



Institut des Sciences de la Terre, de l'Eau et de l'Espace de Montpellier
HYDROSCIENCES - Montpellier - Unité Mixte de Recherche UMII-CNRS-IRD n° 5569

ANALYSE de l'EPISODE PLUVIEUX
du 08 et 09 septembre 2002

réalisée par

HYDROSCIENCES MONTPELLIER
L.NEPPEL

et



**DIRECTION DE LA PREVENTION DES
POLLUTIONS ET DES RISQUES**
Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs
Bureau des Risques Naturels

- juin 2003 -

Résumé.

Le 08 et 09 septembre 2002 un événement pluvieux particulièrement violent a affecté les départements de l'Hérault, du Gard et du Vaucluse. La durée totale de la pluie est inférieure à 24h. Les précipitations sont caractérisées par :

- une superficie couverte par les pluies les plus fortes très étendue, 75% de la superficie du Gard est touché par plus de 200 mm durant l'événement et plus de 400 mm sur environ 1800 km² ;
- des intensités remarquables supérieures, à 100 mm/h pendant une heure sur plusieurs postes ;
- des cumuls très importants en moins de 24h dépassant 600 mm sur environ 150 km² ;
- des lames d'eau excédant 300 mm sur les bassins de Vidourle à Marsillargues (822 km²), du Gard à Sanilhac (1750 km²) et de la Cèze à Laroque/Cèze (1084 km²);
- un positionnement particulier surtout sur les plaines, plutôt que les contreforts montagneux ;
- une dynamique contribuant à amplifier la crue sur les bassins gardois : le système pluvieux le plus intense est positionné initialement sur la partie centrale des bassins, puis se déplace ensuite au Nord – Ouest, vers l'amont, avant de retourner sur la zone initiale et de s'évacuer vers l'Est ;

La fréquence de l'événement est estimée à partir de la période d'observation 1958-2002, en se basant sur la superficie couverte par les événements.

A l'échelle régionale, il apparaît :

- qu'en PACA : cet événement est le plus important observé durant ces 45 ans à la fois en terme d'étendue et des cumuls pluviométriques en moins de 24h. On évalue à 140 ans la période de retour régionale des superficies touchées par au moins 200 mm de pluie.
- qu'en LR la période de retour des superficies touchées varie de 80 à 140 ans pour respectivement des cumuls d'au moins 200 et 300 mm en moins de 24h.

A l'échelle des grands bassins gardois la période de retour de la lame d'eau est évaluée dans une fourchette de 200 à 300 ans.

Les périodes de retour annoncées constituent une borne supérieure, compte tenu des incertitudes liées à l'échantillonnage et à la densité du réseau de mesure. Les quelques événements historiques répertoriés depuis 1900 tendent à le montrer.

Par ailleurs sur la période 1958-2002, l'analyse de la stationnarité du nombre annuel d'événements dépassant 200, 250 et 300 mm, ne montre aucune tendance à la hausse du nombre d'événements pluvieux ces dernières années.

Sommaire

1 INTRODUCTION.....	4
2 DONNÉES DISPONIBLES.....	5
3 ANALYSE DE LA DYNAMIQUE DE L'ÉVÉNEMENT.....	8
3.1 CHRONOLOGIE DE L'ÉVÉNEMENT SUR L'ARC MÉDITERRANÉEN.....	8
3.2 CONCLUSIONS.....	9
4 FRÉQUENCE DES CUMULS PONCTUELS	10
5 FRÉQUENCE À PARTIR DE L'EXTENSION SPATIALE DE L'ÉVÉNEMENT	13
5.1 CARTOGRAPHIE DE L'ÉVÉNEMENT	13
5.2 COMPARAISON AVEC D'AUTRES ÉVÉNEMENTS REMARQUABLES.....	14
5.3 FRÉQUENCE RÉGIONALE DES ISOHYÈTES.....	16
5.3.1 <i>Distribution régionales des aires des isohyètes.....</i>	<i>16</i>
5.3.2 <i>Application à l'événement</i>	<i>18</i>
6 ANALYSES DES LAMES PAR BASSINS.....	21
7 CONCLUSIONS :	25

1. Introduction

Ce rapport présente l'analyse de l'épisode pluvieux du 08 et 09 septembre 2002 ayant affecté plus particulièrement le département du Gard. Il se présente en deux parties.

La première partie constituée des paragraphes 2 et 3, consiste à caractériser l'événement pluvieux. On y décrit les cumuls et intensités mesurés à partir des mesures pluviométriques au sol, ainsi que la superficie couverte par les cumuls de pluie sur toute la durée de l'événement. Une comparaison avec d'autres événements pluvieux majeurs est effectuée. Le radar météo de Nîmes est utilisé pour décrire la déroulement de l'événement durant ces deux jours.

La deuxième partie constituée des paragraphes 4 à 6, aborde l'analyse fréquentielle des pluies observées sur la région Languedoc-Roussillon (LR) et Provence Alpes Cote d'Azur (PACA) en se basant sur les observations ponctuelles et sur les surfaces touchées par les précipitations dans chaque région. Une estimation des lames d'eau et de leur fréquence sur quelques bassins versants les plus affectés par l'événement est également présentée.

2. Données disponibles

- pluie à pas de temps fins :

On dispose de 4 postes gérés par le CG34 à Conqueyrac, Prades le Lez, St Christol et Claret ainsi que de 21 hyétogrammes du SAC30 (annexe 1).

Durée de l'événement :

Les hyétogrammes observés montrent une durée de l'épisode inférieure à 24 h. La quasi totalité des cumuls s'observe en moins de 14 heures, par exemple à Conqueyrac 90 % du cumul total de l'événement a été mesuré de 20h le 08 septembre à 09h le 09 septembre (fig 1).

Ainsi on peut admettre que **la durée de l'événement est inférieure à 24h**, à cheval sur les deux jours du 08 et 09 septembre 2002.

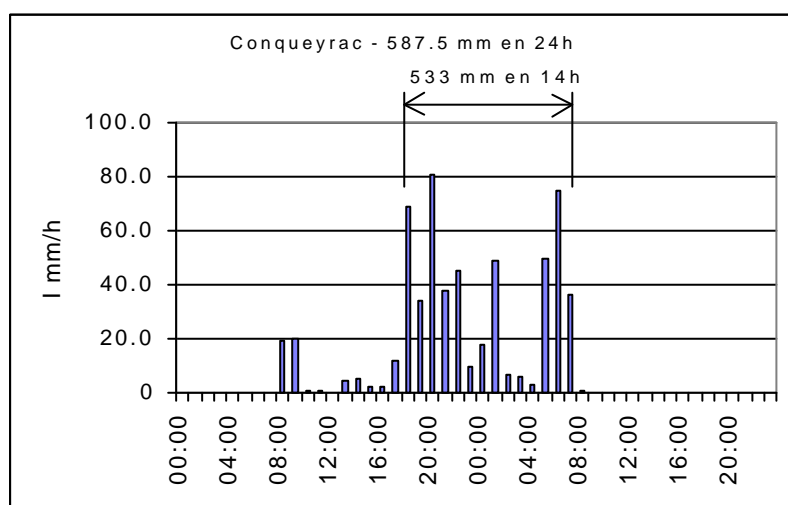


fig 1 : hyétogrammes à Conqueyrac le 08 et 09 septembre 2002.

Intensités observées :

Le réseau du SAC30 enregistre des intensités horaires supérieures à 100 mm/h pendant 1 heure sur 7 postes : à Saumane, St Roman de Codière, Anduze, Alès (96.5 mm/h), Ceyrac, La Rouvière et Quissac. L'intensité maximum correspondant à nos données est enregistrée à Anduze, avec 136 mm/h.

- pluie journalière :

On dispose de 374 mesures de pluie journalière, réparties sur la zone géographique constituée des départements du Gard, de l'Hérault, de la Lozère, de l'Ardèche, de la Drôme, du Vaucluse et des Bouches du Rhône (fig 2), soit une densité de postes de 9.8 postes/1000 km² sur l'ensemble de cette zone. Pour les départements du Gard et de l'Hérault la densité de postes est proche de cette moyenne soit 9.5 postes/ 1000 km² , par contre dans le Vaucluse la densité est plus importante soit 18 postes/ 1000 km².

