Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Bouches-du-Rhône

Etude hydraulique sur le bassin versant de la Cadière et du Raumartin

Rapport de Phase 3

Partie 1 - Hydrologie

40145 | Novembre 2017 | v.2

hydratec

setec

Agence de Vitrolles
5, chemin des Gorges de Cabriès
13127 Vitrolles

T : 04 86 15 62 45
F : 04 86 15 62 48

Directeur d'affaire :

Responsable d'affaire : GFL

N°affaire : 016 40145

Fichier : 40145 CADIERE PHASE 3_partie1_V2.doc

Version	Date	Etabli par	Vérifié par	Nb pages	Observations / Visa
1	07/09/2017	GFL	BLN	46	Création
2	16/11/2017	GFL	BLN	41 (hors annexes)	Compléments sur la pluviométrie d'événements réels, sur la caractérisation des sous-bassins versants incendiés

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION 6
1.1 Contexte 6
1.2 Phasage de l'étude 6
1.3 Démarche générale 6
2 RECUEIL ET EXPLOITATION DES DONNEES DISPONIBLES 8
2.1 Débit 8
2.1.1 Débits jaugés 8
2.1.2 Crues historiques 9
2.2 Pluviométrie 16
2.2.1 Rappel des données issues de la bibliographie 16
2.2.2 Présentation des données statistiques disponibles 17
2.2.3 Pluviométrie d'événements réels 22
2.3 Utilisation des mesures 31
3 DETERMINATION DES PLUIES DE PROJET 32
3.1 Discussion sur l'homogénéité spatiale des pluies extrêmes 32
3.2 Introduction de la notion d'abattement spatial 32
3.3 Hyétogrammes des pluies de projet 35
4 CONSTRUCTION DU MODELE HYDROLOGIQUE 36
4.1 Présentation du bassin versant 36
4.2 Caractérisation des sous-bassins versants 37
4.2.1 Caractéristiques générales 37
4.2.2 Impact de l'incendie du 10/08/2016 sur les caractéristiques du bassin versant 39
4.3 Modèle pluie-débit 39
4.4 Propagation du débit 41

ANNEXES

ANNEXE 1 : DUREES DE RETOUR DE FORTES PRECIPITATIONS - EPISODE : 6 HEURES – METHODE DU RENOUVELLEMENT 42

ANNEXE 2 : COEFFICIENTS DE MONTANA DU POSTE DE MARIGNANE 44

ANNEXE 3 : RAPPORT SUR L'EPISODE PLUVIEUX DES 22 ET 23 SEPTEMBRE 1993 (METEO FRANCE) 45

ANNEXE 4 : TRAVAUX DE RECHERCHE CONCERNANT L'ABATTEMENT SPATIAL DES PLUIES 47

FIGURES

Figure 1 : Localisation de la station hydrométrique de la Cadière (Y4225610) au stade Saint-Pierre à Marignane 8

Figure 2 : Hydrogramme de la crue du 22 septembre 1993 à la station de la Cadière 9

Figure 3 : Hydrogramme de la crue du 21 octobre 1994 à la station de la Cadière..... 10

Figure 4 : Hydrogramme de la crue du 6 septembre1998 à la station de la Cadière..... 10

Figure 5 : Hydrogramme de la crue du 13 octobre 2000 à la station de la Cadière..... 11

Figure 6 : Hydrogramme de la crue du 19 septembre 2002 à la station de la Cadière 11

Figure 7 : Hydrogramme de la crue du 12 septembre 2004 à la station de la Cadière 12

Figure 8 : Hydrogrammes de la crue du 16 et 19 septembre 2009 à la station de la Cadière..... 12

Figure 9 : Ajustement de Gumbel à la station de la Cadière 14

Figure 10 : Ajustement statistique à la station de la Cadière 16

Figure 11 : comparaison des cumuls de pluie en fonction de la durée pour 10 ans 18

Figure 12 : comparaison des cumuls de pluie en fonction de la durée pour 50 ans 18

Figure 13 : comparaison des cumuls de pluie en fonction de la durée pour 100 ans 19

Figure 14 : comparaison des cumuls de pluie en fonction de la durée de 0 à 120min pour 10 ans19

Figure 15 : Précipitation sur 24h de août et septembre 1993 à la station de Marignane (source : www.meteociel.fr) 22

Figure 16 : Iso-hyète du 22 septembre 1993 (source : étude hydraulique La Cadière, Le bondon Le Ravion d'aix – SIB- 1997) 23

Figure 17 : Pluviométrie du 22 au 23 septembre 1993 à la station d'Aix-Les Milles (source SDEP 1999) 24

Figure 18 : Pluviométrie du 22 au 23 septembre 1993 à la station de Marignane (source délimitation des zones inondables : La cadière Le Bondon Le ravin d'Aix – SIB - 1998)..... 24

Figure 19 : Pluviométrie du 22 au 23 septembre 1993 à la station d'Aix en Provence (source délimitation des zones inondables : La cadière Le Bondon Le ravin d'Aix – SIB - 1998) 25

Figure 20 : Laisses de crues du 10/09/2005 (source DDTM 13)..... 26

Figure 21 : Précipitation sur 24h de septembre 2005 à la station de Marignane(source : www.meteociel.fr) 27

Figure 22 : Hauteur d'eau (mm) en fonction du temps pour la pluie du 10 septembre 2005..... 27

Figure 23 : Comparaison des pluies enregistrées aux postes de Marignane, Aix Les Milles, et Aix en Provence pour l'événement du 10 septembre 2005 28

Figure 24 : Précipitation sur 24h d'août et de septembre 2009 à la station de Marignane(source : www.meteociel.fr) 29

Figure 25 : Pluie des 16 et 18 septembre 2009 à la station de Marignane (données source Météo France)..... 30

Figure 26 : Comparaison des pluies enregistrées aux postes de Marignane, Aix Les Milles, et Aix en Provence pour l'événement du 18 septembre 2009 31

Figure 27 : Relief du bassin versant de la Cadière et du Raumartin..... 36

Figure 28 : Découpage en sous bassin-versant et coefficient d'imperméabilisation..... 38

Figure 29 : coefficient de perte en fonction des pertes cumulées pour différentes valeurs de paramètres d'Horner..... 40

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Le bassin versant de la Cadière s'étend depuis le plateau calcaire de l'Arbois jusqu'à l'étang de Berre sur une superficie de 73 km^2 (Il culmine à 250 m). Le réseau hydrographique est constitué des ruisseaux de la Cadière (12km), du Raumartin (10km) du Bondon (6km) et de la Marthe (3km). Depuis sa source dans les gorges karstiques de l'Infernet, les pentes sont soutenues avant d'arriver dans la plaine « littorale » ou cette dernière devient faible.

Ces cours d'eau ont un régime hydraulique méditerranéen caractérisé par des périodes de sécheresse intense et des épisodes orageux très violents.

Ce petit bassin versant côtier qui traverse des zones très urbanisées sur sa partie aval, est soumis à des crues rapides pouvant impacter un grand nombre d'enjeux, tant humains que matériels.

Au cœur de plusieurs zones d'activités économiques majeures du département, favorisant l'expansion de sa démographie, il est primordial de connaitre le fonctionnement des cours d'eau en cas de crue, tant dans un objectif de prévention, que d'alerte et de gestion de crise.

La présente étude a donc pour objectifs la connaissance des aléas inondations sur la totalité du bassin versant, pour différentes occurrences de crues (des évènements fréquents aux évènements exceptionnels) : une attention toute particulière devra être portée à la définition de l'aléa de référence, l'évènement à prendre en compte dans les décisions d'aménagements.

1.2 PHASAGE DE L'ETUDE

Cette étude hydraulique comporte 4 phases :

- Phase 1 : Synthèse de la connaissance existante du risque inondation sur le bassin versant de la Cadière,
- Phase 2 : Besoins topographiques complémentaires,
- Phase 3 : Modélisation hydraulique,
- Phase 4 : Simulation des crues et cartographie des aléas – analyse qualitative

Le présent document traite de la partie hydrologie de la phase 3 de l'étude.

1.3 DEMARCHE GENERALE

L'analyse hydrologique s'appuie d'une part sur la connaissance des événements historiques à travers une étude détaillée des mesures disponibles et d'autre part sur l'exploitation d'un modèle hydrologique pluie-débit couplé aux modèles hydrauliques mis en œuvre pour la caractérisation de l'aléa inondation.

L'analyse statistique des données pluviométriques et hydrométriques disponibles permet de quantifier les débits de pointe et volumes écoulés pour différentes périodes de retour au droit des stations de mesure.

Le modèle hydrologique permet de définir les hydrogrammes injectés dans les modèles hydrauliques qui en assurent le routage vers l'aval. Il tient compte des caractéristiques

physiques des sous-bassins versants, et notamment de l'imperméabilisation liée à l'urbanisation qui tend à augmenter le ruissellement et les volumes écoulés vers les cours d'eau.

La méthode proposée s'inscrit dans une approche générale développée par Hydratec, applicable à tout système hydrologique complexe, dont les épisodes exceptionnels sont influencés par des combinaisons variées de facteurs physiques hétérogènes (ici la structure des pluies et la localisation spatiale de leurs épicentres notamment). Sa bonne application nécessite une caractérisation précise de ces facteurs et de leur interaction, ainsi qu'une modélisation adéquate du fonctionnement hydrologique et hydraulique du système.

Pour cette étude, le calage du modèle hydrologique sera réalisé conjointement au calage du modèle hydraulique.

2 RECUEIL ET EXPLOITATION DES DONNÉES DISPONIBLES

2.1 DEBIT

2.1.1 Débits jaugés

La Cadière est un cours d'eau équipé d'une station de mesure de débits.

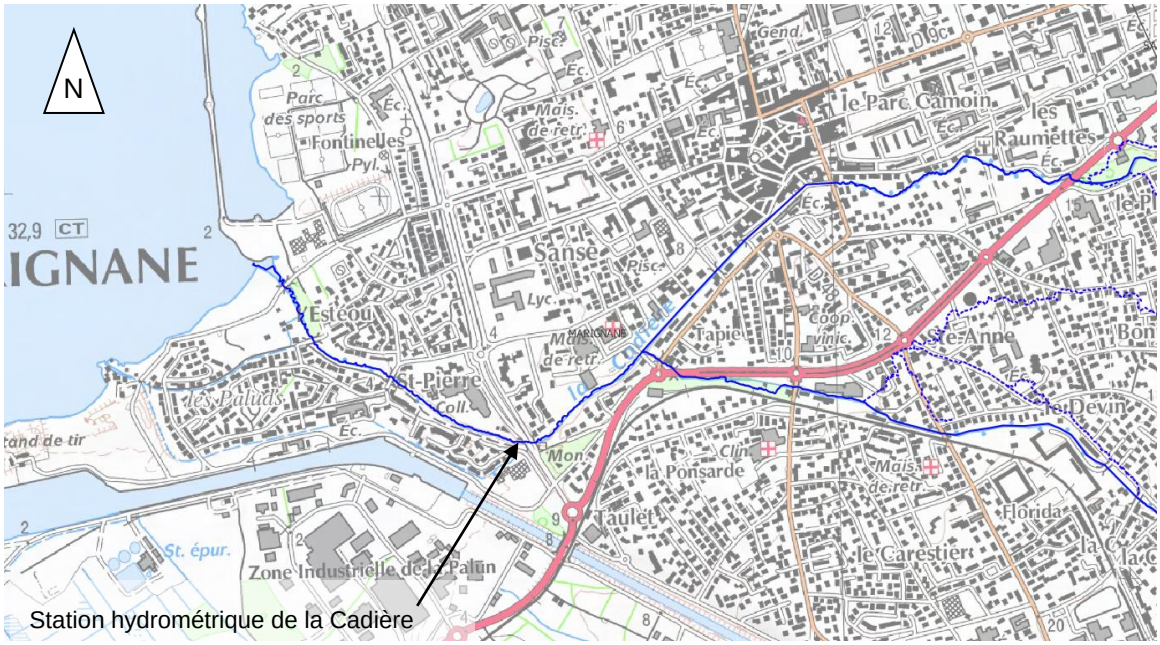


Figure 1 : Localisation de la station hydrométrique de la Cadière (Y4225610) au stade Saint-Pierre à Marignane

La Banque hydro réalise une analyse statistique sur les données brutes afin de déterminer les débits caractéristiques du cours d'eau. La station de mesures est située à Marignane à proximité du Stade Saint Pierre, soit en aval de sa confluence avec le Raumartin. La superficie du bassin versant au droit de la station considérée est de 72.4km².

Suivie depuis 1987, l'analyse statistique est réalisée sur 32 années de mesures. Les débits caractéristiques ainsi calculés sont repris dans le tableau suivant :

Crues (loi de Gumbel - septembre à août) - données calculées sur 32 ans

Fréquence	QJ (m3/s)	QIX (m3/s)
Xo	4.990	18.000
Gradex	2.830	8.340
Biennale	6.000 [5.300;7.000]	21.00 [19.00;24.00]
Quinquennale	9.200 [8.200;11.00]	30.00 [27.00;36.00]
Décennale	11.00 [10.00;14.00]	37.00 [33.00;44.00]
Vicennale	13.00 [12.00;17.00]	43.00 [38.00;52.00]
Cinquantennale	16.00 [14.00;20.00]	51.00 [44.00;63.00]
Centennale	Non calculée	Non calculée

Tableau 1 : débits caractéristiques à la station hydrométrique de la Cadière (source : Banque Hydro juillet 2017)

Les débits obtenus par cette analyse statistiques sont inférieurs aux débits issus de la bilbliographie (cf tableau suivant). En effet l'analyse statsitique est réalisée en prenant en compte les données récentes, or les dernières crues marquantes sont assez anciennes (1993).

Etude	Année	Commune	Cours d'eau	Q2ans	Q5ans	Q10ans	Q50ans	Q100 ans	Q 1993	Surface du bassin versant (km²)
SDEP Vitrolles	2013	Vitrolles	Bondon						72.4	16.9
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Bondon	5.8	7.7	9.3	16.7	24.9		16.55
Etude Hydraulique - La Cadière Le Bondon le ravin d'aix	1997	Vitrolles	Bondon						60.3	(amont A7)
Schéma de cohérence hydraulique et sanitaire communautaire	2008	territoire MPM	Cadière	19-26	29-41	31-52	47-75			72.4
Schéma de cohérence hydraulique et sanitaire communautaire	2008	territoire MPM	Cadière			50	100	141		73
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Cadière	33.1	45.9	53.9	86.7	129		72.09
Etude Hydraulique - La Caidère Le Bondon le ravin d'aix	1997	Vitrolles	Cadière						28.9	(amont A7)
Etude Hydraulique - La Caidère Le Bondon le ravin d'aix	1997	Vitrolles	Cadière						89.2	au franchissement de l'A7
Etude Hydraulique - La Caidère Le Bondon le ravin d'aix	1997	Vitrolles	Cadière						73.8	pont SNCF
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Marthe	2.3	3.5	4.4	10.8	13.9		3.55
Schéma de cohérence hydraulique et sanitaire communautaire	2008	territoire MPM	Raumartin			21	31	47		25.2
Schéma de cohérence hydraulique et sanitaire communautaire	2008	territoire MPM	Raumartin			8	29	46		
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Raumartin	11.3	16.5	19.3	30.9	46		25.2
SDEP Vitrolles	2013	Vitrolles	Ravin d'Aix						16.6	2.26
Schéma directeur communautaire	1998	territoire MPM	Ravin d'Aix	2.2	3.5	5.4	10.7	13.7		3.29

Tableau 2 : Analyse comparative des débits caractéristiques des cours d'eau

2.1.2 Crues historiques

Sur la période de 1987 à 2017, nous avons analysé les hydrogrammes des crues les plus importantes mesurées afin de déterminer les paramètres caractéristiques des crues sur le bassin versant de la Cadière et du Raumartin.

Ces données permettent dans un second temps de calculer le débit décennal et centennal du bassin versant par des méthodes analytiques.

Les hydrogrammes des 6 crues les plus importantes sont représentés sur les figures ci-dessous. Le pic de crue est généralement estimé par la banque hydro. Seule la crue de 2004, qui est moins importante, a été totalement mesurée.

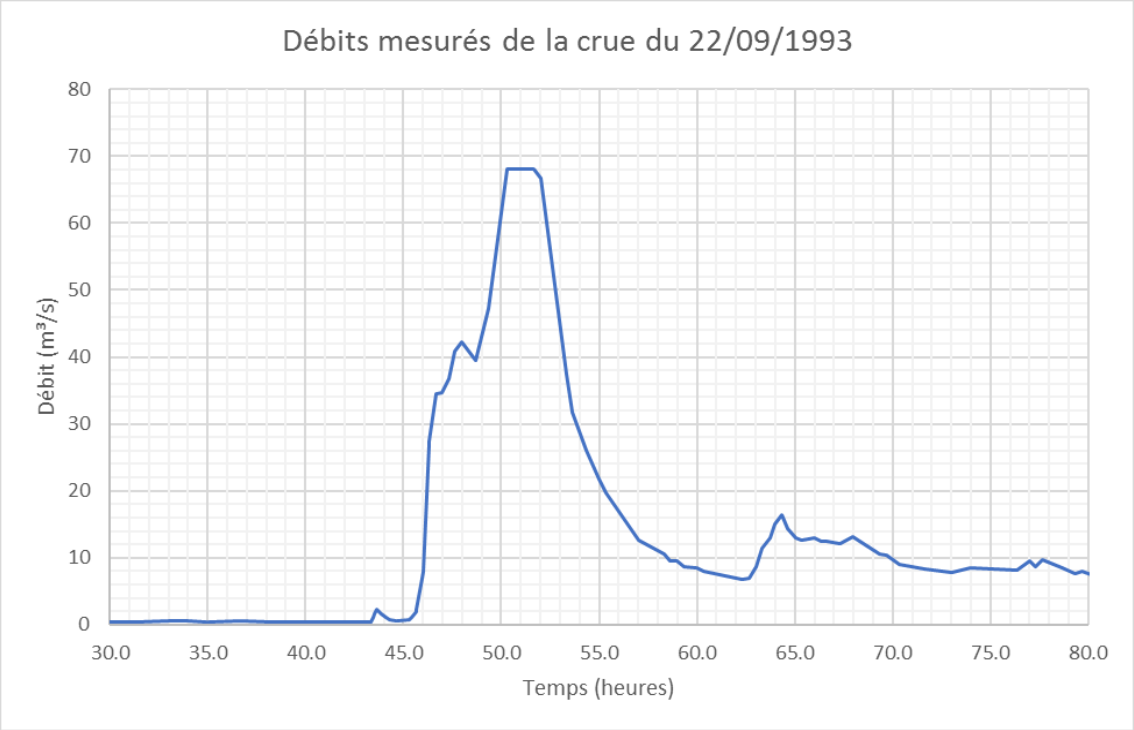


Figure 2 : Hydrogramme de la crue du 22 septembre 1993 à la station de la Cadière

