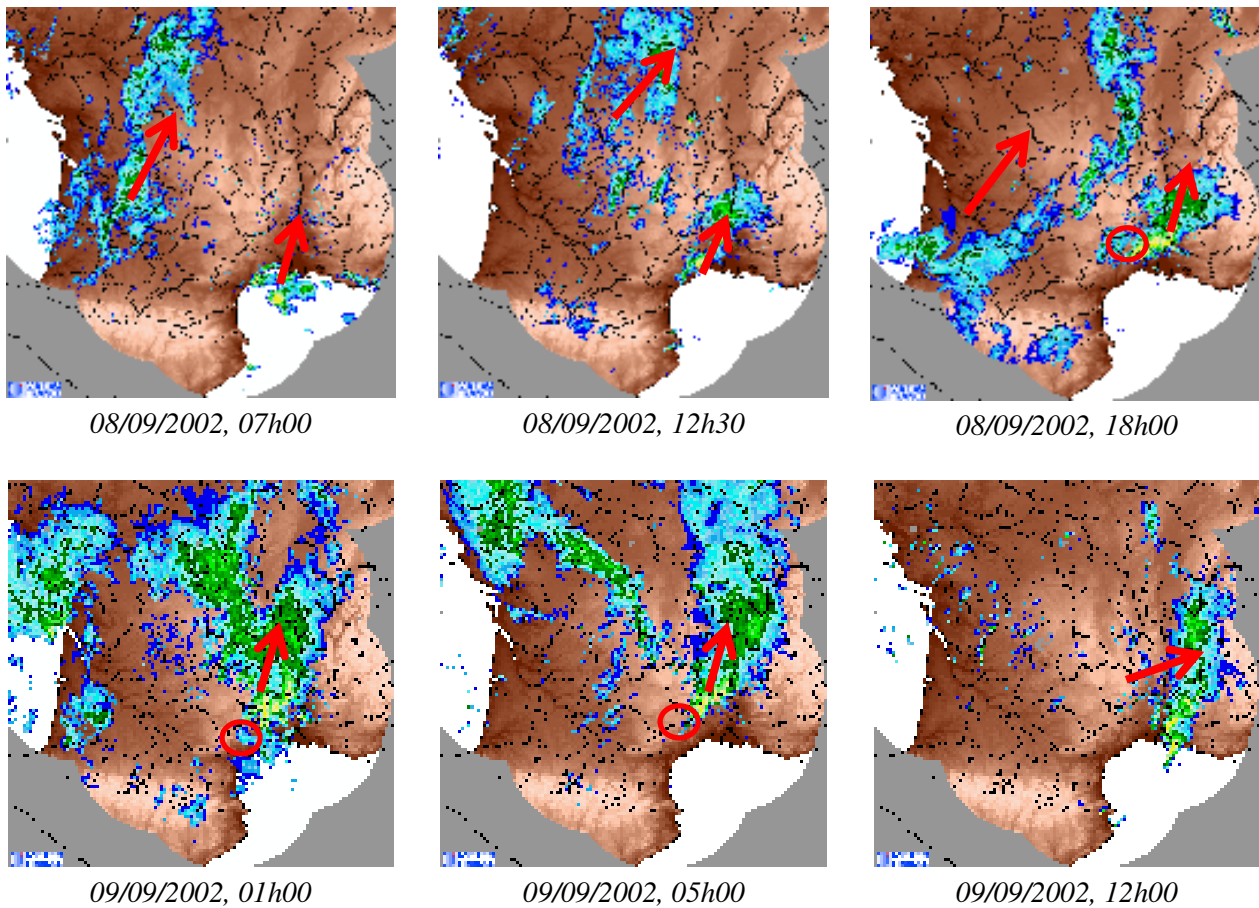


Figure 8 : Données radar du sud-est de la France.

## 2. Développement vertical de la convection

Les données satellites permettent de renseigner la répartition entre la partie convective et la partie stratiforme des nuages. Ils peuvent aussi fournir des informations sur le développement vertical de la convection.