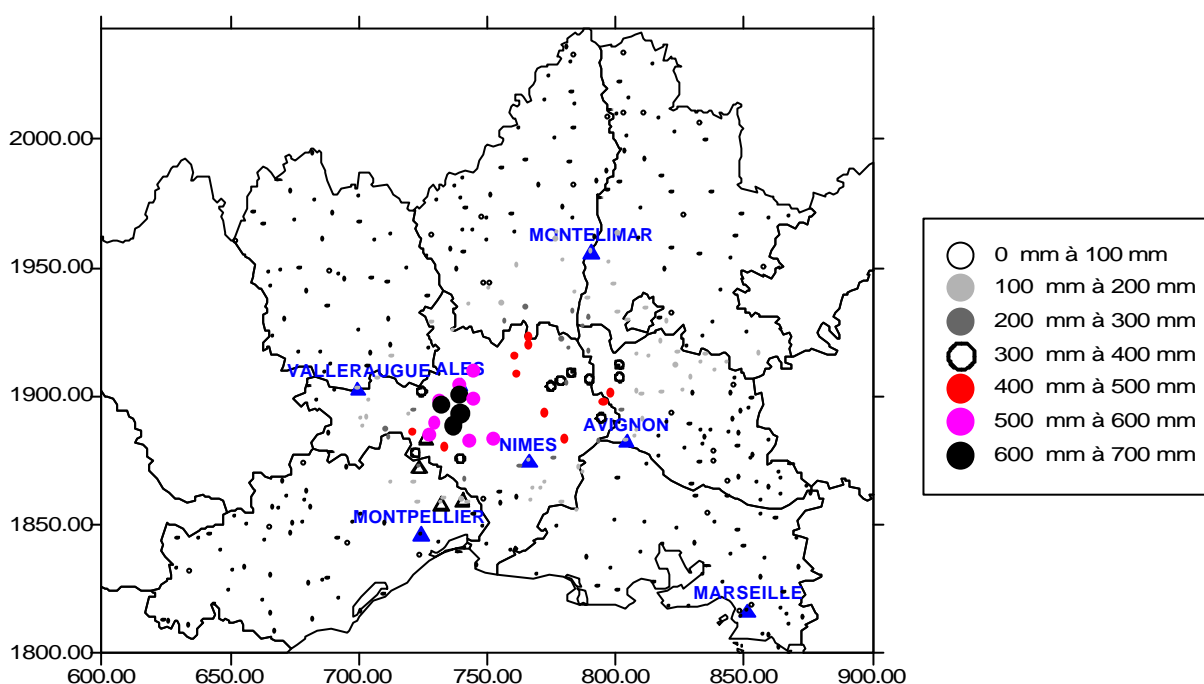


fig 2 : localisation des postes pluviométriques utilisés et classes des précipitations observées le 08 et 09 septembre 2002, cumuls sur les deux jours. NB : dans la base PLUVIO un cumul pluviométrique associé au jour j correspond à la pluie tombée entre 8h légale le jour j-1 et 8 h légale le jour j.

On rappelle que compte tenu des observations faites à partir des hyétogrammes disponibles, **on peut admettre que la durée réelle de l'événement est inférieure à 24h** ; ainsi , dans la suite de ce rapport **lorsqu'il n'est pas fait mention de la durée des pluies, on considère implicitement qu'il s'agit d'un cumul de pluie en 24 h maximum.**

La zone géographique la plus touchée par l'événement est le département du Gard, le nord-est du département de l'Hérault et l'ouest du Vaucluse. Le cumul de pluie durant l'événement dépasse 400 mm, pour 20 postes du Gard, un poste en Ardèche et un dans le Vaucluse. Quatre valeurs

remarquables de plus de 600 mm sur la durée de l'événement sont enregistrées dans le Gard (tab 1) et au moins deux pluies journalières, le 08 septembre, dépassent 500 mm/j.

	Cumuls sur la durée de l'événement	Cumuls Le 08 septembre	Cumuls le 09 septembre	Source
Cardet	690.5	503	127.5	Météo-France
Anduze	687	--	--	DDE 30
St Christol les Alès	635	543	92	Météo-France
Canaulès et argentières	600	480	120	Météo-France

tab 1 : relevés pluviométriques (mm) dépassant 600 mm sur la durée de l'événement.

Sur le Gard 55% des postes pluviométriques enregistrent plus de 200 mm pendant l'événement et 27% des postes enregistrent plus de 400 mm (fig 3). La moyenne spatiale des cumuls observés le 08 et le 09 s'élève respectivement à 212 mm et 67 mm. Cumulée pendant les deux jours elle est de 279 mm. Dans le Vaucluse 12% des postes sont touchés par plus de 200 mm et la moyenne spatiale des cumuls mesurés les 08 et 09 septembre est de 91 mm dont 35 mm pour la journée du 08 et 55 mm pour la journée du 09.

Ces observations montrent:

- i) un événement très étendu pour les cumuls supérieurs à 200 mm et 400 mm dans le département du Gard
- ii) des intensités ponctuelles exceptionnelles en 24 h et pour des durées inférieures notamment une heure.
- iii) un déplacement de l'événement d'ouest en est entre le 08 et le 09 septembre : le Gard est en priorité touché le 08 et le Vaucluse le 09.

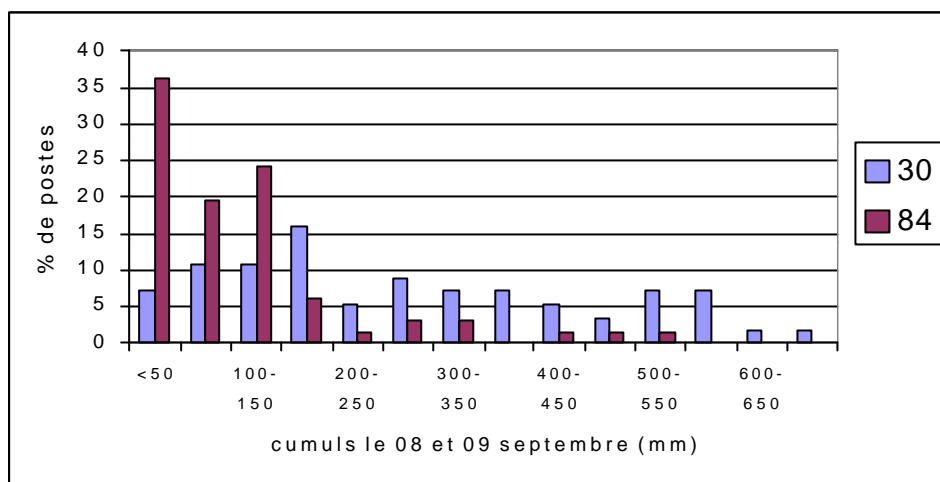


fig 3 : distribution des pluies ponctuelles mesurées le 08 et 09 septembre dans le Gard et le Vaucluse.

3. Analyse de la dynamique de l'événement

On dispose des images radar de Nîmes pour la période 08 septembre 8h au 10 septembre 8h. L'animation radar est constituée d'une image en réflectivité toutes les cinq minutes. Dans la suite de ce paragraphe les heures mentionnées sont des heures légales.

3.1 Chronologie de l'événement sur l'arc méditerranéen.

Le 08 septembre 2002 : (Cf annexe 2 le 08/09 12h à 24h)

- vers 10h00 : début des premières pluies sur le littoral dans les départements 34 et 30 ;
- vers 11h00 : début des premières pluies sur les plaines gardoises ;
- entre 12h et 13h : tout le département 30 est affecté par les pluies ;
- entre 14h-21h : le système intense se met progressivement en place sous forme d'une bande de pluie intense orientée SW-NE, touchant le NE de l'Hérault, la partie centrale du Gard jusqu'à l'W du Vaucluse;
- de 21h jusque vers 24h : le système reste stationnaire sur cette zone où la réflectivité est très forte ; des passages à forte réflectivité touchent aussi le NE de l'Hérault et le N des BV du Gard ;

Le 09 septembre 2002 : (Cf annexe 2 le 09/09 1h30, à 15h)

- à partir du 09 septembre entre 0h et jusque vers 4h00 : on assiste progressivement à une intensification des pluies sur l'amont des BV gardois, la bande pluvieuse toujours orientée SW-NE se déplace progressivement vers le NW en conservant son orientation; les pluies sont moins étendues sur

la partie centrale et aval des BV gardois , elles y sont plus localisées ; on identifie également la forme en V des zones de forte réflectivité, signature des systèmes orageux fortement organisés comme à Nîmes en octobre 1988 par exemple(Cf annexe 2 09/09 à 1h30 et 5h).