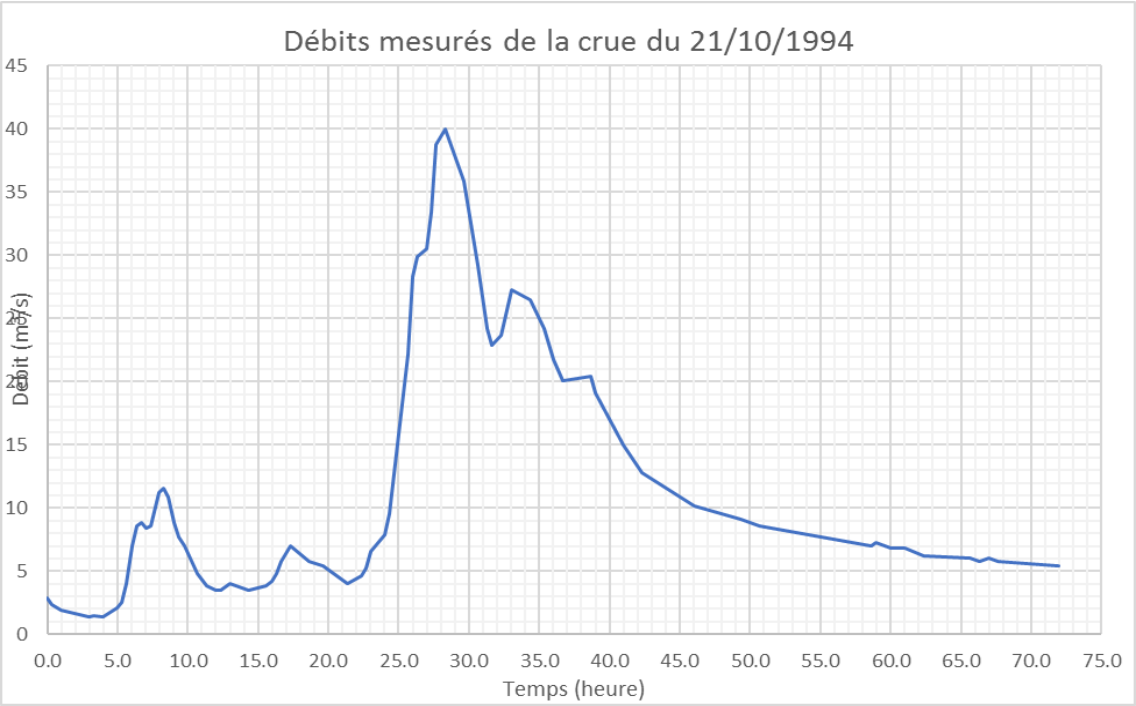


Figure 3 : Hydrogramme de la crue du 21 octobre 1994 à la station de la Cadière

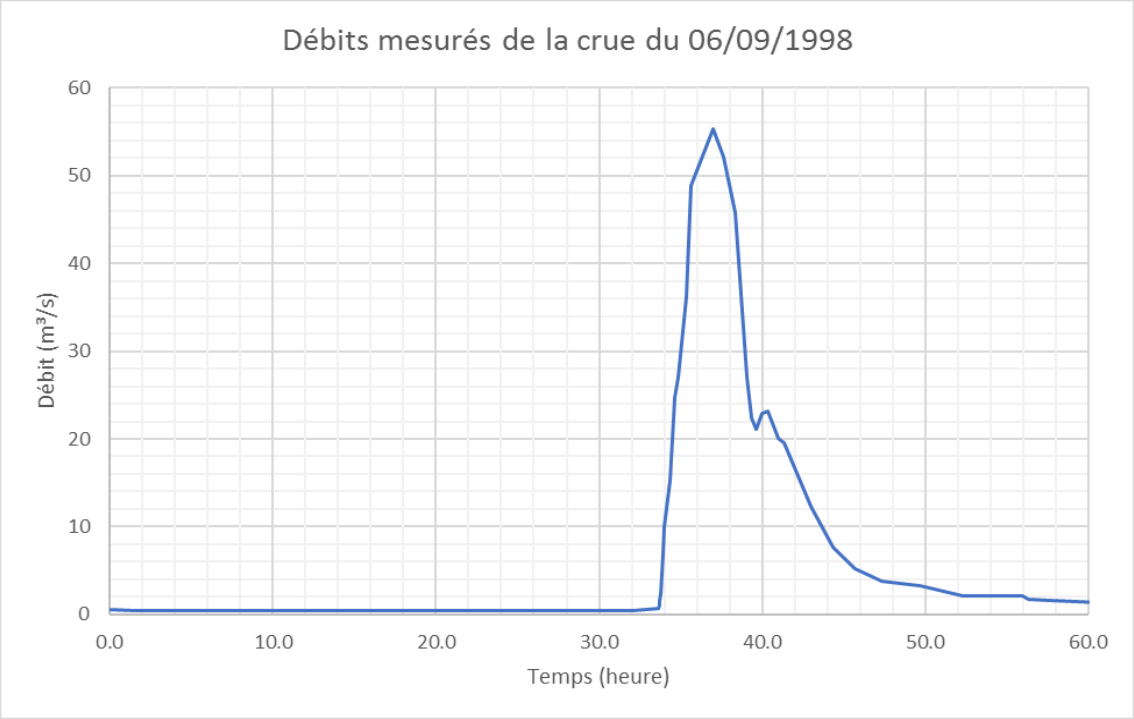


Figure 4 : Hydrogramme de la crue du 6 septembre1998 à la station de la Cadière

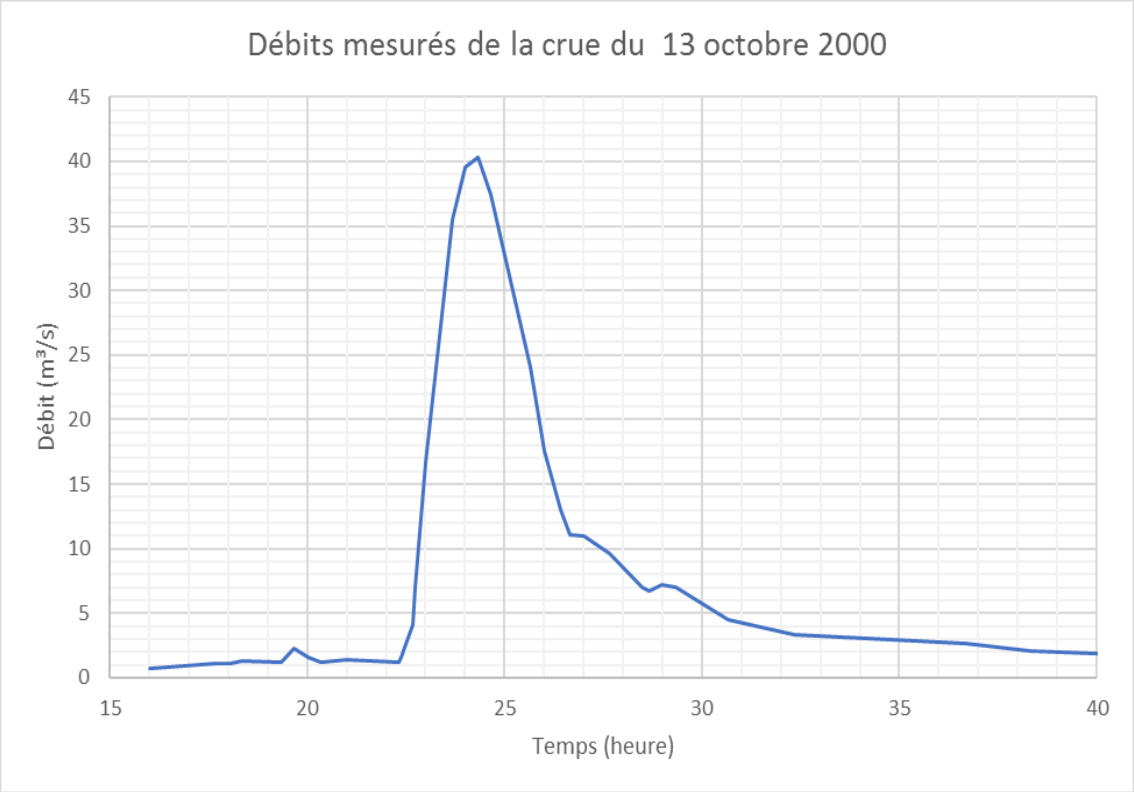


Figure 5 : Hydrogramme de la crue du 13 octobre 2000 à la station de la Cadière

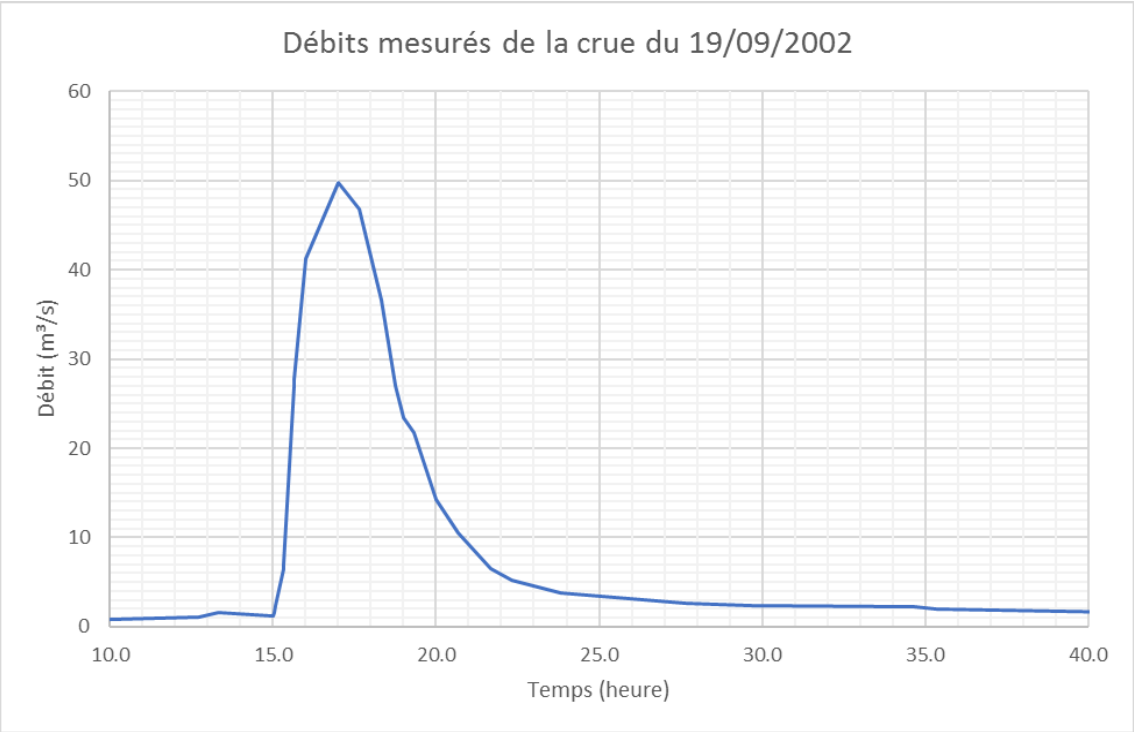


Figure 6 : Hydrogramme de la crue du 19 septembre 2002 à la station de la Cadière

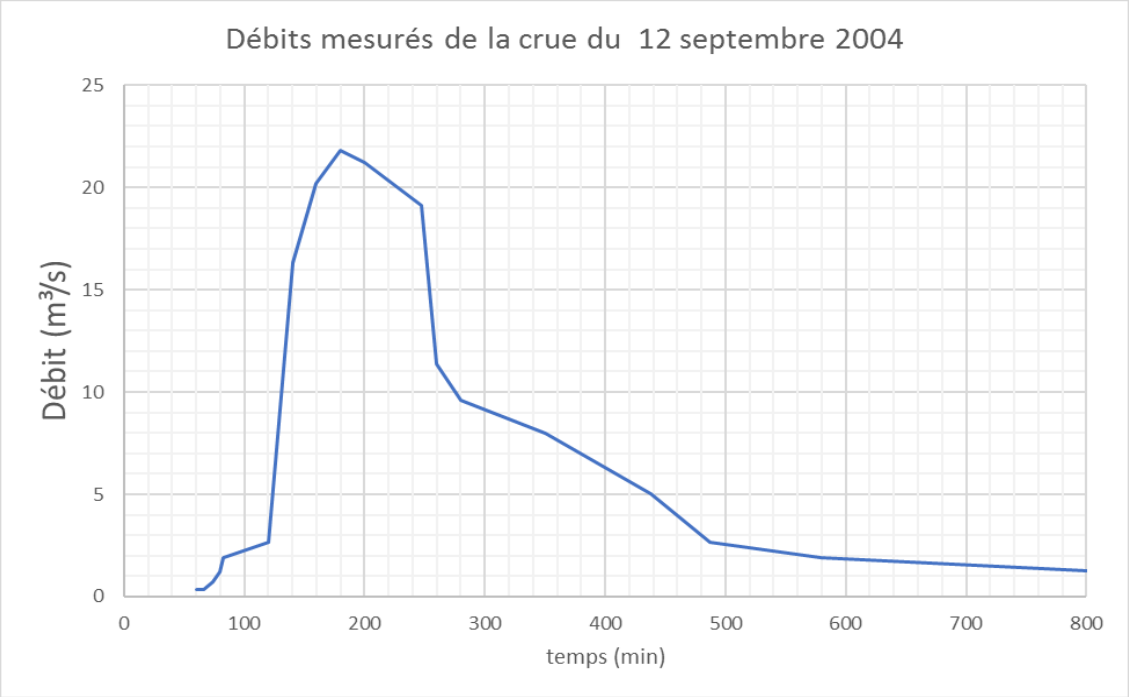


Figure 7 : Hydrogramme de la crue du 12 septembre 2004 à la station de la Cadière

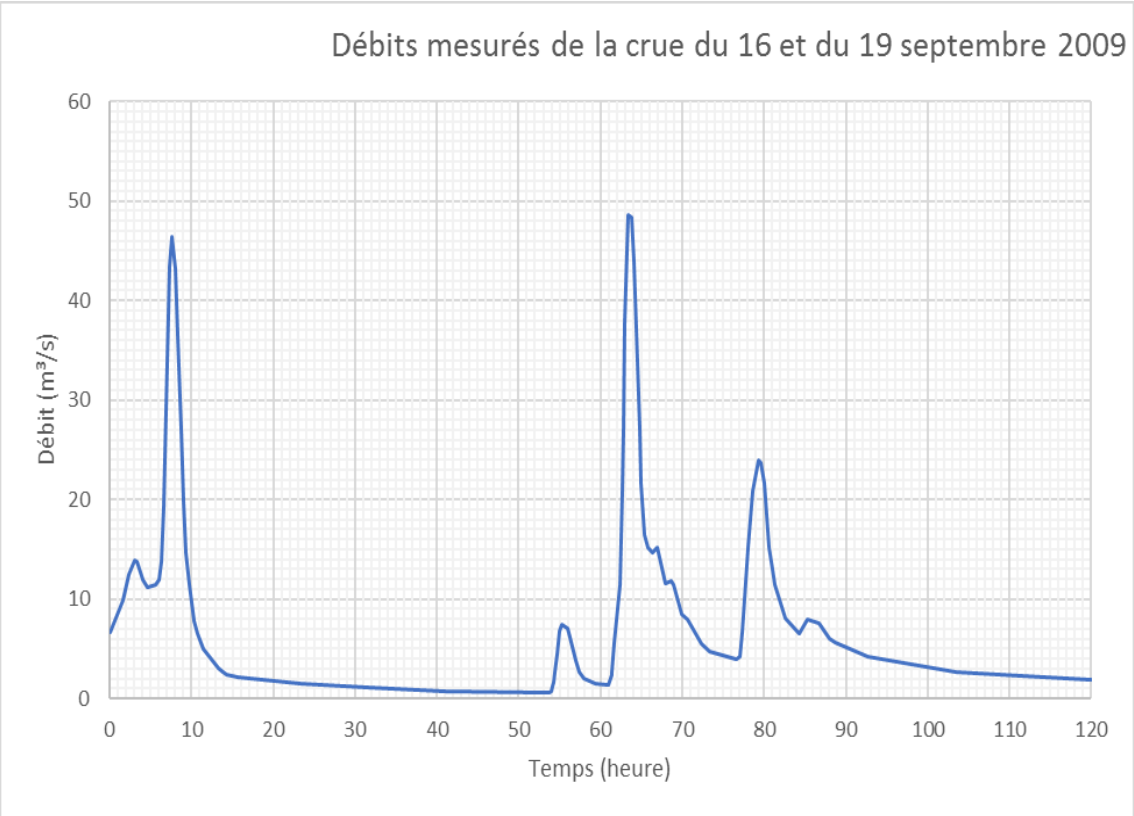


Figure 8 : Hydrogrammes de la crue du 16 et 19 septembre 2009 à la station de la Cadière

A la lecture des graphiques, les valeurs caractéristiques de ces crues sont données dans le tableau ci-dessous :

	Débit max (m^3/s)	**Débit moyen (m^3/s)**	**Durée caractéristique (Heures)**	**Coefficient de pointe**
22-sept-93	68	46.09	8.5	1.5
21-oct-94	40	28.16	12	1.4
08-sept-98	55.3	31.88	7	1.7
12-oct-00	40.3	24.63	4	1.6
19-sept-02	49.8	31.56	5	1.5
12-sept-04	21.8	17.1	8	1.3
16-sept-09	46.4	20.68	9.5	2.2
18-sept-2009	48.6	28.04	5	1.7

Tableau 3 : Valeurs caractéristiques des crues sur le bassin versant de la Cadière (définies à l'aide des graphiques)

L'ordre de grandeur de la **durée caractéristique,** des crues calculées à partir des mesures, est comprise entre 12h et 4h avec une moyenne de **7h.**

Le **coefficient de pointe** basé sur l'analyse des hydrogrammes réels est compris entre 1.3 et 2.2 avec une moyenne de **1.6**.

a) Estimation du débit décennal

On réalise un ajustement statistique à partir de la chronique des débits de 30 valeurs de débit maximal instantané de crue, entre 1984 et 2016, soit sur 32 années de mesures (source Crucal de la Banque hydro).

La courbe d'ajustement calculée à la station de la Cadière est présentée ci-après.

Le débit décennal calculé est 43.3 m^3/s (ajustement Gumbel).

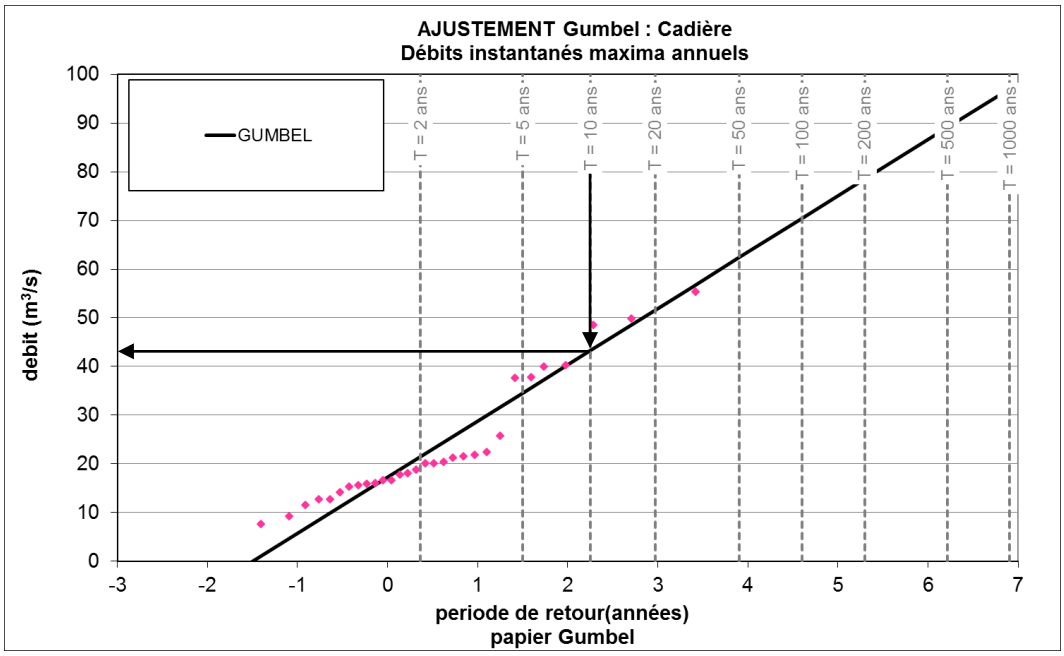


Figure 9 : Ajustement de Gumbel à la station de la Cadière

b) Estimation du débit centennal

<u>Estimation du gradex des pluies</u>

Le Gradex des pluies sur la durée caractéristique des crues retenues à la station de la Cadière est défini à partir des durées de retour de fortes précipitations (méthode du renouvellement) à la station de Marignane (annexe 1). Le produit, fourni par Météo France, est défini pour une durée de 6h, sur la base d'événements réels mesurés à la station de Marignane.

Les crues méditerranéennes sont caractérisées comme des événements courts et intenses. Ainsi la hauteur d'eau estimée sur 6h est sensiblement proche de la hauteur d'eau estimée sur la durée de 7h.

L'analyse statistique a été réalisé sur un échantillon de 155 valeurs pour 44 années traitées.

Durée de retour	Hauteur estimée	Intervalle de confiance à 70 %	
5 ans	62.4 mm	57.8 mm	67.0 mm
10 ans	75.1 mm	67.5 mm	82.6 mm
20 ans	89.5 mm	77.6 mm	101.5 mm
30 ans	98.9 mm	83.5 mm	114.2 mm
50 ans	111.7 mm	91.1 mm	132.3 mm
100 ans	131.2 mm	101.5 mm	161.0 mm

La valeur de Gradex a été déterminée entre les périodes de retour 10 ans et 100 ans.

La valeur de gradex des pluies est 16.7

Méthode du gradex

L'estimation du débit centennal est faite par application de la méthode du gradex.

La méthode du gradex est utilisée pour l'estimation des crues de fréquence rare. Elle se base sur l'hypothèse qu'à partir d'un certain seuil de précipitation (point pivot), les sols arrivent à saturation et la totalité de la pluie supplémentaire ruisselle et participe à la formation de la crue. Sur un graphique de Gumbel, la loi d'ajustement de débits suit donc celle des pluies.