Les données infrarouges (*Figure 9*) localisent davantage que précédemment la cellule convective en V. On note notamment que l'on retrouve des températures froides (inférieures ou égales à  $-50$  °C, couleur rosée) à la pointe du V qui indiquent la présence de nuages élevés dans l'atmosphère. Ces jeunes cellules sont nourries par l'apport d'air chaud provenant de la Méditerranée et qui alimentent la convectivité. Au contraire, plus on s'éloigne vers le nord de la pointe du V, moins les températures sont froides : les nuages sont de plus en plus bas. Il s'agit de cellules plus « vieilles », plus chaudes et moins intenses en pluie. On passe ainsi d'une activité convective (couleur noire à rose foncée) à une activité convective moins forte (rose pâle), voire à la partie stratiforme des nuages (vert).

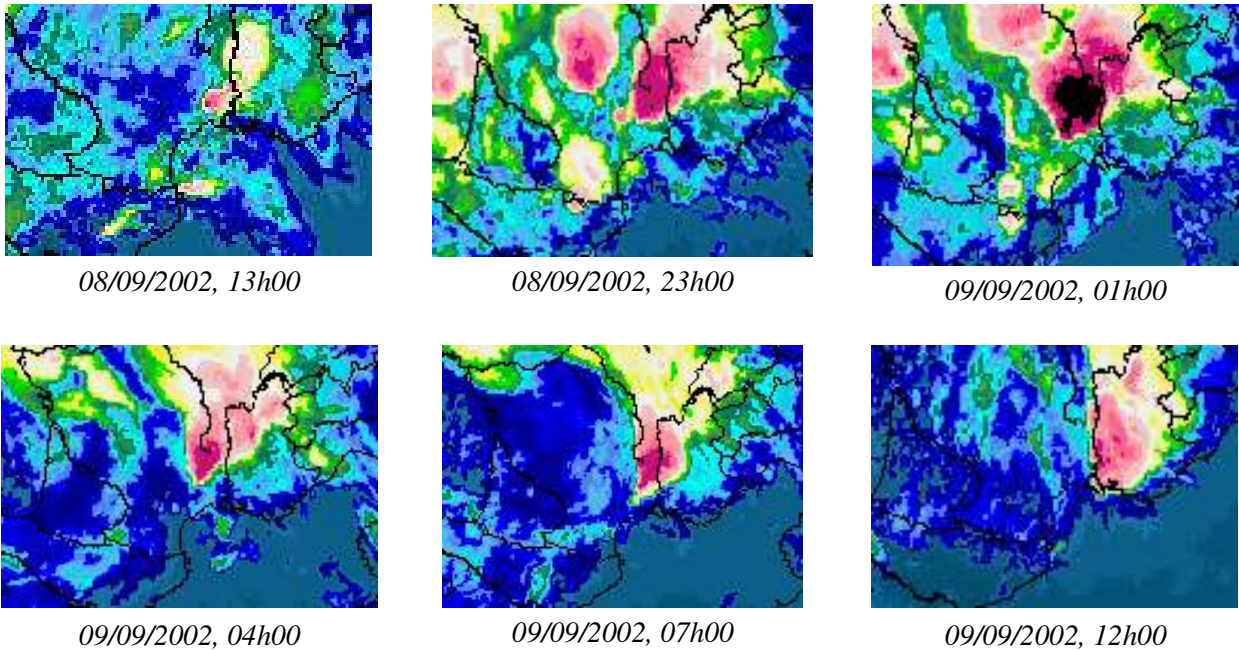


Figure 9 : Images satellites – données infrarouges dans le sud de la France.

Les images satellites permettent également d’observer directement les nuages (Figure 10).