- entre 4h et 7h : la bande de précipitation intense se positionne sur l'amont des BV gardois, le S de la Lozère, de l'Ardèche et le SW de la Drôme sont affectés ;

- à partir de 7h : la bande intense se déplace à nouveau vers le SE ; le S de la Lozère de l'Ardèche et le SW de la Drôme et l'W du Vaucluse sont affectés ;

- de 7h à 11h : la zone de pluie intense a regagné sa position initiale dans le Gard. C'est la partie centrale du département qui est à nouveau touchée ; à partir de 9h la bande pluvieuse s'élargit vers le SE ; seule la partie du département à l'W de St Hyppolite du Fort et le littoral au Sud de Nîmes ne sont pas touchés par les fortes précipitations ;

- à partir de 11h : la zone intense se déplace à nouveau vers l'E ; elle balaye le Sud du Gard, l'W du Vaucluse, de la Drôme et des Bouches du Rhône ; vers 15h l'intensité de la zone pluvieuse semble diminuer, celle-ci continue son déplacement vers l'E ;

- un noyau localisé à forte réflectivité subsiste sur l'extrême E du département du Gard et sur l'W du Vaucluse jusque vers 17h et sur le SW de la Drôme jusque vers 19h ;

- à partir de 20h, il ne reste plus que quelques zones pluvieuses résiduelles sur le NE de la région PACA ;

3.2 Conclusions.

Sur la partie centrale et aval des BV gardois l'événement est constitué de deux parties intenses, la première dure autour de 7h, la seconde environ 6h, séparée par 2 à 3h d'intensités plus faibles. On retrouve ce résultat sur les pluviographes de Vic le Fesq, Quissac et La Rouvière par exemple. L'événement sur la partie amont des bassins n'est constitué que d'une averse. Les pluviographes de Saumane, Ste Cécile, St Roman de Codière, Barre des Cévennes par exemple le montrent également. On note cependant que dans la partie centrale des bassins l'intermittence est peu marquée entre les deux parties intenses, une vingtaine de minutes, une heure au maximum. Cette zone a été très touchée quelle que soit la position de la bande à forte réflectivité. Les postes d'Alès, Anduze, Mialet, Saumane, et St Hyppolite du Fort le montrent également (annexe 2). On y observe d'ailleurs de forts cumuls dépassant 400 mm sur une très large superficie, ainsi que les cumuls plus localisés de plus de 600 mm sur la durée de l'événement.

Les départements de la région PACA sont affectés plus tard par les fortes pluies, dans la nuit du 08 au 09 septembre et dans la matinée du 09 septembre.

Quelle que soit la zone géographique la durée totale des pluies est inférieure à 24h, l'événement pluvieux dure de l'ordre de 14 à 18h maximum suivant les lieux.

Compte tenu de la localisation des zones à fortes intensités sur la partie centrale des bassins, il ne semble pas que les records pluviométriques observés soient liés au relief. De plus on reconnaît sur les images radar la forme en V typique des systèmes convectifs de méso-échelle (Rivrain, 1997, Ramos, 2002). Cet événement ne semble donc pas appartenir à la famille des situations cévenoles, contrairement à l'événement du 29 septembre 1958 qui lui en est un exemple typique.

4. Fréquence des cumuls ponctuels

On répertorie pour chaque département et sur chaque région le nombre de cumuls ponctuels observés dépassant un seuil de pluviométrie en 24h.

La région PACA apparaît comme moins affectée par les pluies extrêmes (tab 3). Sur l'ensemble des événements dépassant 190 mm/j observés autour de l'arc méditerranéen (soit 146), 80% affectent la région LR. En PACA la durée moyenne entre deux événements de plus de 190 mm/j est de l'ordre de 2 ans alors qu'en LR on en observe en moyenne deux par an. Un seul cumul de plus de 400 mm en moins de 24h a été mesuré en PACA entre 1958 et 2002, celui de septembre dernier. Par contre en LR on en observe un en moyenne tous les 6 ans. Ces observations correspondent bien à une réalité climatique et ne sont pas le fait d'une densité de réseau variable d'une région à l'autre. En effet en moyenne pendant la période 1958-1993, la densité de poste en LR (10.6 postes / 1000 km²) est comparable à celle de PACA (9.5 postes / 1000 km²).

On notera également qu'aucune tendance à l'augmentation des fréquences de ces événements n'apparaît sur la période 1958-2000 (fig 4). L'annexe 3 présente avec plus de détail l'étude de la stationnarité des fréquences sur cette période pour la région LR, les résultats suggérés par la fig 4 sont confirmés.

Région LR

Pour des seuils de 200 mm à moins de 300 mm ce sont les départements du Gard et de l'Hérault qui ont les fréquences régionales les plus importantes : un cumul ponctuel de plus de 200 mm y est observé en moyenne une fois tous les 14 mois. Au delà de 400 mm le département du Gard se démarque avec les événements du 29 septembre 1958 et du 24 février 1964 et le 02 octobre 1988. Un cumul ponctuel de plus de 400 mm/j est observé en moyenne une fois tous les 6 ans en LR. **Sur la période 1958-2002 les mesures ponctuelles du 08 septembre sont les plus fortes observées sur ces 45 ans**, avec 4 mesures ponctuelles de plus de 600 mm, tombés en moins de 24h.

Par contre si l'on s'intéresse **aux mesures antérieures à 1958** on constate que **des valeurs supérieures en moins de 24h ont déjà été enregistrées** : les **690 mm à Cardet se placent à la 3ième place en région LR**, ensuite 940 mm/24h à Valleraugue (30) le 28 septembre 1900, 840 mm/24h le 17 octobre 1940 à Saint Laurent de Cerdans (66). Si l'on étend **la zone d'observation à l'ensemble de l'arc méditerranéen** il s'agit du **5ième cumul en 24h le plus important** derrière les 794 mm/24h du 31 octobre 1993 à Bavella en Corse et les 792 mm/24h du 09 octobre 1827 à Joyeuse en Ardèche. Les **périodes de retour empiriques de cumuls ponctuels** au moins égaux à 690 mm en moins de 24h sont **d'environ 35 ans**, en LR et sur l'arc méditerranéen.

seuil (mm)	région	département				
	LR	11	34	30	48	66
200	103	14	40	41	25	22
250	47	4	16	20	11	9
300	23	3	7	12	4	5
350	9	1	2	5	3	2
400	7	1	0	4	2	1
450	3	1	0	2	0	0
500	3	1	0	2	0	0
550	2	1	0	1	0	0
600	1	0	0	1	0	0
650	1	0	0	1	0	0

seuil (mm)	région	département					
	PACA	4	5	6	13	83	84
200	23	2	0	10	5	6	5
250	4	0	0	0	1	0	3
300	2	0	0	0	0	0	2
350	1	0	0	0	0	0	1
400	1	0	0	0	0	0	1
450	0	0	0	0	0	0	0
500	0	0	0	0	0	0	0

tab 2 : nombre d'événements journaliers indépendants dépassant un seuil de pluie journalière entre 1958 et 2002 en région LR et PACA.

LR	116
PACA+LR	5
PACA	25
	146

tab 3 : répartition des événements de plus de 190 mm/j sur les deux régions.