L'estimation du débit de pointe ($Q_i(T)$) s'écrit :

$$Q_i(T) = Q_i(T_0) + Kp * gr(D) * \left(u(T) - u(T_0)\right)$$

Où u(T) est la variable de Gumbel : $u(T) = -\ln\left(-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right)$ avec :

- T0 : durée de retour pour le point pivot
- Gr (D) : gradex des débits sur la durée caractéristique D et grP(D) : gradex des pluies avec :

$gr(D) = \frac{S * grP(D)}{3.6 * D}$ où S est la superficie du bassin versant considéré (72.4km²)

- Kp coefficient de pointe de l'hydrogramme (Kp=Qmax/Qmoy)

Pour l'application de la méthode du gradex, on prend les hypothèses suivantes :

- Point pivot à T0=10 ans ; en l'absence de données de calage concernant la saturation des sols, c'est la valeur couramment admise pour les bassins versants de taille réduite.
- Durée caractéristique de crue D estimé sur la forme des hydrogrammes historiques mesurés : 7 heure
- Coefficient de pointe Kp estimé sur la forme des hydrogrammes historiques mesurés à 1.60

Le débit centennal calculé par la méthode du Gradex est de 223.7m³/s.

Gradex Progressif

La méthode du gradex progressif, développée par le CEMAGREF de Lyon s'inspire fortement de la méthode initiale. Cependant, elle traduit une évolution sans doute plus proche de la réalité physique des phénomènes dans le domaine des fréquences rares.

Elle suppose qu'il n'y a pas refus total de l'infiltration dès le débit de fréquence décennale, mais plutôt une augmentation progressive du coefficient de ruissellement.

La formulation permettant de traduire cette évolution progressive en fonction de la période de retour est :

$$\mathrm{VCX_D(T)} = \mathrm{VCX_D(T_{pivot})} + G_{PD} \times \ln\left(1 + \frac{G_{VCXd}}{G_{PD}} \times \frac{T - T_{pivot}}{T_{pivot}}\right)$$

avec :

- VCXD (T) : débit moyen calculé sur une durée caractéristique de crue D ou volume écoulé sur la durée D de période de retour T (m3/s)
- Gr : gradex des débits moyens (m3/s)

- GPD : gradex des débits moyens (VCXD) pour les périodes de retour inférieures à Tpivot (m^3/s)
- uT : variable réduite de Gumbel pour la période de retour T
- Tpivot : temps de retour du point pivot (ans), pris ici égal à 10 ans

Le débit centennal calculé par la méthode du gradex progressif est de 109m³/s.

Le graphique suivant représente les trois ajustements statistiques qui permettent de déterminer le débit décennal et le débit centennal.

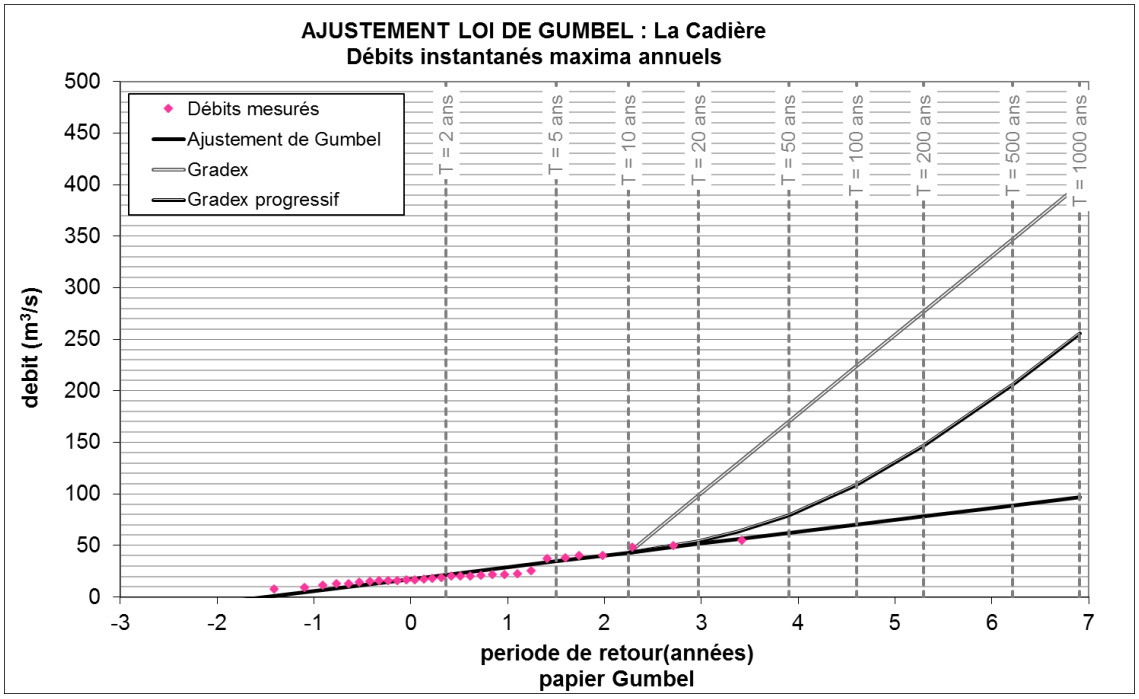


Figure 10 : Ajustement statistique à la station de la Cadière

2.2 PLUVIOMETRIE

2.2.1 Rappel des données issues de la bibliographie

Les analyses hydrologiques, issues de la bibliographie, sur le bassin versant sont hétérogènes. Les données sources sont :

- La région III de l'Instruction Technique de 1977 pour les études sur le territoire de MPM,
- La station pluviométrique ou directement les coefficients de Montana de la station de Marignane pour les études sur les communes de Marignane, Gignac-La-Nerthe ou encore Vitrolles,
- La pluie réelle de 1993 à la station d'Aix en Provence – Les Milles (Vitrolles).

Nous notons en particulier l'analyse hydrologique du SDEP de Vitrolles qui utilise deux types de pluviométrie afin de prendre en compte l'événement de référence le plus pénalisant. Ainsi il a été étudié :

- Une pluie centennale double triangle de durée totale 2h et de période intense 10min pour déterminer les ruissellements centennaux,
- La pluie historique de 22 septembre 1993 pour déterminer les écoulements et les débordements du Bondon et du Ravin d'Aix.

2.2.2 Présentation des données statistiques disponibles

Au regard des études antérieures sur le bassin versant de la Cadière et de la proximité de la station météo de Marignane, nous envisageons de proposer l'application des coefficients de Montana de cette station et / ou les pluies réelles enregistrées à ce poste.

Toutefois, afin de conforter ce choix, nous allons comparer les différentes données existantes. En effet, nous menons actuellement une étude sur le schéma directeur eaux pluviales sur le territoire Marseille Provence de la métropole AMP pour laquelle une partie du bassin versant de la Cadière est concernée. Dans le cadre de cette étude il a été réalisé une analyse hydrologique sur l'ensemble des données disponibles sur le territoire (Météo-France, Shyreg, postes DEAP, IT 77).

Dans le cadre de cette étude, les ajustements par la méthode du renouvellement réalisés à partir des mesures DEAP et les données Météo France nous ont permis de calculer une nouvelle référence pluviométrique pour les périodes de retour 1 an, 5, 10, 20, 50 et 100 ans et sur les pas de temps 30, 60, 120, 180, 360 et 720 minutes.

La construction de la nouvelle référence suit les étapes suivantes :

1) Sélection des valeurs valides pour le calcul du centile,
2) Calcul du centile 80% pour chaque pas de temps,
3) Calcul des coefficients de Montana pour chaque période de retour à partir des centiles calculés à l'étape 2.

Au regard de l'analyse des données il a été convenu :

- D'écarter les données des stations DEAP dont l'historique était inférieur à 20 ans pour le calcul des périodes de retour supérieures à 10 ans, 10 ans inclus, (soit les stations de Aygalades, Bonnaude, La Grave, Longchamp, Saint-Henri et Tourette),
- De conserver les données de ces stations pour le calcul des périodes de retour inférieures à 10 ans,
- D'écarter systématiquement les données de la station de Cassis, jugées peu fiables au regard des données aux autres stations Météo France,
- D'écarter systématiquement les données SHYREG qui sont déjà des données moyennées.

La nouvelle référence calculée est présentée sur les graphiques ci-après sur lesquels on représente également :

- Les valeurs DEAP mesurés y compris les valeurs écartées,
- Les valeurs Météo France (Marignane, Cassis, Marseille observatoire) y compris les valeurs écartées,
- Les données SHYREG,
- Les valeurs de l'instruction technique de 1977 (IT77).

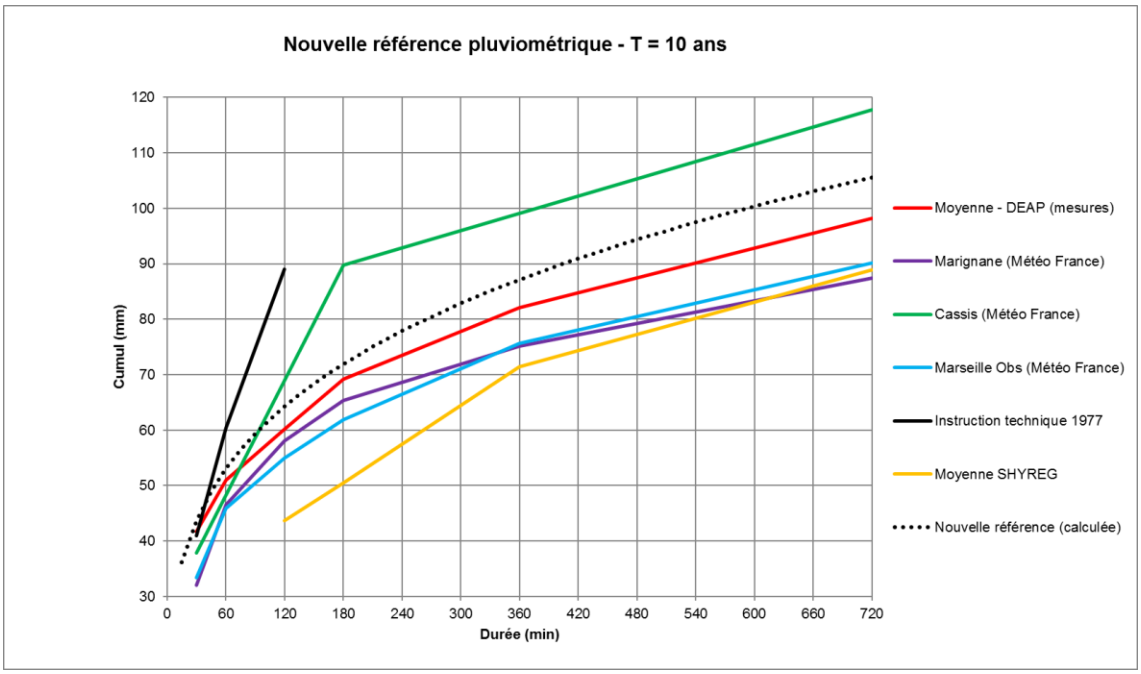


Figure 11 : comparaison des cumuls de pluie en fonction de la durée pour 10 ans

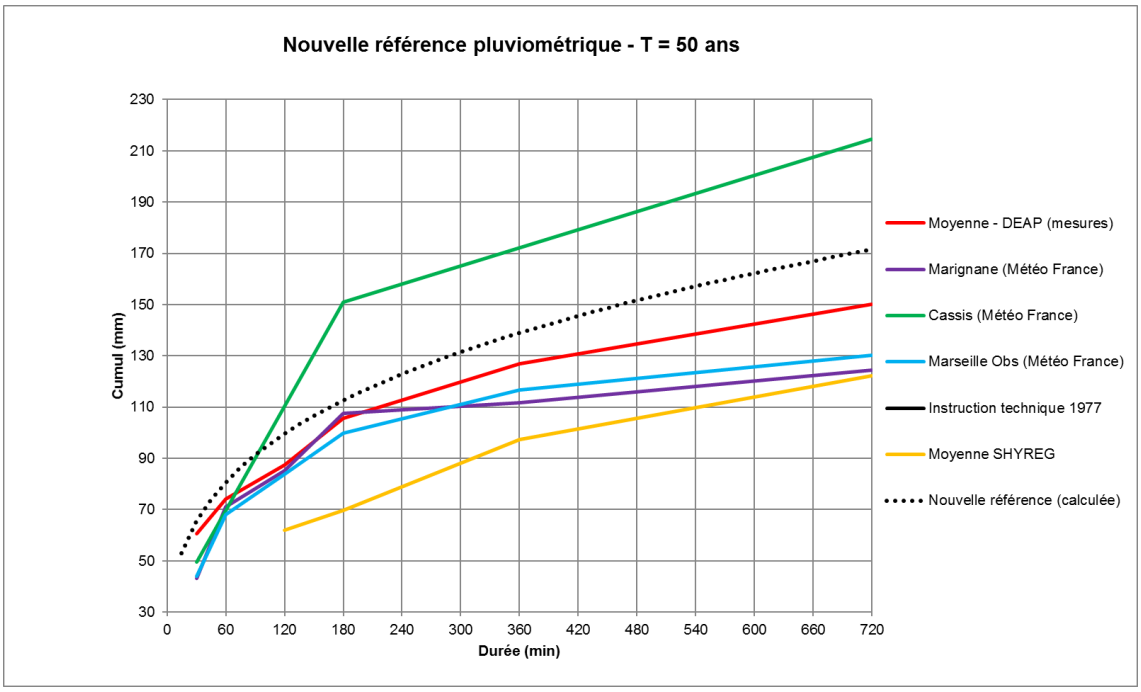


Figure 12 : comparaison des cumuls de pluie en fonction de la durée pour 50 ans

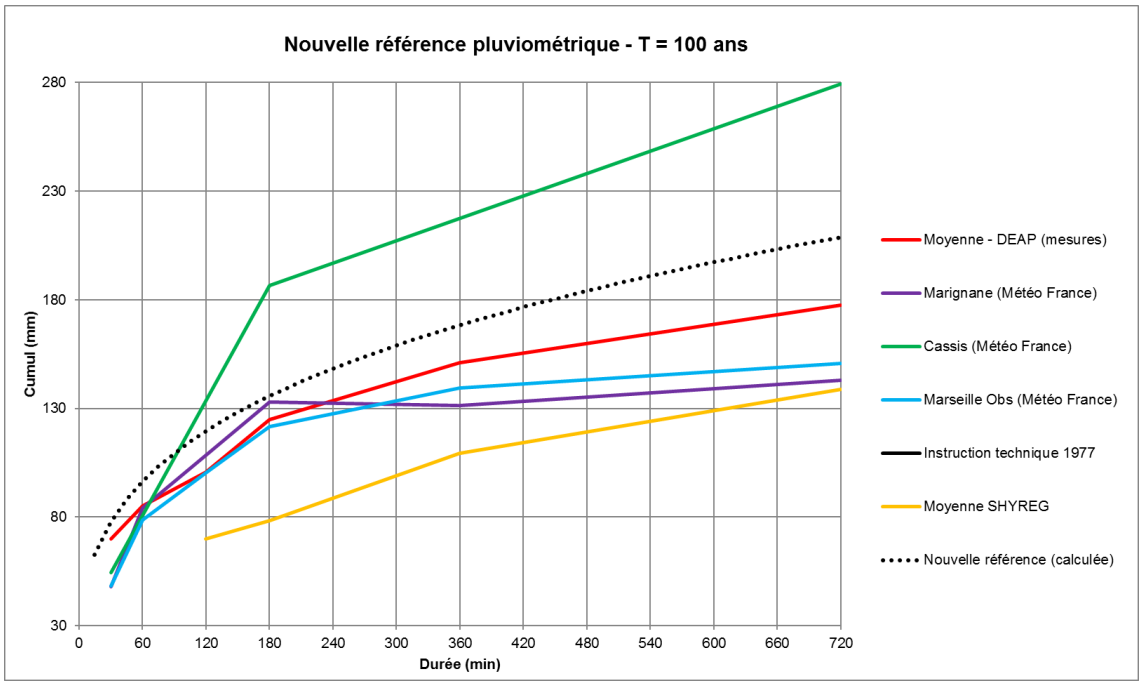


Figure 13 : comparaison des cumuls de pluie en fonction de la durée pour 100 ans

L'étude analyse également l'impact de la nouvelle référence pluviométrique sur le territoire.

Sur le graphique ci-dessous les hauteurs cumulées de la nouvelle référence sont comparées aux postes Météo France majoritairement utilisés précédemment sur le territoire (avec notamment Marignane) pour différentes durées de pluie, pour la période de retour 10 ans :

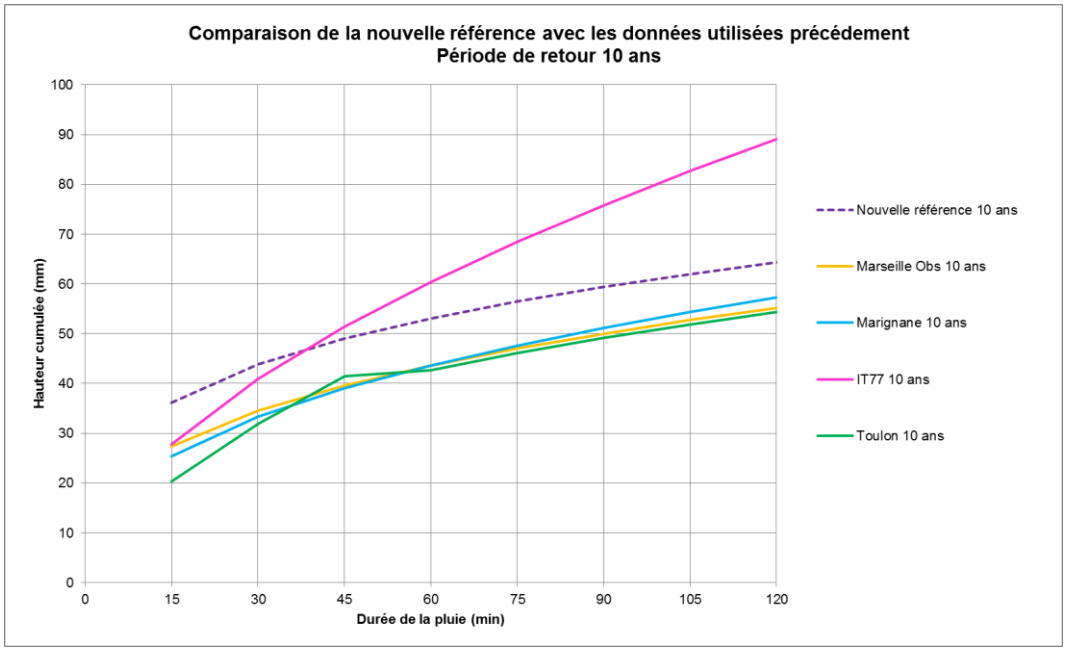


Figure 14 : comparaison des cumuls de pluie en fonction de la durée de 0 à 120min pour 10 ans

Les principales conclusions de cette analyse, dans l'étude du SDEP de AMP/MP, sont :

- La nouvelle référence engendre une hauteur cumulée supérieure de +10 mm en moyenne pour les durées de pluies comprises entre 15 min et 2 heures par rapport aux postes de Marignane, Marseille Obs et Toulon donc pour toutes les communes des secteurs est et ouest du territoire,
- La nouvelle référence engendre un écart de -25 mm par rapport aux données de l'IT77, pour les pluies de durée 2 heures,
- La nouvelle référence engendre un écart de +10 mm environ par rapport aux données de l'IT77, pour les pluies de durée 15 minutes,
- Le croisement des courbes IT77 et nouvelle référence se fait autour de 40 minutes.

La nouvelle référence permet donc de conserver une marge de sécurité pour toutes les pluies de durée inférieure à 1 heure donc pour tous les calculs de dimensionnement d'ouvrages et de travaux d'ampleur réduite (bassin versant de temps de réponse faible).

Pour tous les aménagements de grande ampleur et avec des temps de réponse de bassins versant supérieurs à 1 heure, la nouvelle référence permettra d'avoir une vision certainement plus réaliste par rapport à l'IT77.

Le choix de la nouvelle référence a été validé par AMP/MP pour le SDEP sur tout le territoire AMP/MP.

Dans le cas qui nous intéresse, l'analyse hydrologie sur le bassin versant de la Cadière, les graphiques précédents permettent de mettre en évidence que, quel que soit la période de retour, les hauteurs d'eau, calculées par les coefficients de Montana de la station de Marignane, sont inférieures de 10mm, pour des durées comprises entre 15min et 240min, par rapport au hauteurs calculées par la nouvelle référence.

Concernant la comparaison avec les données Shyreg, qui sont des données régionalisées, on constate que quelques soit la période de retour, les hauteurs d'eau calculées sont inférieures à celle de la station de Marignane. Elles deviennent comparables pour des pluies longues de durée 720min.