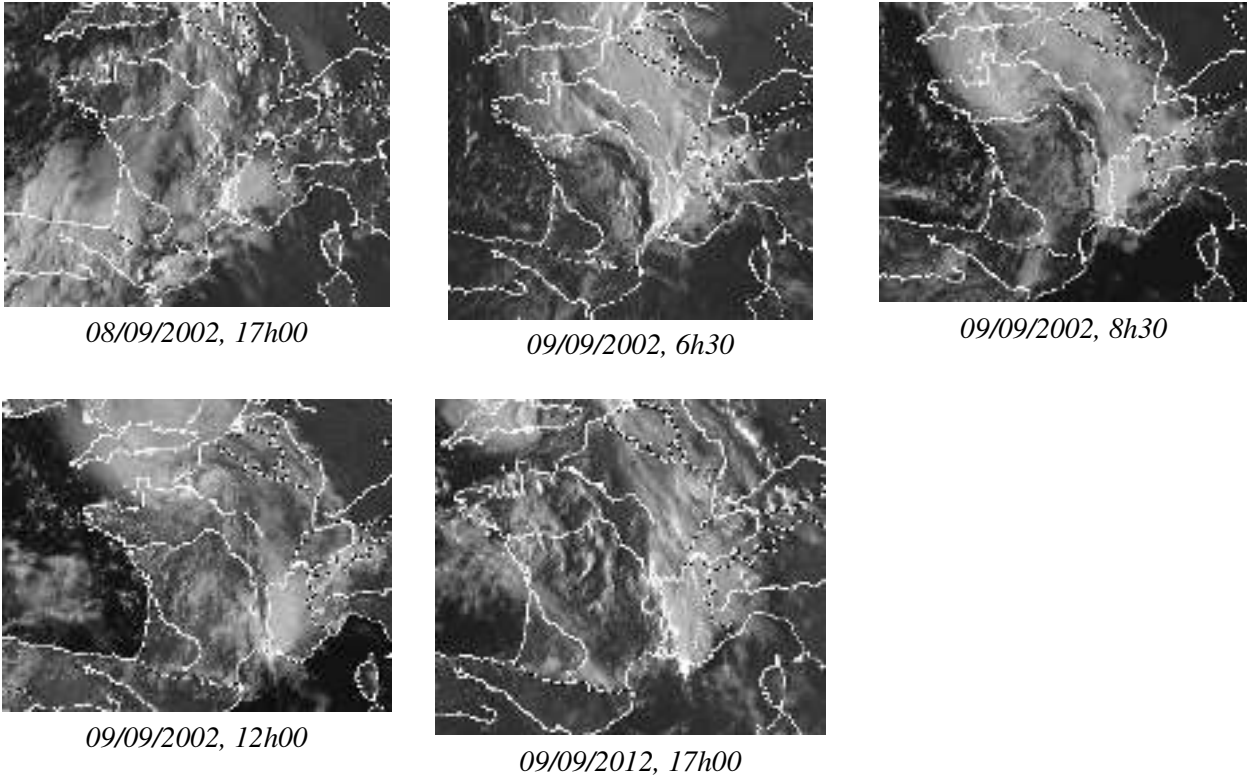


Figure 10 : Visible datas.



Pendant plus de 12h, les précipitations et les orages associés se forment sur place par régénération arrière dans le Gard au niveau de la cellule en V.