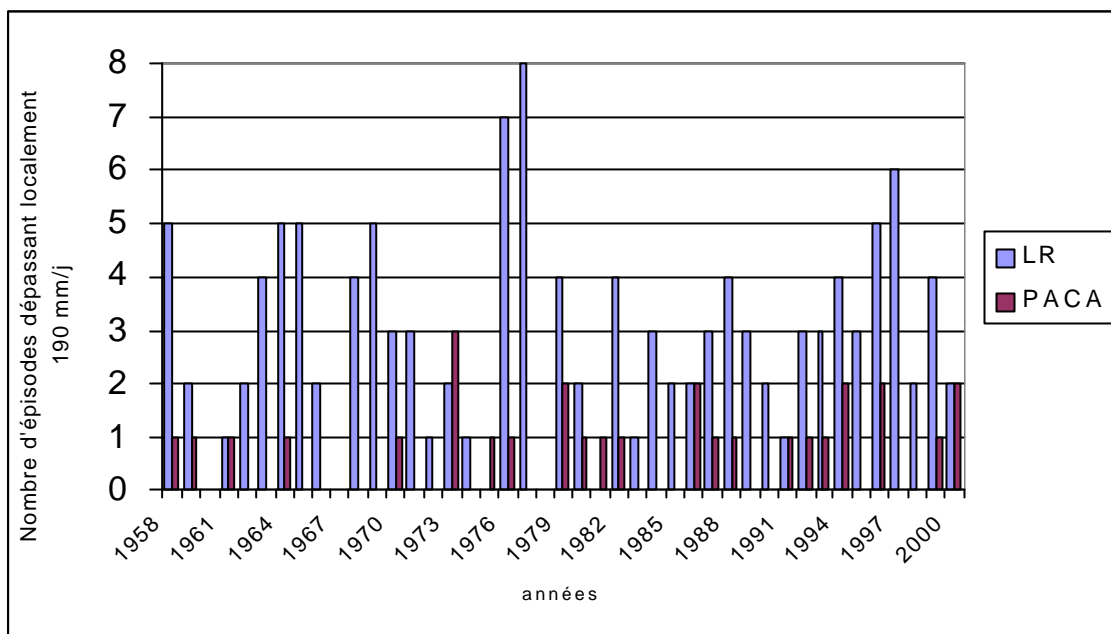


fig 4 : répartition annuelle du nombre d'événements par région.

Région PACA

Les départements des Alpes de Hautes Provinces et des Hautes Alpes semblent les moins touchés par ces situations : sur les 30 événements de plus 190 mm/j échantillonnés en PACA entre 1958 et 2002, seul 13% d'entre eux affectent ces départements avec des cumuls de plus de 190 mm/j. Le département des Alpes Maritimes est le plus touché, par plus de 50% de ces situations, puis viennent au même niveau le Var, les Bouches du Rhône et le Vaucluse. **Sur la région PACA l'événement du 08 et 09 septembre 2002 est le plus important par rapport aux cumuls pluviométriques ponctuels observés entre 1958 et 2002.**

Il est important de préciser que la densité du réseau de pluviomètre influence les estimations de fréquence d'un événement. En effet, il a été montré sur la région LR que le réseau de pluviomètres n'était pas en mesure d'intercepter tous les événements pluvieux qui s'y produisent, en particulier les plus localisés (Neppel et al., 1998). Ainsi les estimations des périodes de retour que l'on propose sont probablement surestimées, qu'il s'agisse de la région LR ou PACA.

5. Fréquence à partir de l'extension spatiale de l'événement

5.1 Cartographie de l'événement

Les 374 postes pluviométriques sont utilisés pour cartographier les champs de pluie journalier du 08/09 et du 09/09 ainsi que du cumul des 2 jours. La méthode du krigeage est employée en utilisant un variogramme événementiel. Les hauteurs de pluies sont interpolées aux nœuds d'une maille d'1 km² (fig 5). On déduit du champs de pluie la superficie couverte par différentes isohyètes. Les superficies sont calculées pour les cumuls pluviométriques du 08 et du 09 septembre. Le tab 4 présente quelques valeurs. On rappelle que la durée total de l'événement est inférieure à 24 h.

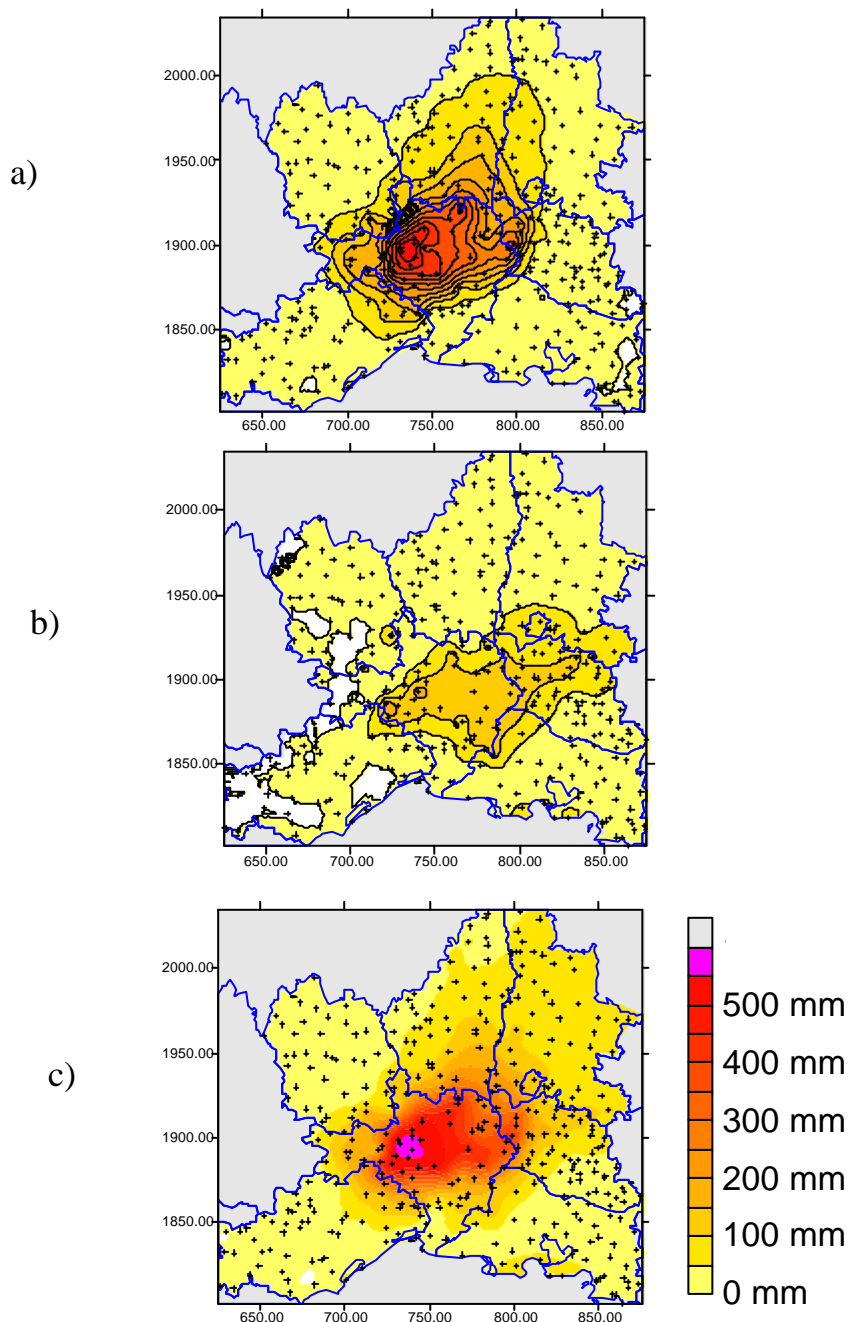


fig 5 : cartographie du champs de pluie a) : le 08/09/02 b) le 09/09/02 et c) le 08 et 09/09/02.

Région	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm	500 mm	600 mm
LR	6040 km ²	4040 km ²	3120 km ²	1800 km ²	720 km ²	150 km ²
PACA	1734 km ²	618 km ²	207 km ²	10 km ²	--	--

tab 4 : superficie (km²) de quelques isohyètes observées le 08 et 09 septembre 2002.

Les zones géographiques touchées par les forts cumuls sont très étendues, surtout en région LR. Par exemple l'isohyète 400 mm s'étend sur près de 1800 km² en formant un seul domaine fermé entièrement contenu dans le Gard, alors que dans le Vaucluse on observe un noyau plus localisé autour de Châteauneuf du Pape. Il ne s'étend que sur quelques km². **Un tiers de la superficie du département du Gard a été touchée par plus de 400 mm, et sur près de 70 % de sa superficie les cumuls ont dépassé 200 mm.**

5.2 Comparaison avec d'autres événements remarquables

Sur la région LR quatre évènements ayant générés de dégâts du même ordre ont été retenus :

- l'Aude le 12 et 13 novembre 1999
- le Gard les 29 et 30 septembre 1958 et les 03 et 04 octobre 1958
- les PO l'aiguat d'octobre 1940, en particulier la journée du 17 octobre.

Pour ces quatre événements les superficies de différentes isohyètes sur la région ont été estimées (tab 5).

