

# Chapitre 4 - Modélisation hydrologique

---

## 1 Analyse des études existantes d'un point de vue hydrologique

### 1.1 Commentaires

Cette analyse a été menée en détail lors de la première phase. Les commentaires concernant les données et hypothèses hydrologiques sont rappelés ci-dessous.

Il ressort de l'analyse des études hydrologiques existantes sur le bassin versant de l'Huveaune une grande hétérogénéité concernant à la fois les méthodes utilisées et les résultats obtenus.

- Concernant l'hydrologie, plusieurs méthodes sont mises en œuvre pour déterminer les débits de crue de l'Huveaune et de ses affluents : ajustements statistiques sur les données de débits, modélisation pluie-débit selon la méthode SCS, méthode des transferts par rapport à des données d'autres bassins versants, méthodes rationnelle, Socose ou Crupedix pour les petits bassins versants... Les données pluviométriques utilisées sont variées et souvent anciennes : ajustements statistiques des pluies de Marignane, de Toulon, ajustement du CEMAGREF sur les pluies d'Aubagne, d'Aix-en-Provence (1983, actualisation en 1995), Instruction Technique de 1977... Les dates des plages de données exploitées sont rarement précisées.

Les hypothèses prises en compte et les détails des modèles hydrologiques (caractéristiques des sous-bassins versants, coefficients de ruissellement...) sont souvent peu explicités. Les résultats obtenus avec des hypothèses de pluies identiques sont parfois incohérents (c'est le cas par exemple pour la Maire : dans l'étude BRLi de 2000, le débit centennal calculé est nettement supérieur à celui de l'étude Horizons de 1997, sur la base des ajustements des pluies d'Aix-en-Provence). Dans plusieurs études, les débits de référence ont été fixés par la ville ou la DDTM et les hypothèses et méthodes de détermination ne sont pas toujours précisées. Un grand nombre d'études reprennent des résultats hydrologiques d'études antérieures, notamment ceux de l'étude de référence EGCEM 1976, sans actualisation des données de base.

Dans tous les cas, les hypothèses hydrologiques ne sont pas actualisées (les données pluviométriques les plus récentes datent de 1995) et ne tiennent donc pas compte des événements historiques récents. L'évaluation des pluies et des débits de référence ne résulte pas d'un calage sur des observations réelles des événements marquants récents. Aucune analyse approfondie des données hydrométéorologiques du bassin versant n'a été menée récemment.

Le tableau 22 de la page suivante synthétise les débits de référence pris en compte dans les études antérieures et les débits spécifiques centennaux correspondants. Les études reprenant des données d'études antérieures sans nouvelle analyse hydrologique n'y figurent pas. Il met en évidence la disparité des résultats obtenus. Les données sont classées par

cours d'eau, d'amont en aval ; les lignes grisées concernent des résultats de plusieurs études pour un même bassin versant.

- Concernant la prise en compte du comportement karstique du bassin versant de l'Huveaune, seules les études EGCEM de 1976 et IPSEAU à Roquevaire (2004) y font réellement allusion. Dans les deux cas les hypothèses retenues sont un effet d'abattement de 20% (appliqué sur la surface des bassins versants ou les débits de pointe). Le rôle aggravant du karst sur les débits de pointe n'est évoqué que dans l'étude SCE de 2008 à la Destrousse, où des hypothèses de saturation sont étudiées.

Aucune étude ne propose d'analyse des événements historiques et de la réponse des bassins versants en fonction des pluies antérieures, qui conditionnent l'état de saturation du karst.

Tableau 22 – Synthèse des débits de crue des études antérieures

Cours d'eau	BV	Surface BV	Q10 (m3/s)	Q100 (m3/s)	Q100 spécifique (m3/s/km²)	Etude
Huveaune	Amont de St Zacharie	13.5	6	25.5	1.9	Saint Zacharie SCE 2011
Huveaune	1er pont de St Zacharie	30	19.8	62	2.1	
Huveaune	Moulin Blanc	53	24.3	73	1.4	
Huveaune	aval de St Zacharie	59	38.9	118.8	2.0	
Huveaune	Auriol	104	64	144	1.4	Fiche "Ipseau"
Huveaune	aval Auriol	104	55-60	100-120	1.2	Hydrologie Auriol Daragon 87
Huveaune	aval Auriol (horizon POS)	104	65-75	130-150	1.4	
Huveaune	amont confluence Merlançon	104	60	150	1.4	Etude Sogreah 1969
Huveaune	Pont de Joux	104		150	1.4	Roquevaire IPSEAU 2004
Huveaune	Roquevaire	146	100	210	1.4	
Huveaune	Roquevaire	153	90	200	1.3	Etude Sogreah 1969
Huveaune	Roquevaire	156	49	144	0.9	EGCEM 1976
Huveaune	Roquevaire	176	71	160	0.9	Fiche "Ipseau"
Huveaune	Roquevaire	176	50	150	0.9	Fiche "Ipseau"
Huveaune	Aubagne	266	98	221	0.8	Fiche "Ipseau"
Huveaune	Aubagne	267	73	215	0.8	EGCEM 1976
Huveaune	Aubagne (aval Merlançon)	277		250	0.9	Etude Sogreah 1969
Huveaune	Penne sur H	295	106	240	0.8	Fiche "Ipseau"
Huveaune	Penne sur H	295	80	236	0.8	Fiche "Ipseau"
Huveaune	Penne sur H sortie tunnel	302	80	236	0.8	EGCEM 1976
Huveaune	amont confluence Jarret	365		270	0.7	Capelette SOGREAH 2006
Huveaune	amont Jarret	368	93	274	0.7	EGCEM 1976
Huveaune	aval Jarret	470	112	329	0.7	
Huveaune	aval	470	126	321	0.7	Aménagement Huveaune 87
Huveaune	embouchure	505	115	347	0.7	EGCEM 1976
Jarret	Hameau de la Fève	21	35	79	3.8	Fiche "Ipseau"
Jarret	Allauch	36	54	121	3.4	SDAP Jarret 94
Jarret Marseille	amont ruisseau Croix Rouge	49	30.1	60.2	1.2	
Jarret Marseille	aval bd Delprat	55	33	66	1.2	
Jarret Marseille	Croix-Rouge - Ravelle - Bégude	56	36.1	72.2	1.3	
Jarret Marseille	du ruisseau Grave à l'av des Olives	77.8	48.1	96.2	1.2	
Jarret Marseille	av des olives	78	48.7	97.5	1.3	
Jarret Marseille	cuvelé jusqu'à Malpasse	89	50	100	1.1	

Cours d'eau	BV	Surface BV	Q10 (m3/s)	Q100 (m3/s)	Q100 spécifique (m3/s/km <sup>2</sup> )	Etude	
Jarret Marseille	Boudinière - Pont Gemy	90	53.8	107.5	1.2		
Jarret Marseille	de St Just à Capelette	91	58-65	110-130	1.2		
Jarret Marseille	aval	103	65	130	1.3		
Jarret	aval	103	35	105	1.0		EGCEM 1976
Jarret	aval	103		150	1.5		Capelette SOGREAH 2006
Merlançon	aval RN96	14.16	12.9	29	2.0	Merlançon Tonneau Horizons 1997	
Merlançon	aval supermarché	14.79	13.3	30	2.0		
Merlançon	amont Tonneau	15.2		40	2.6	Etude CETE Destrousse 1997	
Merlançon	aval confluence Tonneau	25.28	20.5	46	1.8	Merlançon Tonneau Horizons 1997	
Merlançon	amont Grand Pré	25.6		46	1.8	Destrousse CETE 1997	
Merlançon	amont Grand Pré	31.7		55	1.7	Aléa Destrousse SCE 2008	
Merlançon	amont Grand Pré	38	21	46	1.2	Fiche "Ipseau"	
Merlançon	aval Grand Pré	35.4		60	1.7	Destrousse CETE 1997	
Merlançon	aval Grand Pré	42.1		74	1.8	Aléa Destrousse SCE 2008	
Merlançon	Roquevaire	46	29	60	1.3	Roquevaire IPSEAU 2004	
Fauge	parc St Pons	9		14.8	1.6	Horizons 1997	
Fauge	amont centre-ville	12.5		20.1	1.6		
Fauge	aval centre-ville	14		29.9	2.1		
Fauge	amont confluence	15.5	11.8	30.6	2.0		
Fauge	Gémenos	11.8	8	18	1.5	Fiche "Ipseau"	
Fauge	amont confluence	11		31	2.8	SCP 2006	
Maïre	amont confluence	13		20	1.5	Horizons 1997	
Maïre	entrée plaine	9		8.3	0.9		
Maïre	jonction RN8-RN96	12		12.4	1.0		
Maïre	entrée Grande Maïre	14		23.7	0.7		
Maïre	amont confluence	16.5		25.7	1.6		
Maïre	amont confluence	16	30	75	4.7	BRL 2000	
Maïre + Faugue	confluence	24		51	1.2	SCP 2006	
Maïre	aval	41	20	48.6	2.1	SCP 2001	
Maïre	Aubagne	40	22	49	2.1	Fiche "Ipseau"	
Fenouilloux	aval	9.1	11.9	30	3.3	Saint Zacharie SCE 2011	
Esplannes	aval	1.3	3.4	7	5.4		
Peyruis	aval	13.4	6.1	22	1.6		
Vède	Auriol	19.5	14.2	29	1.5	Auriol Horizon 1996	
Vède	Auriol	19.6	17	40	2.0	Vède Auriol 1997 et 1998	
Basseron	Auriol	3.52	6.3	14.2	4.0	Auriol Basseron Horizon	
Tonneau	aval	10.27	10	22.5	2.2	Merlançon Tonneau Horizons 1997	
Grand Pré	aval	3.3		7	2.1	Destrousse CETE 1997	
Grand Pré	aval	3.7		9	2.4	Aléa Destrousse SCE 2008	
Pégoulières	Confluence Grand Pré	6.5		10	1.5	Destrousse CETE 1997	
Pégoulières	Confluence Grand Pré	6.7		12.5	1.9	Aléa Destrousse SCE 2008	
Grand Pré + Pégoulières	Confluence	9.8		16	1.6	Destrousse CETE 1997	
Grand Pré	Destrousse	10	7	16	1.6	Fiche "Ipseau"	
Grand Pré + Pégoulières	Confluence	10.4		19	1.8	Aléa Destrousse SCE 2008	
Merlançon	amont autoroute	21	9.5	19.5	0.9	Etude Sogreah 1969	
Merlançon	amont autoroute	21	7	15	0.7	Etude Sogreah 1969	
Merlançon	Aubagne	22	13	30	1.4	Fiche "Ipseau"	
Vallon de l'Amandier	Allauch	4.25	9.8	22	5.2		
Vallon de l'Oule	Allauch	3.8	8.9	20	5.3		

Le graphique de la Figure 14 illustre les débits spécifiques obtenus sur les différents cours d'eau du bassin versant de l'Huveaune (Huveaune et affluents) dans les études existantes.

On constate que les valeurs obtenues sur le bassin de l'Huveaune sont très variables d'une étude à l'autre (bassins versants <150 km<sup>2</sup>). Cette hétérogénéité s'explique par la diversité des méthodes et hypothèses prises en compte pour le calcul des débits caractéristiques. Les débits spécifiques de l'Huveaune entre Aubagne et la mer sont issus de l'étude EGCEM 1976, dont les résultats font référence et sont repris dans les études suivantes. Ils sont inférieurs à 1 m<sup>3</sup>/s/km<sup>2</sup>.

La

Figure 15 permet d'établir une comparaison avec les débits spécifiques des cours d'eau des départements voisins. Les débits de l'Arc sont issus du SAGE (1998). Les débits centennaux des cours d'eau du Var ont été extrapolés à partir des débits caractéristiques décennaux fournis par la Banque Hydro (2010), en appliquant un rapport  $Q_{100}/Q_{10}$  similaire à celui de l'Arc.

Figure 14 : Débits spécifiques sur le bassin versant de l'Huveaune – Etudes existantes

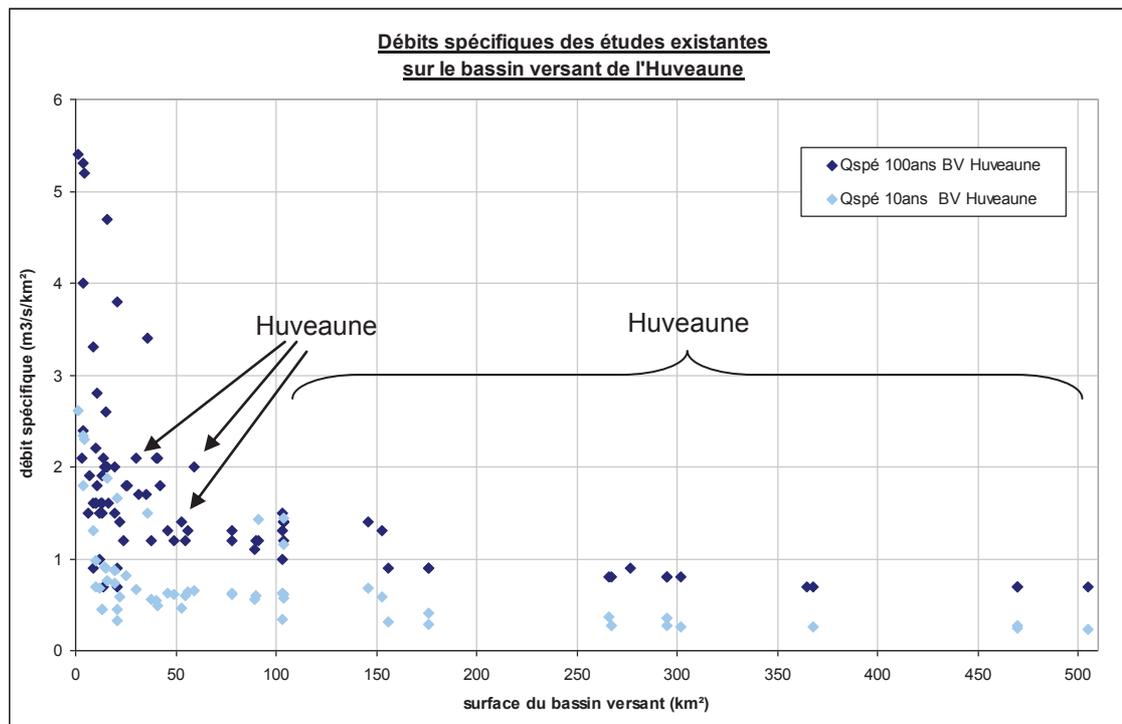
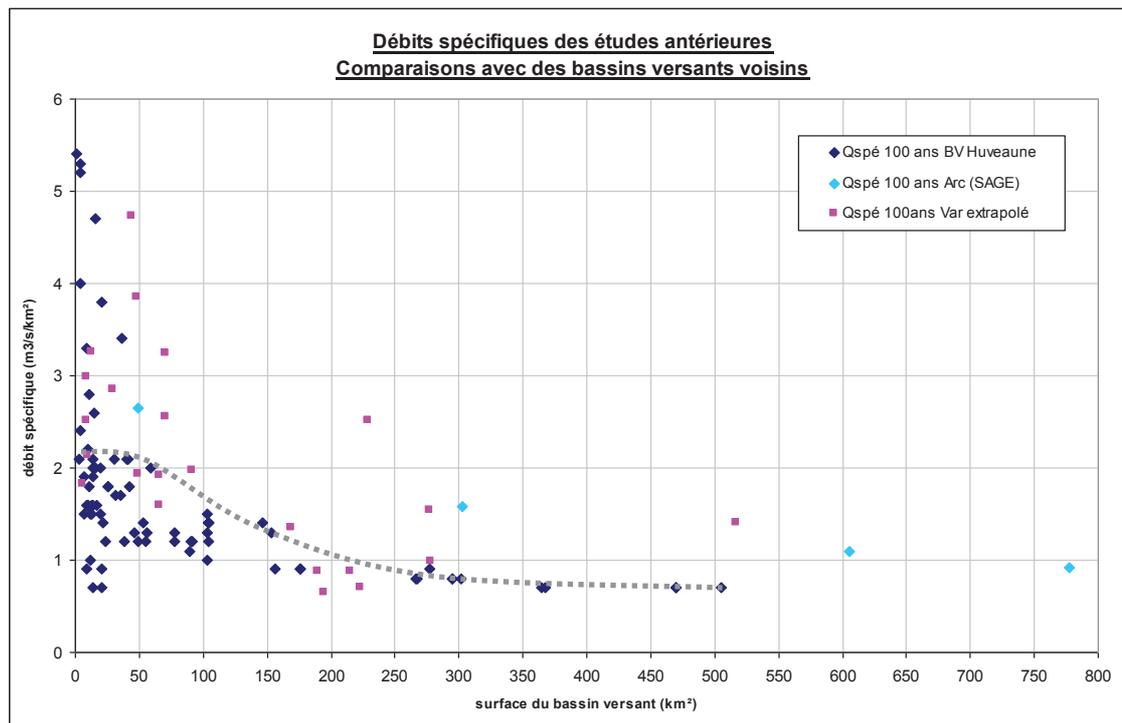


Figure 15 : Comparaison des débits spécifiques (bassin de l'Huveaune et bassins voisins)



La courbe en pointillés correspond aux plus forts débits spécifiques obtenus pour l'Huveaune dans les études existantes.

**On constate que ces valeurs maximales restent globalement inférieures à celles des bassins versants voisins, notamment à celles de l'Arc (débit spécifique centennal 2 fois inférieur pour une surface de l'ordre de 300 km<sup>2</sup>).**

## 1.2 Comparaison des caractéristiques des pluies prises en compte dans les études antérieures avec les pluies proposées

Les caractéristiques des pluies de période de retour 100 ans et 10 ans prises en compte dans les études antérieures sont représentées dans les figures 15 et 16 suivantes, où figurent également les caractéristiques des pluies proposées.

Le tableau 23 fournit les caractéristiques des pluies de période de retour 100 ans prises en compte dans les études antérieures.