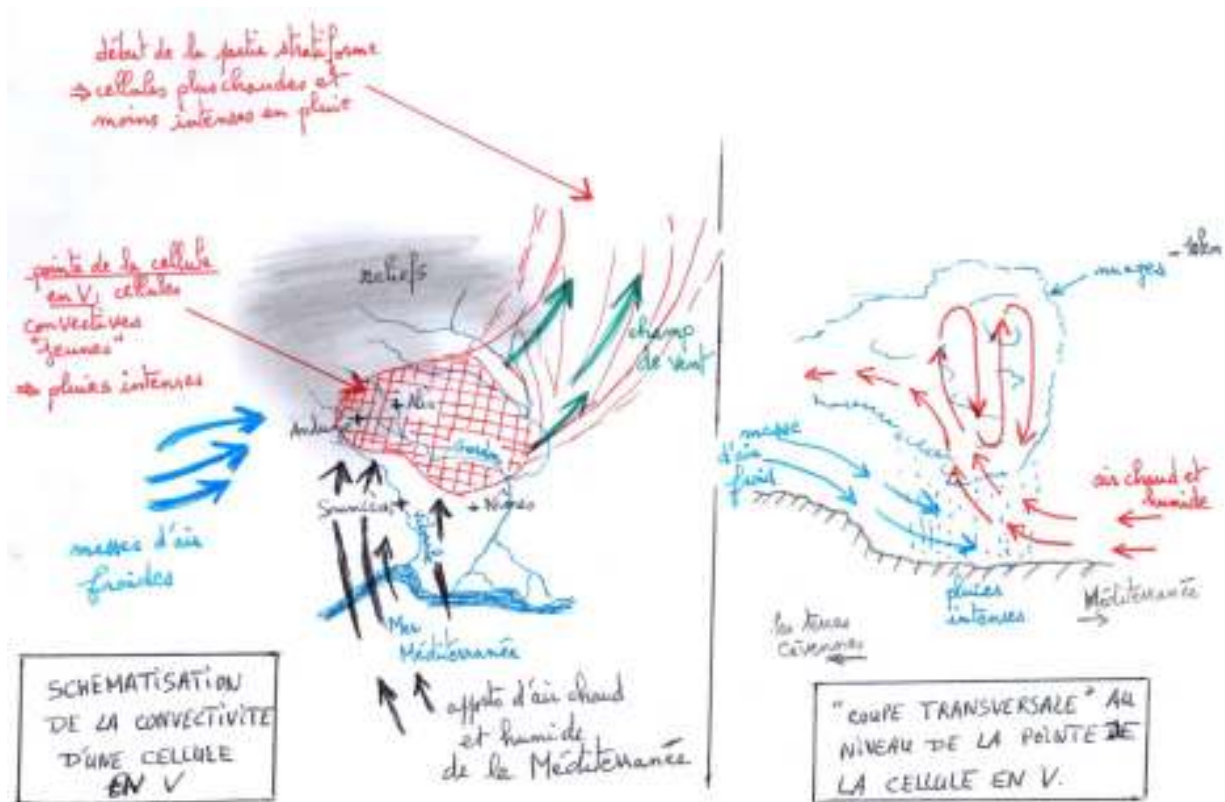


Figure 11 : Schématisation de l' « alimentation » d'une cellule en V.

## L'ENVIRONNEMENT MÉTÉOROLOGIQUE

La formation des cellules convectives débutent dès le 8 septembre, à la fin de matinée. Il apparaît donc pertinent de regarder les vents géostrophiques de surface et au géopotentiel 500 mb pour connaître l'environnement dans lequel s'est formée la cellule convective qui est restée quasi-stationnaire au niveau du Gard.

Le vent géostrophique peut être calculé par la formule suivante :

$$v = \frac{1}{\rho_f} \text{grad}(P) \text{ avec } \rho_f = 10^{-4} \text{s}^{-1}$$

L'analyse synoptique (Figure 12) permet d'évaluer pour le 8 septembre 2002 12h00 un vent géostrophique de surface de  $v_{f,\text{surf}} = 6,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  SE et un vent géostrophique en altitude de  $v_{f,500\text{mb}} = 150 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  SW (circulation dynamique). Ce cisaillement vertical des vents (différence entre le sol et l'altitude) est dû à l'effet dépression-anticyclone au sol (le vent va toujours de l'anticyclone vers la dépression) et haute pression-basse pression en altitude.