Le poste de la station météo de Marignane est situé sur l'aéroport d'Aix Marseille. Ainsi, la proximité de cette station sur le bassin versant et l'analyse hydrologique du SDEP confirme la cohérence de la prise en compte des données (pluviométrie, Montana…) de la station météo de Marignane.

Toutefois, le choix entre Marignane et la nouvelle référence sera proposé à la suite des tests de sensibilité lors de la modélisation.

A ce stade, les coefficients de Montana sur le poste de Marignane ont été commandés auprès de Météo France pour 2 intervalles de temps, en premier lieu pour des durées allant de 6 à 30 min, puis en second lieu pour des durées de 30 min à 12 heures. On trouvera en annexe 2 les fiches correspondantes.

Le tableau présenté ci-après présente les grandeurs obtenues pour différentes durées de pluies pour 10 et 100 ans.

Durée (min)	*Marignane Météo France*	
	10 ans	100 ans
10	15.5	22
20	25	41.5
30	34.5	61
60 (1h)	43	83
90	49	96
120 (2h)	54	105
240	66.9	133.2
360 (6h)	76.1	152.9
420	79.9	161.2

Tableau 4 : Hauteur d'eau pour différentes durées pour les périodes de retour 10 ans et 100 ans.

Ces données sont comparables aux données utilisées dans le cadre de l'étude du SDEP de Vitrolles lorsque sont utilisés les coefficients de Montana de Marignane :

Durée de pluie	**Période de retour (ans)**					
	2	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
6 min	9	10	11	12	13	14
15 min	12	17	20	23	28	31
30 min	14	25	31	38	49	58
1 h	17	38	49	62	86	109
2 h	21	47	59	74	98	121
3 h	23	51	65	81	107	131
6 h	28	60	75	93	123	152
12h	34	71	88	109	143	175
24 h	41	84	103	126	165	203

'ableau 1 : Quantiles de précipitations (en mm) sur la station de Marignane pour la période d'observation 1960-2009 (Source : Météo France)

Tableau 5 : quantiles de précipitations (mm) sur la station de Marignane pour la période d'observation 1960-2009 (source : SDEP Vitrolles)

2.2.3 Pluviométrie d'événements réels

a) Pluie du 22-23 septembre 1993

La pluie du 22 et 23 septembre 1993 est l'événement pluvieux le plus violent enregistré par les stations météorologiques sur le secteur d'étude (Marignane, Aix Galice…). L'occurrence de la pluie peut être considérée proche de la centennale (c'est d'ailleurs cette pluie enregistrée au poste d'Aix les Milles qui a été prise comme pluie de référence dans le SDEP de Vitrolles pour le Bondon et le ravin d'Aix).

L'épisode pluvieux de 1993 intervient après une période de sécheresse de 1 mois. Les graphiques suivants retracent la pluviométrie du mois d'août et de septembre 1993 (source météociel).

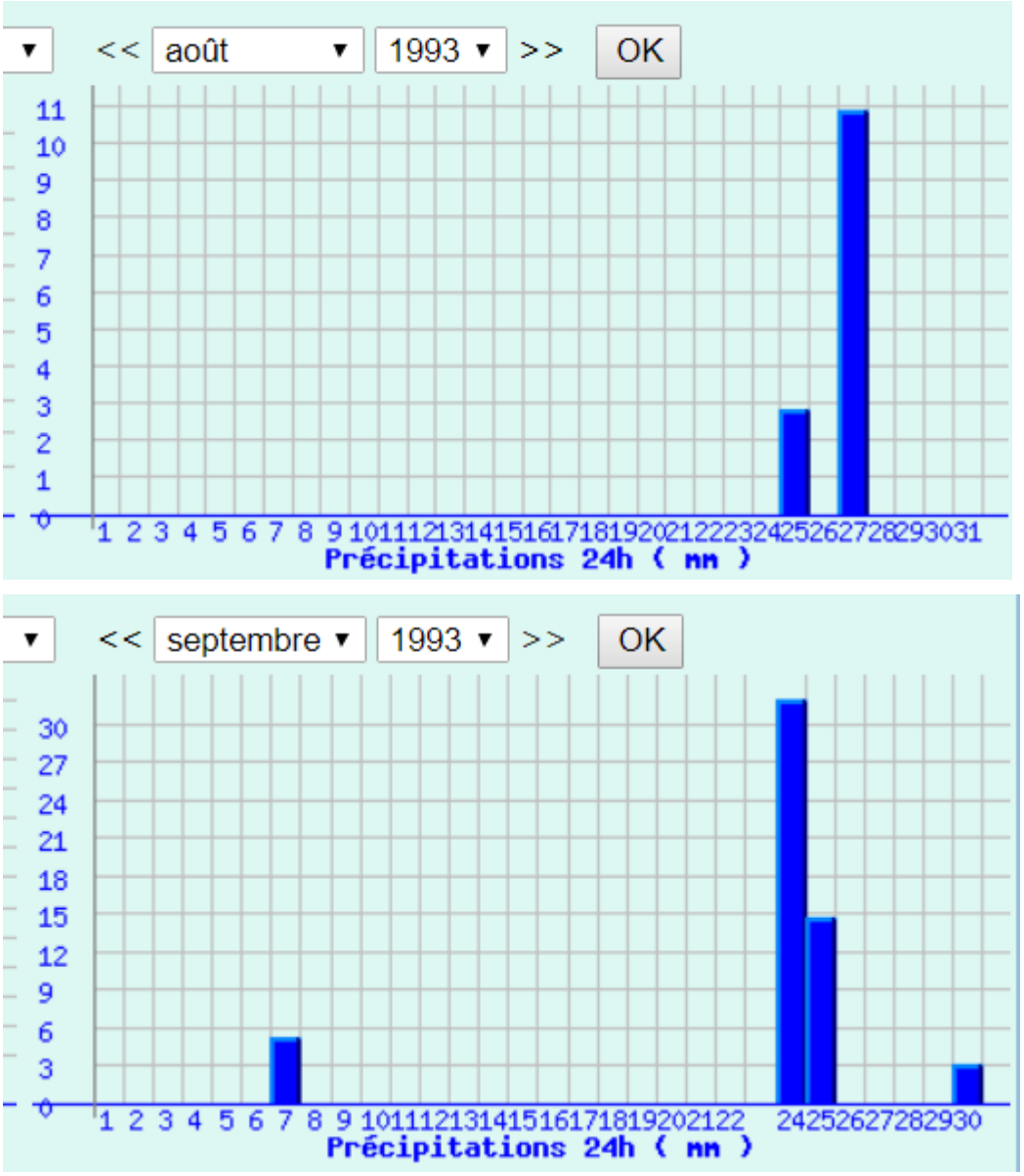
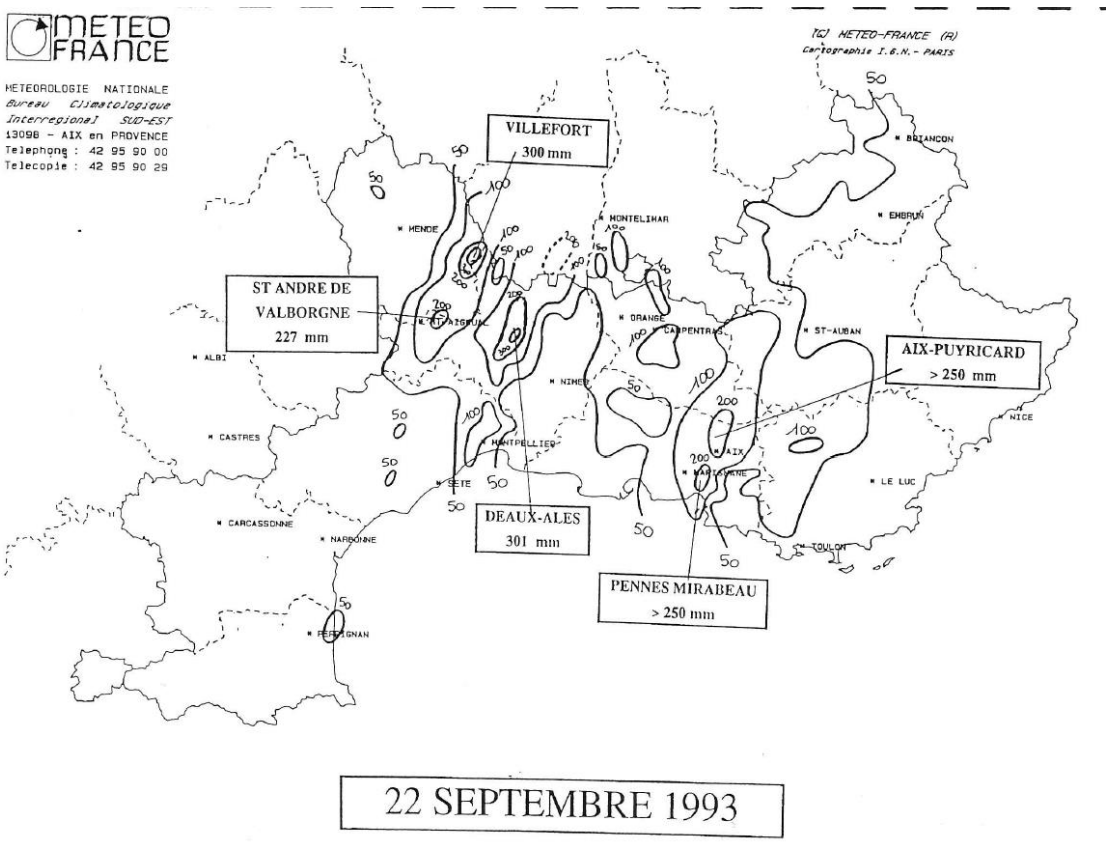


Figure 15 : Précipitation sur 24h de août et septembre 1993 à la station de Marignane (source : www.meteociel.fr)

Ainsi les sols devaient être relativement secs.

Un rapport de Météo France réalisé à la suite de l'événement (cf annexe 3) mentionne de grandes différences concernant la répartition spatiale des précipitations, ce qui se lit sur les iso-hyètes de la figure suivante.



I

Figure 16 : Iso-hyète du 22 septembre 1993 (source : étude hydraulique La Cadière, Le bondon Le Ravion d'aix – SIB- 1997)

En outre l'orage semble s'être déplacé d'Est en Ouest soit de l'aval vers l'amont.

Dans l'analyse pluviométrique du SDEP de Vitrolles, il ressort que l'événement de 1993 mesuré au poste d'Aix Les Milles, est l'événement de référence pour les crues du Bondon et du Ravin d'Aix.

Le tableau suivant indique les valeurs maximales de précipitations observées lors de cet événement sur différentes stations. Ces mesures peuvent être comparées aux quantiles de pluie centennaux à la station de Marignane (source SDEP Vitrolles).

Station\Durée	48h	24h	6h	3h	1h	30min	6min
Aix-Galice	255.0	222.0	218.2	206.8	129.9	70.7	12.8
Aix-Les Milles	232.7	189.0	178.2	169.4	100.8	53.0	12.4
Marignane	147.0	115.0	104.6	83.0	73.2	53.6	15.8
La Fare	139.4	103.8	93.8	92.2	81.2	53.6	13.0
Salon	108.2	54.2	45.4	44.2	32.2	26.4	7.6
Quantiles 100 ans Marignane	-	203	152	131	109	58	14

Tableau 2 : Valeurs maximales enregistrées lors de la pluie du 22 et 23 septembre 1993 (Source : Météo France)

Tableau 6 : valeurs maximales enregistrées lors de la pluie du 22 et 23 septembre 1993 (source : SDEP Vitrolles)

La pluviométrie de cet événement est représentée dans les graphiques suivants pour les stations de Marignane, Aix Les Milles et Aix en Provence. Il est important de noter que les 3 stations de mesures ont présentées des dysfonctionnements pendant l'épisode pluvieux. Les données ont donc été reconstituées par Météo France.

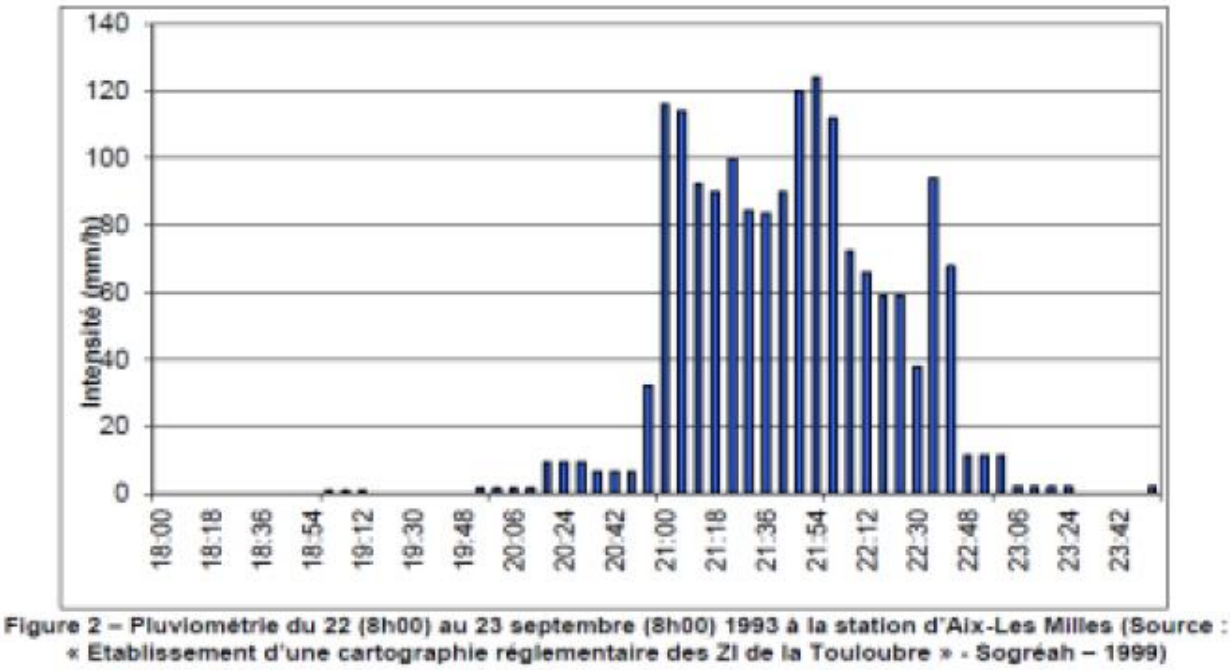


Figure 17 : Pluviométrie du 22 au 23 septembre 1993 à la station d'Aix-Les Milles (source SDEP 1999)

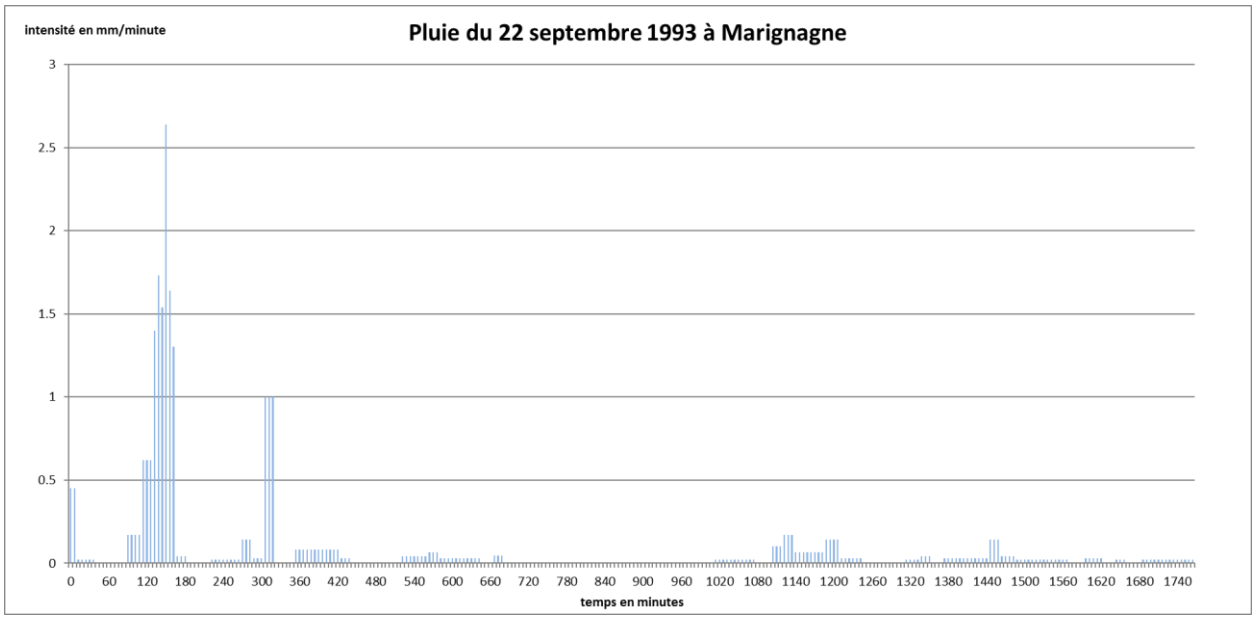


Figure 18 : Pluviométrie du 22 au 23 septembre 1993 à la station de Marignane (source délimitation des zones inondables : La cadière Le Bondon Le ravin d'Aix – SIB - 1998)

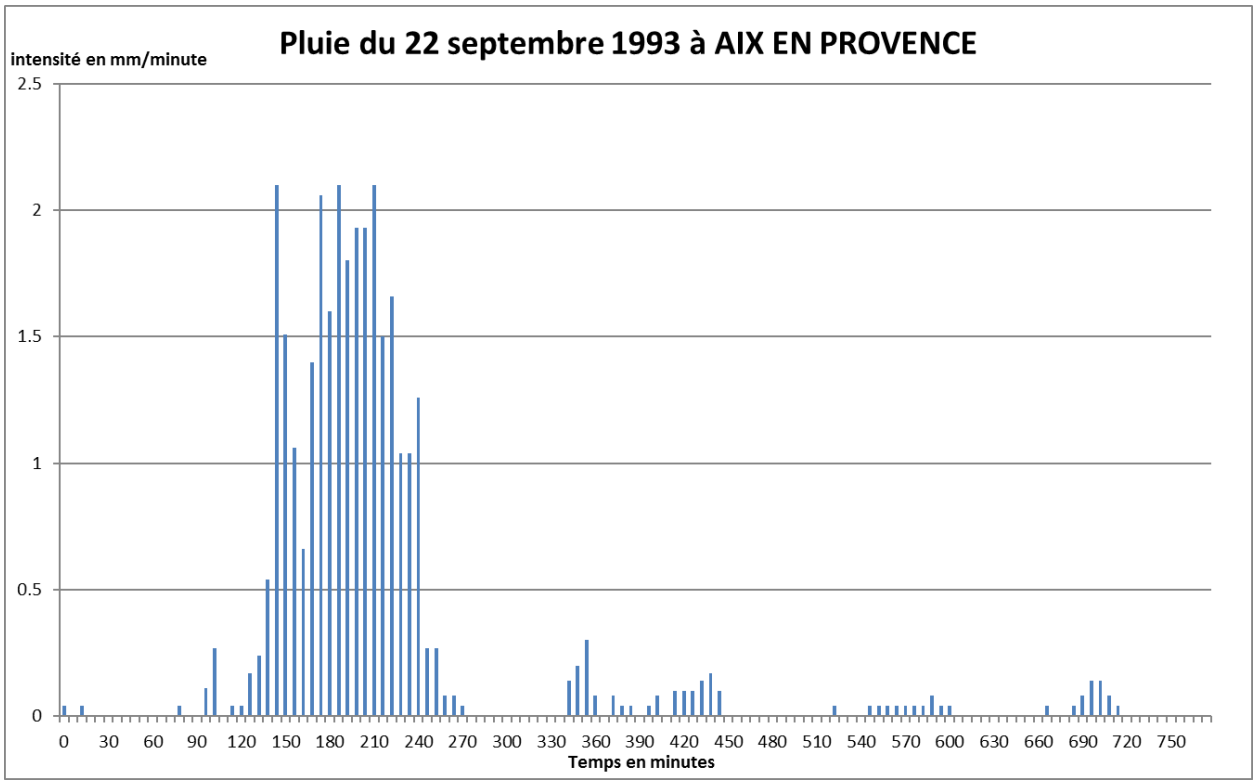


Figure 19 : Pluviométrie du 22 au 23 septembre 1993 à la station d'Aix en Provence (source délimitation des zones inondables : La cadière Le Bondon Le ravin d'Aix – SIB - 1998)

Les cumuls de pluies reconstitués pour cet événement sont de :

- 77.46mm pour le poste de Marignane sur 1h30, avec un pic de 15.84mm/min
- 162.05mm pour le poste d'Aix Les Milles sur 2h, avec un pic de 12.4 mm/min
- 171.12mm pour le poste d'Aix en Provence sur 2h30, avec un pic de 12.6mm/min.