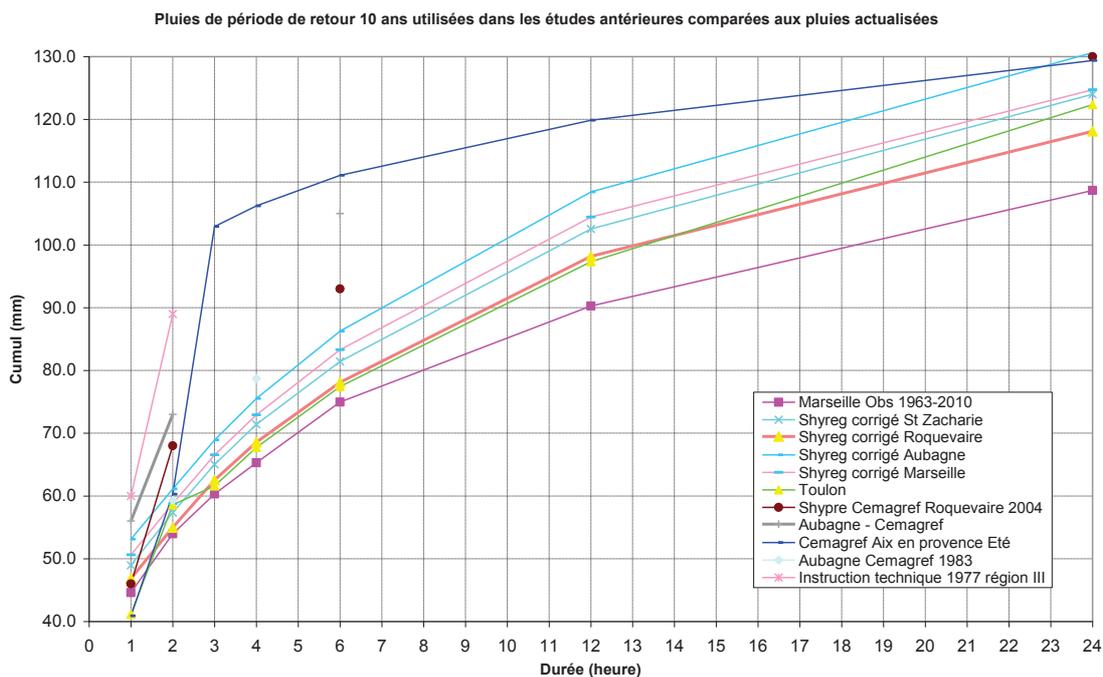


Figure 16 Pluies de période de retour 10 ans utilisées dans les études antérieures comparées aux pluies actualisées

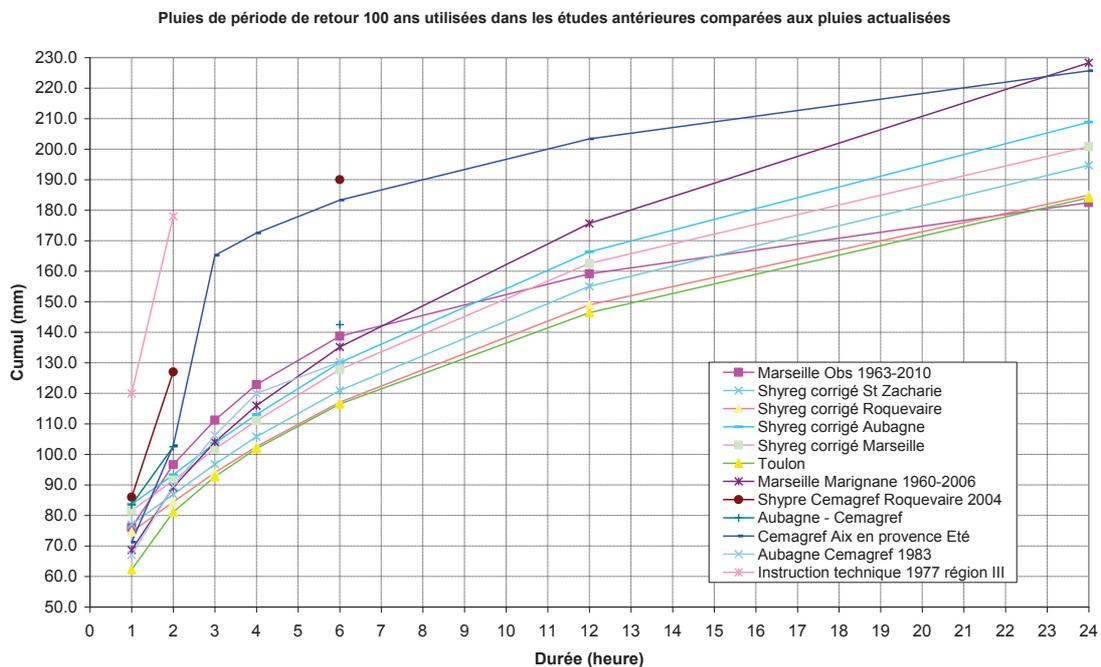


Figure 17 Pluies de période de retour 100 ans utilisées dans les études antérieures comparées aux pluies actualisées

**Tableau 23 Caractéristiques des pluies centennales prises en compte dans les études antérieures**

Etude	Source de données de pluie	P 1h	P 2h	P6h	P12h	P24h
Aléa inondation St Zacharie 2011 - SCE	Station Toulon MF	62.2	81.1	116.5	146.4	184.1
ZI commune Roquevaire 2004 - IPSEAU	Shypre Cemagref Roquevaire	86	127	190		
Aléa La Destrousse – 2008 - SCE	Station Marseille Marignane 1960-2006	68.7	89.2	135.2	175.7	228.3
Aléa inondation Maire et Fauge – Horizons 1997	Aix en Provence – Saison Été - Cemagref	71.2	102.8	183.3	203.4	225.7
Risque inondation plaine Gémenos – 2000 - BRLi	Aubagne Cemagref 1983	67	89.6	130.2		
Zi Les Paluds – 2006 - SCP	Aubagne Cemagref	83.5	102.5	142.5		
Pluie actualisée proposée pour Marseille	Quantile Shyreg corrigé	81.5	91.5	127.8	162.6	200.9
Pluie actualisée proposée pour Aubagne	Quantile Shyreg corrigé	83.7	93.3	130.1	166.4	208.8
Pluie actualisée proposée pour Roquevaire	Quantile Shyreg corrigé	74.6	84.4	117.1	149.0	184.9
Pluie actualisée proposée pour St Zacharie	Quantile Shyreg corrigé	77.0	86.9	120.9	155.1	194.7

En comparant les valeurs caractéristiques prises en compte dans les études antérieures et les valeurs actualisées proposées, on note :

- pour St Zacharie, des valeurs proches, légèrement supérieures à celles de l'étude de 2011,
- pour Roquevaire, des valeurs antérieures nettement plus élevées à partir de la durée 2h et surtout pour la durée 6h. Ces valeurs sont issues d'estimations faites par le Cemagref (méthode Shypre datant de 2004 pour Roquevaire),
- pour La Destrousse, des valeurs antérieures plus élevées à partir de la durée 2heures (comparaison avec les valeurs du quantile Shyreg de Roquevaire),
- pour Aubagne, des valeurs antérieures également plus élevées estimées par le Cemagref, mais avec des écarts plus faibles pour l'estimation la plus récente (étude SCP 2006). Les valeurs de la station d'Aix en Provence utilisées pour l'étude Horizons 1997 sont nettement plus élevées à partir des durées 6h (une distinction a été faite entre les pluies d'été et d'hiver, les pluies d'hiver étant plus faibles). L'étude BRLi de 2000 a utilisé des valeurs plus anciennes (Aubagne 1983), intermédiaires.
- Pour Marseille, les valeurs proposées sont plus faibles que les valeurs utilisées dans les études antérieures qui se basaient sur les valeurs de l'Instruction Technique de

1977 pour la région III (pluie horaire décennale 60mm, centennale 120mm). Les valeurs proposées sont cohérentes avec les estimations faites par le CETE à partir des données de la CUMMPM/DEA (cf Chapitre 2 - Chapitre 3 -3.2.5).

Cependant, l'analyse des données des postes de la CUMMPM met en évidence la variabilité spatiale des caractéristiques de la pluie à l'échelle de la ville de Marseille. Par exemple, la pluie décennale horaire varie entre 43mm (La Grave) et 63 mm (Bonnaude), avec une moyenne qui s'établit à 53 mm pour les 13 postes situés dans le bassin de l'Huveaune.

### 1.3 Données hydrologiques exploitables

Excepté les études Sogreah de 1969 et EGCEM de 1976 qui fournissent des données hydrologiques pour quelques événements marquants du 19<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> siècle (pluies journalières ; estimations ponctuelles de débits et hauteurs d'eau à Auriol, Roquevaire, Aubagne), les études analysées n'apportent quasiment pas d'informations concernant les données hydrologiques observées sur le bassin versant.

Les ajustements statistiques des pluies des stations de Toulon, Aubagne, et Marseille sont disponibles mais ne sont pas actualisés.

Les données hydrologiques utiles dans le cadre de la présente étude hydrologique sont principalement issues de l'étude EGCEM :

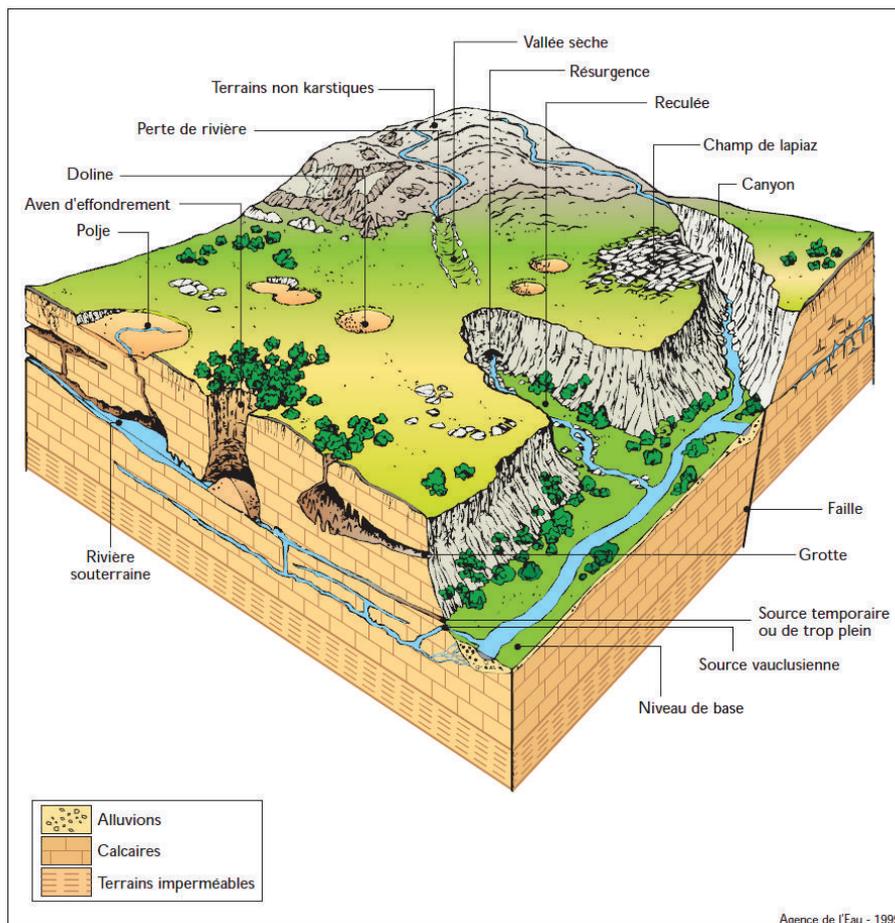
- Pluies journalières les plus fortes entre 1836 et 1976,
- Pluies journalières sur le bassin versant et estimations des débits de pointe de la crue de 1978,
- Pluies horaires et hydrogrammes à Roquevaire, Aubagne et Marseille pour la crue de 1978.
- Pluies journalières et estimations de débits des crues de 1935, 1973 et 1960.

## 2 Prise en compte du karst

### 2.1 Présentation générale du système karstique

La karstification consiste en la transformation d'une formation carbonatée fracturée (l'aquifère carbonaté fissuré) caractérisé par une architecture géologique, en un aquifère karstique, du fait de l'érosion hydrochimique et hydraulique. C'est donc la circulation d'eaux dans la formation géologique qui façonne les vides de l'aquifère (allant de fissures d'ouverture micrométrique et longues de plusieurs mètres jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres et longs de plusieurs kilomètres) et induit des caractéristiques spécifiques. Toutes les régions karstiques présentent la marque de plusieurs phases de karstification, dont seules les plus récentes participent au fonctionnement de l'aquifère : il convient donc de considérer la fonctionnalité karstique de l'aquifère, et de ne pas se contenter de constater l'existence de phénomènes karstiques.

Figure 18 : Paysage karstique (Agence de l'eau, 1999)



Dans l'aquifère karstique, les écoulements ont créé des vides organisés en une structure hiérarchisée de drainage, le réseau de conduits, de l'amont (la surface) vers l'aval (la source, exutoire en général unique de l'aquifère). Souvent, au cours de la saison de recharge de

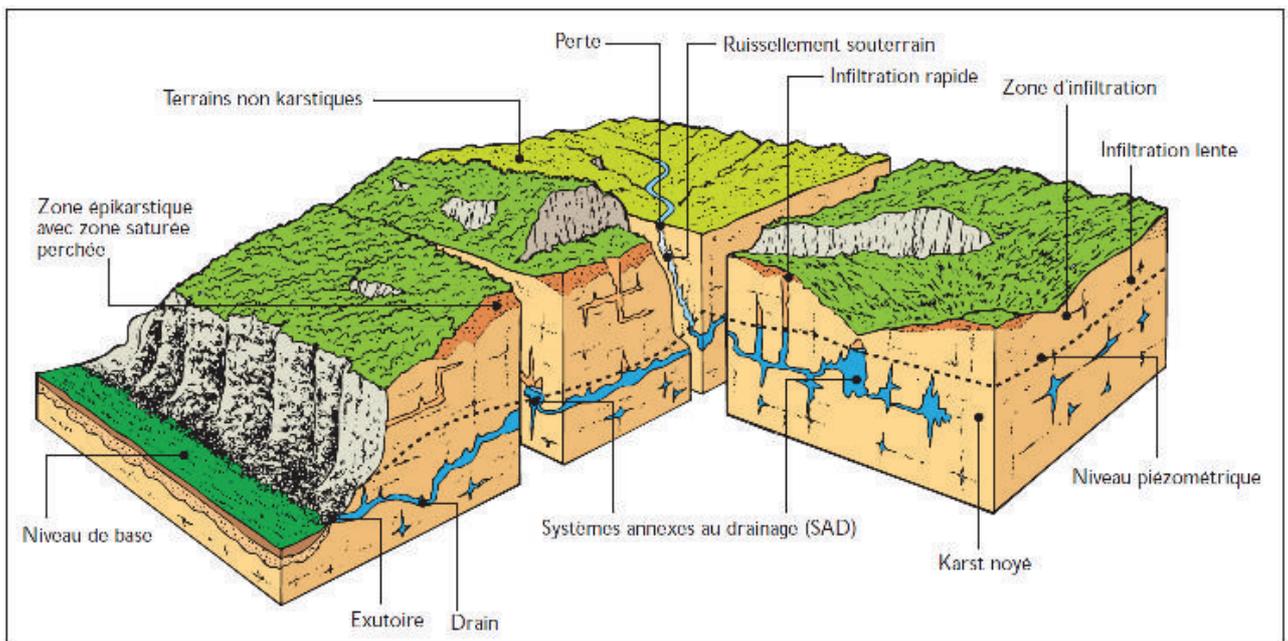
l'aquifère, des remontées importantes de l'eau dans le réseau de conduits provoquent l'inondation de réseaux supérieurs, habituellement sans écoulement, et la mise en fonctionnement de sources temporaires de trop plein.

L'aquifère karstique présente une organisation des écoulements souterrains, qui détermine celle des vides qu'ils créent. Dans cette organisation, les deux fonctions classiques (stockage et drainage) sont séparées, au moins dans la zone noyée, et sont assurées par des éléments distincts de la structure :

- le drainage est assuré par un réseau de conduits hiérarchisé.
- le stockage est fourni soit par les parties microfissurées ou poreuses de la roche non karstifiée, soit par des cavités karstiques, parfois de grandes dimensions, connectées au drainage par des zones à fortes pertes de charge (Systèmes Annexes au Drainage, SAD).

On notera que les vitesses d'écoulement souterrain vont de moins de quelques centimètres heure à plusieurs centaines de mètres par heure, selon les dimensions des vides, valeurs qui sont bien plus importantes que celles constatées dans les aquifères poreux. Par conséquent, le temps de séjour de la majorité des eaux est inférieur à un cycle hydrologique, et donc toutes les caractéristiques physiques, chimiques et hydrauliques présentent une très grande variabilité spatiale et temporelle.