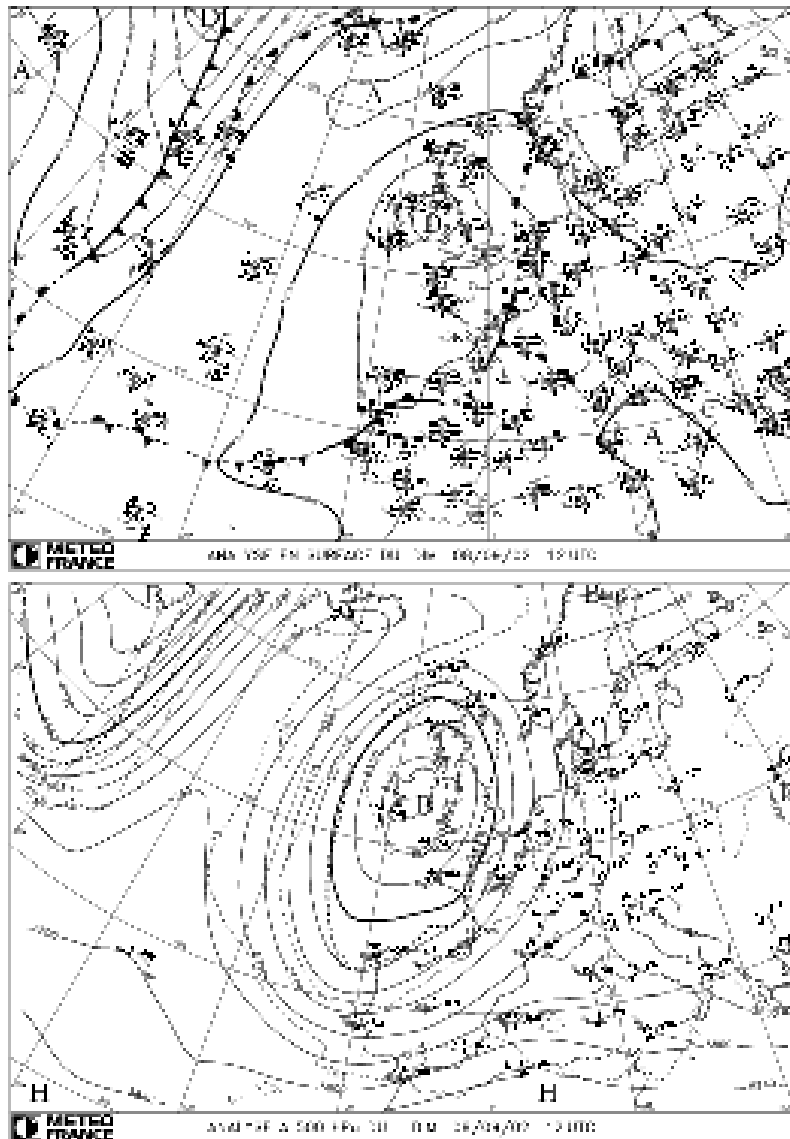


Figure 12 : Analyse synoptique de la situation météorologique du 8 septembre 2002, 12 UTC.

Le radiosondage de Nîmes permet alors de regarder l'instabilité verticale à cette même date (Figure 13). L'analyse de ce dernier permet notamment de constater :

- une instabilité verticale (CAPE) élevée avec une « épaisseur » de nuages atteignant 10 kilomètres ;
- un cisaillement vertical de vent (le vent tourne du sud-est au sud-ouest en augmentant en altitude) ;
- un air chaud et humide en basses couches (15-16 °C à 900 hPa) et un air froid en altitude (près de -60 °C à 200 hPa).