Ainsi l'événement reconstitué sur la station de Marignane, en comparaison avec les deux autres stations, conduit à un cumul plus faible sur une durée plus courte mais avec un pic légèrement plus fort. Cette station est celle qui a rencontré le plus de problème pendant l'événement. Ainsi, nous proposons d'écarter cette station pour cet événement, ce qui est cohérent avec les autres études et notamment le SDEP de Vitrolles.

Les pluies reconstituées sur les stations d'Aix en Provence et d'Aix Les Milles sont comparables, en forme de hyétogramme, en durée, en intensité et en cumul.

Le hyétogramme le plus défavorable serait celui mesuré par la station d'Aix en Provence (Aix Galice). Or la prise en compte de cette pluie sur l'intégralité du bassin versant de la Cadière conduirait à des débits et des débordements non observés car :

- La station se situe en dehors du bassin versant
- La répartition spatiale de l'orage est très différente.
- L'orage de 1993 a présenté un déplacement d'Est vers l'Ouest soit de l'aval vers l'amont

Ainsi au regard de l'analyse précédente, nous proposons d'étudier, dans le cadre de la modélisation, la pluie d'Aix Les Milles ce qui permet d'être cohérent avec les hypothèses hydrologiques de l'étude du SDEP de Vitrolles et notamment sur les bassins versant du Bondon et du Ravin d'Aix.

b) Pluie du 10 septembre 2005

Le samedi 10 septembre 2005, le secteur de Vitrolles, Marignane, Saint-Victoret et Les Pennes Mirabeau a été touché par d'importantes précipitations. En 2h (15h30-17h30), il est tombé près de 56mm d'eau avec des intensités maximales observées, de courtes durées (quelques minutes) pouvant atteindre 135mm/h. La période de retour de cet événement a été estimé entre 5 et 10 ans. Cette pluie intense a entraîné de forts ruissellements pluviaux venant alors alimenter la Cadière et le Raumartin.

La pluie du 10 septembre 2005 a donc conduit à des débordements localisés sur le Raumartin et la Cadière en aval de l'Autoroute A7. L'événement s'est avéré plus important sur le bassin versant du Raumartin. La cartographie suivante représente les laisses de crues relevées pour cet événement.

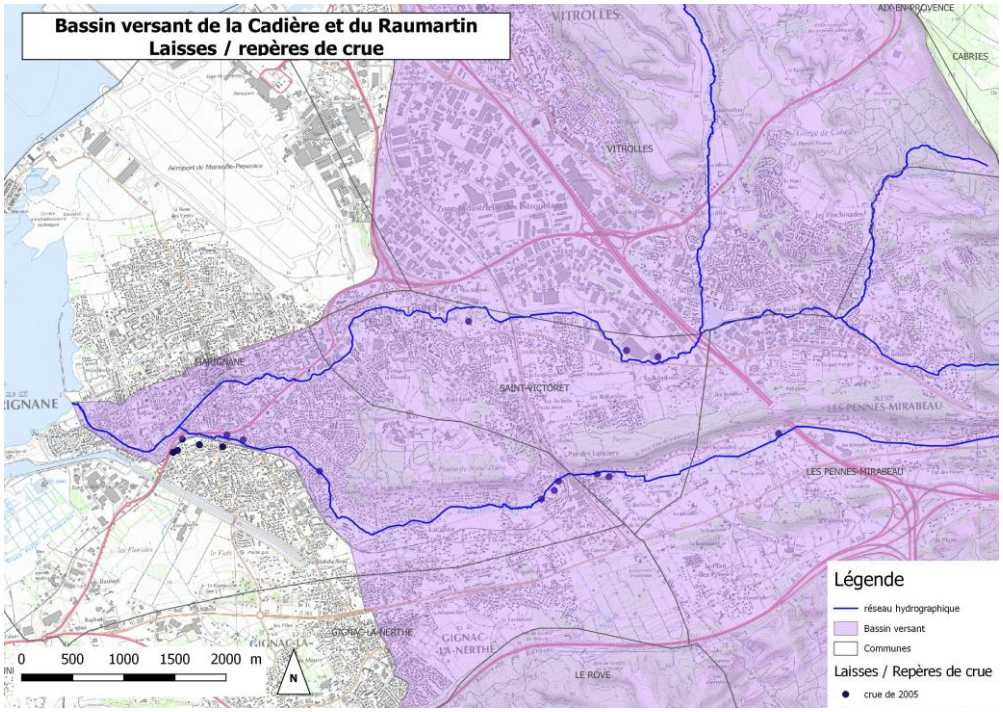


Figure 20 : Laisses de crues du 10/09/2005 (source DDTM 13)

On constate également que les jours précédents cet évènement, de nombreuses précipitations ont très probablement contribué à saturer une partie des sols ce qui a probablement conduit à une apparition plus rapide du ruissellement (source Experise hydraulique de la crue de la Cadière et du Raumartin du 10 septembre 2005 – Sogreah – septembre 2005).

La pluviométrie enregistrée à la station de Marignane pour le mois de septembre 2005 est représenté dans le graphique suivant. On peut effectivement constater des pluies importantes sur 24h, précédent l'événement, les 6 et 8 septembre 2005.

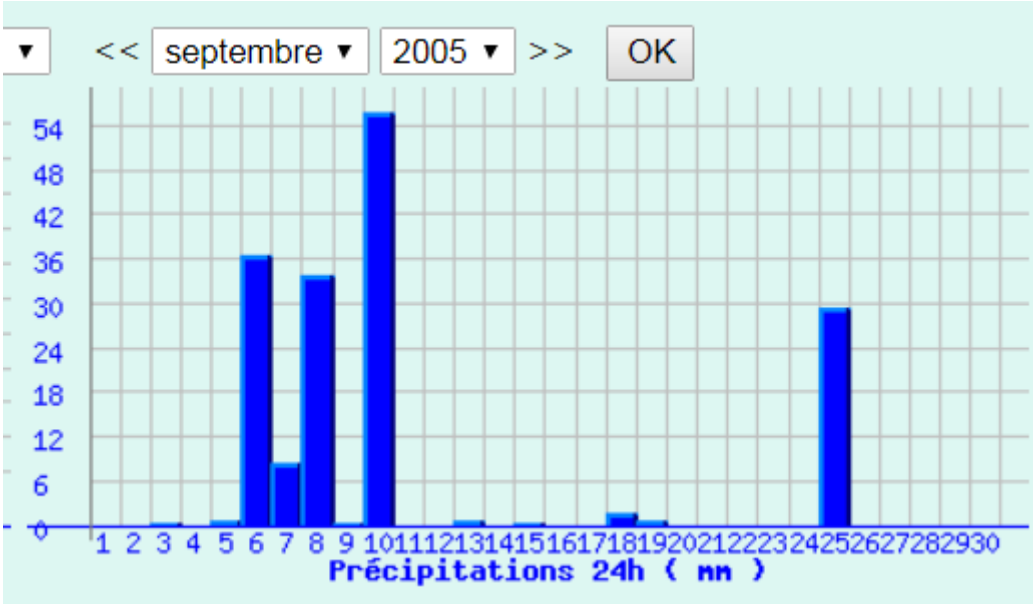


Figure 21 : Précipitation sur 24h de septembre 2005 à la station de Marignane(source : www.meteociel.fr)

La pluviométrie de cet événement à la station de Marignane (pas de temps 6min), est représentée dans le graphique suivant. L'événement est de faible ampleur par rapport à celui de 1993, cependant, l'analyse de cette pluie et des points de débordements pourront servir de point de calage pour la modélisation hydrologique et hydraulique.

Remarque : suite à un dysfonctionnement de la station hydrométrique, aucune mesure de débits de l'événement n'a pu être collecté (Banque Hydro).

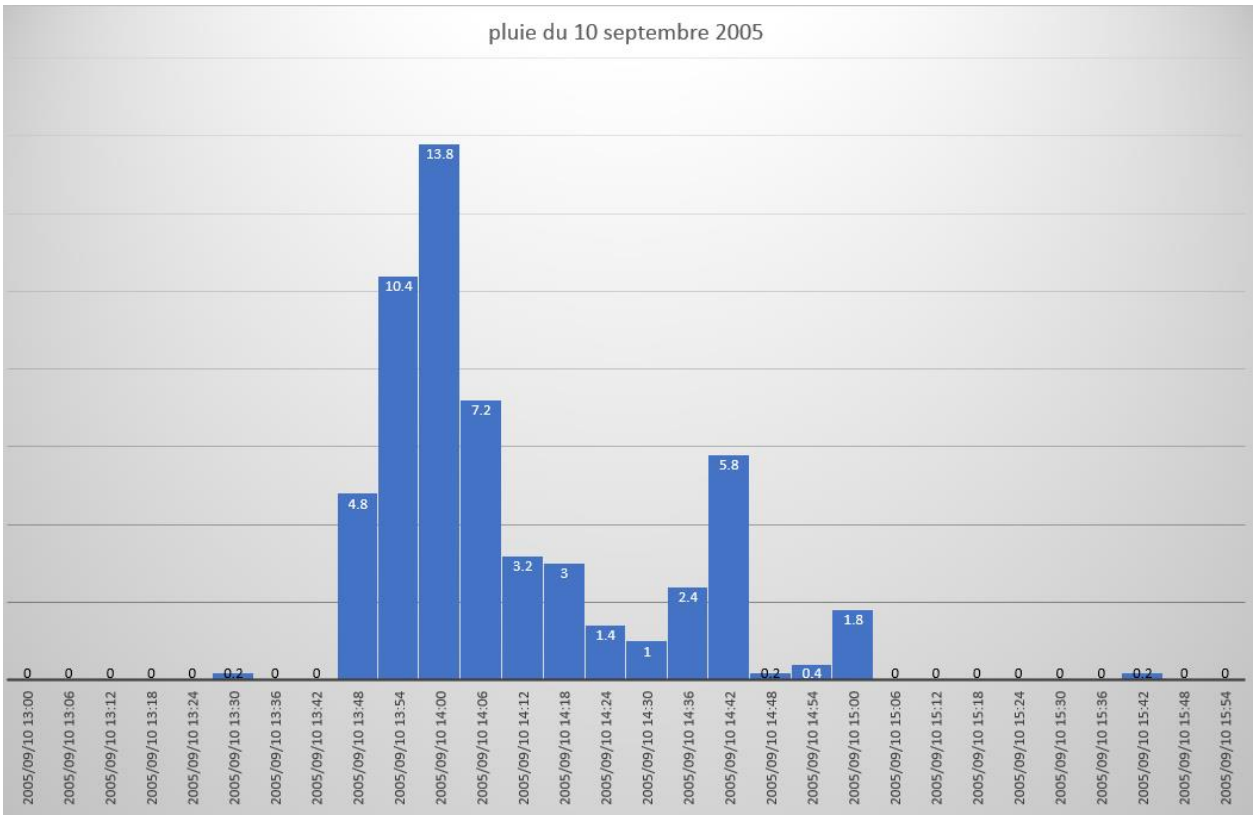


Figure 22 : Hauteur d'eau (mm) en fonction du temps pour la pluie du 10 septembre 2005

Nous avons commandé à Météo France les données pluviométriques des postes à proximité du bassin versant (Marignane, Aix Les Milles et Aix en Provence) afin de comparer les événements.

Le graphique suivant représente donc la pluviométrie (pas de temps 6min) de l'événement du 10 septembre 2005 sur les 3 stations de Marignane, Aix Les Milles et Aix ne Provence.

Pour cet événement, on constate que le poste Marignane enregistre une pluie courte avec un premier pic d'intensité dès le début de la pluie et un second pic plus modéré en fin d'événement. Les stations situées à Aix Les Milles et Aix en Provence, enregistrent un événement un peu plus long. Le premier pic d'intensité de pluie est plus faible que celui enregistré à la station de Marignane. La station d'Aix Les milles enregistre un second pic important alors que la station d'Aix En Provence n'indique plus de gros pic d'intensité, jusqu'à la fin de l'événement.

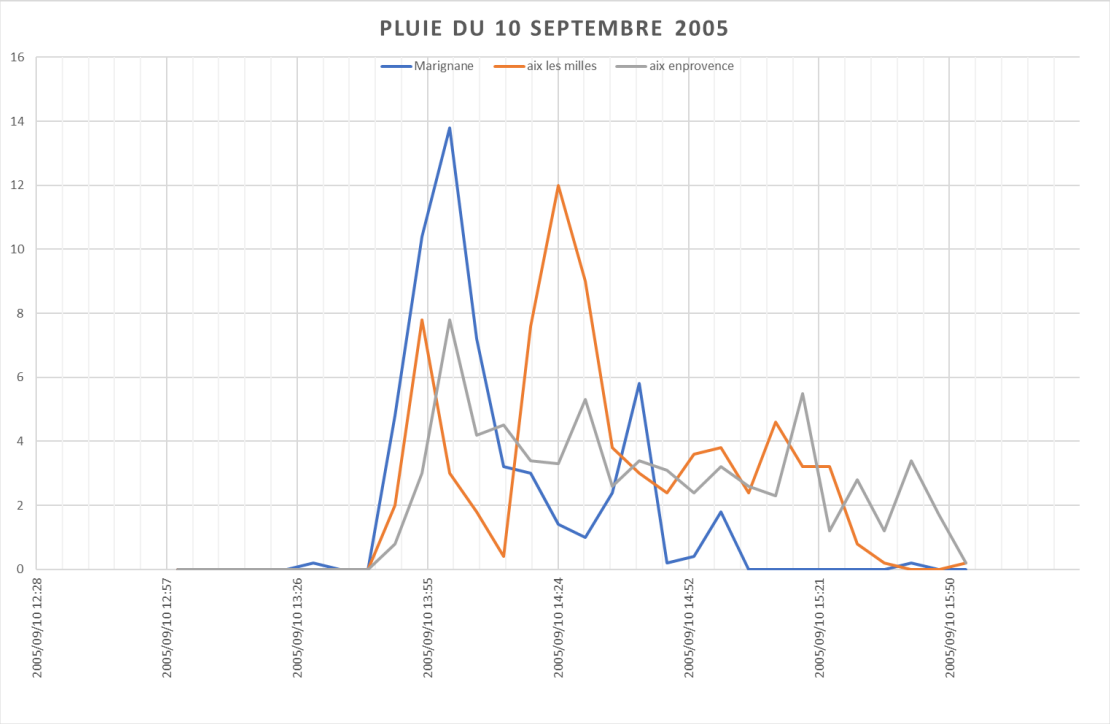


Figure 23 : Comparaison des pluies enregistrées aux postes de Marignane, Aix Les Milles, et Aix en Provence pour l'événement du 10 septembre 2005

Les cumuls de pluies enregistrés sur 3h (entre 13h et 16h) pour cet événement sont de :

- 55.8mm pour le poste de Marignane,
- 74.8mm pour le poste d'Aix Les Milles,
- 67.9mm pour le poste d'Aix en Provence.

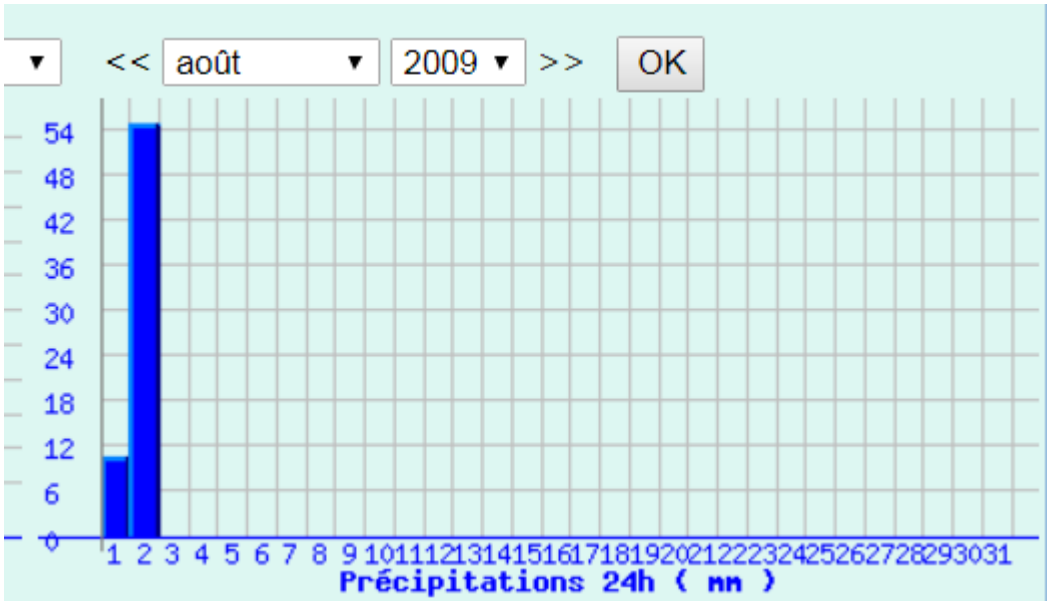
Ainsi pour cet événement Le poste d'Aix Les Milles enregistre un pic maximal d'intensité de même ordre de grandeur que la station de Marignane et un cumul de pluie plus important.

c) Pluies des 16 et 18 septembre 2009

Le suivi des hydrogrammes de la Cadière a permis de mettre en évidence un événement les 16 et 19 septembre 2009. Nous avons donc commandé les données de pluviométrie à Météo France afin de définir la pluie ayant engendré les hydrogrammes.

On constate que les jours précédents cet évènement, de nombreuses précipitations ont très probablement contribué à saturer une partie des sols.

La pluviométrie enregistrée à la station de Marignane pour le mois d'août et septembre 2009 est représenté dans la graphique suivant. On peut effectivement constater un orage début août et des pluies importantes sur 24h, précédent l'événement.



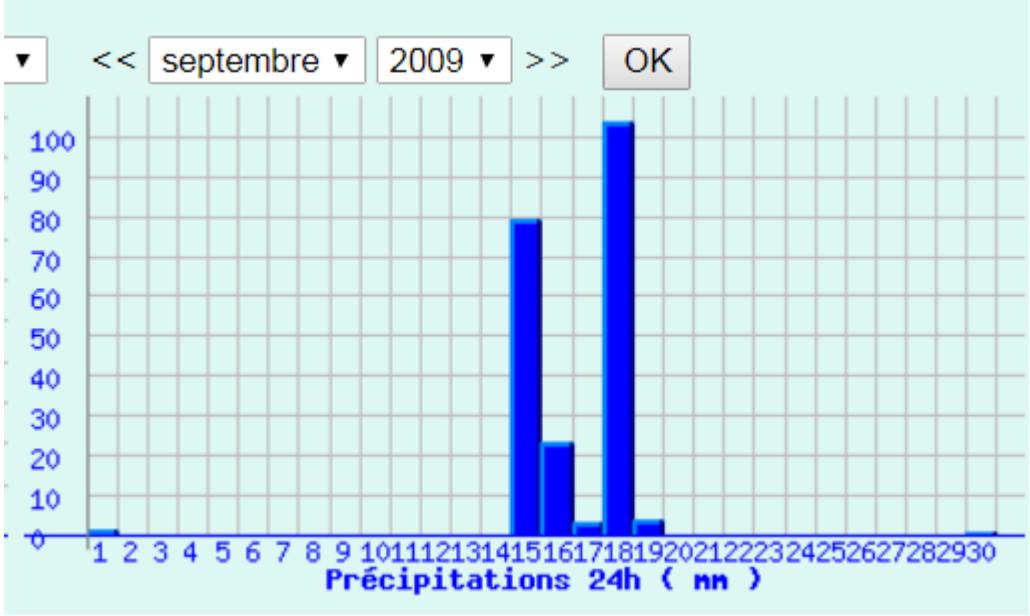


Figure 24 : Précipitation sur 24h d'août et de septembre 2009 à la station de Marignane(source : www.meteociel.fr)

Le graphique suivant reprend les hauteurs d'eau sur 6 min à la station de Marignane.

On constate que l'événement du 16 septembre est une succession de pluies peu intenses mais sur une durée assez longue de 8h (entre minuit et 7h30). Le cumul de pluie sur tout l'événement du 16 septembre est de 69.8mm.

L'événement du 18 septembre est marqué quant à lui par 4 pics de pluie entre 5h30 et 17h48 avec un pic maximal à 14h48 avec une hauteur de 12mm. Le cumul de pluie sur tout l'événement du 18 septembre est de 89.8mm.