La comparaison avec l'événement de l'Aude les 12 et 13 novembre 1999 montre que l'isohyète 200 mm /24h est du même ordre de grandeur. Par contre les isohyètes 300 mm et 400 mm touchent une superficie respectivement 2 fois et 9 fois plus étendue. De même, en comparaison avec les pluies de septembre et octobre 1958, l'extension spatiale des cumuls supérieurs à 200 mm le 08 septembre 2002 est sans commune mesure.

Concernant septembre 1958 il faut rappeler les résultats de Jacquet (1959) : la violence des crues du Vidourle a été attribuée à la succession de deux événements pluvieux avec à peine une semaine d'intervalle. Les pluies les plus importantes se sont produites les 29 et 30 septembre 1958 avec plus de 400 mm, cet événement a affecté surtout les bassins de l'Hérault et des Gardons avec 3000 m³/s estimé à Anduze et 5000 m³/s à Ners alors que la crue du Vidourle est plus modeste avec 640 m³/s à Sommières. Les 03 et 04 octobre 1958 un second épisode déverse à nouveau plus de 200 mm sur le BV du Vidourle, et compte tenu de la saturation des sols on observe une forte crue du Vidourle. A

Sommières le débit est estimé à 1800 m³/s. L'ampleur de cette crue s'explique plus par la succession de deux événements pluvieux assez courants mais affectant la même zone géographique à une semaine d'intervalle, que par les cumuls des précipitations et la superficie couverte.

Le 17 octobre 1940 dans les PO, on retrouve des superficies couvertes par 300 mm et 400 mm, du même ordre de grandeur que celle observées en 2002 dans le Gard. Concernant cet événement on rappelle cependant que les aires ont été estimées à partir de la cartographie proposée par Pardé (Cf Soutadé, 1993 ou Jacq, 1995) : on note que d'une part le nombre d'observations utilisées pour cette cartographie n'est pas mentionné et d'autre part on remarque que ces isohyètes sont probablement bien plus étendues sur les versants espagnols. Contrairement à l'événement du Gard qui est relativement bien ciblé par notre fenêtre d'observation, en octobre 1940 le coté espagnol de l'événement n'est pas décrit ce qui laisse supposer une plus grande extension spatiale des cumuls supérieurs à 200 mm que ceux estimés ici.

a. Aude en novembre 1999

	50 mm	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
12/11/99	12500 km ²	8870 km ²	4000 km ²	1523 km ²	200 km ²
13/11/99	10400 km ²	500 km ²	-	-	-

b. Pyrénées-Orientales, octobre 1940

Seuil de pluviométrie (mm en 24 h)	Estimations de l'aire de l'isohyète (km ²)
300 mm	2500 km ²
400 mm	1500 km ²

c. Gard, septembre et octobre 1958.

	100 mm	200 mm	300 mm	400 mm
29/09/1958	6700 km ²	2813 km ²	908 km ²	26 km ²
03/10/1958	3367 km ²	124 km ²	22 km ²	---

tab 5 : aires (km²) des isohyètes journalières, en région LR, pour 3 événements remarquables a) les 12 et 13 novembre 1999 en LR. (Neppel et Desbordes, 2000) - b) le 17 octobre 1940 dans les Pyrénées Orientales (dans Jacq, 1995) - c) le 29 septembre 1958.

5.3 Fréquence régionale des isohyètes

L'objectif est prendre en compte la superficie couverte par l'événement pour en estimer la fréquence régionale. Le principe de la méthode est d'abord rappelé.

5.3.1 Distribution régionale des aires des isohyètes

Cette démarche a été présentée et appliquée à l'analyse des pluies des 12 et 13 novembre 1999 dans l'Aude (Neppel et Desbordes, 2000, Neppel et al., 2001).

L'échantillonnage sur la région de tous les événements pluvieux dépassant 190 mm/j en au moins un poste du LR a permis d'estimer les aires de différentes isohyètes de pluies définies pour un seuil de pluie τ . Pour un seuil τ fixé, la distribution des fréquences des aires des isohyètes est ensuite déterminée. Elle permet d'associer à chaque isohyète une période de retour, fonction du seuil de pluviométrie τ considéré et de la superficie couverte par au moins τ mm de pluie.

Initialement la région d'étude est le LR, et la période d'observation est 1958-1993 (Neppel, 1997) sur laquelle 97 événements en 24h maximum avaient été sélectionnés. Une réactualisation de ce travail est réalisée ici en incluant à l'échantillon précédent les événements observés de 1994 à 2002, ce qui rajoute 26 événements supplémentaires. De plus ce travail est étendu à la région PACA où 30 événements sont échantillonnés.

Pour une isohyète τ fixée, la distribution des aires \mathfrak{S} est modélisée par une loi Gamma à deux paramètres α et β estimés par la méthode des moments :

$$\text{Prob}[\mathfrak{S}\tau < s] = F(s) = \int_0^s \frac{1}{|\mathbf{b}|^a \Gamma(\mathbf{a})} x^{a-1} e^{-\frac{x}{b}} dx$$

Des exemples d'ajustement sont proposés en annexe 4.

On en déduit ensuite la période de retour d'une isohyète $\mathfrak{S}\tau$ d'aire au moins égale à s par :

$$T_{[\mathfrak{S}\tau > s]} = \frac{1}{\lambda(1 - F(s))}$$

où λ est le nombre moyen d'épisodes par an dépassant τ mm.

En région LR :

En moyenne on observe 2.7 épisodes/an et 0.37 épisodes/an dépassant respectivement 190 mm/j et 300 mm/j en au moins un point de la région. La tendance saisonnière est marquée puisque 68.3% des événements sont observés de septembre à novembre inclus, un tiers uniquement en octobre. La courbe surface-hauteur-fréquence est présentée pour $T=10$ ans et 100 ans (fig 6). Elle caractérise l'aléa

pluvieux régional. A titre d'exemple, une surface d'au moins 1500 km² couverte par au moins 200 mm de pluie s'observe sur la région en moyenne une fois tous les 10 ans.

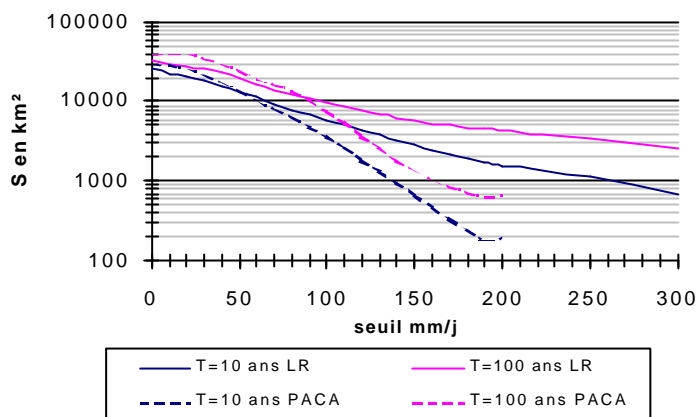


fig 6 : surface de période de retour décennale et centennale pour différents seuils de pluviométrie en PACA et LR..

En région PACA :

La région apparaît comme nettement moins fréquemment touchée par ces événements (fig 4). On note aussi une répartition saisonnière qui diffère sensiblement par rapport au LR : 56 % des événements sont observés de septembre à novembre, avec seulement 16% des événements en octobre, soit deux fois moins qu'en LR pour ce mois. Par contre en Janvier c'est l'inverse avec près de 12% de situations qui s'y produisent, soit deux fois plus qu'en LR.

Concernant l'étendue des pluies, on observe que pour les seuils de pluies de moins 80 mm les aires des isohyètes sont plus étendues en région PACA qu'en LR, par contre pour des seuils supérieurs à 110 mm, les quantiles en région LR sont au moins 2 fois plus étendus, jusqu'à 7 à 9 fois pour $\tau=200$ mm suivant la période de retour (fig 7) : par exemple l'étendue de l'isohyète 200 mm décennale est de 1500 km² environ en LR contre seulement 200 km² en région PACA.

Ainsi les pluies extrêmes, au sens où on les a définies, apparaissent moins fréquentes en région PACA et aussi moins étendues qu'en LR.

Comme précédemment, ces observations ne semblent pas liées à la densité de poste dans la mesure où celle-ci est comparable en LR et en PACA (Cf § 0). Par contre on peut tenter d'expliquer ces observations par les situations météorologiques qui génèrent ces pluies : les centres d'action des pluies dites cévenoles orientent les masses d'air d'abord sur les départements 30 et 34 puis parfois un

glissement du système vers l'est apporte des forts cumuls en rive gauche du Rhône, mais c'est surtout la rive droite la plus arrosée.