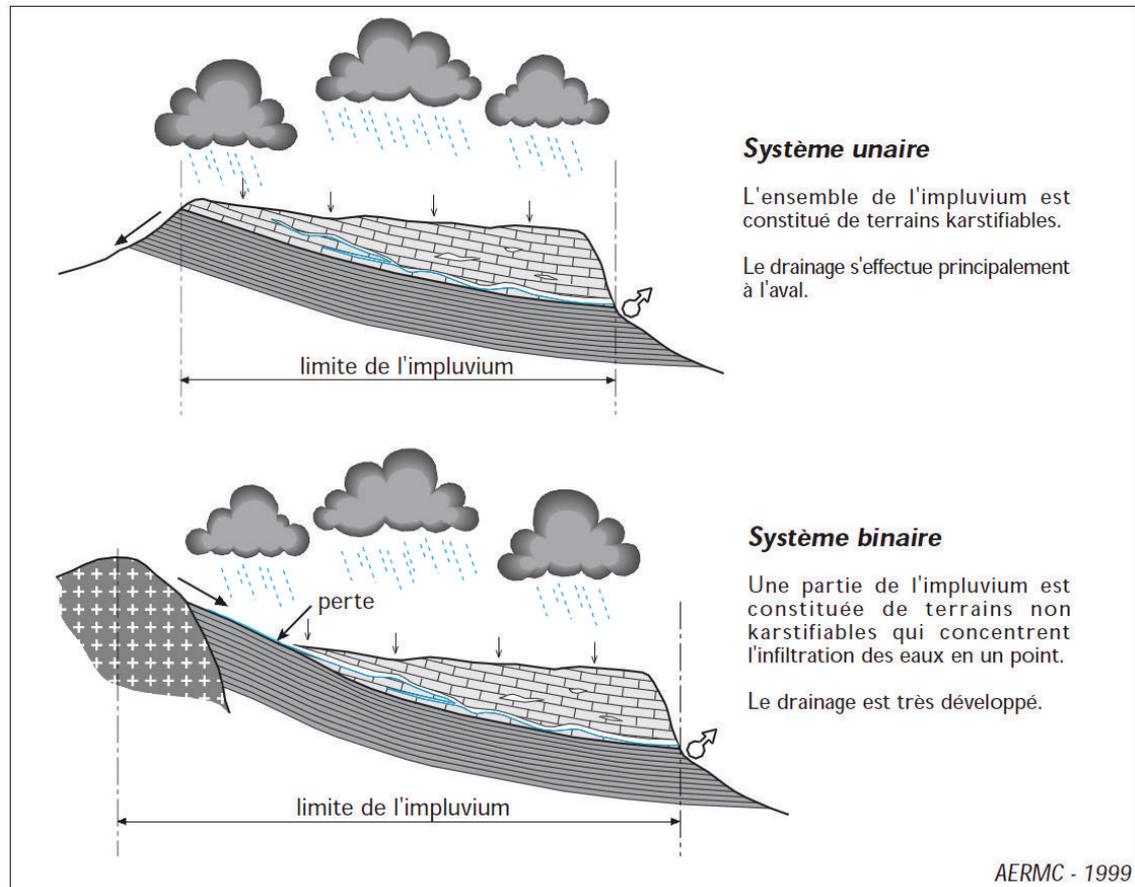
Figure 19 : L'aquifère karstique ( Mangin, 1975)



Les régions karstiques sont des milieux où l'eau est souvent absente en surface du fait de la grande perméabilité des terrains, notamment en raison de l'épikarst (zone plus perméable en raison de l'altération, en surface, sur quelques mètres de profondeur). On trouve deux types d'alimentation. D'une part, il y a l'alimentation par les précipitations, où on distingue les écoulements à infiltration lente avec possibilité de stockage temporaire, et ceux à infiltration rapide et concentrée qui rejoignent rapidement la zone saturée du karst sans nécessairement recharger significativement la zone non saturée : les limites du système correspondant aux limites de l'aquifère, on parle de système karstique unaire. D'autre part, on retrouve

l'alimentation par les pertes de rivière allochtone, où les écoulements provenant d'un bassin non karstique vont s'infiltrer rapidement : le système recevant des eaux précipitées sur une autre surface, on parle de système karstique binaire. A noter que la plupart des systèmes karstiques du bassin méditerranéen sont binaires.

Figure 20 : Les deux types de systèmes karstiques (AERMC, 1999)



Le karst a par ailleurs un impact lors des phénomènes de crue de surface. En effet, les inondations en milieu karstique se manifestent sous deux formes :

- une saturation des terrains en surface résultant de précipitations extrêmes, ce qui entraîne une saturation de la capacité d'absorption du karst (colmatage possible des drains et des fissures, sous dimensionnement des réseaux de drainage,...) ;
- une contribution rapide et intense des eaux karstiques aux écoulements de surface suite à une mise en charge du karst qui se traduit par une augmentation rapide du débit des émergences karstiques drainées par le cours d'eau.

Par ailleurs, en situation d'étiage, et compte tenu des fortes vitesses d'infiltration constatées, le karst permet d'absorber une partie non-négligeable des crues de surface.

On constate alors que le niveau de saturation du karst est un paramètre essentiel pour expliquer son rôle lors d'un phénomène de crue de surface.

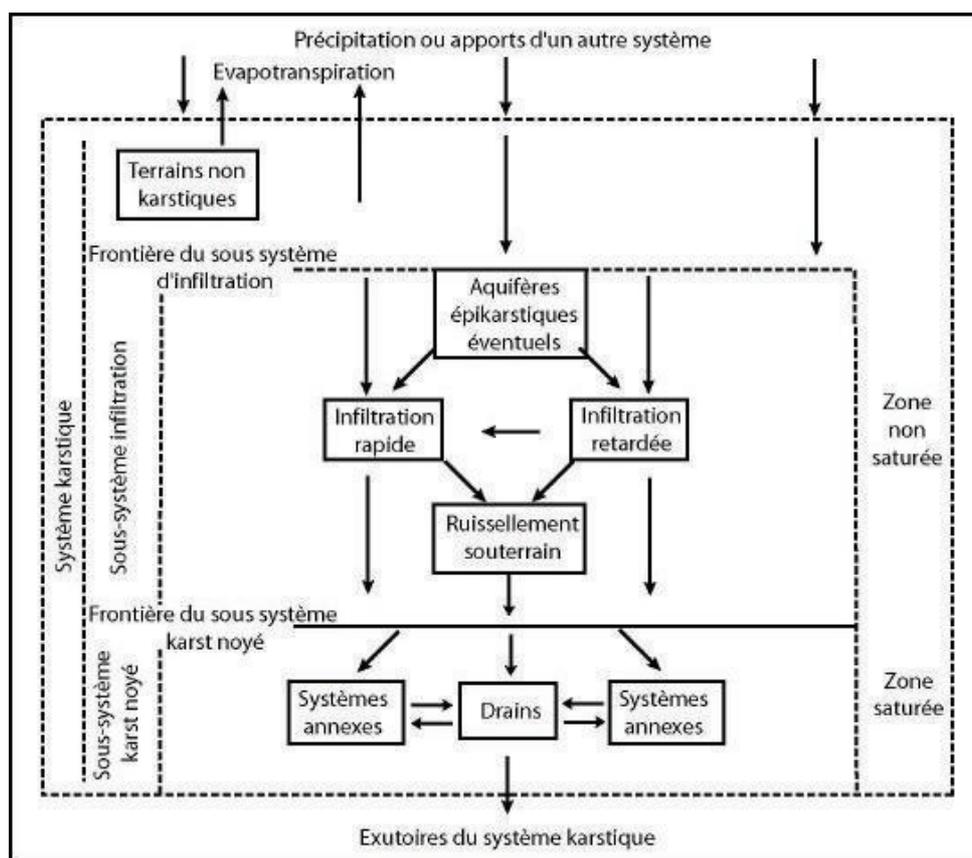
Comme on peut le voir, les systèmes karstiques sont des ensembles complexes à analyser compte tenu du nombre important d'éléments qui entrent en jeu, et ce à des niveaux d'échelles

différentes. Le karst est alors considéré dans une première approche comme une boîte noire, étudiée à partir de modèles faisant intervenir des mesures hydrologiques et hydrométriques.

Alain Mangin, en 1975, a néanmoins proposé un schéma suivant représentant le fonctionnement général du karst. Pour répondre à la particularité des aquifères karstiques, ce schéma est composé de deux sous-systèmes :

- le sous-système d'infiltration qui correspond à la zone non-saturée : présence d'un aquifère épikarstique près de la surface (infiltration retardée) et d'une zone sous-jacente où se produisent à la fois une infiltration rapide dans les grandes fractures (écoulement monophasique) et une infiltration retardée dans les fissures de petite taille (écoulement diphasique, mélange d'eau et d'air) ;
- le sous-système karst noyé, qui correspond à la zone saturée : fonction transmissive assurée par des drains, fonction capacitive reliée aux systèmes annexes de drainage.

Figure 21 : Schéma de fonctionnement général des karsts (Mangin, 1975)

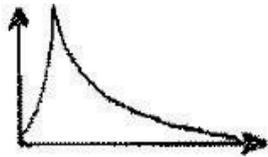
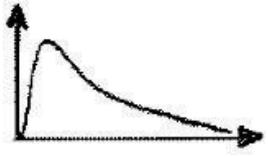
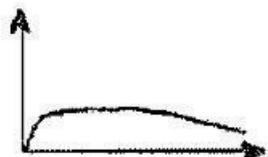


Par ailleurs, suite aux travaux de Mangin, une classification hydrodynamique des aquifères karstiques de la Sainte Baume peut être mise en place. Celle-ci s'appuie sur des techniques de traitement du signal où le karst est considéré comme un opérateur modulant. Les types d'aquifères karstiques se distinguent les uns des autres à l'aide de trois paramètres, empruntés au langage du traitement du signal :

- l'effet mémoire, qui correspond au nombre de jours  $k$  pour lequel le corrélogramme prend la valeur  $r(k)=0.2$ . Il représente l'inertie de l'aquifère et donne une idée de la présence de réserves et du degré de karstification. Cet effet est proportionnel au pouvoir de filtre du système, et est inversement proportionnel au degré de karstification : moins un système est drainé avec des réserves importantes, plus la décroissance du débit et du corrélogramme sera lente, et plus la valeur de l'effet mémoire sera élevée, et inversement.
- la fréquence de coupure, qui est égale à la valeur de fréquence pour laquelle la densité de variance devient nulle ou négligeable, c'est-à-dire la valeur à partir de laquelle les informations liées à la fonction d'entrée du système sont totalement filtrées. Elle correspond à la durée minimale que doit avoir une pluie pour influencer sur le système. Plus cette fréquence est basse, plus l'inertie est grande et donc le système est moins karstifié.
- le temps de régulation, qui représente la durée d'influence du signal d'entrée, c'est-à-dire la longueur de la réponse impulsionnelle. Sa valeur est égale à la moitié de la valeur du spectre à fréquence nulle. Plus le temps de régulation est grand, plus le système possède un comportement inertiel, plus les réserves sont grandes et le système est moins karstifié.

Mangin a identifié quatre types de comportement, que l'on retrouve tous dans le massif de la Sainte Baume.

Tableau 24 : Classification hydrodynamique des aquifères karstiques selon Mangin (1984), issu de la thèse de Martin (1991), à l'aide de techniques de traitement du signal

Types	« Effet mémoire » $r=0.2$ en jour	Bande spectrale (fréquence de coupure)	Temps de régulation (en jours)	Forme de l'hydrogramme unitaire
<b>Aliou</b>	Réduit : 5j	Très large : 0.30	10 à 15j	
<b>Baget</b>	Petit : 10 à 15j	Large : 0.20	20 à 30j	
<b>Fontestorbes</b>	Grand : 50 à 60j	Etroite : 0.10	50j	
<b>Torcal</b>	Considérable : 70j	Très étroite : 0.05	70j	

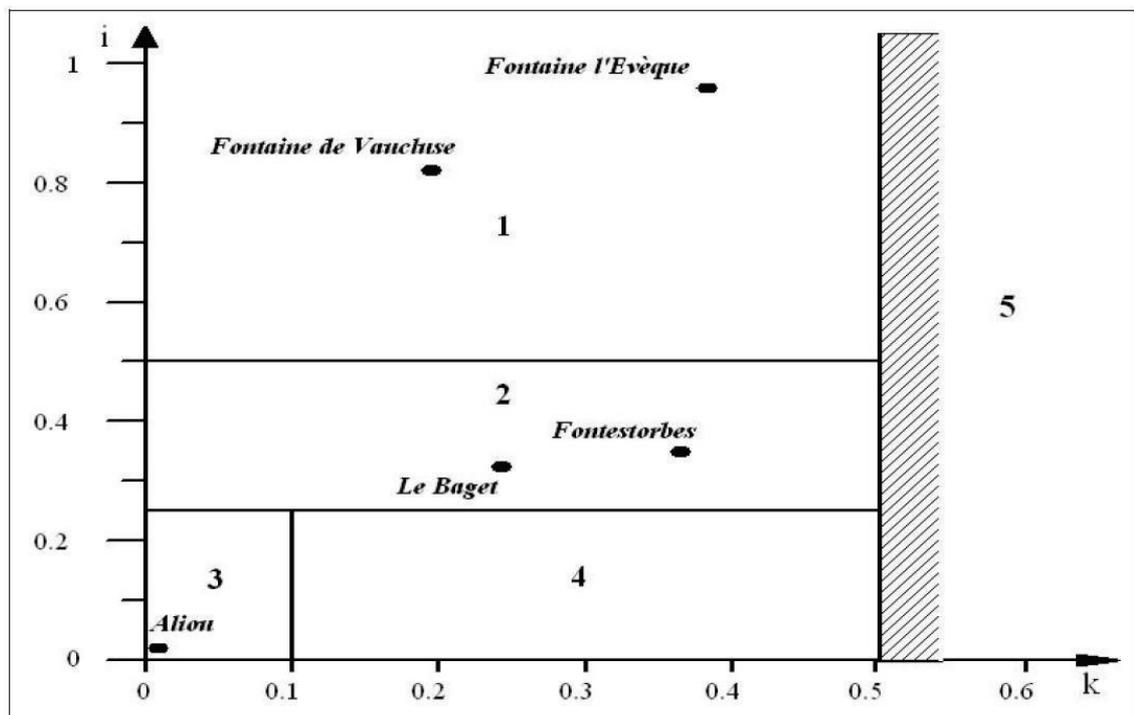
Une autre manière de classer les systèmes karstiques a été mise en place par Mangin, à l'aide de l'analyse des courbes de récession. Celle-ci repose sur l'utilisation de deux paramètres :

- le coefficient  $k$ , qui se rapporte à l'importance du karst noyé, et traduit l'aptitude du système à stocker les précipitations et les restituer progressivement ;
- le coefficient  $i$ , qui se rapporte au fonctionnement de la zone d'infiltration et caractérise les apports au karst noyé en traduisant les retards à l'infiltration ( $i$  élevé pour une infiltration lente, faible pour une infiltration rapide).

Mangin a alors regroupé sur un seul diagramme les couples ( $k ; i$ ) de plusieurs aquifères karstiques de référence et a distingué cinq types de comportement :

- **1** : domaine des systèmes karstiques complexes, de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous-systèmes
- **2** : domaine des systèmes ayant des conduits karstiques plus développés en amont qu'en aval et se caractérisant par des retards dans l'alimentation dus à des terrains non karstiques ou à une couverture neigeuse
- **3** : domaines des systèmes ayant des conduits très karstifiés en aval où l'infiltration rapide domine avec une zone noyée négligeable et possédant des réseaux spéléologiques très développés
- **4** : domaine des systèmes possédant un réseau spéléologique bien développé et débouchant à l'aval sur un important karst noyé
- **5** : domaine des aquifères non karstiques

Figure 22 : Classification des systèmes karstiques basée sur l'analyse des courbes de récession (Mangin, 1975)



## 2.2 Le système karstique du bassin de l'Huveaune

Comme évoqué précédemment, le bassin versant de l'Huveaune est hautement karstique, avec la répartition estimée suivante :

■ Massif de la Sainte Baume (plan d'Aups compris)	77.0 km <sup>2</sup>
■ Aurélien-Regagnas	39.5 km <sup>2</sup>
■ Etoile Massif d'Allauch (+ La Salette)	85.5 km <sup>2</sup>
■ Carpiagne, et chaînes méridionales	68.5 km <sup>2</sup>

Figure 23 : Carte synthétique du bassin de l'Huveaune (Mazet)

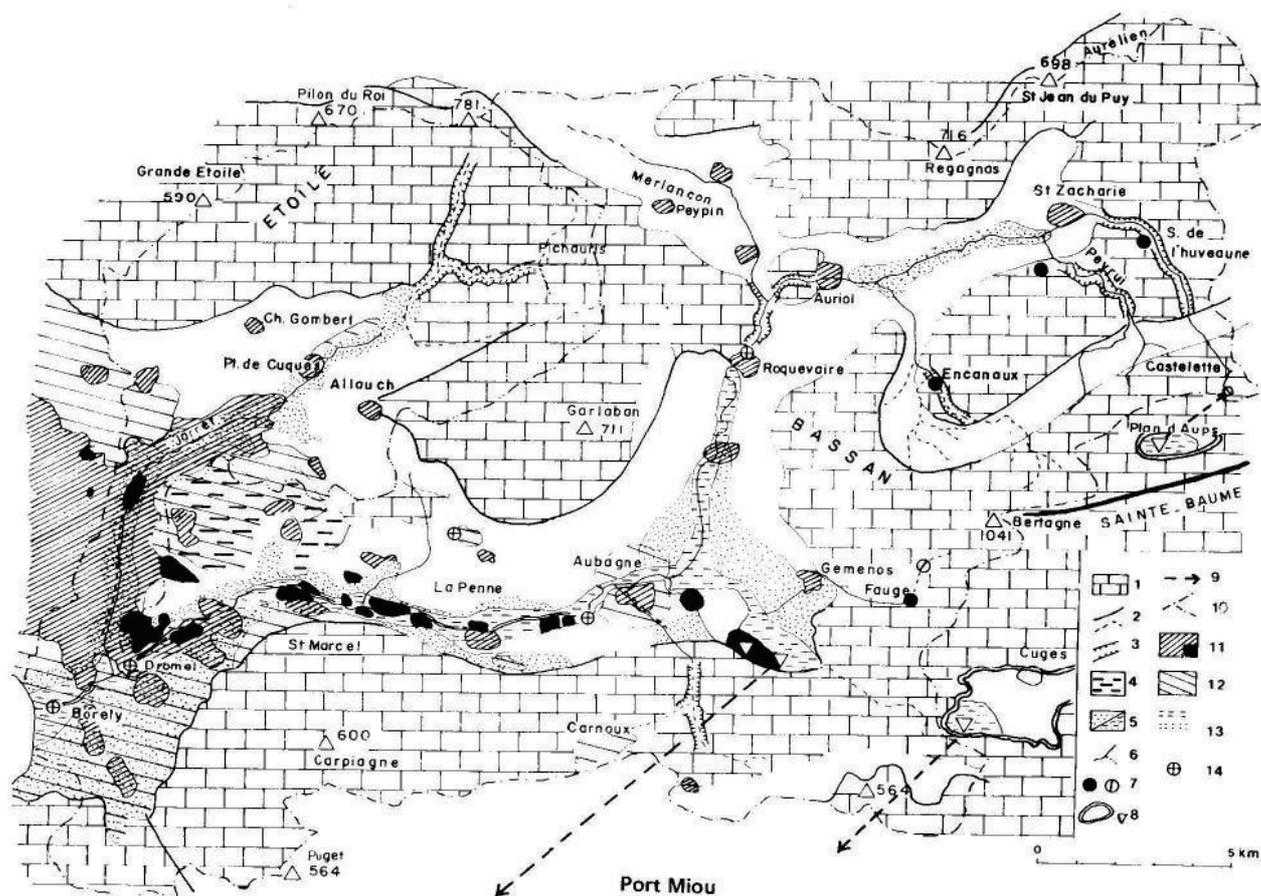


Fig. 4 : CARTE SYNTHETIQUE DU BASSIN DE L'HUVEAUNE

1 : Unités karstiques ; -2 : Limite escarpement tectonique ; -3 : Gorges ; -4 : Plateau de travertins villafranchiens ; -5 : Nappe alluviale et zone inondable ; -6 : Cours d'eau permanent, temporaire ; -7 : Sources permanentes, temporaires ; -8 : Bassin fermé, pertes ; -10 : Lignes de partage des eaux (théorique) ; -11 : Espaces bâtis continus, industries ; -12 : Habitat non continu mais dense ; -13 : Lit artificiel, lit artificiel couvert ; -14 : Limnigraphe.