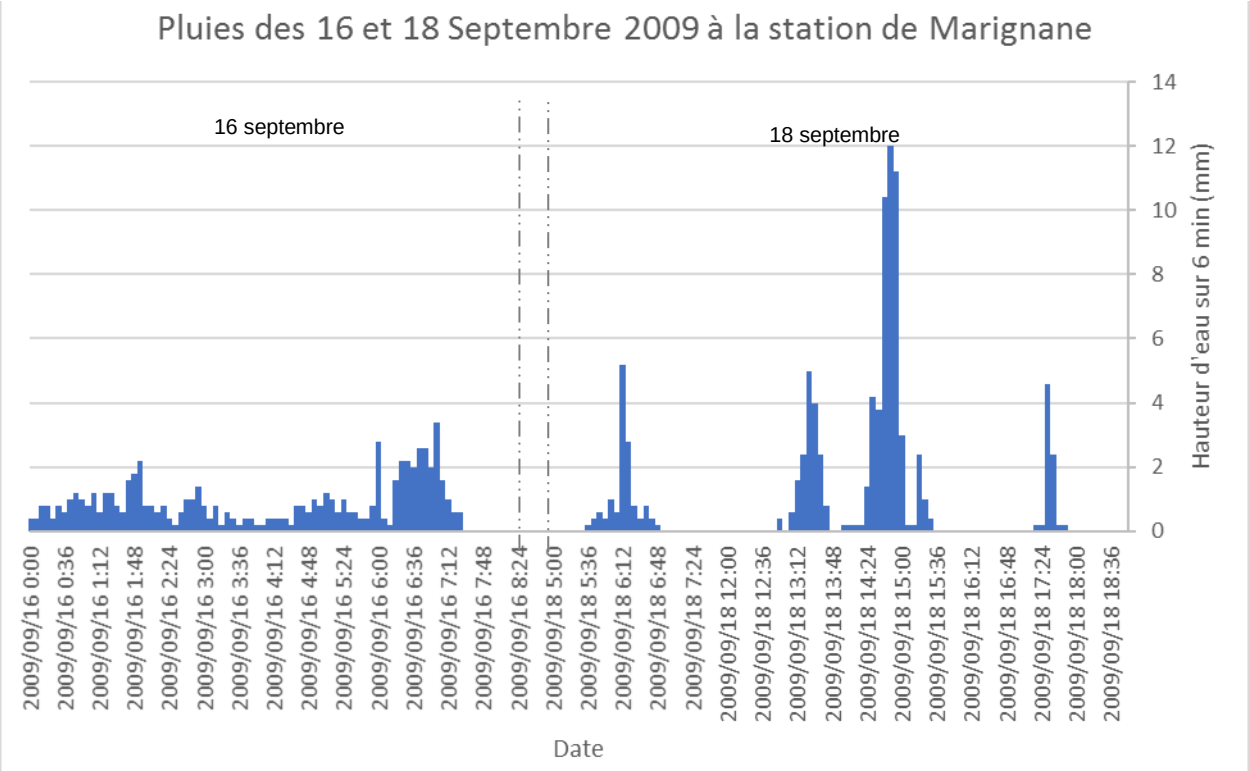


Figure 25 : Pluie des 16 et 18 septembre 2009 à la station de Marignane (données source Météo France)

Comme précédemment, nous avons commandé les données pluviométriques sur les trois stations les plus proches du bassin versant afin de réaliser une analyse critique des données mesurées.

Le graphique suivant représente donc la pluviométrie (pas de temps 6min) de l'événement du 18 septembre 2009 sur les 3 stations de Marignane, Aix Les Milles et Aix en Provence.

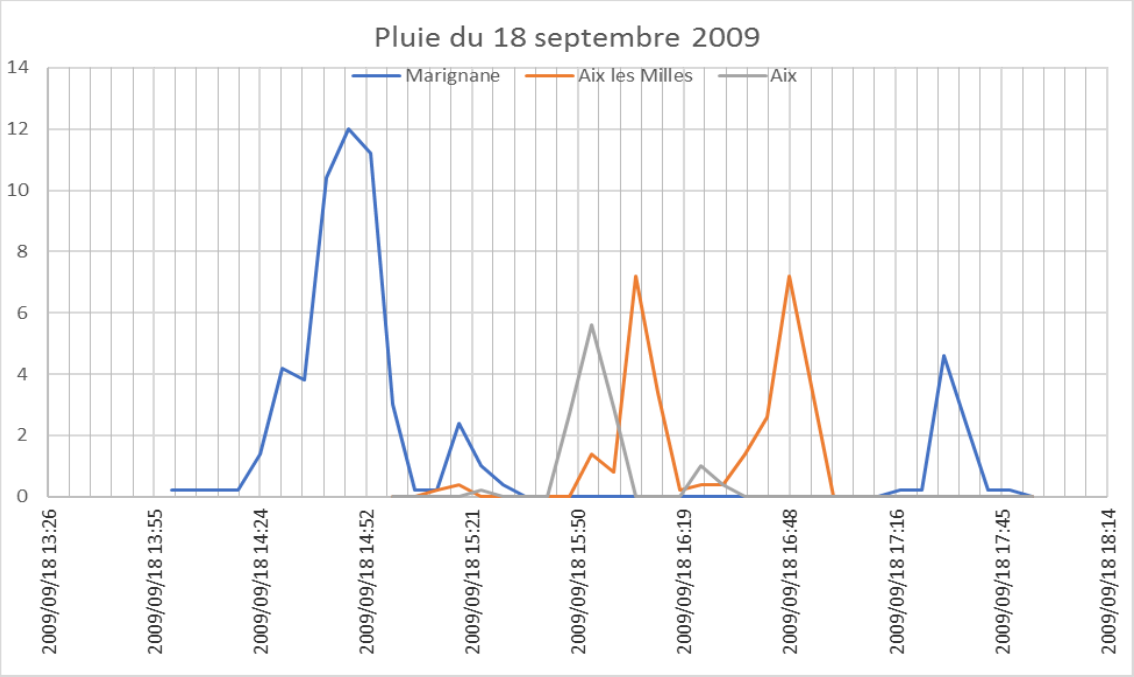


Figure 26 : Comparaison des pluies enregistrées aux postes de Marignane, Aix Les Milles, et Aix en Provence pour l'événement du 18 septembre 2009

Pour cet événement, les stations d'Aix les Milles et Aix en Provence enregistrent un événement qui débute plus tard dans l'après-midi, de plus faible intensité et de plus courte durée que celui enregistré sur la station de Marignane.

La station d'Aix Les Milles enregistre deux pics d'intensité identique de 7.2mm (sur 6 min), alors que la station d'Aix en Provence enregistre un seul pic de 5.6mm (sur 6 min).

Les cumuls de pluies enregistrés pour cet événement sont de :

- 68.2mm pour le poste de Marignane, entre 12h30 et 15h30 (durée :3h),
- 29.2mm pour le poste d'Aix Les Milles, entre 15h et 17h (durée : 2h),
- 12.8mm pour le poste d'Aix en Provence, entre 15h et 16h30 (durée : 1h30).

Ces données laissent donc penser que l'orage était localisé sur la partie aval du bassin versant. Ainsi la station de Marignane serait plus représentative de l'évènement sur le bassin versant et plus particulièrement sur le secteur aval.

2.3 UTILISATION DES MESURES

Les mesures disponibles présentées dans ce chapitre seront utilisées pour le calage du modèle hydrologique et hydraulique. On utilisera les données pluviométriques ainsi que les données limnimétriques et débimétriques.

3 DÉTERMINATION DES PLUIES DE PROJET

Dans le cadre de l'étude de l'aléa inondation des Aygalades, que nous réalisons actuellement, nous avons intégré un coefficient d'abattement afin de prendre en compte la répartition spatiale de la pluie. Cette réflexion peut également s'appliquer sur le bassin versant de la Cadière et du Raumartin.

3.1 DISCUSSION SUR L'HOMOGENEITE SPATIALE DES PLUIES EXTREMES

Une possibilité est d'appliquer de façon homogène sur l'ensemble du bassin versant la lame d'eau ponctuelle issue des données du poste météo choisi : en d'autres termes, la lame d'eau moyenne sur le bassin versant est prise partout égale à la lame d'eau issue des mesures ponctuelles.

Or, il est probable que cette méthodologie aboutisse à des débits totaux de période de retour supérieure à 100 ans.

L'objet du présent paragraphe est donc de chercher à définir la lame d'eau moyenne d'occurrence donnée sur l'ensemble du bassin versant, à partir d'une lame d'eau ponctuelle, en introduisant la notion d'abattement spatial.

Cette démarche s'est appuyée sur des travaux de chercheurs en hydrométéorologie, en cherchant les références les plus pertinentes parmi l'abondante littérature scientifique consacrée à ce sujet.

3.2 INTRODUCTION DE LA NOTION D'ABATTEMENT SPATIAL

L'analyse des données issues de réseaux denses de pluviographes d'une part, des données issues de l'imagerie radar météo d'autre part, montre que **l**a répartition spatiale des précipitations est d'autant plus hétérogène que la durée d'observation (pas de temps) est courte.

L'analyse des apports intermédiaires, impose un découpage en nombreux sous bassins versants, des bassins versants du Raumartin et de la Cadière. Ainsi, les temps de réaction, des sous-bassin versants, aux précipitations sera assez court (inférieur à 2 h), ce qui oblige à étudier les précipitations sur des pas de temps courts.

Dans ces conditions, extrapoler l'intensité ponctuelle mesurée sur un pluviomètre à l'ensemble du bassin conduit à surestimer les volumes ruisselés.

Afin de tenir compte de cette hétérogénéité, on introduit la notion de **coefficient d'abattement spatial.**

Le coefficient probabiliste d'abattement spatial est défini ainsi :

$$\alpha(S,T,\Delta t) = \frac{\text{Lame_précipitée_moyenne}}{\text{Lame_précipitée_ponctuelle}}$$

- Pour un bassin versant de surface S (en km²)
- Pour une période de retour T en années
- Pour une durée de précipitations Δt

Hydratec a effectué une recherche bibliographique sur les travaux de recherche s'étant intéressés à cette notion d'abattement spatial dans le contexte méditerranéen ; ces travaux sont cités en annexe 4.

Parmi ces travaux, une étude paraît particulièrement pertinente : il s'agit de l'étude « **Coefficient d'abattement spatial des pluies en région méditerranéenne adaptés aux petits bassins versants, Rapport de synthèse, Cereve, Gaume et al., février 2001 ».**

Synthèse des résultats de cette étude

(voir rapport de synthèse complet en annexe 3)

Cette étude s'appuie sur les travaux menés par Christian Roux en 1996 pour son travail de thèse : ces travaux ont établi une relation liant le coefficient d'abattement spatial à la surface du bassin versant et à la durée de la pluie pour des petits bassins versants situés en région parisienne.

L'objectif du travail de Gaume et al. est de transposer ces résultats aux régions méditerranéennes. Il s'appuie pour ce faire sur le réseau de pluviomètres de la ville de Marseille, qui est le plus dense de la région méditerranéenne en France.

Les données pluviométriques étudiées concernent la période 1991-1999.

Démarche et résultats de l'étude

L'étude s'attache tout d'abord à vérifier que les séries de données étudiées ne sont pas entachés de biais liés à des facteurs tels que le relief, l'éloignement de la mer : l'étude conclut à ce sujet : « *autant qu'il nous est possible d'en juger, les distributions d'intensités moyennes maximales sont homogènes sur le secteur couvert […] La série des données pluviographiques de Marseille apparaît donc particulièrement bien adaptée à une étude des coefficients d'abattement*. »

L'étude établit ensuite que, pour des périodes de retour supérieures à 6 mois, la démarche proposée est valide, et que les conditions permettant alors d'affirmer que le coefficient d'abattement spatial est relativement indépendant de la période de retour sont vérifiées.

L'étude détermine alors, par l'analyse détaillée de la pluviométrie affectant des sous-parties du secteur d'étude de tailles diverses, une relation reliant le coefficient d'abattement α à la surface **S** et au pas de temps Δt (durée de la pluie étudiée).

Cette relation est

- $\alpha = S^{(-0.064+0.014\,ln(\Delta t)}$, pour S>30 km²
- $\alpha = S^{-0.056 + 0.016\,\ln(\Delta t)}$, pour S<30km²

Unités : dt en heures et S en km²

Le rapport conclut en comparant ce résultat à l'analyse des images radar de 2 évènements (26/081996 et 7/09/1998). Elle conclut que « *pour les petits pas de temps – typiquement quelques dizaines de minutes – la valeur du coefficient d'abattement semble être essentiellement déterminée par le déplacement des cellules orageuses intenses* ».

La relation établie par Gaume et al. semble utilisable pour la problématique qui nous concerne :

- Pour notre cas, les différents paramètres sont situés dans son domaine de validité (surface du bassin versant, la période de retour et la durée de pluie) ;
- Elle est accompagnée d'un travail rigoureux d'analyse scientifique de la validité du modèle statistique utilisée ;
- Elle a été calée sur les données des pluviomètres de Marseille, situés à proximité du bassin versant de la Cadière.

Cette relation est :

$\alpha = S^{(-0.064+0.014\ln(\Delta t))}$, pour S > 30 km², (formule 1)

$\alpha = S^{(-0.056+0.016\ln(\Delta t))}$, pour S < 30km² (formule 2)

En application de la relation dans le cas du bassin versant de la Cadière au droit de la station hydrométrique (S= 72.4km²), le coefficient d'abattement serait de :

- 0.78 pour une durée intense de 90min
- 0.76 pour une durée intense de 60 min

Remarque : Dans le cadre de l'étude des Aygalades, il a été retenu **un coefficient d'abattement de 0.80** pour S= 50 km² et Δt = 1.5h = 90 minutes (durée de pluie intense).

L'analyse des grands sous-bassins versant, conduit aux coefficients suivants :

			Coeffcient abattement		
			Durée intense (heure)		
BV	Surface (km²)	Formule	0.5	1	1.5
Raumartin	27.145	2	0.8	0.8	0.8
Bondon	17.5	2	0.8	0.9	0.9
Ravin d'Aix	2.74	2	0.9	0.9	1.0
Cadière (à la confluence avec le Raumartin)	46.9	1	0.8	0.8	0.8
Cadière à la station hydro	72.4	1	0.7	0.8	0.8

Tableau 7 : coefficients d'abattement spatial en fonction de la durée intense par grands sous-bassin versant

Le coefficient d'abattement moyen quel que soit la durée intense est de 0.8, comparable au coefficient d'abattement appliqué dans l'étude des Aygalades.

Il apparaît raisonnable de considérer un abattement de 0.8 à appliquer à la pluie ponctuelle de période de retour 100 ans pour la transformer en lame d'eau moyenne d'occurrence centennale sur l'ensemble du bassin versant.

C'est cette hypothèse qui sera appliquée pour la suite des calculs hydrologiques.

3.3 HYETOGRAMMES DES PLUIES DE PROJET

L'analyse suivante sera complétée et affinée lors de la modélisation. En effet la modélisation permet de réaliser des tests de sensibilité sur la durée (et éventuellement la forme) de la pluie afin de déterminer l'évènement qui maximise les débits de crue.

Dans le présent chapitre nous proposons des pistes de réflexion au regard des études existantes sur le territoire, des hyétogrammes des crues réelles et de notre expertise hydrologique.

Ainsi en première approche, au regard des études existantes (et notamment du SDEP de Vitrolles) et des éléments pluviométriques recherchés, nous proposons, lors de la phase de modélisation, l'analyse des pluies de projet, suivantes :

- Pluie de forme double triangle
- Pluie de durée totale 2h : ce qui correspond à la durée moyenne des événements orageux sur le secteur d'étude
- Pluie avec une période intense de 10min (SDEP Vitrolles : cette pluie fait réagir les petits bassins versant urbain), ou plus longue (entre 30min et 1h) afin de faire réagir les bassins ruraux.
- La pluie historique réelle de 1993 à la station d'Aix Les Milles (plus forte crue connue)

Des tests de sensibilité seront réalisés lors de la modélisation sur la durée de la pluie afin d'affiner les hyétogrammes projet pour déterminer l'évènement qui maximise les débits de crue. Ainsi il pourra être testé également des pluie plus longue (par exemple de durée de 270min).

Les pluies caractéristiques seront retenues **après application de l'abattement spatial de facteur 0.8.**

L'aléa inondation pour une période de retour donnée correspondra alors à l'enveloppe maximale des hauteurs d'eau calculées pour ces différents scénarios de pluies, avec à priori des hauteurs d'eau maximales obtenues pour les pluies de courte durée sur les petits bassins versants et pour les pluies de plus longue durée sur les grands bassins versants.

Les hydrogrammes de la **crue exceptionnelle** seront définis par homothétie des hydrogrammes centennaux calculés par le modèle pluie débit à l'exutoire de chacun des sous bassins versants, avec un rapport de 2 sur les débits de pointe.

4 CONSTRUCTION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE

4.1 PRESENTATION DU BASSIN VERSANT

L'altitude du bassin versant de La Cadière et du Raumartin varie entre 250 mNGF au sud-est (chaîne de La Nerthe) du bassin versant à 0 mNGF à l'exutoire dans l'étang du Bolmon.

Il présente des secteurs de très forte pente au nord et au sud et des secteurs de pente quasi nulle en aval en milieu très urbanisé. On notera la présence de la chaîne des Pennes Mirabeau séparant le bassin versant de la Cadière et du Raumartin.

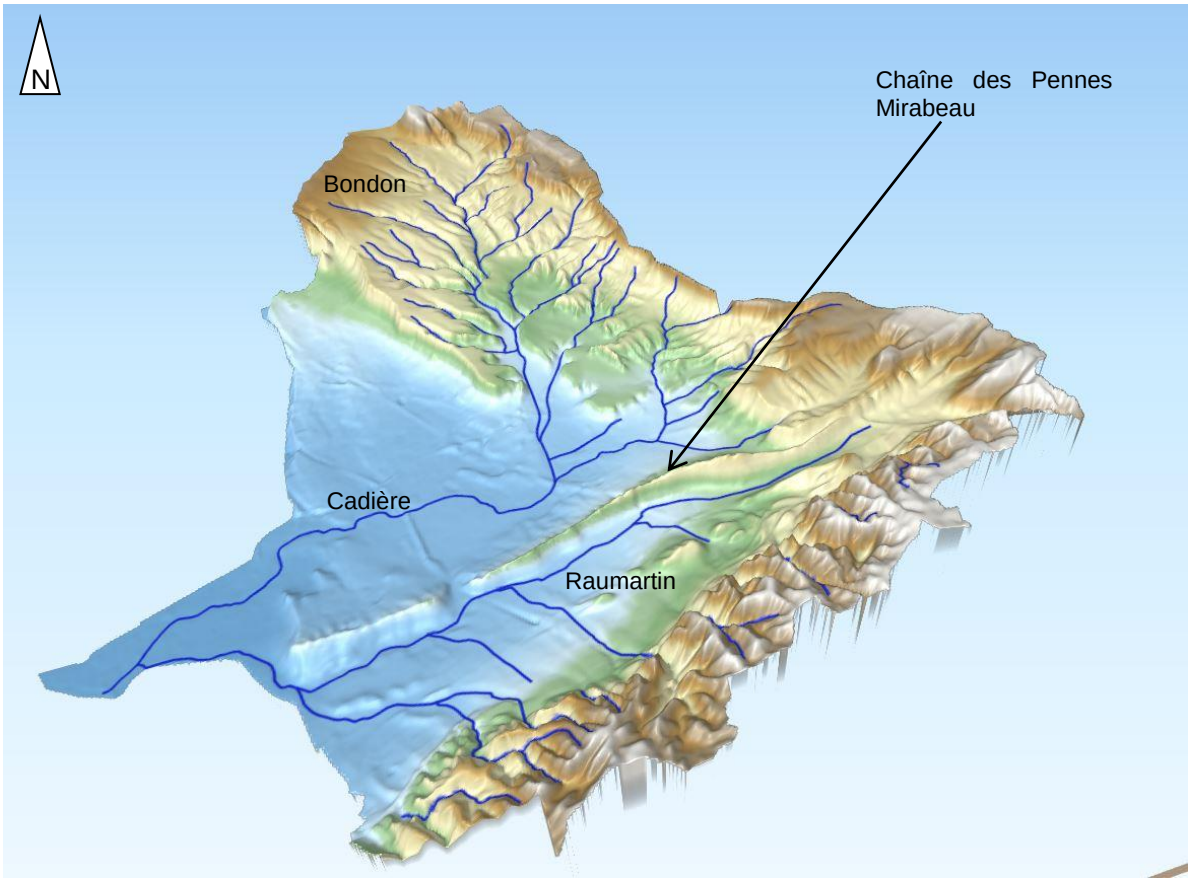


Figure 27 : Relief du bassin versant de la Cadière et du Raumartin

4.2 CARACTERISATION DES SOUS-BASSINS VERSANTS

4.2.1 Caractéristiques générales

Le découpage en sous bassin versant repose essentiellement sur le MNT. Les bassins versants déterminés ont ensuite été confronté localement aux données existantes issues du SDEP de Vitrolles et SDEP de l'AMPM. Localement, la mission de terrain a permis de déterminer plus précisément les limites des bassins versants. La découpe en sous-bassin versant permet d'affiner la description de l'ensemble du bassin versant de la Cadière et du Raumartin afin de détailler la modélisation hydraulique. Ainsi le bassin versant est découpé en 136 sous-bassins versants, répartis de la manière suivante :

- 21 sous-bassin versant sur le Bondon (à la confluence avec La Cadière)
- 4 sous-bassin versant sur le ravin d'Aix (à la confluence avec le Bondon)
- 6 sous-bassin versant sur le ruisseau de la Marthe (à la confluence avec la Cadière)
- 51 sous-bassin versant sur la Cadière : depuis la source de l'Infernet (10 sous-bassin versant) à l'exutoire, en prenant les écoulements sur la commune de Vitrolles (7 sous-bassin versant)
- 54 sous-bassin versant sur le Raumartin (à la confluence avec la Cadière)

Chaque sous-bassin versant a été caractérisé par :

- Sa surface,
- Sa pente,
- Sa longueur,
- Son coefficient d'imperméabilisation.