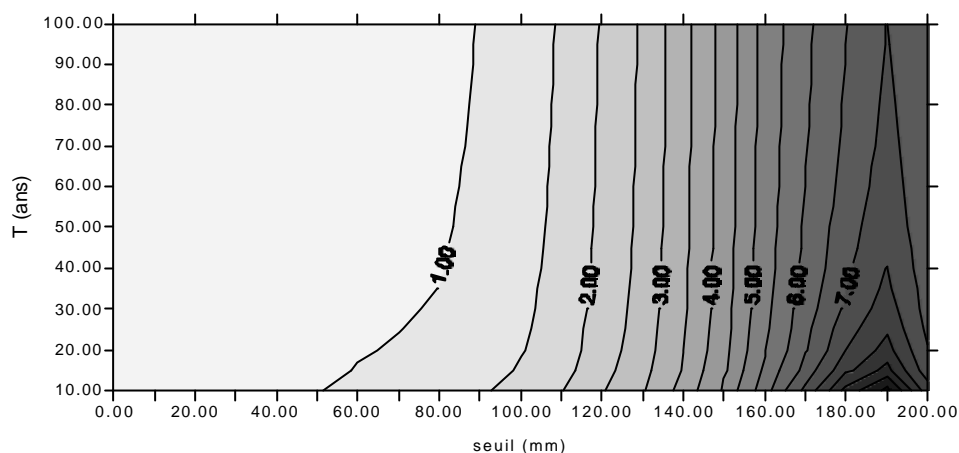


fig 7 : rapport entre les aires des isohyètes en LR et PACA, en fonction du seuil de pluie (mm/j) et de la période de retour

5.3.2 Application à l'événement

L'objectif est d'évaluer la fréquence régionale de l'événement pluvieux. Il est impropre de parler d'une fréquence ou d'une période de retour de l'événement. En effet on peut attribuer une fréquence à chaque variable décrivant l'événement pluvieux, et pour un événement donné la fréquence de chacune d'elle peut être différente. Les variables utilisées ici sont les aires des isohyètes définies à différents seuils de pluviométrie pour un pas de temps de 24 h maximum.

Région LR :

La période de retour régionale des isohyètes en fonction du seuil de pluviométrie τ est synthétisée fig 8. Les intervalles de confiance de ces estimations sont présentés pour 3 seuils de pluie 100 mm, 200 mm et 300 mm (tab 6).

Pour des cumuls inférieurs à 120 mm il s'agit d'un événement assez fréquent à l'échelle régionale puisque de telles isohyètes sont observées en moyenne une fois tous les 5 à 15 ans en LR. A partir de 200 mm les périodes de retour régionales des superficies couvertes dépassent 80 ans : la fréquence d'une isohyète 300 mm au moins aussi étendue que celle du 08 et 09 septembre est évaluée à 140 ans sur la région. On notera cependant que les intervalles de confiance à 80% de ces estimations sont très larges (tab 6).

En comparant les périodes de retour des isohyètes à celles de septembre 1958 et de novembre 1999 dans l'Aude il apparaît :

- i) que l'événement de septembre 1958 a une fréquence régionale beaucoup plus courante que les deux autres événements ;
- ii) les périodes de retour des surfaces de pluie observées dans l'Aude en novembre 1999 sont plus importantes que dans le Gard pour des cumuls de moins de 200 mm. Par exemple pour 100 mm la période de retour régionale des superficies touchées dans l'Aude est de 75 ans contre une dizaine d'année pour les pluies de septembre 2002. La fréquence régionale des surfaces ayant reçu au moins 200 mm de pluie est équivalente dans les deux cas (environ 80 ans). Par contre dès que l'on considère des isohyètes de plus de 200 mm, les périodes de retour de l'événement Gardois sont bien supérieures à celles de l'événement de l'Aude : pour 250 mm et 300 mm les périodes de retour régionales sont estimées à respectivement 60 ans et 40 ans dans l'Aude contre 110 et 140 ans pour l'événement de septembre 2002.

Ainsi il apparaît que **c'est surtout la superficie couverte par les plus forts cumuls qui caractérise cet événement, en particulier les pluies dépassant 200 mm**. A partir des informations dont on dispose, seul l'événement d'octobre 1940 présente des caractéristiques comparables : son étendue est au moins aussi importante et la pluviométrie journalière maximale mesurée est encore plus élevée. Ceci devrait peut-être modérer les périodes de retour maximales évaluées à une centaine d'années par notre approche statistique.

On ne se risquera pas à une estimation de la fréquence régionale des surfaces touchées par plus de 600 mm étant donné que c'est la seule observation - 600 mm sur 150 km² - dont on dispose entre 1958 et 2002. De même que pour les pluies ponctuelles, l'influence de la densité du réseau entraîne une surestimer les périodes de retour des isohyètes, surtout les plus localisées. Par exemple on peut montrer qu'en LR, une zone pluvieuse de 150 km² a une probabilité de 70% d'être mesurée par au moins un poste pluviométrique avec la densité de postes existant entre 1958 et 1993, entre 1920 et 1939 cette probabilité n'était que de 25%.

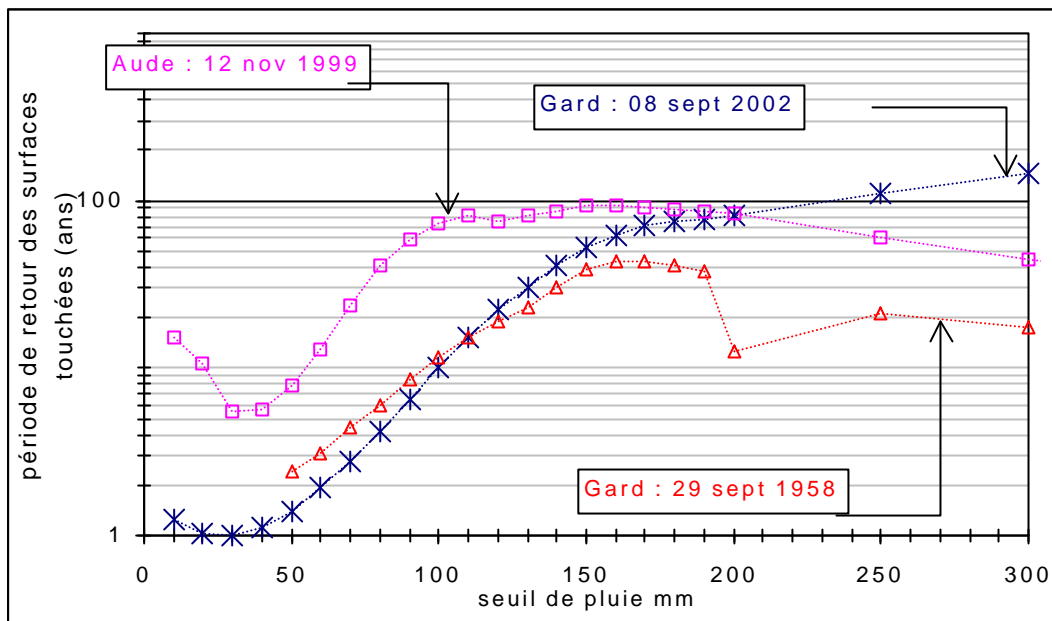


fig 8 : période de retour régionale (LR) des surfaces couvertes par les isohyètes du 08 et 09 septembre 2002 et comparaison avec d'autres événements régionaux.

Seuil de pluie	100 mm	200 mm	300 mm
Période de retour des isohyètes	10 ans	81 ans	144 ans
Surface de l'isohyète (km ²)	6040	4040	3120
Intervalle de confiance à 80%			
- borne inférieure	7 ans	20 ans	65 ans
- borne supérieure	12 ans	> 500 ans	> 500 ans

tab 6 : période de retour en LR et intervalle de confiance des surfaces couvertes par quelques isohyètes observées le 08 et 09 septembre 2002.

Région PACA :

Les périodes de retour des isohyètes sont présentées fig 9. On observe que pour des isohyètes inférieures à 160 mm, la fréquence régionale en PACA est du même ordre qu'en LR, et même plus fréquente pour les isohyètes entre 60 et 160 mm. La période de retour maximale est sensiblement la même pour les deux régions. Elle est de l'ordre de 140 ans, mais elle correspond en PACA à la superficie touchée par plus de 200 mm alors qu'en LR il s'agit de la superficie touchée par plus de 300 mm.