Figure 24 : Structures géologiques et principaux axes de drainage souterrain de la Sainte Baume (P. Martin)

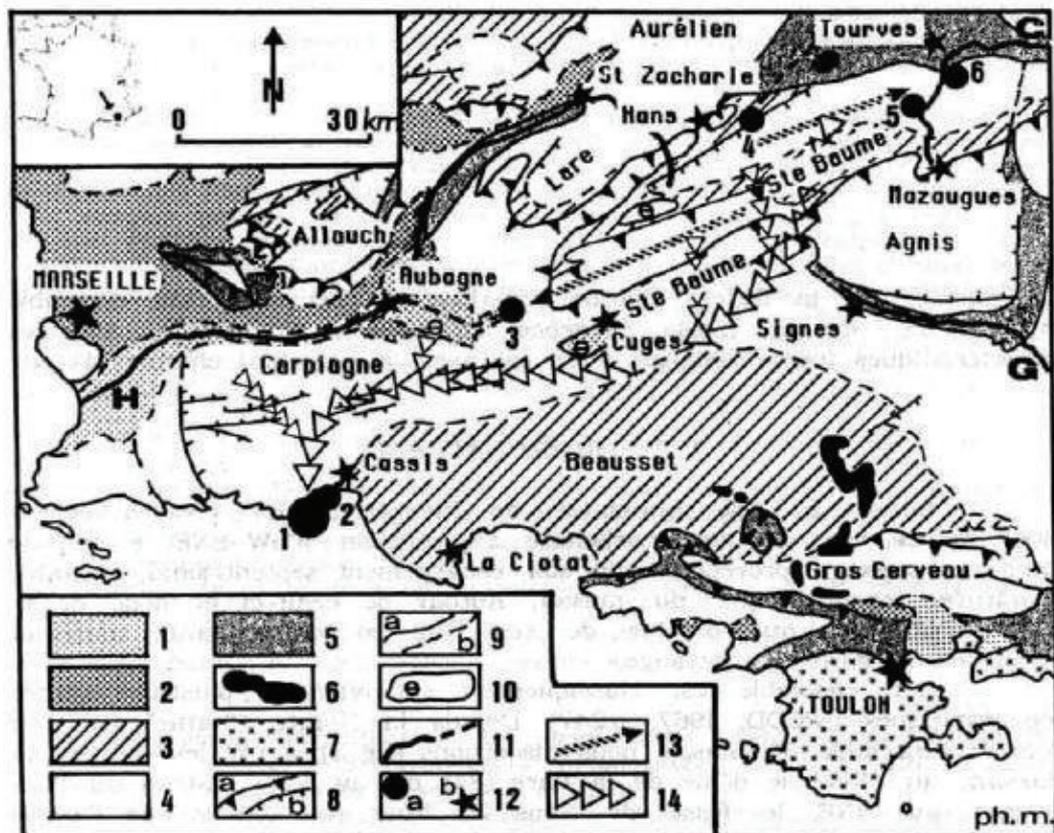


Fig. 1: Structures géologiques et principaux axes de drainage souterrain

## Légende:

1 - Quaternaire. 2 - Oligocène. 3 - Crétacé supérieur. 4 - Jurassique et Crétacé inférieur. 5 - Trias. 6 - formation volcanique. 7 - permien et formation métamorphique. 8a - chevauchement, 8b - faille. 9a - décollement principal. 9b - limite stratigraphique. 10 - poljé et ponor. 11 - rivière pérenne et temporaire. 12a - source. 12b - ville et village. 13 - drainage à l'échelle du massif vers les sources orientales et occidentales les plus basses (niveau 2). 13 - drainage à l'échelle régionale vers les sources sous marines de Port Miou et du Bestouan à Cassis (niveau 3).

Ainsi, on estime à plus de 270 km<sup>2</sup> la surface totale des affleurements calcaires sur le bassin versant de l'Huveaune, ce qui représente plus de la moitié de la surface totale du bassin (source : J.J. Mazet). On retiendra notamment que la plupart de ces affleurements correspondent aux reliefs, situés dans la partie amont du bassin versant, en particulier au niveau de la Sainte Baume (Baou de Bertagne, altitude 1041m) et de l'Etoile (Grand Puech, altitude 781m).

### 2.3 Le Massif de la Sainte Baume

Le Massif de la Sainte Baume est le plus méridional des chaînons de la Basse Provence carbonatée. De structure géologique pyrénéo-provençal, d'une vingtaine de kilomètres de long sur une dizaine de large, il est constitué par une haute chaîne étirée d'Ouest en Est qui domine

d'importants plateaux karstifiés. La Sainte Baume est d'ailleurs le massif de la Basse Provence carbonatée où le karst est le mieux développé : il présente 180 cavités, en particulier l'aven du Petit Saint Cassien (-321m et 9.3km), le réseau Sabre (4.3km) et la grotte de la Castelette (grande salle de 4150m<sup>2</sup>). L'histoire du massif est assez complexe, et sa fracturation l'est tout autant.

Au Nord, la série renversée est constituée de dolomites jurassiques, de Crétacé inférieur réduit et de calcaire récifaux de l'Urgonien, qui forment la falaise principale du massif. Cette série renversée chevauche le synclinal Santonien-Campanien du Plan d'Aups. Ce dernier est formé de calcaires du Crétacé supérieur ployés en un synclinal couché, il forme une cuvette dont le fond est percé d'orifices naturels (d'origine karstique) et qui peut temporairement être inondé en cas de fortes précipitations. Au Sud, on trouve la série normale, constituée de Jurassique et du Lias.

Il est par ailleurs considéré comme étant le principal château d'eau de la Basse Provence (Nicod, 1980). Deux fleuves côtiers sont alimentés par la Sainte Baume : l'Argens à l'Est et l'Huveaune à l'Ouest. Concernant ce dernier, qui prend sa source au pied du Plan d'Aups, au fond de la reculée de la Castelette, il est alimenté par trois ruisseaux : le ruisseau de la Gastaude, le ruisseau de Peyruis, le ruisseau de la Vède et le Fauge. Il est alors à noter que la délimitation précise de la partie de la Sainte Baume contribuant à l'alimentation de l'Huveaune peut être difficile, le bassin versant géographique n'étant pas nécessairement en accord avec le bassin réel compte tenu des écoulements souterrains qui peuvent être importants dans le karst.

Une étude avancée du Massif de la Sainte-Baume a été menée par Philippe Martin (1991). C'est d'ailleurs de cette thèse que proviennent une grande partie des informations concernant ce massif karstique présentées ici.

### 2.3.1 Le bassin versant du Fauge

L'impluvium considéré est ici la vallée fluvio-karstique de Saint Pons, qui s'étend du pied de l'escarpement du pic de Bertagne jusqu'à la plaine d'Aubagne. Celle-ci, à travers l'impact du Fauge, incise profondément le Massif de la Sainte Baume.

Le bassin versant superficiel amont, qui correspond à une zone en très forte pente avec une érosion marquée, ne fonctionne que de façon très épisodique. Il est alimenté par la source de la Glacière, la Tourne de Saint Pons, la source de Saint Pons (principal apport, le seul en période d'étiages, débit de l'ordre de 200l/s en moyenne d'après une étude du BRGM datant de 1981) et la source des Cabrelles. A noter qu'il n'existe qu'une seule source au niveau des collines de Gémenos-Bassan, la source de la Saucette, dont le très faible débit est d'une dizaine de litres par seconde.

Figure 25 : La vallée de Saint Pons (P. Martin, 1991)

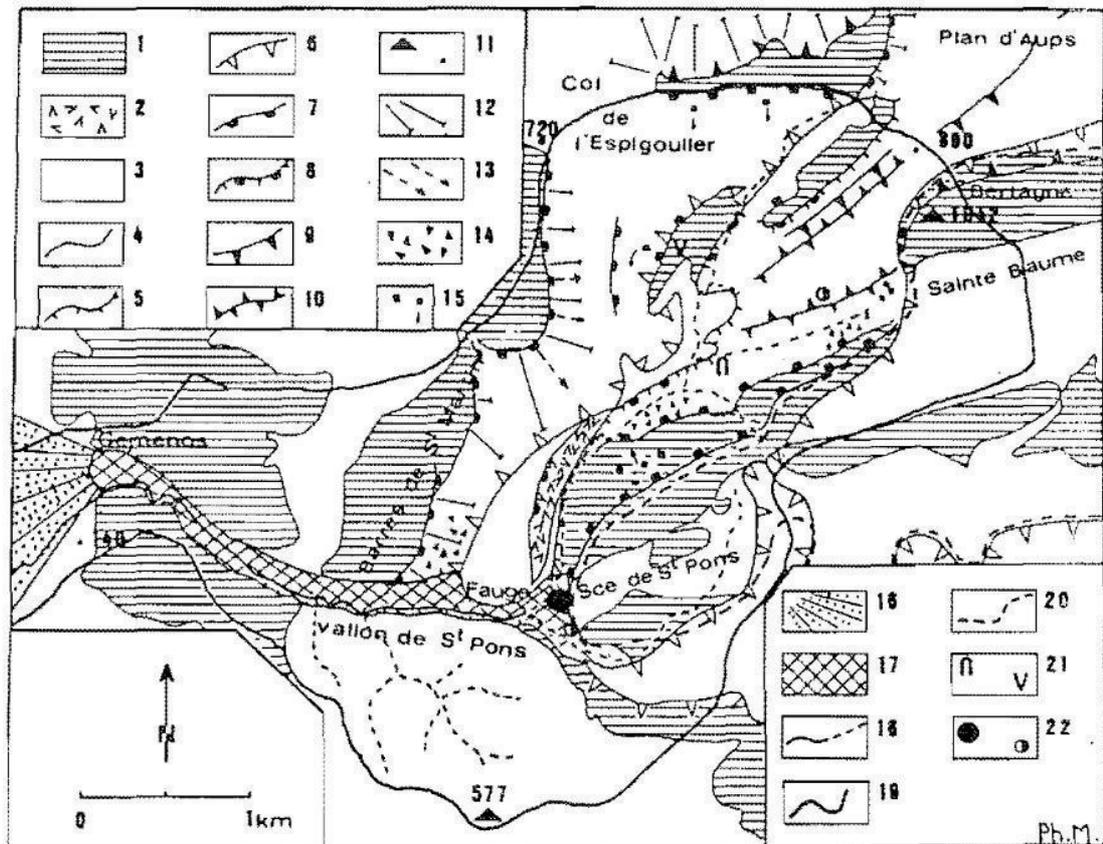


Fig. 14 LA VALLEE DE SAINT-PONS ; MORPHO-STRUCTURE, HYDROLOGIE ET KARST

**Morpho-structure :** 1. Affleurement calcaire ; 2. Trias (t9) à lentilles de gypse ; 3. Autre affleurement (marnes, dolomies) ; 4. Limite d'affleurement ; 5. Faille principale ; 6. Chevauchement ; 7. Escarpement ; 8. Escarpement lié à une faille ; 9. Crat. ; 10. Bonne-Modèle quaternaire et actuel ; 11. Sommet et point coté ; 12. Versant régularisé ; 13. Couloir d'éboulis actif ; 14. Groize ; 15. Bloc éboulé de corniche ; 16. Cône de déjection ; 17. Comblement du vallon.

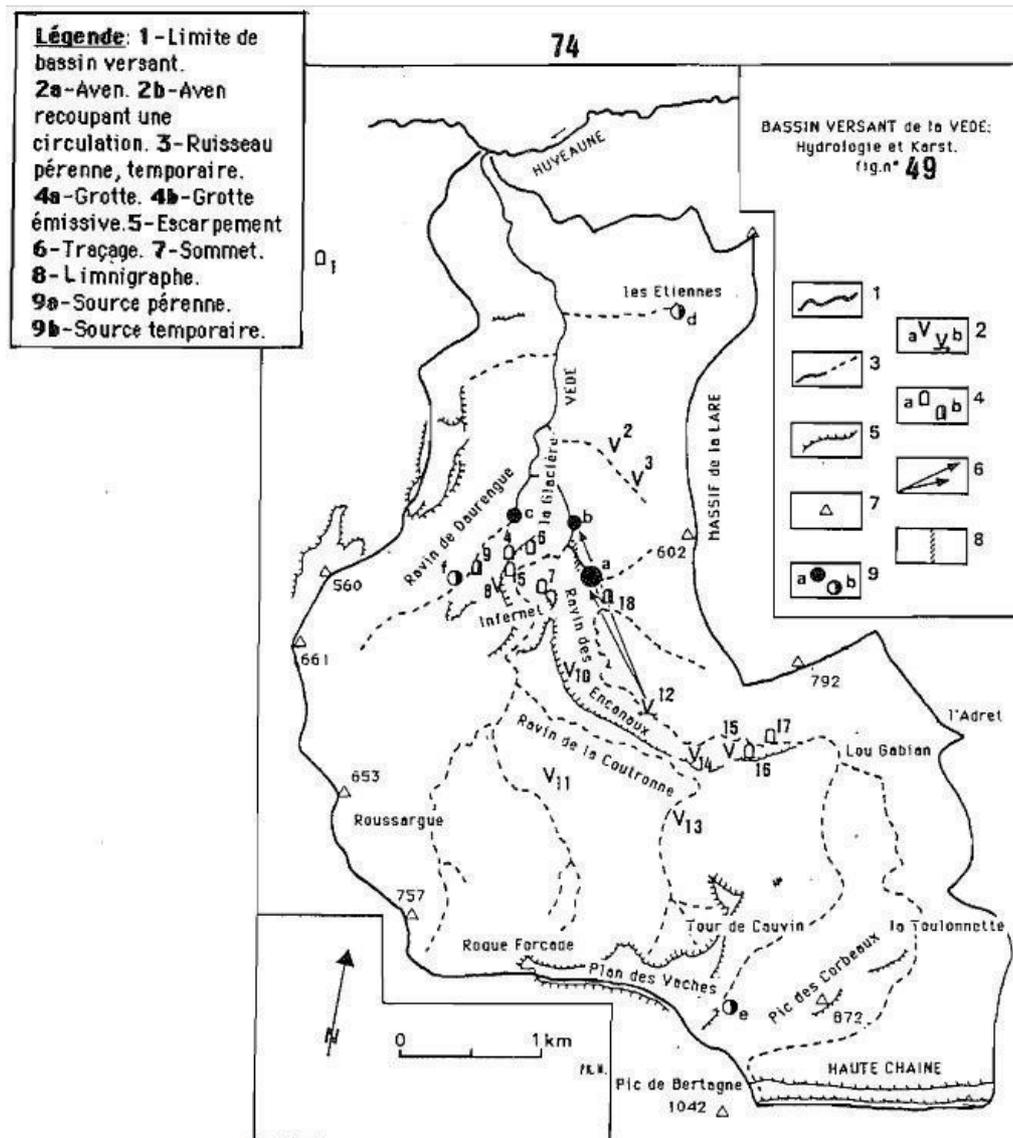
**Hydrologie et karst :** 18. Ruisseau pérenne, temporaire ; 19. Limite du bassin versant ; 20. Limite du bassin d'alimentation de la source de Saint-Pons ; 21. Grotte, aven ; 22. Source pérenne, temporaire.

L'aquifère de la source de Saint Pons est assez hétérogène d'après l'étude de P. Martin (1991). Cette variabilité inciterait à penser qu'il possède un réseau de drainage mais pour une large part non fonctionnel.

### 2.3.2 Le bassin versant de la Vède

L'impluvium considéré ici est situé au Nord Ouest de la Sainte Baume, délimité par les collines de Bassan, la haute chaîne et le massif de la Lare. La Vède est alimentée par les écoulements des Encanaux (principalement les sources des Encanaux supérieurs et des Encanaux Inférieurs), de Daurengue (source « chaude » de la Glacière, réseau émissif des Brailles) et des Infernets (où il n'y a un écoulement qu'en cas de fortes précipitations).

Figure 26 : Bassin versant de la Vède (P. Martin, 1991)



Concernant le fonctionnement des systèmes karstiques du vallon des Encanaux, d'après l'étude de C. Coulier en 1983, deux ensembles sont à distinguer : les Encanaux supérieurs (sorties d'eau situées au-dessus de la confluence avec les Infernets) et les Encanaux inférieurs.

L'étude de P. Martin (1991) tend à montrer que le système des Encanaux supérieurs possède un aquifère bien drainé mais avec de faibles réserves et dont le fonctionnement change légèrement suivant son niveau d'imbibition (débit moyen de l'ordre de la centaine de litres par seconde). Quant aux Encanaux inférieurs, le système semble posséder un petit karst noyé, les

débits sont régulés par des systèmes annexes capacitifs de la zone non-saturée (en accord avec la nature des terrains rencontrés) qui sont drainés vers la source par un réseau assez bien développé (débit moyen de quelques dizaines de litres par seconde).

Par ailleurs, au niveau du vallon de Daurengue, il existe deux phénomènes karstiques : la source « chaude » de la Glacière et le réseau des Brailles. Le débit à la source de la Glacière n'excède jamais quelques litres par seconde. En revanche, si le siphon d'entrée de la source des Brailles peut s'assécher en périodes déficitaires, le débit de la source peut atteindre quelques centaines de litres par seconde pendant de courts moments en période de crue.