Le coefficient d'imperméabilisation a été déterminé en zonant les surfaces dont l'occupation du sol est de même type (urbanisation très dense, dense, peu dense…) à partir de la base de données Corine Land COVER. Des ajustements localisés ont ensuite été réalisés sur la base des orthophotoplans.

Le coefficient d'imperméabilisation moyen par sous bassin versant correspond à la moyenne pondérée par la surface des coefficients d'imperméabilisation élémentaires.

Une table de correspondance, entre état de l'urbanisation et imperméabilisation, a ensuite été employée. Cette table a été déterminée à partir de valeurs classiques couramment utilisées dans des modélisations pluie-débit dans le Sud-Est de la France.

Occupation du sol	Coefficient d'imperméabilisation
Zone de bois ou forêt	0.05
Zone naturelle	0.2
Surface agricole et naturelle	0.25
Surface agricole	0.4
Zone mixte (naturel et urbain)	0.7
Zone industrielle / commerciale	0.85
Tissus urbain discontinu	0.85
Habitat très dense, centres-villes, parkings	0.90

Tableau 8 : table de correspondance entre occupation du sol et coefficient d'imperméabilisation

Le découpage en sous-bassins versant mis à jour est présenté sur la figure ci-après.

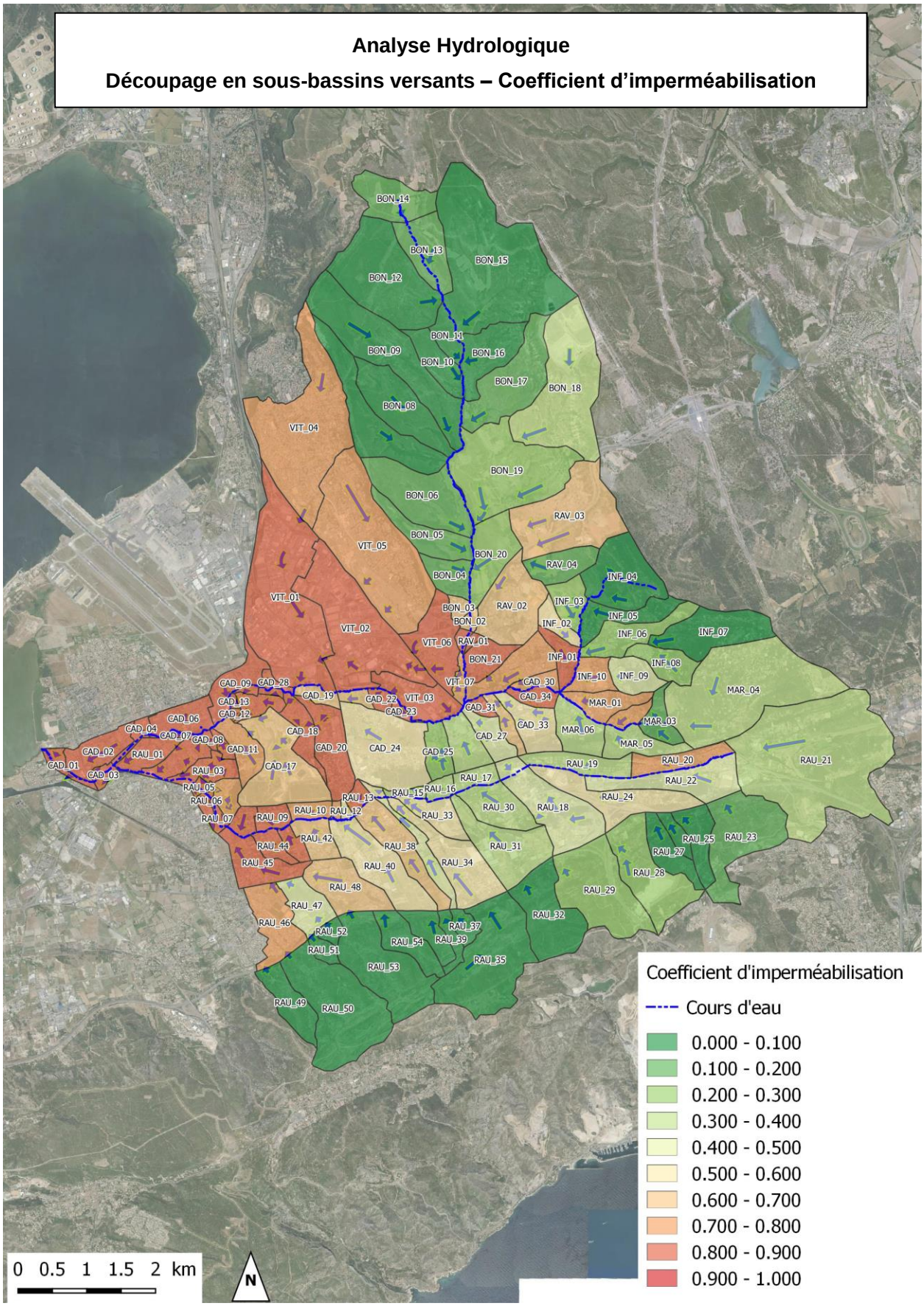


Figure 28 : Découpage en sous bassin-versant et coefficient d'imperméabilisation

4.2.2 Impact de l'incendie du 10/08/2016 sur les caractéristiques du bassin versant

Le 10 août 2016, de très violents incendies, attisés par un vent extrêmement fort et favorisés par une grande sécheresse de la végétation, ont ravagé plus de 3 000ha de garrigues et de pinède entre Rognac, Vitrolles et Les Pennes Mirabeau.

Le bassin versant de la Cadière sur les communes de Vitrolles et des Pennes Mirabeau était au cœur de cet important incendie, entraînant la destruction massive de la végétation.

Ainsi suite à un incendie les sols sont mis à nus. Lors d'un événement pluvieux, il est observé un déclenchement plus rapide du ruissellement et une érosion des sols plus importante. Ainsi les ruissellements sur les versants ayant subis un incendie, sont généralement, rapidement plus importants et chargés de sédiments par rapport à un événement sur un sol avec un couvert végétal.

Les retours d'expérience montrent que lorsque la végétation apparaît, généralement des buissons, l'impact sur le ruissellement est rapidement atténué. Ainsi dès la première année l'impact est réduit même si les sols restent fragiles, il faudra attendre 3 à 5 ans pour avoir un retour à l'état initial.

Le bassin versant a déjà subi un incendie important sur le massif de la Colle en 2002 et en 2004, sur le bassin versant du Raumartin. Une étude réalisée par SAFEGE en 2004 (Schéma d'aménagement hydraulique pour la gestion du risque inondation sur le Raumartin) arrive à ces conclusions :

- La mise à nu d'une partie du bassin versant a modifié sa capacité d'interception par la végétation et d'infiltration, ce qui entraîne une augmentation des débits ruisselés des vallons.
- L'impact d'un incendie est beaucoup plus marqué sur des sols peu perméables et peu profonds, sur lesquels la forêt a un rôle réducteur important en termes de volumes ruisselés et de débits de pointe.
- L'impact des incendies se manifeste sur une période de 2 ans environ.

Dans le cas de l'incendie de 2016, sur les reconnaissances de terrain, on peut constater que les traces de l'incendie sont encore visibles toutefois, la végétation, au bout d'une année, commence à occuper le sol. Nous sommes actuellement dans la seconde année suite à l'incendie, le phénomène est donc en cours d'atténuation.

A l'échelle de réflexion du PPRi ou d'un document d'urbanisme (10 / 15 ans, voire plus), il nous semble donc délicat de prendre en considération l'effet de cet incendie sur le ruissellement et l'érosion des sols.

4.3 MODELE PLUIE-DEBIT

A ce stade de l'étude, les choix de modélisation sont :

- La transformation pluie brute / pluie nette est assurée par la loi de Horner.
- La loi de transformation pluie nette / débit est de type réservoir linéaire avec un temps de réponse calculée suivant la formulation de Desbordes.

La loi de Horner permet de représenter un coefficient de ruissellement de plus en plus important lorsque l'intensité de l'événement pluvieux croit ; pour un événement très intense, le coefficient de ruissellement tendra vers le coefficient d'imperméabilisation.

L'évolution au cours du temps des pertes liées au taux d'imperméabilisation constaté à la surface du BV, s'écrit, suivant la formule de Horner :

$$Cp(t)=\alpha*\exp(-\beta*Pa(t))$$

Avec Cp(t) : Coefficient de perte durant un pas de temps dt

Pa(t) : pertes cumulées depuis le début de l'averse (mm)

α et β sont les paramètres de calage du modèle. Le coefficient α exprime les pertes globales au début de l'averse (évapotranspiration et infiltration), alors que β module ce coefficient de perte au cours du temps (en fonction des pertes cumulées). Le graphique présenté ci-après permet de visualiser l'influence des coefficients α et β.

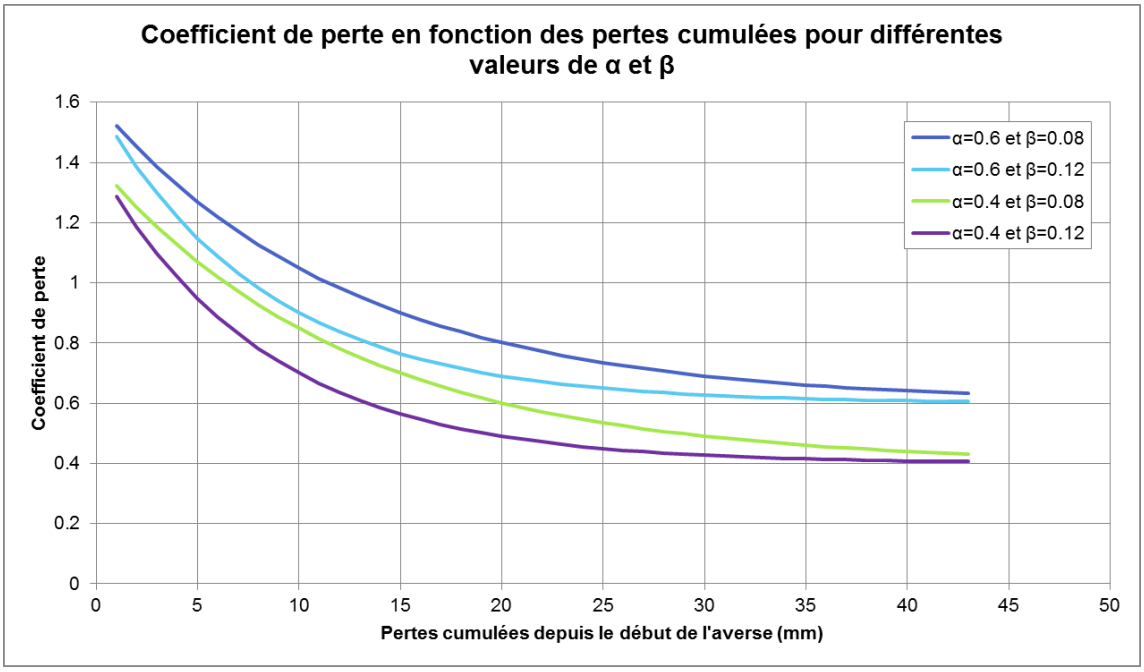


Figure 29 : coefficient de perte en fonction des pertes cumulées pour différentes valeurs de paramètres d'Horner

La lame d'eau qui ruisselle Qe(t) est reliée à l'intensité de la pluie i(t) et au coefficient de perte Cp par l'expression :

$$Q_e(t) = C_{imp} * S * (1 - C_p) * i(t) * \frac{1}{360}$$

Avec, Qe(t) : exprimé en m^3/s

Cimp : Coefficient d'imperméabilisation

I(t) : Intensité de la pluie en mm/h

S : Surface du bassin versant en ha

4.4 PROPAGATION DU DEBIT

Le calage du modèle hydrologique sera réalisé conjointement au calage du modèle hydraulique puisque les bassins versants seront directement connectés au modèle hydraulique de simulation de l'aléa.

ANNEXE 1 : DUREES DE RETOUR DE FORTES PRECIPITATIONS - EPISODE : 6 HEURES – METHODE DU RENOUVELLEMENT

METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

DUREES DE RETOUR DE FORTES PRECIPITATIONS

Episode : 6 heures − Méthode du renouvellement

Statistiques sur la période 1960−2012

MARIGNANE (13)

Indicatif : 13054001, alt : 9 m., lat : 43°26'12"N, lon : 05°12'54"E

L'échantillon contient 155 valeurs pour 44 années traitées.
− les valeurs de dépassement sont ajustées par **une loi de Pareto généralisée**
− on utilise une expression **asymptotique** pour la prise en compte des nombres annuels de dépassements

Durée de retour	Hauteur estimée	Intervalle de confiance à 70 %	
5 ans	62.4 mm	57.8 mm	67.0 mm
10 ans	75.1 mm	67.5 mm	82.6 mm
20 ans	89.5 mm	77.6 mm	101.5 mm
30 ans	98.9 mm	83.5 mm	114.2 mm
50 ans	111.7 mm	91.1 mm	132.3 mm
100 ans	131.2 mm	101.5 mm	161.0 mm

Seuil d'ajustement : 24.3 mm

Paramètre de forme k = −0.2

Paramètre d'échelle = 10.1

VALEURS MAXIMALES DE L'ECHANTILLON TRAITE

Hauteur observée	Date
137.0 mm	07/09/1998
128.4 mm	02/10/1973
111.3 mm	11/10/1972
76.0 mm	18/09/2009
69.6 mm	23/08/1984

** Les précipitations en 6 heures sont issues de mesures de l'intensité des précipitations par pas de 6 minutes et sont décomptées sur 24 heures glissantes.*

Edité le : 11/07/2016

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues,
en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO−FRANCE

Pôle Régional de Relation Clients
63, Chemin de l'Aérodrome 30000 NIMES
Tél. : 04 66 02 92 58 − Fax : 04 66 02 92 59 − Email : contact.sud−est@meteo.fr

DUREES DE RETOUR DE FORTES PRECIPITATIONS

Episode : 6 heures − Méthode du renouvellement

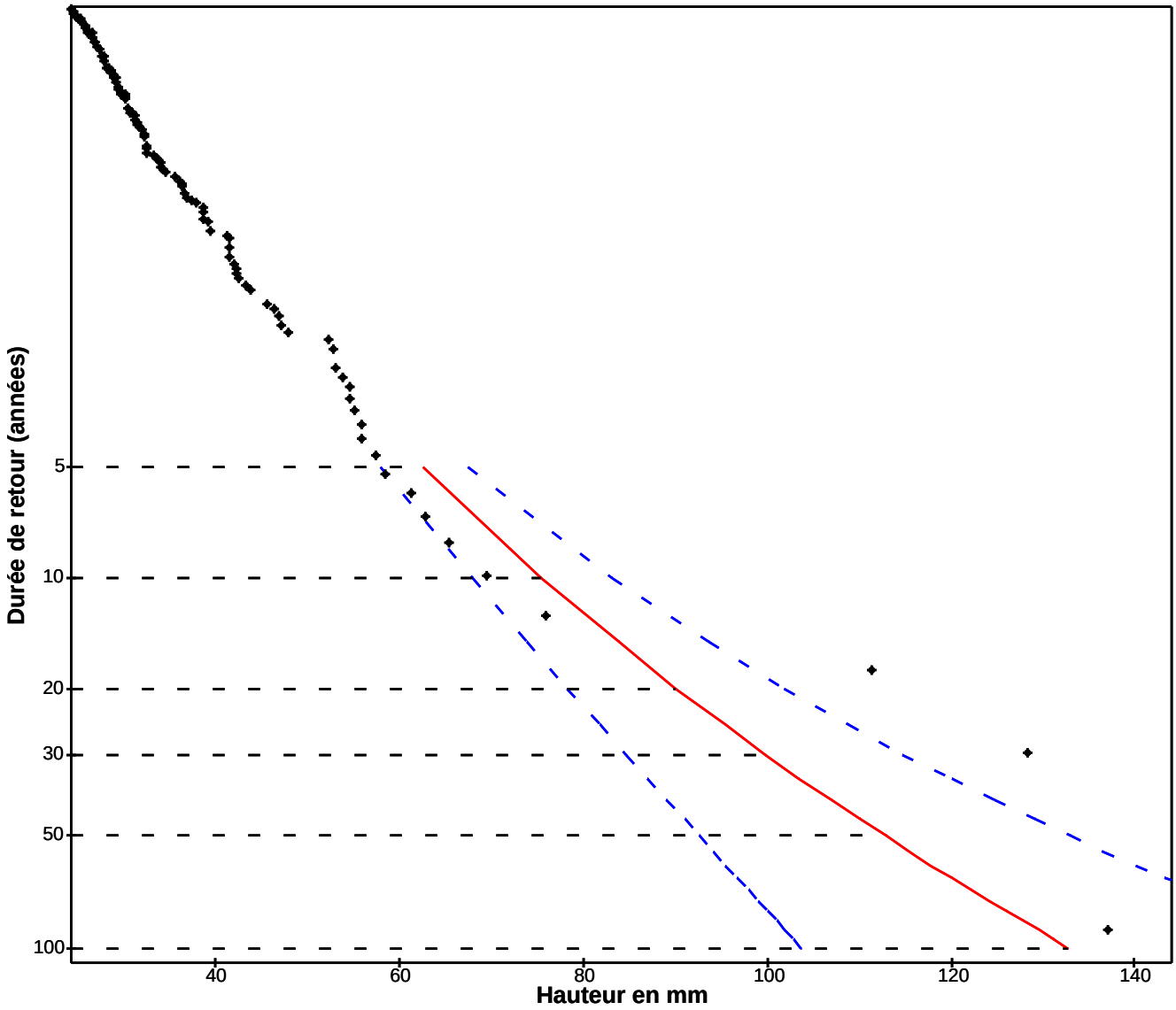
Statistiques sur la période 1960−2012

MARIGNANE (13)

Indicatif : 13054001, alt : 9 m., lat : 43°26'12"N, lon : 05°12'54"E

GRAPHIQUE D'AJUSTEMENT

La droite donne la hauteur de précipitations estimée pour une durée de retour exprimée en années.
Les observations sont pointées. L'intervalle de confiance à 70 % est représenté en pointillés.



Edité le : 11/07/2016

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues,
en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO−FRANCE

Pôle Régional de Relation Clients
63, Chemin de l'Aérodrome 30000 NIMES
Tél. : 04 66 02 92 58 − Fax : 04 66 02 92 59 − Email : contact.sud−est@meteo.fr

ANNEXE 2 : COEFFICIENTS DE MONTANA DU POSTE DE MARIGNANE

METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

COEFFICIENTS DE MONTANA

Formule des hauteurs – Méthode du renouvellement

Statistiques sur la période 1960 – 2010

MARIGNANE (13)

Indicatif : 13054001, alt : 9 m., lat : 43°26'12"N, lon : 05°12'54"E

La formule de Montana permet, de manière théorique, de relier une quantité de pluie **h(t)** recueillie au cours d'un épisode pluvieux avec sa durée **t** :

$$h(t) = a \times t^{(1-b)}$$

Les quantités de pluie h(t) s'expriment en millimètres et les durées t en minutes.
Les coefficients de Montana (a,b) sont calculés par un ajustement statistique entre les durées et les quantités de pluie ayant une durée de retour donnée.

Cet ajustement est réalisé à partir des pas de temps (durées) disponibles entre 6 minutes et 30 minutes.
Pour ces pas de temps, la taille de l'échantillon est au minimum de 42 années.