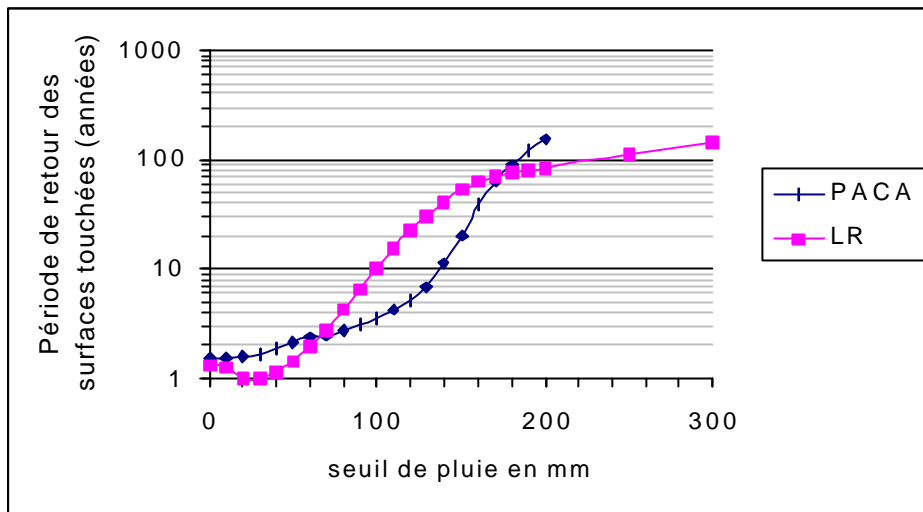


fig 9 : périodes de retour régionales des surfaces des isohyètes en 24h pour l'événement du 08 – 09 septembre 2002, comparaison région LR et PACA..

6. Analyses des lames par bassins

L'objectif est d'estimer les lames d'eau et leur fréquence pour les quelques bassins parmi ceux qui ont été les plus affectés par l'événement. Les quatre bassins gardois choisis sont :

- le Gard à Sanilhac (1750 km²)
- le Gardon d'Anduze à Anduze (539 km²)
- le Vidourle à Marsillargues (822 km²)
- la Cèze à la Roque sur Cèze (1084 km²)

Pour chaque bassin on a estimé la distribution des lames d'eau à l'aide de l'échantillon d'événements décrit plus haut. Pour l'événement du 08 et 09 septembre 2002 on a estimé la superficie de chaque bassin couverte par les précipitations en fonction du seuil de pluie et on a estimé la fréquence de cette lame d'eau. Dans un premier temps on présente, pour chaque bassin, les superficies touchées par les pluies en fonction du seuil de pluviométrie. Ensuite on procède au calcul des lames d'eau. Enfin on détermine les distributions des lames d'eau et la fréquence de celle observée en septembre 2002.

On attire l'attention sur le fait que l'échantillon est constitué des événements ayant générés plus de 190 mm/j en au moins un poste. Ainsi les distributions des lames d'eau par BV sont des distributions conditionnelles.

Superficie touchée.

Les 4 bassins sont totalement touchés par les précipitations. 50 % de leur superficie est touchée par au moins 200 mm de pluie, quel que soit le bassin (fig 10). Sur 50% de la superficie du Gard à Sanilhac les précipitations ont dépassé 500 mm en moins de 24h et sur environ 12% de sa surface on observe plus de 600 mm. Si l'on classe les BV en fonction de la proportion de leur surface touchée par plus de 400 mm, le Gard tient la première place, suivi du Vidourle et enfin de la Cèze et du Gardon d'Anduze.

On voit ici une autre particularité de l'événement qui apparaît aussi sur la cartographie présentée fig 5. Pour le bassin du Gard, la proportion de surface des bassins touchée par les forts cumuls, de plus de 200 mm, augmente avec la taille du bassin. Ainsi, les cumuls les plus importants ne semblent pas liés au relief, ils ne sont pas situés sur les versants comme on l'observe habituellement sur les pluies dites 'cévenoles'.

On remarquera aussi que par rapport à l'événement de 1958, exception faite du gardon à Anduze, pour tous les autres bassins la superficie couverte par les forts cumuls est bien plus importante en septembre 2002. Pour le Gardon d'Anduze, tant qu'on considère des seuils de moins de 350 mm, les superficies couvertes sont plus importantes en 1958 qu'en 2002 : on observe plus de 190 mm sur 50% de la surface du BV en 2002 contre 270 mm en 1958. Ce qui confirme encore la localisation particulière du récent événement.

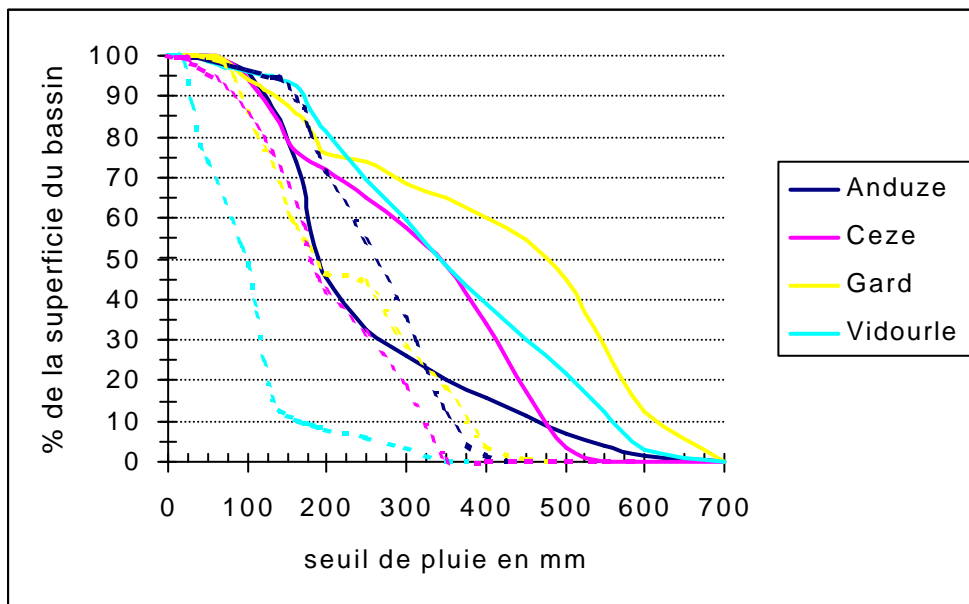


fig 10 : superficie des bassins couverte par les précipitations, en trait plein pour l'événement de septembre 2002, en trait pointillé septembre 1958.

Distribution des lames d'eau.

L'échantillon dont on dispose est constitué des événements de plus de 190 mm/j en au moins un point de la région LR. Pour rester homogène dans notre analyse on a échantillonné sur chaque bassin les événements dépassant 190 mm en au moins un point du bassin. Les lames d'eau sont calculées et leur fréquence modélisée par une loi Gamma à deux paramètres. Différentes lois ont été testées. On a retenue une loi Gamma à deux paramètres qui modélise correctement les distributions de lame d'eau excepté sur le bassin du Gard à Sanilhac pour lequel aucune loi, même celle à trois paramètres type GEV, n'est en mesure de décrire l'ensemble des fréquences observées. Par homogénéité on a retenue aussi une loi Gamma. L'annexe 5 présente les graphiques d'ajustement. On utilise ensuite l'expression de la loi Gamma pour déterminer la lame décennale et centennale sur chaque bassin et estimer le temps de retour de lame observée durant l'événement de septembre 2002. Les résultats figurent tab 7. On rappelle que la distribution des lames est une distribution conditionnelle, sachant qu'un cumul de plus de 190 mm est observé sur le BV.

Fréquence des lames de septembre 2002.

La lame observée a une période de retour supérieure à 100 ans sur tous les bassins sauf pour le Gardon à Anduze où elle est de l'ordre de 70 ans. En effet sur ce bassin la lame du 29 septembre 1958 dépasse d'une dizaine de mm celle de septembre 2002. Sur le Gard la lame (et sa période de retour) augmente avec la surface prise en compte, ce qui souligne encore l'extension spatiale des forts cumuls et leur localisation sur les plaines plutôt que les contreforts cévenols : c'est sur le bassin versant le plus grand, sur le Gard à Sanilhac, que la lame est la plus grande 373 mm en moins de 24 h, ce qui représente plus de 650 Mm³ d'eau précipités sur ce bassin, dont 20% (132 Mm³) sur le Gardon d'Anduze. Le Vidourle à Marsillargue est en deuxième position avec une lame de 351 mm pour 822 km² soit environ 290 Mm³.