### 2.3.3 Le bassin versant de la Gastaude

Situé essentiellement dans les terrains calcaires et dolomitiques de la Lare, ce petit bassin est coïncé entre ceux de la Vède et du ruisseau de Peyruis, d'où une certaine étroitesse. En résulte alors un faible drainage au niveau du bassin, qui ne s'est ainsi pas autant approfondi que ses « voisins ». Des circulations souterraines semblent se produire, alimentant la source des Encanaux inférieurs et l'émergence des Encourons (vallon de la Gastaude).

### 2.3.4 Le bassin versant du ruisseau de Peyruis

L'impluvium considéré s'étend ici dans le massif de la Lare, les affleurements de la série allochtone Roque Forcade – Nans, jusqu'au rebord septentrional du Plan d'Aups et la retombée méridionale de l'anticlinal de la Lare au Sud. Deux émergences principales sont à relever : la source des Nayes et celle de Peyruis (on relèvera aussi l'émergence de la Taurelle, d'importance moindre).

D'après l'étude de P. Martin (1991), l'aquifère de la source de Peyruis semble ne présenter presque aucune réserve et avoir un fonctionnement non linéaire permettant l'écoulement de volumes non négligeables (débit moyen de plusieurs dizaines de litres par seconde). Concernant les Nayes, elles peuvent être vues comme le phénomène essentiel du drainage de la Lare. L'aquifère correspondant est complexe, relativement mal drainé mais très capacitif (débit moyen de plusieurs dizaines de litres par seconde)

### 2.3.5 Le bassin versant de la Haute Huveaune

Alors que les affluents évoqués jusqu'à maintenant concernaient la retombée occidentale de la Sainte Baume, le terme « Haute Huveaune » renvoie ici à la partie du bassin versant drainant directement des surfaces appartenant à la Sainte Baume. Celle-ci est située à l'amont de Saint Zacharie mais aussi sur une partie du massif de l'Aurélien.

L'impluvium considéré présente plusieurs émergences : la source de la Brise, le Foux de Saint Zacharie, la source de la Taurelle, la source Lazare, mais aussi et surtout les sources de la reculée de Castelette (la grotte de la Castelette, la résurgence basse de la grotte de Castelette, le trou du Moulin, la source de l'Huveaune). Toutefois, il semble que le bassin versant réel s'étende au-delà de la vallée de l'Huveaune, englobant notamment la cuvette du Plan d'Aups.

En période de crue, l'essentiel des apports provient des sources de la reculée de Castelette. En revanche, celles-ci sont à sec lors des périodes d'étiage et les uniques apports proviennent de la source Lazare. L'étude avancée des sources de la reculée de Castelette menée par C. Coulier (1985) montre en effet que l'émergence de l'Huveaune est très sensible aux précipitations, avec des débits pouvant atteindre 200L/s.

D'une manière générale, au niveau du bassin versant de la Haute Huveaune, et malgré les apports de nombreuses sources (certaines drainant même des terrains hors du bassin versant apparent), on constate des pertes karstiques importantes. Néanmoins, malgré le rôle de filtre joué par le karst, les crues ne sont pas pour autant gommées.

### 2.3.6 Diversité de fonctionnement des aquifères

Globalement, la partie de la Sainte Baume incluse dans le bassin versant de l'Huveaune présente des aquifères qui sont drainés vers le Nord, vers des sources locales, en fonction de gorges recoupant les structures géologiques. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit que nous ne travaillons que sur une partie de la Sainte Baume : il n'y a donc pas conservation de la quantité d'eau, compte tenu non seulement des échanges souterrains avec la partie à l'Est du massif, mais aussi des pertes estimées à environ  $1\text{m}^3/\text{s}$  sur l'ensemble de la Sainte Baume au profit des sources sous marines de Cassis au Sud.

Le drainage souterrain au sein du massif est anisotrope et hétérogène. Cela est la conséquence d'un niveau de karstification qui n'est pas homogène sur l'ensemble du massif et qui peut s'expliquer par des facteurs géologiques, des vitesses de karstification spécifiques, des événements particuliers et le fonctionnement d'hydrosystèmes fluviatiles.

Les fonctionnements de chacun de ces aquifères sont extrêmement variés, et il existe alors une diversité spatiale au sein de la seule entité qu'est la Sainte Baume. Suite aux travaux de Martin et Mangin, une classification hydrodynamique des aquifères karstiques de la Sainte Baume peut être mise en place. Celle-ci s'appuie sur des techniques de traitement du signal où le karst est considéré comme un opérateur modulant. Mangin a identifié quatre types de comportement (cf. tableau 24), que l'on retrouve tous dans le massif de la Sainte Baume.

Martin (1991) a alors attribué à chaque bassin karstique de la Sainte Baume le type correspondant. Ainsi :

- **Saint Pons est du type Torcal** (réserves considérables, hydrogramme unitaire arrondi et étalé, temps de régulation important).
- **Les Encanaux supérieurs sont du type Aliou** (peu de réserves, hydrogramme unitaire étroit et pointu, temps de régulation faible).
- **La Figuière, en position intermédiaire, est du type Fontestorbes** : on trouve deux sortes de drainage, l'un transmissif et peu capacitif correspondant à la pointe de l'hydrogramme unitaire, l'autre peu transmissif mais très capacitif aboutissant à un hydrogramme « ventru ».

A noter la particularité de l'aquifère de Saint-Pons : celui-ci possède un important potentiel de karstification (calcaires urgoniens), mais son fonctionnement correspond à celui d'un aquifère ne possédant pas de structures internes permettant d'effectuer un drainage très transmissif. Cela ne signifie pas pour autant que ces structures n'existent pas. Plusieurs explications peuvent être envisagées : la première s'appuie sur une diminution de la charge hydraulique par une remontée du niveau de base, la seconde envisage des pertes de charge sous l'effet de morpho-structures qui moduleraient les débits (colluvionnement colmatant un exutoire, faciès marneux et fracturé au travers duquel s'effectue la résurgence de l'eau, bouchon travertineux,...)

Ainsi, chaque système karstique possède un comportement propre, lié à des différences d'état et de stade d'évolution. Cette dernière est donc loin d'être linéaire et spatialement homogène.

## 2.4 Les autres formations karstiques du bassin versant de l'Huveaune

Outre le massif de la Sainte Baume, nous avons noté que des formations karstiques étaient présentes dans le bassin versant de l'Huveaune au niveau de l'Aurélien-Regagnas, de l'Etoile – Massif d'Allauch et de Carpiagne (incluant les chaînes méridionales). Si l'influence de ces formations est moindre que celle de la Sainte Baume, il convient néanmoins d'évoquer leurs caractéristiques, qui ont été étudiées par le BRGM (Etude des ressources hydrologiques et hydrogéologiques du Sud-est, juin 1968).

### 2.4.1 Le Massif de l'Aurélien-Regagnas

L'ensemble Olympe-Aurélien limite le bassin de Gardanne vers l'Est. Il est essentiellement constitué de Jurassique supérieur et d'une écaille de Lias à la base qui chevauche vers le Nord le Crétacé supérieur du bassin d'Aix. Ces massifs semblent être drainés par des sources situées dans la haute vallée de l'Huveaune : Petit Foux et Fouen Sicard (120L/s). Sur le versant Nord, les émergences de faible débit s'établissent au contact du Lias et du Crétacé supérieur, alimentées par les calcaires du Lias. Dans le massif lui-même, il n'y a que peu de sources, d'autant qu'elles n'ont qu'un très faible débit.

Quant à la chaîne du Regagnas, elle est encadrée par le Massif de l'Etoile et l'Olympe. C'est une chaîne modeste, de structure anticlinale et formée de calcaires et de dolomies du Jurassique supérieur. Elle est pauvre en eau, et le massif n'a pas d'exutoire superficiel. Les eaux superficielles s'y infiltrent.

### 2.4.2 Le Massif de l'Etoile – Massif d'Allauch

Le Massif de l'Etoile est un vaste anticlinal dont le flanc Sud plonge vers le bassin de Marseille. La dolomie jurassique de la zone centrale a 800m d'épaisseur. Tandis que le versant Sud est très aride, des sources existent sur le versant Nord dans tous les vallons importants, mais elles n'alimentent pas le bassin versant de l'Huveaune. La masse dolomitique de la chaîne

proprement dite est drainée par la galerie de la mer évacuant les eaux d'exhaure du bassin minier de Gardanne. Le débit collecté en provenance des calcaires est de l'ordre de 500L/s.

Concernant le Massif d'Allauch, c'est un dôme anticlinal faillé (horst) à noyau de Dogger et comportant surtout du Crétacé inférieur calcaire. Les enveloppes crétacées plongent vers le Nord, à l'Ouest et le Sud tandis qu'à l'Est les couches se prolongent par un dispositif monoclin. Le massif est globalement pauvre en eau. La karstification est importante, ce qui pourrait expliquer que le ruissellement est vite absorbé, notamment du fait de la présence importante de lapiès. Le réseau semble être peu profond, bloqué par l'Hauterivien marneux. Les eaux peuvent se perdre dans la nappe des poudingues oligocènes de Marseille car descendant plus bas que le fond des vallons, mais le drainage semble majoritairement se faire en direction de la vallée de l'Huveaune du fait des gypses du Trias d'Allauch.

### 2.4.3 Le Massif de Carpiagne

Le massif de Carpiagne est un vaste anticlinal dont le cœur bathonien est parsemé de nombreux ravins. Il est parcouru par de multiples failles longitudinales et transversales. Trop dolomitisé (Jurassique supérieur, jusqu'à 2000m d'épaisseur), le massif est pauvre en eau, mais il existe quelques suintements au contact de l'Urgonien calcaire et du Néocomien marneux et calcaire sur le versant Nord.

Remarques :

- Il est à noter que l'anthropisation progressive du milieu impacte en partie le fonctionnement du milieu karstique. En effet, des surfaces sont imperméabilisées, ce qui entraîne un ruissellement plus important au détriment de l'infiltration.
- Des habitants du bassin de l'Huveaune nous ont expliqué qu'il existait de nombreuses galeries minières souterraines dans les massifs que nous avons évoqués précédemment. Aujourd'hui, celles-ci ne sont pas précisément localisées, si bien qu'avec l'urbanisation intense, des affaissements de bâtiments auraient lieu, engendrant la fissuration de certaines habitations. Ces galeries, créées par l'homme, ont sans nul doute un impact sur le réseau des écoulements souterrains dans le milieu.

## 2.5 Conclusion

Le système karstique du bassin versant de l'Huveaune apparaît donc comme un système complexe. Il est tout d'abord très difficile de le délimiter très précisément car, compte tenu des écoulements souterrains, le bassin versant réel est différent du bassin versant géographique, et les apports provenant de surfaces drainées à l'extérieur du bassin versant géographique peuvent être considérables. Il semble cependant admis que des écoulements souterrains importants drainent une partie du karst vers l'extérieur du bassin versant de l'Huveaune, le bilan sur le bassin étant globalement négatif.

La synthèse des informations recueillies permet de décrire le fonctionnement global de la manière suivante :

- **Les écoulements dans le massif karstique se font avec un niveau de base à - 300m, et avec plusieurs étages bien identifiés.**
- **Il existe un drainage horizontal profond, à l'origine de plusieurs rivières souterraines ayant leur exutoire en mer (Port Miou, Sormiou). Les pertes semblent plus importantes sur la partie Sud-Ouest de la Ste Baume.**
- **Massif de la Ste Baume : superposé au drainage horizontal profond, il existe des compartiments verticaux à l'origine des différences sources dans le massif (sept compartiments). Les écoulements Sud et Ouest sont dirigés hors du bassin de l'Huveaune. Les sources ont des fonctionnements différents : la source de St Pons drainerait l'épikarst de la partie Ouest de la Ste Baume. Les sources ont des fonctionnements qui peuvent être assez différents.**
- **Le massif du Garlaban devrait alimenter l'Huveaune via le karst, des analyses sont prévues dans le cadre de l'étude BRGM en cours. Des pertes auraient lieu également vers le plateau de la Mure.**
- **Massif de l'Etoile : très forte infiltration, pertes vers l'extérieur du bassin de l'Huveaune**
- **La galerie de la mer draine le massif de l'Etoile, avec un débit de l'ordre de 1000 à 1200 m<sup>3</sup>/h. Il s'agit d'une conduite qui se rejette en mer, réalisée pour drainer des eaux de pompage de galeries minières de Gardanne, et qui de fait réalise également un drainage du massif. La capacité maximale est de 2,5 à 3 m<sup>3</sup>/s.**
- **Massif du Regagnas : pas de grands axes de circulation souterraine identifiés.**

### 3 Analyse des épisodes de crue

#### 3.1 Historique des crues marquantes sur le bassin versant

L'ensemble des données historiques recueillies a permis de dresser une chronique des événements marquants identifiés depuis le 16<sup>ème</sup> siècle.

Le tableau 20 au chapitre précédent fournit la liste de ces épisodes ainsi que leurs principales caractéristiques issus des études antérieures (pluie, débits, description des phénomènes). Pour rappel, les épisodes les plus importants généralisés sur le bassin versant apparaissent en orangé. Les épisodes concernant plus spécifiquement la zone urbaine de Marseille sont grisés.

Ce tableau met en évidence une vingtaine de crues largement débordantes sur le bassin versant depuis le début du 16<sup>ème</sup> siècle, soit une moyenne de 4 par siècle. La plus forte crue connue serait celle d'octobre 1892, pour laquelle les relevés de pluie indiquent un cumul de 221mm en 4h à Marseille, et 210mm à Aubagne.

Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, 4 crues importantes ont été identifiées en 1907, 1935, 1960 et 1978, la crue de 1935 étant la plus forte.

La crue de 1907 est localisée sur l'aval du bassin versant, ses conséquences seraient sensiblement égales à celles de 1892 à Marseille.

Les crues de 1935 et 1960 sont surtout marquantes à l'amont de Roquevaire, les débits de pointe sont estimés à 170-180 m<sup>3</sup>/s, soit nettement supérieurs aux débits des crues de décembre 2008 (54m<sup>3</sup>/s) et de 1978 (90 m<sup>3</sup>/s). Les pluies sont localisées en amont du bassin versant. En 1960, un phénomène d'écrêtement a contribué à atténuer les débits de pointe sur la zone aval du bassin entre Aubagne et la Penne sur Huveaune (cf hydrogramme observé disponible à Marseille en aval de la confluence Huveaune-Jarret).

La crue de 1978 est la crue débordante la plus récente et concerne tout le bassin versant. Elle fut générée par une averse longue et généralisée sur tout le bassin. D'après les analyses antérieures, l'épisode de pluie serait intervenu sur un karst saturé. Un épisode de pluie assez similaire a eu lieu en 1973, mais ses conséquences ont été moindres car il s'est produit sur un sol non saturé.

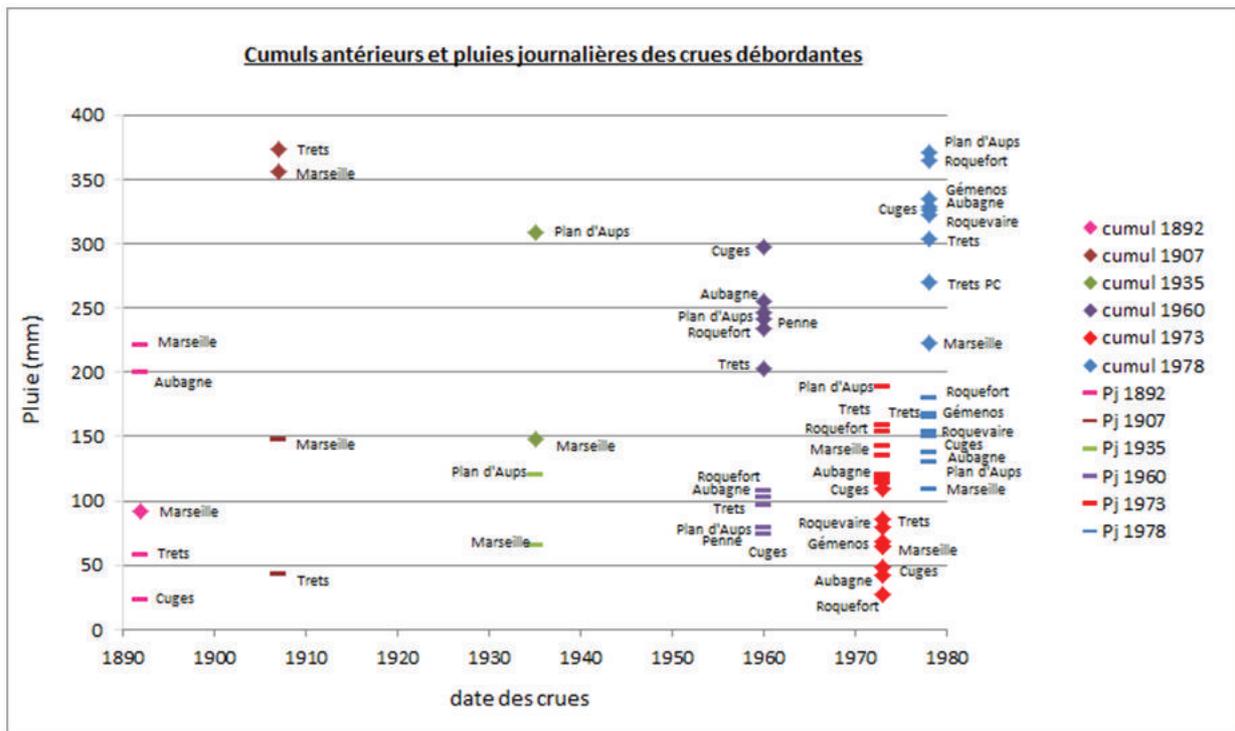
Sur le bassin du Jarret, c'est la crue de 1942 qui semble être la plus forte crue historique d'après les informations recueillies.

### 3.2 Caractéristiques des plus fortes crues connues

Ce chapitre vise à synthétiser et commenter les données hydrologiques existantes concernant les crues largement débordantes de l'Huveaune, la plus récente étant celle de janvier 1978.

Peu d'informations précises sont disponibles pour ces crues, et notamment pour la crue de 1892 qui serait la plus forte jamais observée sur la partie sur le bassin versant dans sa partie aval (à partir d'Aubagne). Les graphiques suivants présentent les données de pluies et les estimations de débits disponibles pour les événements de 1892, 1907, 1935, 1960, 1973 et 1978.