Coefficients de Montana pour des pluies de durée de 6 minutes à 30 minutes

Durée de retour	a	b
5 ans	3.141	0.372
10 ans	3.205	0.318
20 ans	3.069	0.249
30 ans	2.962	0.206
50 ans	2.821	0.152
100 ans	2.536	0.067

Edité le : 02/03/2012

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues,
en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO–FRANCE

Direction de la Production
42 avenue Gustave Coriolis 31057 Toulouse Cedex
Fax : 05 61 07 80 79 – Email : climatheque@meteo.fr

METEO FRANCE
Toujours un temps d'avance

COEFFICIENTS DE MONTANA

Formule des hauteurs – Méthode du renouvellement

Statistiques sur la période 1960 – 2010

MARIGNANE (13)

Indicatif : 13054001, alt : 9 m., lat : 43°26'12"N, lon : 05°12'54"E

La formule de Montana permet, de manière théorique, de relier une quantité de pluie **h(t)** recueillie au cours d'un épisode pluvieux avec sa durée **t** :

$$h(t) = a \times t^{(1-b)}$$

Les quantités de pluie h(t) s'expriment en millimètres et les durées t en minutes.
Les coefficients de Montana (a,b) sont calculés par un ajustement statistique entre les durées et les quantités de pluie ayant une durée de retour donnée.

Cet ajustement est réalisé à partir des pas de temps (durées) disponibles entre 30 minutes et 12 heures.
Pour ces pas de temps, la taille de l'échantillon est au minimum de 42 années.

Coefficients de Montana pour des pluies de durée de 30 minutes à 12 heures

Durée de retour	a	b
5 ans	9.668	0.688
10 ans	11.777	0.683
20 ans	14.052	0.676
30 ans	15.573	0.673
50 ans	17.57	0.667
100 ans	20.67	0.66

Edité le : 02/03/2012

N.B. : La vente, redistribution ou rediffusion des informations reçues,
en l'état ou sous forme de produits dérivés, est strictement interdite sans l'accord de METEO-FRANCE

Direction de la Production
42 avenue Gustave Coriolis 31057 Toulouse Cedex
Fax : 05 61 07 80 79 – Email : climatheque@meteo.fr

ANNEXE 3 : RAPPORT SUR L'EPISODE PLUVIEUX DES 22 ET 23 SEPTEMBRE 1993 (METEO FRANCE)

METEO FRANCE

LES EPISODES PLUVIEUX DE L'AUTOMNE 1993 ET DE L'HIVER 1993-94 SUR LE SUD-EST DE LA FRANCE EXTENSION GEOGRAPHIQUE ET VALEURS REMARQUABLES.

L'Automne 1993 a été caractérisé par la prédominance d'un régime très pertubé sur le sud-est de la France et la Corse, apportant des quantités de précipitations remarquables voire historiques et provoquant tout au long de ces 3 mois des inondations catastrophiques.

1 / Les 22 et 23 septembre 1993.

Septembre 1993 a connu, les 22 et 23, un épisode pluvio-orageux d'une rare violence et intensité, qui a balayé le sud-est de la France et la Corse, un an jour pour jour après la catastrophe de "Vaison-la-Romaine". Ces pluies diluviennes ont eu localement de lourdes conséquences.

Le 22 en journée, les départements de l'Hérault, et surtout le Gard et la Lozère ont d'abord été touchés avec des cumuls dépassant 300 mm sur l'épisode.
Puis, dans la nuit du 22 au 23 ce furent le Vaucluse et les Bouches-du-Rhône. Sur ces 2 départements les cumuls ont par endroits, largement dépassé les 200mm.

Sur l'Hérault: Les plus fortes précipitations ont touché notamment la région montpelliéraine, avec plus de 100 mm de St-Drézery à Villeneuve les Maguelonne. L'intensité des pluies a été remarquable, notamment à Castelnau-le-Lez: 112 mm en 50'.

Sur le Gard: La perturbation pluvio-orageuse du 22 a été très active sur les hauts reliefs cévenols, ainsi que sur un axe Quissac-Salindres. Le noyau > 200 mm se situe sur la zone St-Christol-les-Alès/Deaux, avec un maximum à Deaux: 301mm dont 291mm en 6H, 269mm en 3H, 232mm en 2H, 143mm en 1H, 85mm en 1/2H.

Sur le Vaucluse, la zone orageuse a principalement touché l'est, en s'intensifiant à partir de 22H30 légales, sur l'est et surtout le quart sud-est (sud-Lubéron, vallée de l'Eze). Au total on relèvera plus de 200 mm selon un axe Pertuis-La Bastide des Jourdans. Egalement plus de 100 mm en 2 noyaux axés Althen-des-Paluds/Carpentras/Vaison-la-Romaine.
Les 230 mm recueillis à Pertuis sur l'épisode, 200 sont tombés en 3 heures.

Sur les Bouches-du-Rhône: La durée de l'épisode a été d'environ 6H, avec un maximum d'activité sur la région aixoise où les cumuls ont dépassé 200 mm voire 250 en moins de 3H. A Aix-en-Provence, il a été relevé au total 222 mm dont 218 mm en 6H, 207 en 3H, 130 en 1H, 70 mm en 1/2H (12,8 mm en 6').

Sur le Var: Les pluies ont été maximales sur Barjols: 146 mm. Sur l'aérodrome du Castellet on a relevé 94,8 mm en 3 heures.

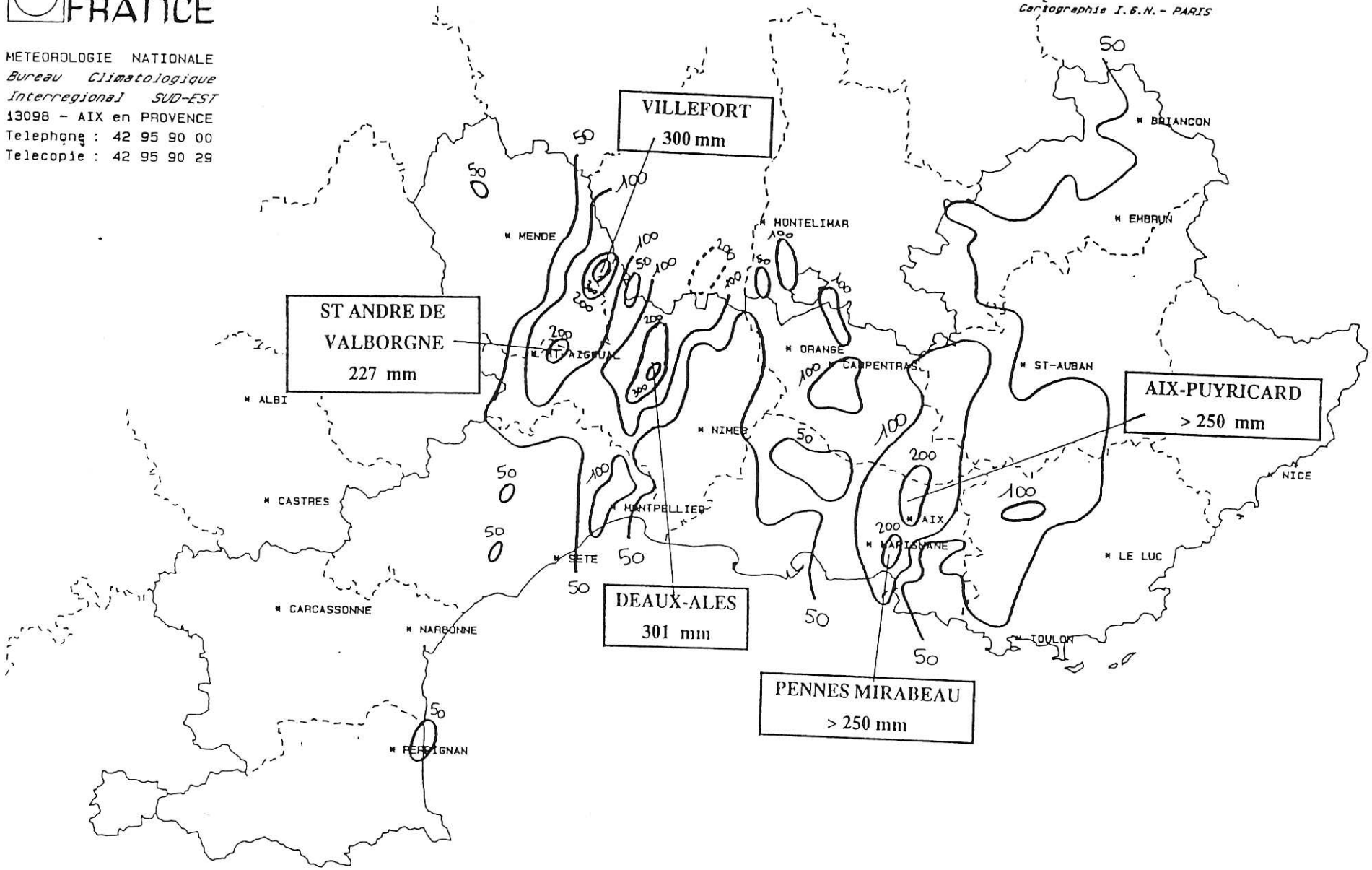
Sur la Drôme: on a relevé plus de 100 mm; **sur l'Ardèche:** un peu moins de 200 mm à Bessas, Loubaresse, Mayres, et 274 mm à Vallon Pont d'Arc; **sur la Lozère:** environ 200 mm à Pied-de-Borne et Vialas, 300 mm à Villefort.

Le 23 septembre, la pluie s'est généralisée à l'ensemble de la région, apportant des précipitations beaucoup plus stables, nettement plus faibles et réparties de manière plus homogène, mais également bien plus durable. Ce sont les Alpes-Maritimes, les Pyrénées-Orientales, l'Aude, et la Corse qui ont été les plus touchées avec des cumuls dépassant 100 mm pour atteindre 198 mm sur l'Aude.

METEO FRANCE

METEOROLOGIE NATIONALE
Bureau Climatologique Interregional SUD-EST
13098 - AIX en PROVENCE
Telephone : 42 95 90 00
Telecopie : 42 95 90 29

(C) METEO-FRANCE (R)
Cartographie I.G.N. - PARIS



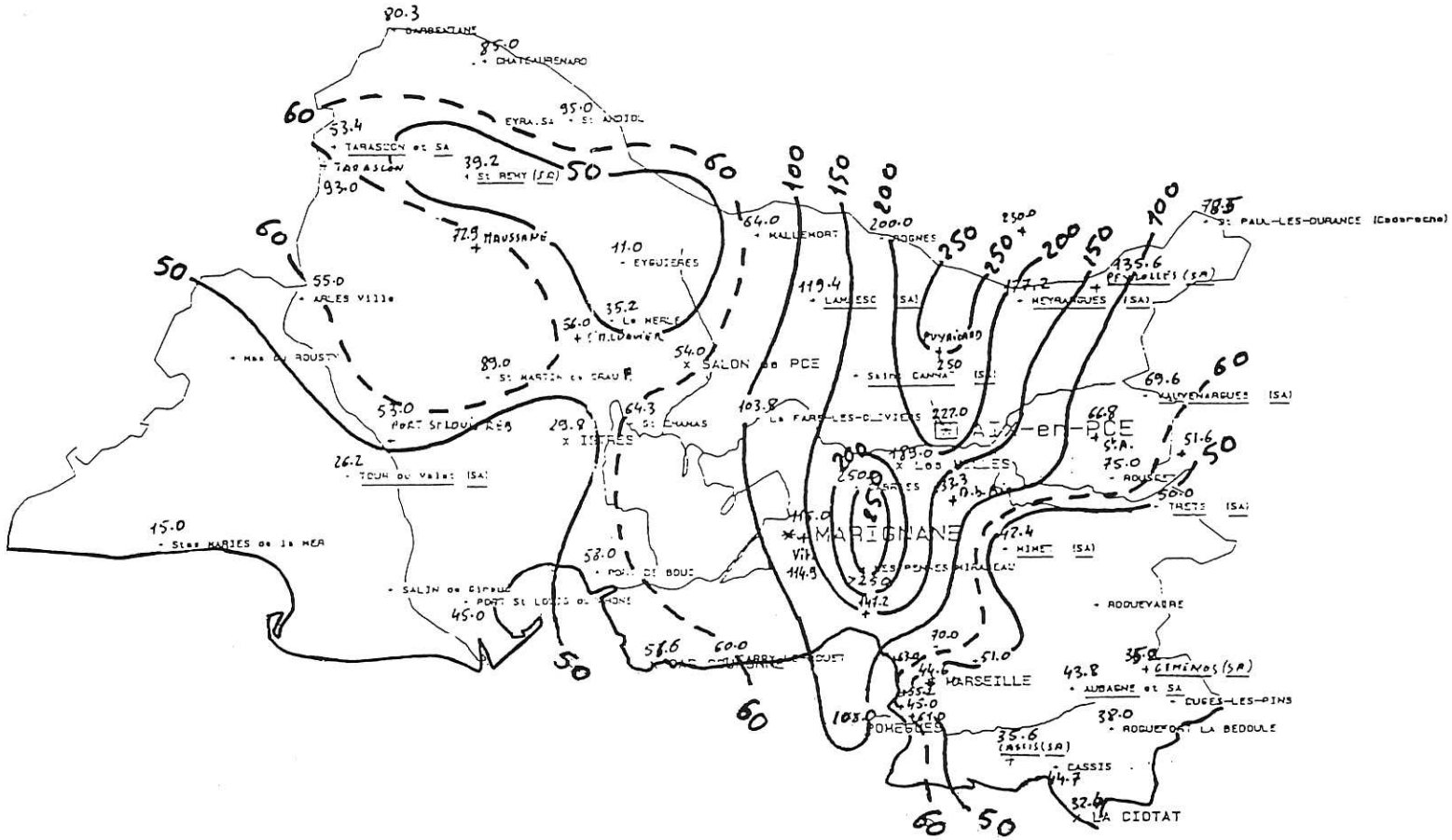
22 SEPTEMBRE 1993

CENTRE DEPARTEMENTAL de la METEOROLOGIE (C.D.M.)

des BOUCHES DU RHONE

(C) METEO-FRANCE (R)

Cartographie I.G.N. - PARIS



PLUVIOMETRIE du 22-09-93 (8h) AU 23-09-93 (8h HL)

C.M.I.R/SE
[*] = C.D.M. 13
x = STATIONS METEOROLOGIQUES ET SEMAPHORES
+ = POSTES CLIMATOLOGIQUES SA = STAT.AUTO

RESEAU CLIMATOLOGIQUE DEPARTEMENTAL

DES BOUCHES DU RHONE 93

ANNEXE 4 : TRAVAUX DE RECHERCHE CONCERNANT L'ABATTEMENT SPATIAL DES PLUIES

- **Coefficient d'abattement spatial des pluies en région méditerranéenne adaptés aux petits bassins versants, Rapport de synthèse, Cereve, Gaume et al., février 2001**

Cette étude s'appuie sur les travaux menés par Christian Roux en 1996 pour son travail de thèse : ces travaux ont établi une relation liant le coefficient d'abattement spatial à la surface du bassin versant et à la durée de la pluie pour des petits bassins versants situés en région parisienne.

L'objectif de ce travail est de transposer ces résultats aux régions méditerranéennes. Il s'appuie pour ce faire sur le réseau de pluviomètres de la ville de Marseille, qui est le plus dense de la région méditerranéenne en France.

Les données pluviométriques étudiées concernent la période 1991-1999.

Démarche et résultats de l'étude

L'étude s'attache tout d'abord à vérifier que les séries de données étudiées ne sont pas entachés de biais liés à des facteurs tels que le relief, l'éloignement de la mer : l'étude conclut à ce sujet : « *autant qu'il nous est possible d'en juger, les distributions d'intensités moyennes maximales sont homogènes sur le secteur couvert […] La série des données pluviographiques de Marseille apparaît donc particulièrement bien adaptée à une étude des coefficients d'abattement.* »

L'étude établit ensuite que, pour des périodes de retour supérieures à 6 mois, la démarche proposée est valide, et que les conditions permettant alors d'affirmer que le coefficient d'abattement spatial est relativement indépendant de la période de retour sont vérifiées.

L'étude détermine alors, par l'analyse détaillée de la pluviométrie affectant des sous-parties du secteur d'étude de tailles diverses, une relation reliant le coefficient d'abattement α à la surface **S** et au pas de temps Δt (durée de la pluie étudiée).

Cette relation est (pour S>30 km²) :

$$\alpha = S^{(-0.064+0.014\,ln(\Delta t))}$$

Unités : dt en heures et S en km2

Le rapport conclut en comparant ce résultat à l'analyse des images radar de 2 évènements (26/081996 et 7/09/1998). Elle conclut que « *pour les petits pas de temps – typiquement quelques dizaines de minutes – la valeur du coefficient d'abattement semble être essentiellement déterminée par le déplacement des cellules orageuses intenses* ».

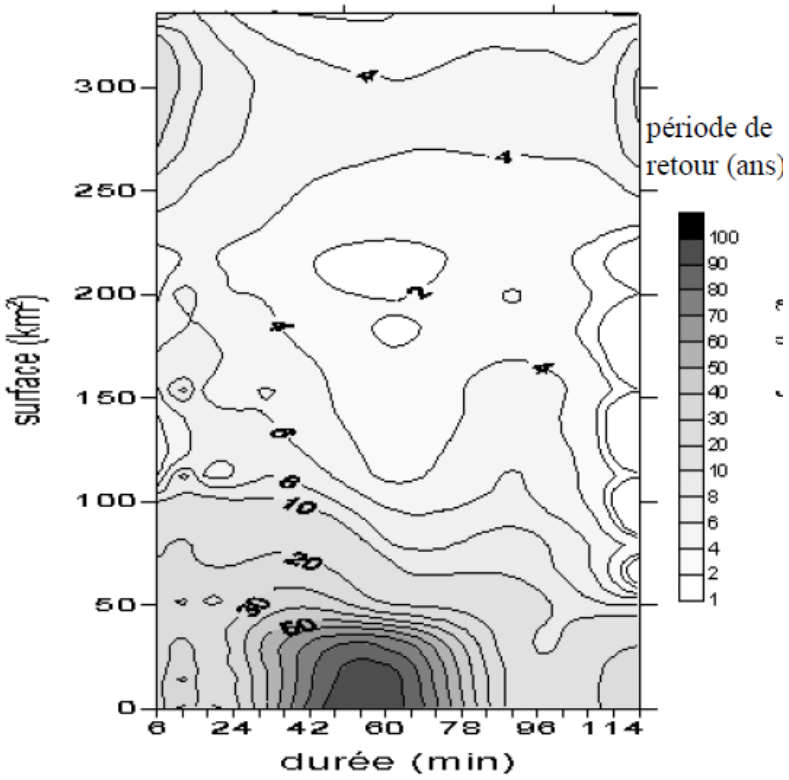
- **Analyse de la pluviométrie sous des systèmes nuageux convectifs, étude de cas sur des données de la Ville de Marseille et de la méthode ISIS de Météo-France, thèse de Maria RAMOS, 2002**

Cette thèse s'intéresse à un sujet plus vaste (celui de la corrélation entre certaines structures météorologiques et les fortes précipitations), mais nous intéresse particulièrement dans la mesure où elle étudie plus spécifiquement 3 épisodes pluvieux sur la ville de

Marseille (22-23/09/1996, 07/09/1998, 19/09/2000) sur la base de l'analyse des données pluviométriques du réseau de la DEA.

Pour ces trois épisodes, Mme Ramos introduit la notion de cartes de sévérité : ces cartes visent à représenter la sévérité des épisodes (en termes de période de retour) en fonction de la surface concernée (en ordonnée) et pour différentes durées d'observation (en abscisse).

La carte ci-dessous illustre l'épisode du 22-23 septembre 1993 dont la période de retour pour une durée de pluie de l'ordre de 60 minutes est d'environ 80 ans : la carte montre sur cet exemple la décroissance relativement rapide, au-delà de quelques dizaines de km², de cette période de retour, qui n'est plus que de 30 ans pour une surface de 50 km², corroborant ainsi (mais sur un exemple unique) l'abattement spatial observé sur le bassin versant qui nous concerne.



a) 22-23 septembre 1993

D’autres études ont été consultées, notamment :

- **Abattement spatial des précipitations en Languedoc-Roussillon, Neppel, Bouvier, Lavabre (2003)** : cette étude menée dans la région de Nîmes et sur 3 secteurs de reliefs différents (mais pour des durées de pluies plus importantes, de l’ordre de 24h) aboutit aux conclusions suivantes :
    - Les coefficients d’abattement spatial sont relativement peu sensibles à la présence des reliefs ;
    - L’abattement spatial est relativement peu dépendant de la période de retour pour les périodes de retour supérieures à 5 ans
    - Pour des grandes superficies, l’abattement est moins sévère en Languedoc-Roussillon qu’en région parisienne, ce qui est également montré par l’étude de Gaume et al. citée ci-avant, et qui peut être mis sur le compte de la proximité immédiate de la Méditerranée et du caractère advectif qui conduit à des extensions spatiales exceptionnelles en Languedoc-Roussillon (exemple : épisodes de 199 dans l’Aude, de 2002 dans le Gard)