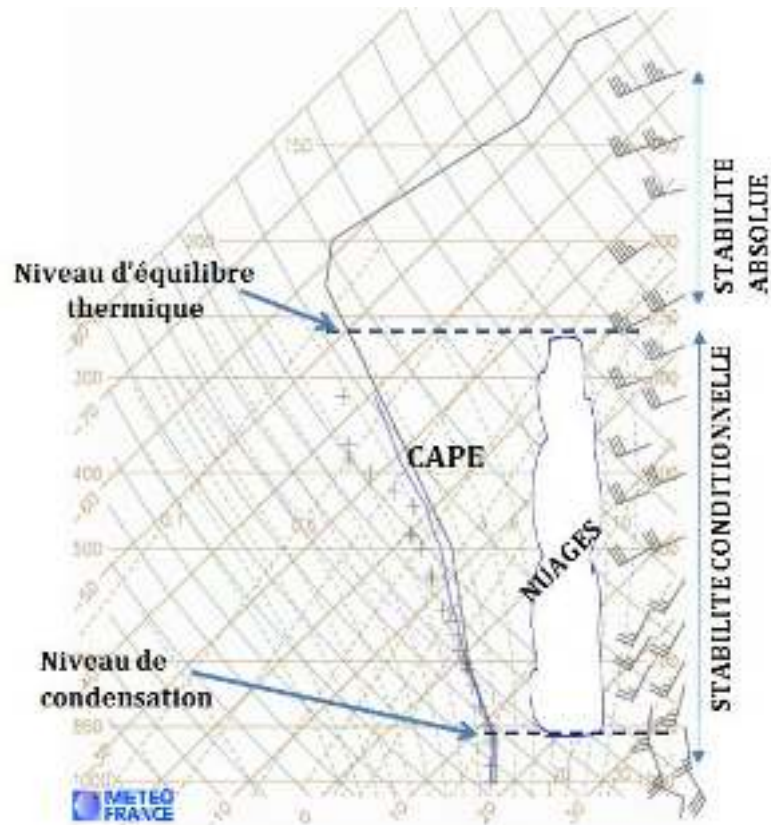


Figure 13 : Radiosondage de Nîmes, le 8 septembre 2002 12UTC.

Ainsi, à l'avant du front (*Figure 12*), des remontées d'air chaud de basses couches de Méditerranée portées par des vents de sud-est rentrent « en conflit » avec des vents froids (*Figure 14*). Soulevée par l'air plus froid, la masse d'air chaud et humide se rafraîchit, se condense et engendre la formation d'orages violents, stationnaires (cellules en V) sur le Sud-Est de la France du 8 au 9 septembre 2002. Ce système convectif s'évacuera le 9 septembre en fin de matinée vers l'est.

D'après la *Figure 14*, il y a un refroidissement des masses d'air chaud et humide au niveau des reliefs des Cévennes. La masse d'air chaud perd en « horizontalité » pour gagner l'altitude et ainsi alimenter les nuages en hauteurs.

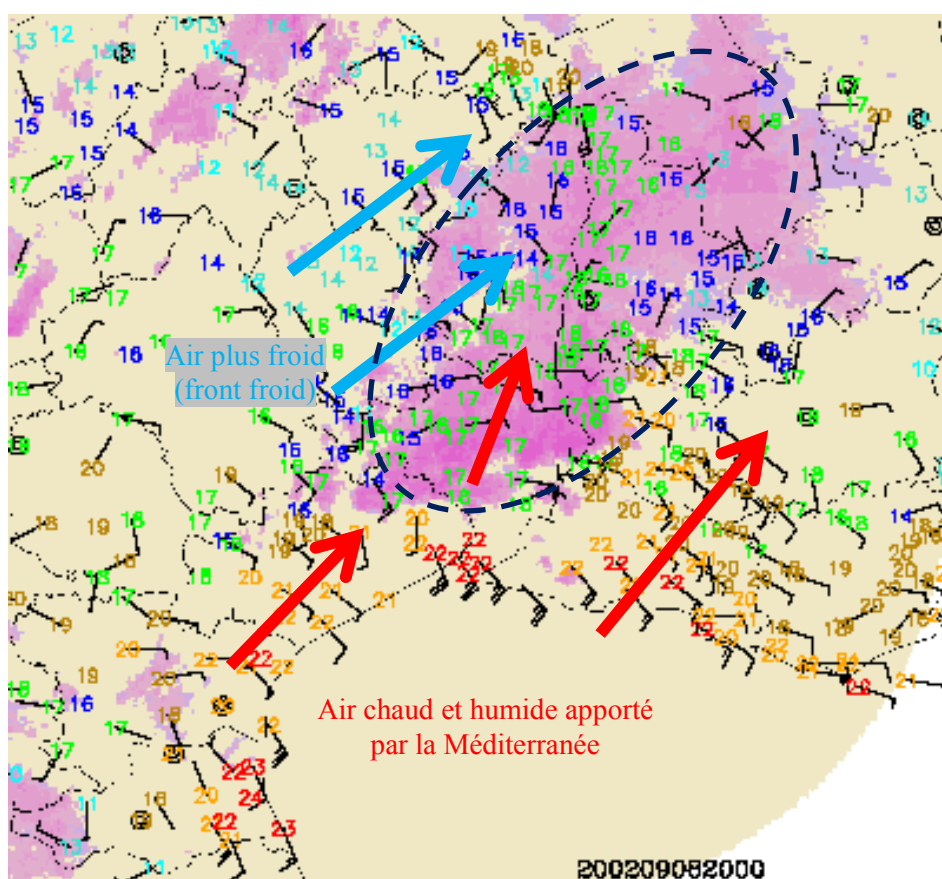


Figure 14 : 2m temperature and 10 m wind vectors (radar reflectivity in pink).