Figure 27 : Pluies antérieures et pluies journalières des principales crues débordantes



Cette figure permet de comparer pour les différents épisodes les cumuls de pluies des 3 mois antérieurs à la crue, ainsi que les pluies journalières du jour de la crue aux postes disponibles.

Elle met en évidence les différentes conditions de saturation des sols précédant chaque crue. On observe ainsi des cumuls antérieurs très importants pour les épisodes de 1907, 1960 et 1978, qui vont contribuer à saturer le karst, alors que les crues de 1892 et 1972 ont lieu sur des sols nettement plus secs. Cet état antérieur explique notamment la moindre importance de la crue de 1973 malgré un cumul journalier proche de celui de 1978, avec notamment un fort cumul sur le Plan d'Aups.

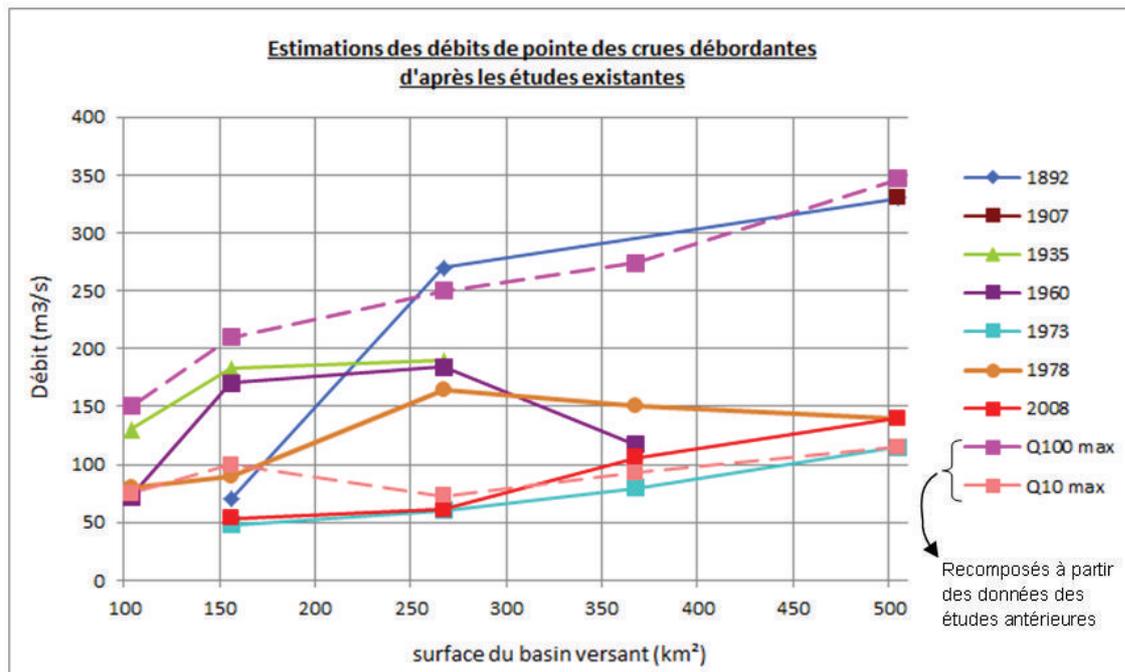
L'ampleur de la crue de 1892 s'explique par la valeur exceptionnelle du cumul journalier en aval du bassin (221 mm en 4h sur Marseille, épiceutre sur Aubagne et Marseille). Les pluies journalières sont plus faibles sur l'amont du bassin.

Les crues de 1935 et 1960 présentent des cumuls journaliers plus faibles, se produisant dans des conditions de sols saturés. La crue de 1935 est localisée sur l'amont du bassin versant. C'est la plus forte crue connue à Auriol.

L'épisode de 1907 se produit sur un sol saturé, mais l'épisode pluvieux générant la crue étant localisé sur Marseille (crue urbaine), cet état de saturation n'a pas eu d'influence aggravante.

Le graphique suivant illustre l'évolution des débits de pointe de l'Huveaune estimés d'amont en aval du bassin versant, entre Auriol ( $S=104 \text{ km}^2$ ) et la mer ( $S=505 \text{ km}^2$ ), d'après les données des études antérieures. Il permet de faire la distinction entre les crues ayant touché principalement l'amont du bassin versant (1960), les crues d'aval (1892, 1907), et les crues plus généralisées (1935, 1973, 1978).

Figure 28 : Estimations des débits des crues historiques d'après les études antérieures



Les valeurs maximales des débits décennaux et centennaux issus des études antérieures y figurent également.

La crue de 1892 apparaît comme la plus forte crue, en tous les points du bassin.

La crue de 1907 la rejoint à partir d'Aubagne.

Les débits de la crue de 1892 ont été estimés sur la base de considérations pluie-débit. Les débits des autres crues antérieures à la mise en place des stations limnimétriques ont été estimés par des calculs hydrauliques locaux à partir des laisses de crue ou des relevés d'échelles de crue.

La crue de 1978 semble être décennale en parties amont et aval et plus importante en partie médiane du bassin versant.

Les informations de pluie et de débit fournies dans les études antérieures et les modes d'estimation de ces débits sont synthétisées dans le tableau suivant.

**Tableau 25 Informations recueillies sur les crues historiques dans les études antérieures**

Date de la crue	
Octobre 1892	Données sur les pluies issues archives Météo (222mm en 24h, hyétogramme précis pour Marseille Obs) et carte pour le reste du BV sur le site pluiesextremes.meteo.fr
	Débits estimés dans l'étude de 1961 (1) par estimation pluie-débit : Aubagne 270 m3/s, Marseille : 380 m3/s (chiffres cités dans 2)
	Roquevaire : 70m3/s ( ?), 280 m3/s en amont du Jarret (modèle pluie-débit) (4)
Novembre 1907	150mm à Marseille dont 113 en 4h30, 140mm à Aubagne (4)
	Q=330 m3/s en aval (1)
	Aubagne : 80m3/s, 290 m3/s à l'embouchure (modèle pluie-débit) (4)
Novembre 1935	Pluies très fortes sur l'amont du bassin Aubagne : 47mm, 44mm, 65mm les 11/12/13/11/1935 Plan d'Aups : 121mm le 11
	Auriol : plus forte crue connue xxème siècle amont confluent Merlançon : 130 m3/s, Roquevaire : 183 m3/s , Aubagne D43b 170-190 m3/s (2) (repères de crue/ calcul hydraulique)
Décembre 1959	Roquevaire : 63m3/s, Aubagne : 107 m3/s, La Penne : 98 m3/s (1) (observation – extrapolation lois hauteur-débit régime uniforme)
Octobre 1960	Pluies journalières des 3-4-5-6/10/1960, carte isohyètes MF
	Roquevaire : 120 m3/s (2) (repère de crue/ calcul hydraulique)
	Auriol : 72m3/s , Roquevaire : 170 m3/s, Aubagne : 184 m3/s, La Penne : 117 m3/s (1) (observation – extrapolation lois hauteur-débit régime uniforme)
Décembre 1972	Hyétogramme horaire Roquevaire et Aubagne (4), carte isohyètes MF
	Hydrogrammes et débits de pointe Roquevaire : 50 m3/s, Aubagne : 70 m3/s : (4) : extrapolation des courbes hauteur-débit - modélisation pluie-débit
1973 03/10	Hyétogramme horaire Roquevaire, Aubagne et Marseille (4), carte isohyètes MF
	Hydrogrammes et débits de pointe Roquevaire : 47 m3/s, Aubagne : 55 m3/s, Dromel 80 m3/s, aval : 115 m3/s : (4) : extrapolation des courbes hauteur-débit - modélisation pluie-débit
Janvier 1978	Hyétogramme horaire Roquevaire et Aubagne (dépouillement pluviogramme), carte isohyètes MF
	Hydrogrammes et débits de pointe Auriol : 80 m3/s, Roquevaire : 90 m3/s, Aubagne : 160 m3/s, Marseille-Borély 140 m3/s (5)
Janvier 1994	Aubagne : 130 m3/s

- (1) : Etude du service hydraulique des Ponts et Chaussées de l'arrondissement d'Arles – décembre 1961 (non récupérée)  
(2) : Autoroutes A52 et B52 – Sogreah – Avril 1969  
(3) Submersion du lit majeur de Huveaune – Hydrologie –EGCEM – janvier 1976  
(4) Etablissement d'un système d'annonce de crues sur l'Huveaune – BCEOM – Avril 1978  
(5) Document EGCEM 1978 (document non récupéré - cité dans Inondations et urbanisation en milieu méditerranéen – l'exemple des crues récentes de l'Arc et de l'Huveaune – Pierre Gabert – Jean Nicod).

### 3.3 Analyse de la genèse des crues (jusqu'à Aubagne)

L'analyse de la genèse des crues a pour objectifs une meilleure compréhension des phénomènes hydrologiques et hydrauliques mis en jeu lors de la formation des crues.

Elle a été menée à partir des hydrogrammes de crue disponibles (données SPC des crues récentes observées aux stations hydrométriques, et crues historiques notamment la crue de janvier 1978), associée aux hyétogrammes disponibles aux différentes stations pluviométriques. Les données de lames d'eau et d'indice d'humidité des sols (SWI) fournies par le SPC pour les bassins amont de St Zacharie, Roquevaire et Aubagne ont également été exploitées.

Une analyse approfondie a ainsi pu être menée sur une série d'évènements entre 1997 et 2011, pour lesquels on dispose de données fines de pluie et de débits au pas de temps horaire sur les stations de Saint Zacharie, Roquevaire, Aubagne et Marseille. La crue de 1978 est également prise en compte dans cette analyse (données EGCEM 1978, exploitation des pluviogrammes du SPC).

L'analyse porte principalement sur la partie amont du bassin versant (amont de la station d'Aubagne), et vise d'une part à identifier les typologies de crues spécifiques au bassin versant et leurs caractéristiques, d'autre part à appréhender au mieux le fonctionnement du bassin versant en fonction de la pluviométrie et de l'état de saturation du karst.

#### 3.3.1 Liste des évènements étudiés

Le tableau ci-dessous présente la liste classée par date des 34 évènements étudiés avec l'indice SWI du jour précédent, les cumuls de pluie de l'épisode et les débits de pointe correspondants. Des dégradés de couleurs permettent de visualiser rapidement les valeurs les plus fortes/faibles des différents paramètres.

Les hyétogrammes et les hydrogrammes correspondant à chaque épisode sont fournis en Annexe 4 du rapport de phase 3. On y constate en première approche que plusieurs types de crues vont se distinguer selon l'état d'humidité du sol, les cumuls et la répartition spatiale des pluies.

La crue de décembre 2008, qui correspond à une situation en limite de débordement, est la plus forte enregistrée depuis 1997 en amont de Marseille. D'après les témoignages, c'est également la plus forte crue depuis celle de janvier 1978.

Les débits les plus forts enregistrés à Marseille ne coïncident pas avec des épisodes importants en amont, mais correspondent à des crues spécifiquement urbaines, avec une forte contribution du Jarret. L'analyse sur cette partie aval du bassin versant sera menée dans un second temps.

Différentes analyses ont été effectuées sur les données disponibles afin d'appréhender au mieux le fonctionnement du bassin versant :

- Influence de l'état de saturation du sol et des cumuls de pluie sur les débits,
- Analyse de la typologie des crues (crue rurale d'amont ou crue urbaine d'aval), Comparaison des temps de propagation selon les types de crues,
- Comparaison des débits de pointe et des volumes écoulés entre chaque station, analyse des coefficients d'écoulement...

Tableau 26 – Liste des événements étudiés

Date	SWM	Cumul de pluie sur l'épisode (mm)			DEBITS de pointe (m3/s)							
	jour J-1	Saint-Zacharie	Roquevaire	Aubagne - Charrel	St-Zacharie	Roquevaire	Aubagne - Charrel	Le Mouton	Saint Marcel	Ramon	Bégude (Jarret)	Pugette (Jarret)
17/01/1978	1,30		162,0	160,0		90,0	140,0			165,0		
19/12/1997	0,91	41,6	40,9	45,1		8,0	11,7	14,8	13,1	29,4		
30/05/1998	0,81	7,7	10,6	11,7	0,1	2,6	9,6	15,2	10,8	0,1		
07/09/1998	0,33	92,1	94,5	93,9	1,2	14,7	21,3	37,6	69,7	199,7		
09/01/1999	1,07	61,7	60,3	59,4		13,1	17,0	17,3	19,3	10,9	6,6	
20/01/1999	1,39	77,3	73,5	75,4		28,8	31,4	39,0	129,0	55,5	23,3	
20/09/1999	0,82	110,9	113,3	115,0		30,4	49,2	52,5	90,5	81,3	33,1	
21/10/1999 (1)	1,20	80,7	75,2	72,2		15,3	26,2	30,9	129,0	199,7	39,3	
21/10/1999 (2)	1,44	28,9	28,1	27,1		13,3	22,0					
25/12/2000	1,21	64,0	59,0	58,1		28,1	33,3	35,8	53,2	44,4	14,3	
10/05/2002	1,01	32,7	32,5	31,2		8,7	8,0	8,0	10,8	0,5	4,7	
15/07/2002	0,43	27,6	28,8	30,6	0,3	4,2	10,1	11,9	25,8	28,5	8,0	
10/10/2002	0,85	53,6	54,9	64,6		15,7	17,9	26,6	49,0	58,1	18,8	
16/11/2002	1,28	99,6	89,0	85,7		17,6	22,3	0,1	32,4	18,9	8,5	
21/01/2003	1,09	18,7	17,6	19,9		8,8	10,8	9,1	16,3	0,1	4,3	
02/12/2003	1,29	91,8	94,7	92,3		22,1	28,2	34,0	112,5	176,0	70,3	
12/09/2004	0,25	31,5	32,5	29,4		17,2	17,9	17,3	25,3	81,3	53,4	
09/09/2005	0,54	20,8	25,2	22,7		10,5	10,6	14,8	22,0	46,0	28,9	
02/12/2005	1,04	52,3	50,8	48,1		11,9	14,8	17,6	17,4	32,8	9,1	
06/07/2006	0,24	9,2	9,3	8,9	0,5	4,3	6,7	28,7	12,8	33,5	42,9	55,1
04/02/2008	0,98	29,3	28,3	27,9	0,1	2,1	10,9	1,8	2,3	3,5	1,7	4,1
08/10/2008	0,30	36,2	35,0	37,7	0,1	0,9	5,2	1,5	2,1	46,9	32,7	37,9
02/11/2008 (1)	1,06	21,5	20,6	21,9	0,1	1,5	12,4	21,0	44,4	70,3	68,2	54,4
02/11/2008 (2)	1,21	54,1	50,1	47,8	3,5	8,2	7,3					
14/12/2008	1,26	85,5	88,4	89,1	17,6	53,5	61,0	63,8	106,7	66,5	1,5	1,8
26/01/2009	1,16	34,2	32,4	33,2	5,9	10,3	14,5	19,5	17,8	25,2	8,5	14,3
07/02/2009	1,29	28,1	23,5	19,7	8,1	13,6	19,5	16,2	16,3	10,9	4,3	72,5
27/04/2009	1,09	56,6	47,3	42,8	4,9	14,2	16,7	20,6	21,6	0,5	4,3	5,3
19/09/2009 (1)	0,23	30,5	38,1	41,3	1,2	6,7	10,9					
19/09/2009 (2)	0,70	16,5	18,9	22,6	0,6	4,5	13,1	4,0	32,8	17,2	30,1	21,3
24/12/2009	1,45	45,7	39,8	34,9	17,0	25,1	30,0	27,9	48,4	14,5	6,1	10,8
08/01/2010	1,19	73,0	69,6	69,8	13,0	24,0	29,0	25,8	47,9	20,1	8,2	18,2
16/06/2010 (1)	0,56	71,7	67,1	63,3	1,0	9,0	11,0					
16/06/2010 (2)	0,89	19,7	19,9	22,1	2,0	8,0	12,0	13,1	32,4	86,5	37,5	62,5
31/10/2010	0,57	48,4	40,3	43,2	1,7	6,1	9,7	9,1	23,7	38,0	16,7	31,0
22/12/2010	1,14	58,7	45,4	44,4		12,2	13,3	83,0	16,6	1,4	3,0	3,8
05/06/2011 (1)	0,49	10,5	23,0	17,7		15,7	15,5					
05/06/2011 (2)	0,57	38,3	30,8	27,1	13,1	14,3	18,5	23,7	26,2	5,1	22,5	31,0
05/11/2011	1,31	73,8	61,3	73,8	10,4	17,1	20,0	23,7	27,9	30,6	14,6	17,7

### 3.3.2 Typologie des crues : réponses rurales et urbaines

La comparaison de la forme et de la propagation des hydrogrammes entre les stations permet de mettre en évidence les deux types de réponses composant les ondes de crues :

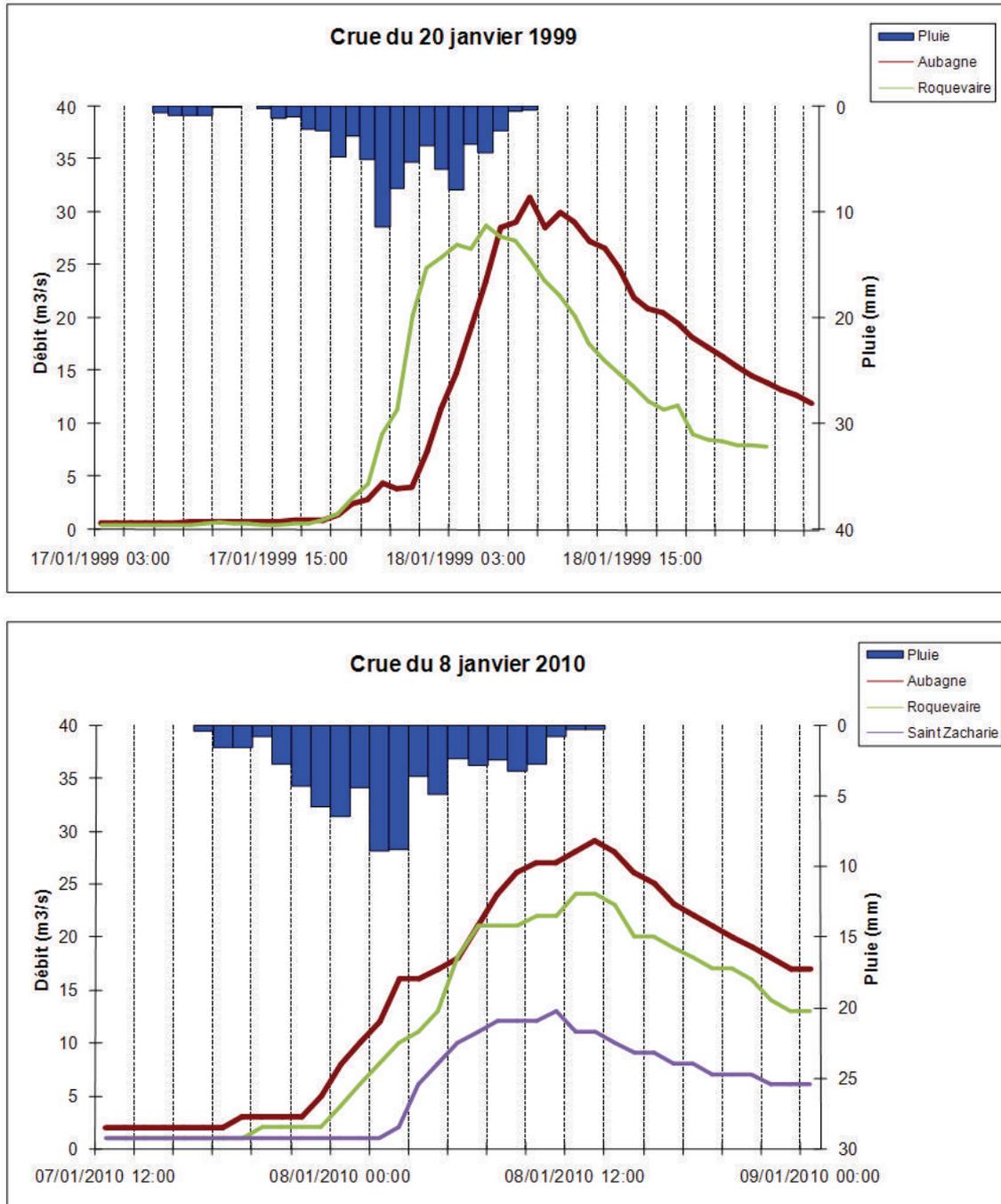
- l'apport des zones rurales et karstiques, qui correspond à une réponse plutôt lente nettement influencée par l'état initial, avec souvent à un fort apport en volume,
- l'apport des zones urbanisées, qui correspond à une réponse rapide aux fortes intensités de pluies, avec une incidence beaucoup plus faible de l'état initial. Ce type de composante est très visible à Aubagne et en aval, on peut également l'observer dès la station de Roquevaire selon les événements.