	Gardon Anduze (539 km ²)	Gard Sanilhac (1750 km ²)	Vidourle Marsillargues (822 km ²)	Ceze La Roque (1084 km ²)
Effectif	24	36	13	26
Lame (mm/j)				
T=10 ans	185	165	121	156
IC à 95%	+/- 10	+/- 35	+/- 30	+/- 24
T=100 ans	255	264	286	263
IC à 95%	+/- 45	+/- 75	+/- 104	+/- 80
Lame le 08/09/02 (mm/j)	244	373	351.2	310.7
T (ans)	70	>500	200-300	300-400

tab 7 : distribution des lames d'eau (mm) par bassin et intervalle de confiance (IC) à 95%.

Remarque sur la comparaison des lames d'eau obtenues avec le réseau sol et le radar :

On note que :

- les lames d'eau Rhea sont les plus proches de celles obtenues par le réseau sol, ce qui semble cohérent compte tenu du calibrage des images réalisé toutes les 5 minutes en utilisant les observations sols
- les lames d'eau Strategis sont fréquemment sous estimées par rapport au réseau sol, ce qui pourrait s'expliquer par une sous estimation du radar sur les parties amont des BV, suite à un effet de masque ; en particuliers sur le BV des gardons d'Anduze à Anduze la lame est sous estimée de 20% par rapport au réseau sol ;
- les lames d'eau Hydrum varient le moins suivant les bassins, et on note une sous-estimation de 20% de la lame précipitée sur la Rouvière par rapport aux autres méthodes.
- enfin, quelle que soit la méthode de calibration les écarts entre les lames radar et « sol » n'excèdent jamais 20%, avec nos observations.

BV	Radar Hydrum	Radar Strategis	Radar Rhea	Pluviomètres
La Rouvière	460	537	576	578
Ceyrac	420	367	381	366
Conqueyrac	400	355	318	370
Sommière	380	391	440	
Marsillargues		345		351
Vic		405	438	442
Gardons d'Anduze		196		244
Gard Sanilhac		333		373

tab 8 : comparaison des lames d'eau Radar et « sol » sur quelques BV.

7. Conclusions :

L'événement pluvieux des 08 et 09 septembre 2002 est parmi les plus violents observés en LR et en PACA. Il est caractérisé d'une part par les cumuls ponctuels mesurés, jusqu'à 690 mm en moins de 24 heures, et d'autre part par la surface touchée par les cumuls les plus importants, au moins 400 mm sur environ 1800 km² dans le Gard et 150 km² touché par plus de 600 mm.

Cet événement présente cependant plusieurs différences par rapport à ceux de septembre 1958 et d'octobre 1958 qui servaient de référence sur les bassins du Gard et du Vidourle. Au niveau de la pluviométrie les cumuls enregistrés en automne 1958 restent très inférieurs à ceux récemment observés de même que la localisation des zones pluvieuses situées plus en amont sur les versants montagneux. Leur étendue était aussi très nettement inférieure à celle de septembre 2002. Sur le Vidourle la crue d'octobre 1958 est davantage due à la succession de deux événements pluvieux espacés d'une semaine qu'aux cumuls pluviométriques de ces événements.

Si l'on se penche sur le passé, des événements pluvieux comparables ont déjà été observés en LR, soit par rapport aux cumuls ponctuels mesurés ou par rapport à la surface couverte. Les plus ressemblants restent l'Aude en novembre 1999 et l'aigouat d'octobre 1940 dans les Pyrénées-Orientales. Du point de vue des cumuls pluviométriques ponctuels maximaux il se place à la 5^{ème} place dans l'espace méditerranéen entre 1825 et 2002. Du point de vue de l'étendue couverte par plus de 300 mm il se place en deuxième position sur la période 1940-2002, derrière l'Aigouat de 1940. Ce dernier montre d'ailleurs que les records régionaux en matière de cumuls pluviométriques et de superficie touchée n'ont pas été dépassés en septembre dernier.

La fréquence régionale de l'événement peut être appréhendée à partir des cumuls ponctuels ou à partir des surfaces couvertes par les précipitations, sur la période 1958-2002. Dans le premier cas on peut évaluer à une quarantaine d'année la période de retour d'un cumul ponctuel de plus de 690 mm, en un point de la région LR. En faisant intervenir les superficies couvertes par les précipitations, la période de retour régionale est d'autant plus importante que le seuil de précipitation est grand : les superficies couvertes par au moins 200 mm de pluie ont une période de retour de l'ordre de 80 ans, celles couvertes par au moins 300 mm ont une période de retour avoisinant les 140 ans. Il est important de souligner que ces résultats sont entachés de large incertitude liée au nombre d'observations dont on dispose et aussi à l'influence de la densité du réseau de pluviomètres. On a montré que ce dernier ne permettait pas d'observer toutes les cellules pluvieuses en particulier les plus localisées. Ceci tend à

surestimer les périodes de retour. Les périodes de retour présentées peuvent être considérées comme des bornes supérieures. L'analyse historique abonde d'ailleurs dans ce sens.

La particularité de l'événement réside aussi dans la localisation des cumuls pluviométriques les plus importants. Ils ne sont pas mesurés sur les versants des reliefs cévenols mais plus au sud sur une zone d'altitude comprise entre 200 et 300 m environ. Cet événement se distingue des événements cévenols au sens météorologique. Des conclusions similaires se dégagent des images radars où l'on observe nettement la signature en 'V' des systèmes convectifs de méso-échelle (SCME).

Enfin l'hypothèse d'une évolution des fréquences des pluies extrêmes ces dernières années n'est pas confirmée par l'analyse de la stationnarité du nombre d'événements pluvieux dépassant un seuil de pluie fixé pendant la période d'observation 1958-2002. L'augmentation des inondations observées la dernière décennie semble davantage liée à une vulnérabilité grandissante des bassins versant qu'à des pluies extrêmes plus fréquentes (Neppel et al., 2002).

Bibliographie :

- Jacq V., 1995. *Inventaire des situations à précipitations diluviennes en Languedoc-Roussillon / Paca / Corse*. Service Central d'Exploitation de la Météorologie, Direction interrégionale Sud-Est, 190p
- Jacquet J., 1959. *Les crues d'automne 1958 sur le Vidourle*. Mémoire et travaux de la société hydrotechnique de France, (1)11: 66-82.
- Neppel L., Vinet F., Bouvier C., Desbordes M. *Pluies extrêmes et changement climatique : quelques éléments de réflexions pour la région Languedoc-Roussillon*. Montpellier Agropolis, déc 2002.
- Neppel L., Desbordes M., 2001 : *Fréquence de l'épisode pluvieux à l'origine des inondations des 12 et 13 novembre 1999 dans l'Aude*. C.R. Acad. Sci. Paris, 332, p297-273
- Neppel L., Desbordes M., 2000 : analyse de l'épisode pluvieux de 12-13 novembre 1999 – 2^{ème} phase, rapport ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, DPPR/DRM, Janv 2000.
- Neppel L., 1997 : *Etude du risque pluvial en région Languedoc-Roussillon : caractérisation de l'aléa climatique*. Thèse de doctorat de l'Université Montpellier II, 272p
- Neppel L., Desbordes M., Masson J.M., 1998 : *Influence de l'évolution dans l'espace et le temps d'un réseau de pluviomètres sur l'observation des surfaces de pluie en fonction de leur aire*. Revue des Sciences de l'Eau, vol. 1, 43-60.
- Ramos Maria Helena, 2002. *Analyse de la pluviométrie sous des systèmes nuageux convectifs*. Thèse de l'université Joseph Fourier, Laboratoire d'étude des Transfert en Hydrologie et Environnement, 160p.
- Rivrain J.C., 1997. *Les épisodes orageux à précipitations extrêmes sur les régions méditerranéennes de la France*. Service de Prévision Interrégionale, Direction Inter-régionale Sud-Est de Météo-France, 92p.
- Soutadé G., 1993. *Les inondations d'octobre 1940 dans les Pyrénées-Orientales*. Conseil Général, Direction des Archives Départementales de Perpignan, 351p.