## LA RÉPONSE HYDROLOGIQUE

Lorsque l'on s'intéresse à la réaction hydrologique d'un bassin versant, il est important de comprendre à partir de données hydrologiques et d'événements pluvieux le fonctionnement hydrologique du bassin. L'étude d'un nombre important d'événements pluvieux montre effectivement qu'il existe une relation entre le débit de base d'un cours d'eau avant l'évènement pluvieux et le coefficient de ruissellement associé à cet évènement pluvieux. Le coefficient d'écoulement s'exprime comme le rapport entre le volume d'eau écoulé à l'exutoire et le volume d'eau précipité pendant l'évènement. La particularité de l'évènement hydrologique des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard tient d'une part à son fort coefficient d'écoulement global de l'ordre de 80 %.

De plus, la faible capacité d'absorption des sols saturés dès le début de l'évènement est également à l'origine d'abondants ruissellements et des crues (caractérisées par des débits spécifiques de pointe dépassant  $20 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{km}^2$  pour de petits cours d'eau habituellement à sec). En effet, les écoulements de surface (ou ruissellement) contribuent alors à l'alimentation du réseau hydrographique. Ces écoulements directs font que le volume d'eau à l'exutoire est plus important (d'où un coefficient d'écoulement plus élevé).

La réponse hydrologique du bassin versant dépend fortement de l'état hydrique initial du bassin (dont le débit de base peut être un bon indicateur), lui-même relié aux séquences de divers types de périodes pluvieuses et sèches qui ont précédé l'évènement pluie-débit étudié. Ainsi, une pluie tombant sur un sol sec

servira d'abord à combler le déficit d'humidité du sol. Cette même pluie sera entièrement disponible pour le ruissellement si le sol est déjà saturé au début de l'événement.

Comme ce fut le cas pour les 8 et 9 septembre 2002, les sols se sont rapidement saturés en eau, cela s'est traduit par un fort ruissellement sur les bassins, notamment le bassin versant des Gardons : les différentes lames d'eau calculées précédemment (au niveau d'Anduze, de Remoulins et de Sommières) ont contribué aux écoulements de surface (peu d'infiltration), ce qui a engendré les crues de septembre 2002.



Figure 15 : Le Pont St Nicolas, pendant et après la crue.

Enfin, les hydrogrammes (qui correspondent à la réponse hydrologique d'un bassin et permettent de connaître la fonction de transfert associée à ce bassin) se caractérisent par deux paramètres : le temps de montée au pic  $T$  et le débit de pointe  $Q$ . Ces deux paramètres peuvent également être influencés par différentes caractéristiques des bassins versants que sont la surface, la pente, la forme du bassin ou encore sa densité de drainage (c'est-à-dire le rapport de la longueur du réseau hydrographique sur la surface du bassin versant). En somme, on peut schématiser ces influences par le tableau ci-dessous (Figure 16) :

Caractéristiques du bassin versant		T	Q
Surface	augmente	↑	↑
	diminue	↓	↓
Pente	augmente	↓	↑
	diminue	↑	↓
Forme	allongée	↑	↓
	compacte	↓	↑
Densité de drainage	faible	↑	↓
	élevée	↓	↑

Figure 16 : Influence de quelques paramètres sur la réponse hydrologique d'un bassin.

L'imperméabilisation des sols jouent également un rôle important dans la réponse hydrologique d'un bassin puisqu'elle contribue à diminuer le temps de concentration (c'est-à-dire le temps nécessaire à une goutte d'eau pour atteindre l'exutoire depuis l'endroit le plus éloigné hydrauliquement parlant du bassin versant).