Les graphiques ci-après représentent 3 types de crues caractéristiques illustrant ces phénomènes, choisies en priorité parmi les crues les plus importantes pour lesquelles on dispose de données sur les 3 stations :

- Les crues de janvier 1999, 2009 et 2010, où l'onde de crue est principalement rurale et se propage vers l'aval suite à un épisode de pluie long et peu intense, qui génère le pic de débit. La crue de janvier 1999 est typiquement une crue rurale d'amont, avec une réponse urbaine inexistante et quasiment aucun apport entre Roquevaire et Aubagne. Sur les deux autres crues, la réponse urbaine, nettement moins importante, devance plus ou moins nettement l'onde de crue principale.

- La crue de juin 2011, où la composante urbaine est plus importante, qui comprend deux composantes bien distinctes : une composante urbaine rapide à Roquevaire et Aubagne, nettement en avance sur la composante rurale plus lente provenant de l'amont. Ce type de crue est en général généré par un épisode pluvieux court.
- Les crues de septembre 1998 et septembre 2009, crues typiques d'été, engendrées par des pics de pluie courts et intenses se produisant sur un sol très sec. Le karst joue alors un rôle tampon majeur, et la réponse du bassin versant amont est très réduite.

Figure 29 : Exemples de crues rurales



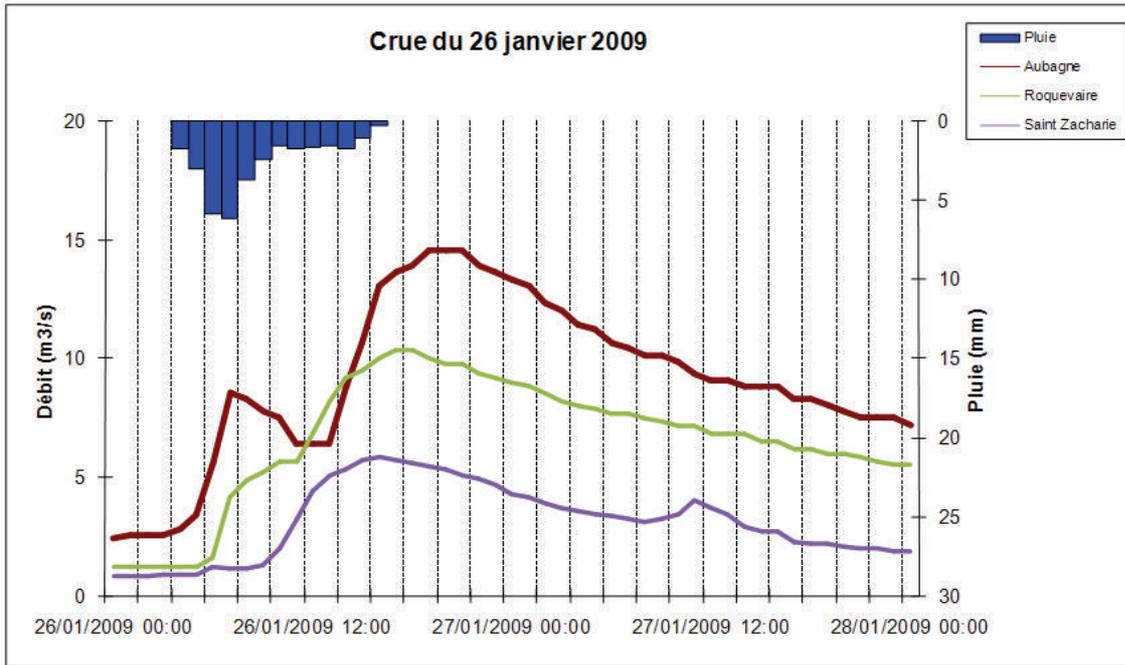


Figure 30 : Exemple de crue mixte

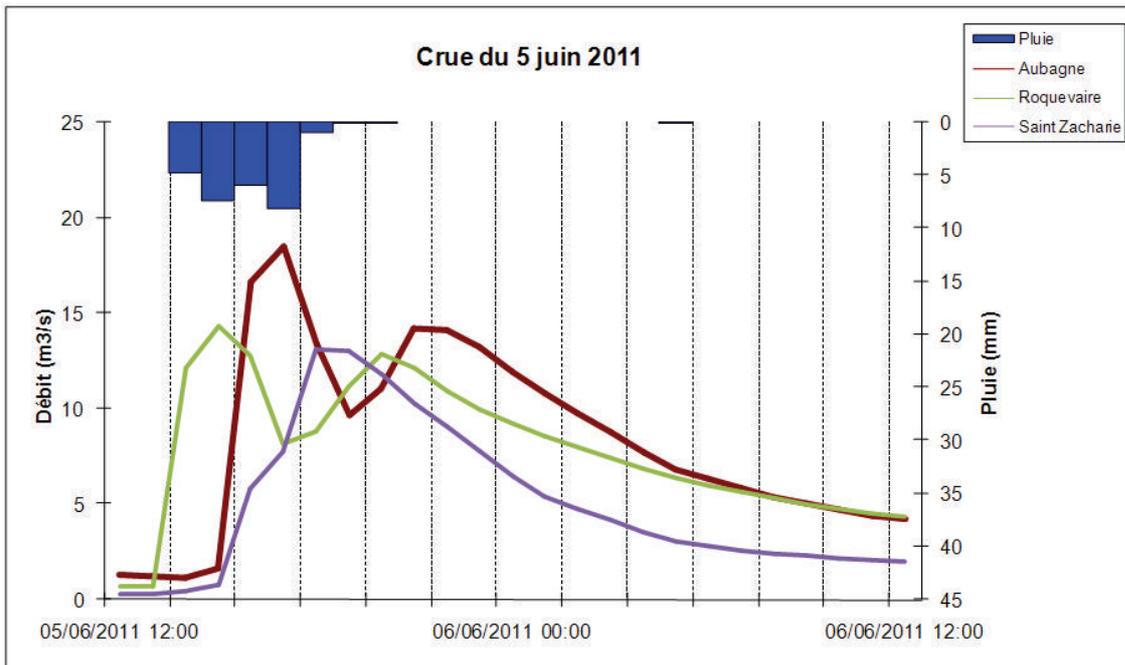
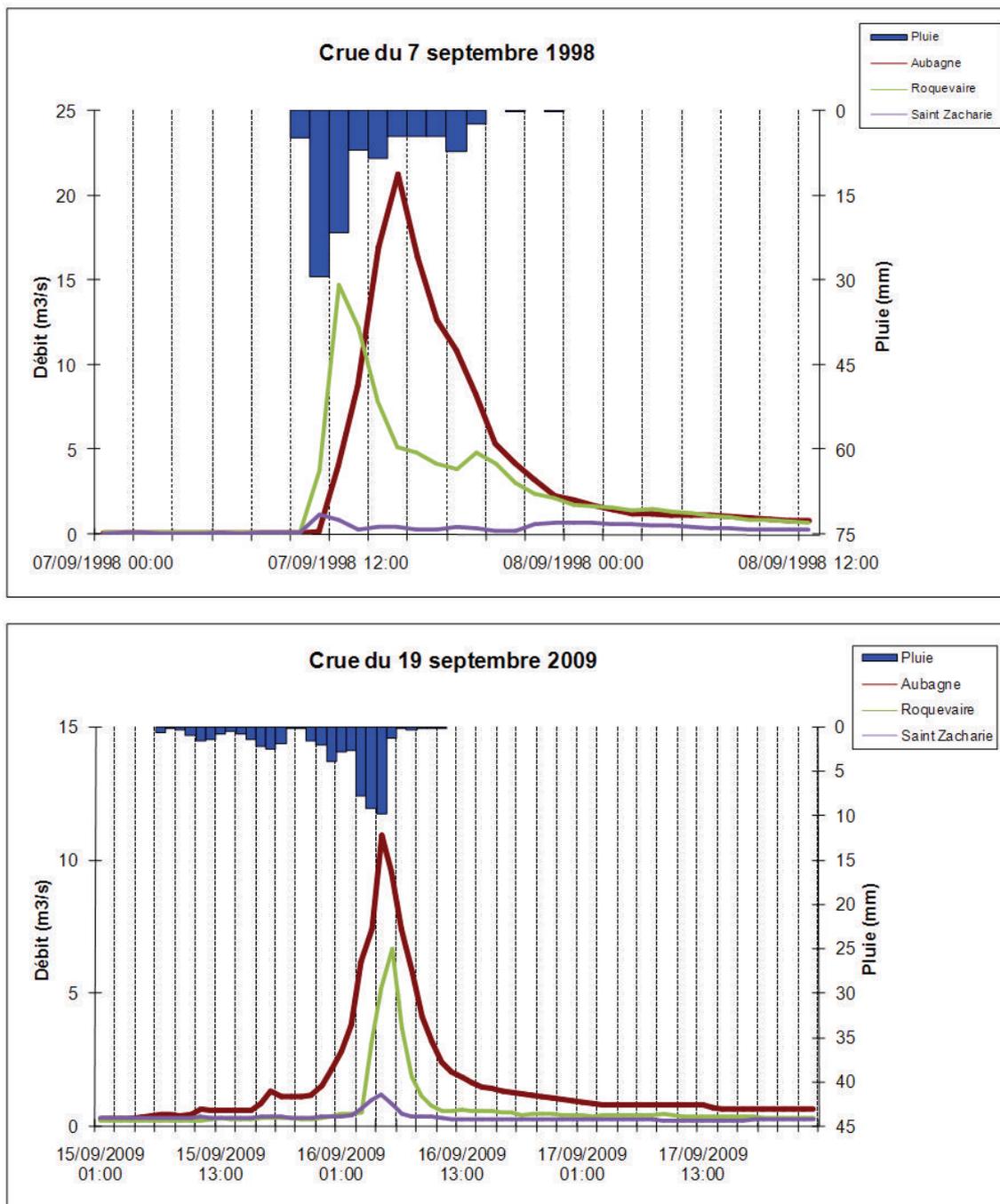


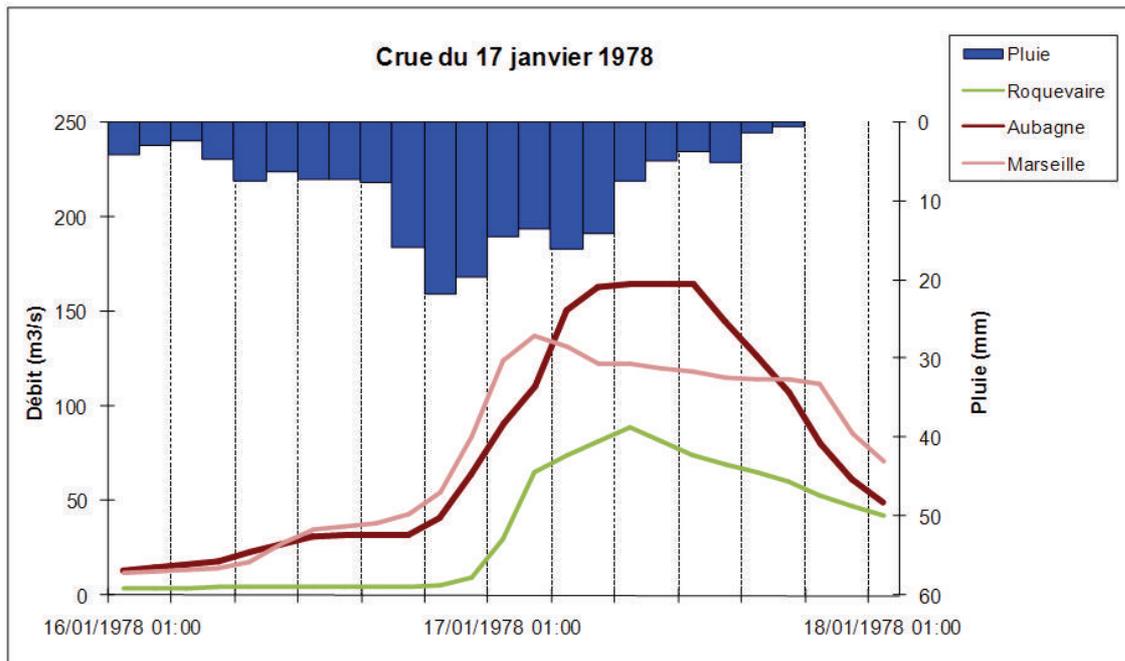
Figure 31 : Exemples de crues urbaines



La crue de 1978 est également bien représentative de ce double phénomène. Elle est typique d'une crue d'hiver produite par un épisode pluvieux long sur sols saturés. L'onde de crue à Aubagne et à Marseille se forme immédiatement après les plus fortes précipitations, et la crue de l'amont de Roquevaire ne se forme que plusieurs heures plus tard, bien que les pluies maximales soient relativement synchrones et homogènes sur le bassin versant. L'onde de crue amont est venue amplifier et entretenir le pic d'Aubagne et de Marseille.

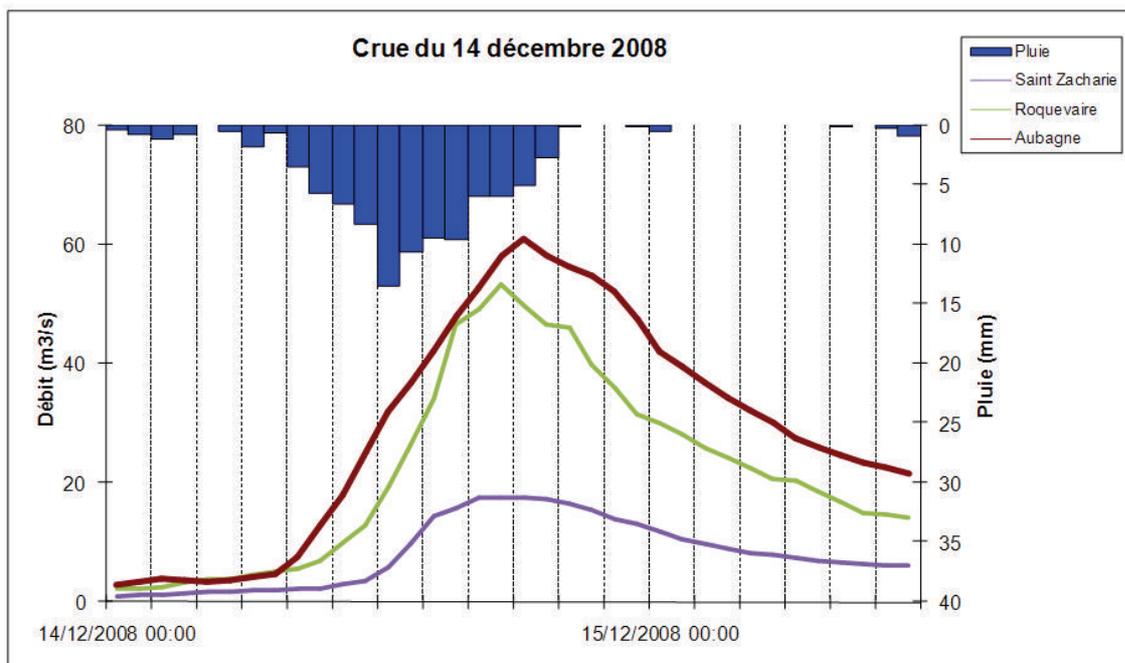
Les hydrogrammes mettent également en évidence un phénomène d'écêtement entre Aubagne et Marseille dû aux débordements et aux inondations de la zone urbaine.

Figure 32 : Hydrogrammes de la crue de janvier 1978



La crue de décembre 2008 est du même type (épisode pluvieux long sur sol saturé), bien que nettement plus faible que celle de 1978. C'est principalement une crue d'amont, il y a très peu d'apport entre Roquevaire et Aubagne. On observe également une composante urbaine rapide qui vient amorcer la montée de la crue : l'onde de crue à Aubagne se forme avant celle de Roquevaire, qui se forme elle-même avant celle de Saint Zacharie.

Figure 33 : Hydrogrammes de la crue de décembre 2008



### 3.3.3 Temps de propagation : estimation à partir des stations de mesure

L'analyse du décalage temporel des pointes de crues permet d'estimer des temps moyens de propagation de l'onde de crue entre les stations. Il faut cependant distinguer les pointes urbaines rapides qui ne proviennent pas de la propagation de l'onde amont mais des ruissellements urbains locaux, et les pointes rurales qui proviennent des bassins versants amont.

Le tableau suivant fournit les décalages temporels entre les pics de débits par rapport à la station amont. La précision est de l'ordre de l'heure (données de base au pas de temps horaire). Les temps de propagation négatif correspondent aux crues dont la pointe de débit principale est engendrée par la composante urbaine, qui survient avant l'arrivée de l'onde amont (signalés en rose).

Tableau 27 – Décalage entre les pointes de débits

Date de la pointe	Décalage entre les pointes (h)	
	Roquevaire / Saint Zacharie	Aubagne / Roquevaire
17/01/1978		1
19/12/1997		0
19/12/1997		1
30/05/1998		0
30/05/1998		3
07/09/1998	1	3
09/01/1999		2
20/01/1999		3
20/09/1999		-1
21/10/1999		1
21/10/1999		3
25/12/2000		2
10/05/2002		1
15/07/2002	1	1
10/10/2002		2
16/11/2002		1
21/01/2003		2
02/12/2003		2
12/09/2004		2
09/09/2005		1
02/12/2005		1
06/07/2006	1	1
04/02/2008		-1
08/10/2008	0	-3
02/11/2008	1	-2
02/11/2008	3	4
14/12/2008	-1	1
26/01/2009	2	1
07/02/2009	1	2
27/04/2009	-3	2
19/09/2009	1	-1
19/09/2009	4	-4
24/12/2009	1	2
08/01/2010	1	1
16/06/2010		1
16/06/2010		1
16/06/2010	-5	-1
31/10/2010	1	-7
22/12/2010		2
22/12/2010		3
05/06/2011		1
05/06/2011	-3	2
05/11/2011	1	2

Le temps de propagation entre Saint Zacharie et Roquevaire varie entre 1 et 3h. Il est difficile d'en tirer des conclusions étant donné le peu d'informations disponibles sur la station amont, et le manque d'information concernant les apports du bassin versant du Merlançon, qui peuvent avoir une grosse influence sur la forme et l'amplitude de l'hydrogramme à Roquevaire.

Le temps de propagation entre Roquevaire et Aubagne est de 2h en moyenne. Il n'y a pas d'évolution notable de ce paramètre entre 1977 et 2011.

### 3.3.4 Comparaison des débits de pointe et des volumes entre stations

La surface de bassin versant de l'Huveaune drainé est de 55 km<sup>2</sup> à Saint Zacharie, ce qui représente 33 % du bassin drainé à Roquevaire (165 km<sup>2</sup>) et 20 % de celui drainé à Aubagne (270 km<sup>2</sup>). L'apport principal entre les deux stations est celui du bassin versant du Merlançon (46 km<sup>2</sup>, soit 28%), qui rejoint l'Huveaune en amont de Roquevaire. On ne dispose d'aucune mesure de débit sur cet affluent.

La surface de bassin versant à Roquevaire représente 61 % du bassin drainé à Aubagne (270 km<sup>2</sup>). Les apports principaux entre les deux stations sont constitués des bassins versants de la Maire (16 km<sup>2</sup>, soit 7%) et du Merlançon d'Aubagne (22 km<sup>2</sup>, soit 8%), qui rejoignent l'Huveaune dans la zone urbaine d'Aubagne.

### 3.3.5 Comparaison des débits de pointe aux stations

Le tableau suivant permet de comparer les débits de pointe au droit des stations pour les différents épisodes étudiés.

Tableau 28 – Comparaisons des débits de pointe aux stations

Date	Débits de pointe (m3/s)					
	Saint Zacharie	Roquevaire	Aubagne	Rapports (%)		
				SZ / R	SZ / A	R / A
17/01/1978		90,0	165,0			55%
19/12/1997		8,0	11,7			68%
30/05/1998	0,1	2,6	9,6	4%	1%	27%
07/09/1998	1,2	14,7	21,3	8%	6%	69%
09/01/1999		13,1	17,0			77%
20/01/1999		28,8	31,4			92%
20/09/1999		30,4	49,2			62%
21/10/1999 (1)		15,3	26,2			58%
21/10/1999 (2)		13,3	22,0			60%
25/12/2000		28,1	33,3			84%
10/05/2002		8,7	8,0			108%
15/07/2002		4,2	10,1			41%
10/10/2002		15,7	17,9			88%
16/11/2002		17,6	22,3			79%
21/01/2003		8,8	10,8			81%
02/12/2003		22,1	28,2			78%
12/09/2004		17,2	17,9			96%
09/09/2005		10,5	10,6			99%
02/12/2005		11,9	14,8			80%
06/07/2006	0,5	4,3	6,7	12%	8%	65%
04/02/2008	0,1	2,1	10,9	4%	1%	20%
08/10/2008	0,1	0,9	5,2	9%	2%	18%
02/11/2008 (1)	0,1	1,5	12,4	10%	1%	12%

Date	Débits de pointe (m3/s)					
	Saint Zacharie	Roquevaire	Aubagne	Rapports (%)		
				SZ / R	SZ / A	R / A
02/11/2008 (2)	3,5	8,2	7,3	43%	48%	113%
14/12/2008	17,6	53,5	61,0	33%	29%	88%
26/01/2009	5,9	10,3	14,5	57%	40%	71%
07/02/2009	8,1	13,6	19,5	60%	42%	70%
27/04/2009	4,9	14,2	16,7	35%	29%	85%
19/09/2009 (1)	1,2	6,7	10,9	17%	11%	61%
19/09/2009 (2)	0,6	4,5	13,1	14%	5%	34%
24/12/2009	17,0	25,1	30,0	68%	57%	84%
08/01/2010	13,0	24,0	29,0	54%	45%	83%
16/06/2010 (1)	1,0	9,0	11,0	11%	9%	82%
16/06/2010 (2)	2,0	8,0	12,0	25%	17%	67%
31/10/2010	1,7	6,1	9,7	28%	18%	63%
22/12/2010		12,2	13,3			92%
05/06/2011 (1)		15,7	15,5			101%
05/06/2011 (2)	13,1	14,3	18,5	92%	71%	77%
05/11/2011	10,4	17,1	20,0	61%	52%	86%
<b>Moyenne</b>				<b>32 %</b>	<b>24 %</b>	<b>71 %</b>

L'apport en débit de Saint Zacharie par rapport à Roquevaire est très variable selon les épisodes (4 à 92 % du débit de pointe de Roquevaire), car fortement conditionné par l'état de saturation du sol et l'importance des apports du bassin versant du Merlançon.

La contribution en débit de pointe de Roquevaire est plus homogène, et correspond en moyenne à 71 % du débit de pointe observé à Aubagne, ce qui est nettement supérieur au ratio de surfaces des bassins versants (61%). Le débit de pointe à Roquevaire est supérieur au débit de pointe d'Aubagne pour certains épisodes (mai 2002, novembre 2008, juin 2011). Il s'agit d'épisodes avec un épïcêtre des précipitations positionné en amont de Roquevaire, et des cumuls faibles en aval. La pointe de débit peut alors s'amortir légèrement. Cet écart néanmoins faible peut également provenir d'une légère incohérence des courbes de tarage (précision des stations).

Les graphiques suivants permettent d'illustrer ces données et de visualiser la contribution en débit aux différentes stations.

Figure 34 : Débits de pointe à Saint Zacharie en fonction de celui de Roquevaire

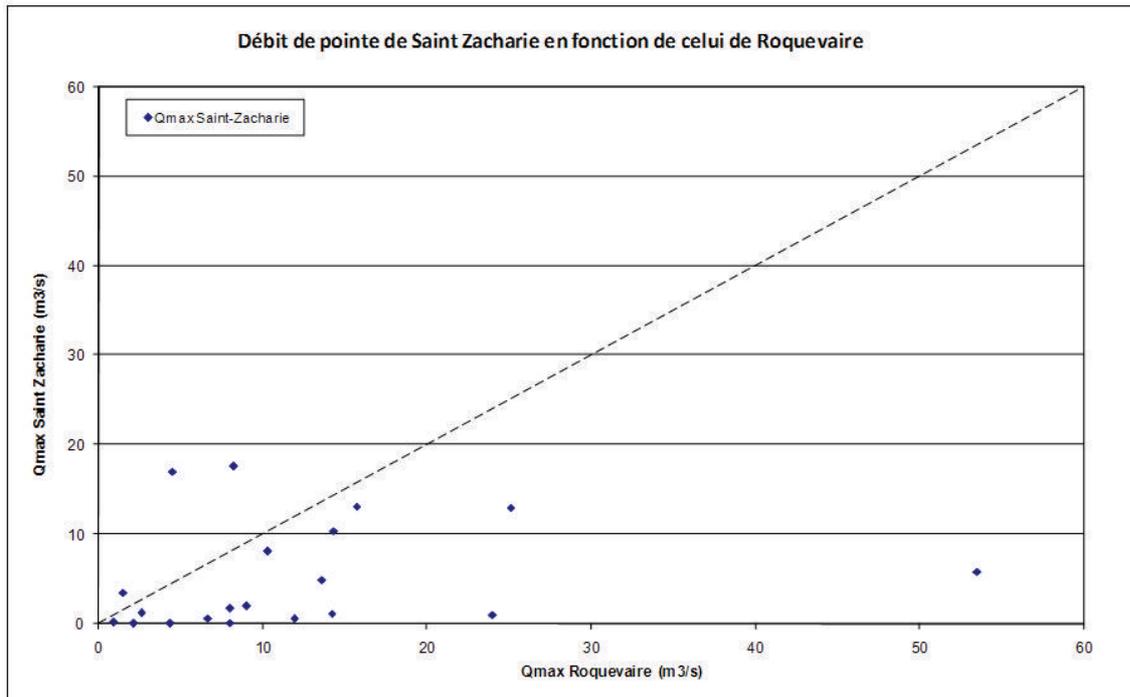
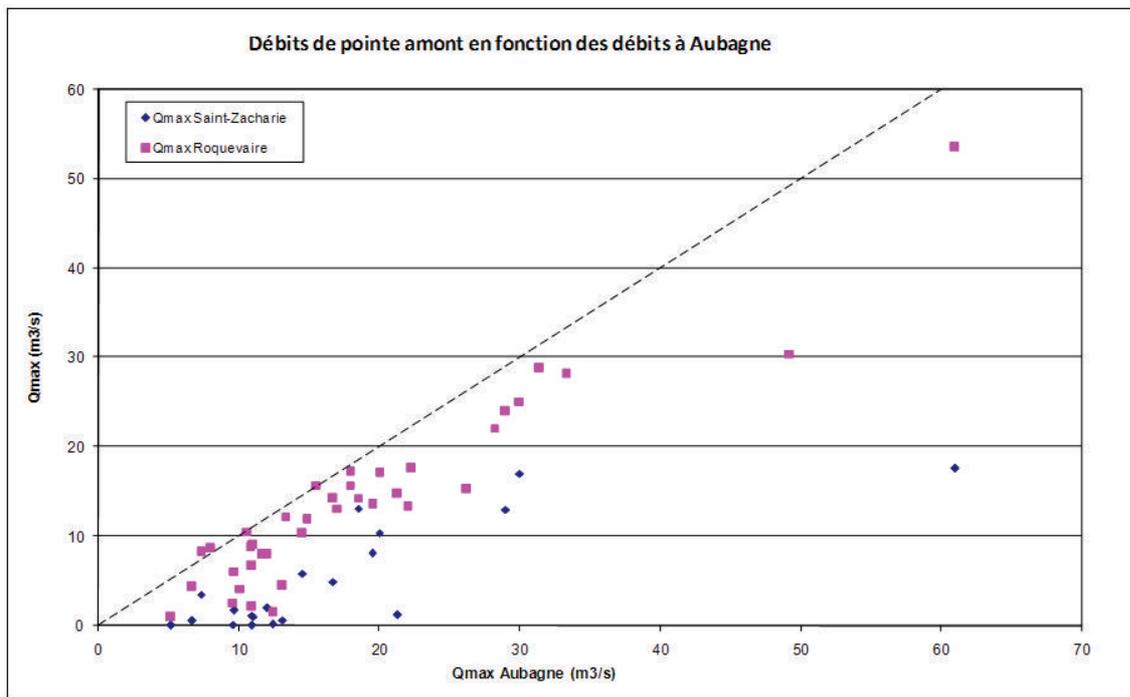


Figure 35 : Débits de pointe à Saint Zacharie et Roquevaire en fonction de celui d'Aubagne



### 3.3.6 Comparaison des volumes écoulés aux stations

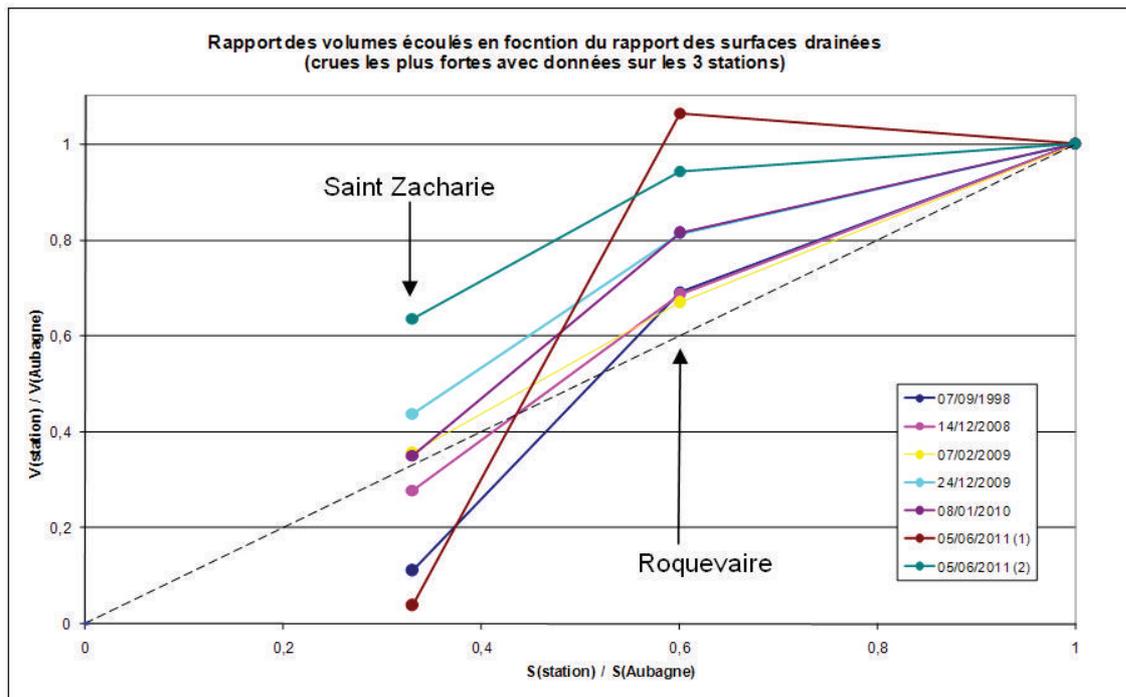
On peut de la même façon comparer les volumes des hydrogrammes afin de dégager des tendances globales dans les contributions des bassins versants. Le tableau suivant détaille les volumes écoulés aux 3 stations, et donne leur contributions respectives.

Tableau 29 – Comparaisons des volumes écoulés aux stations

Date	VOLUMES (10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> )					
	Saint Zacharie	Roquevaie	Aubagne	Rapports des volumes		
				SZ / R	SZ / A	R / A
17/01/1978	-	6 100	12 400			49%
19/12/1997	-	920	1 163			79%
30/05/1998	-	19	96			20%
07/09/1998	55	342	495	16%	11%	69%
09/01/1999	-	1 126	1 247			90%
20/01/1999	-	2 267	2 817			80%
20/09/1999	-	1 673	2 469			68%
21/10/1999 (1)	-	1 580	3 130			50%
21/10/1999 (2)	-	1 440	2 839			51%
25/12/2000	-	2 274	2 992			76%
10/05/2002	-	840	815			103%
15/07/2002	-	50	127			39%
10/10/2002	-	1 177	1 399			84%
16/11/2002	-	1 900	2 404			79%
21/01/2003	-	1 260	1 587			79%
02/12/2003	-	2 093	2 974			70%
12/09/2004	-	125	246			51%
09/09/2005	-	127	169			75%
02/12/2005	-	626	954			66%
06/07/2006	-	35	84			42%
04/02/2008	1	19	125	7%	1%	16%
08/10/2008	-	17	119			14%
02/11/2008 (1)	4	92	325	5%	1%	28%
02/11/2008 (2)	256	802	734	32%	35%	109%
14/12/2008	1 144	2 834	4 123	40%	28%	69%
26/01/2009	719	1 657	2 269	43%	32%	73%
07/02/2009	1 043	1 964	2 930	53%	36%	67%
27/04/2009	584	1 598	2 033	37%	29%	79%
19/09/2009 (1)	24	91	242	26%	10%	37%
19/09/2009 (2)	23	182	362	12%	6%	50%
24/12/2009	819	1 522	1 872	54%	44%	81%
08/01/2010	1 240	2 894	3 550	43%	35%	82%
16/06/2010 (1)	67	302	547	22%	12%	55%
16/06/2010 (2)	65	221	340	29%	19%	65%
31/10/2010	229	735	1 258	31%	18%	58%
22/12/2010	-	2 159	2 479			87%
05/06/2011 (1)	9	254	239	4%	4%	106%
05/06/2011 (2)	380	565	599	67%	64%	94%
05/11/2011	1 171	2 125	2 477	55%	47%	86%
06/11/2011	1 171	2 125	2 477	55%	47%	86%

Le graphique suivant illustre la contribution des stations de Saint Zacharie et Roquevaire aux volumes écoulés à Aubagne pour les plus fortes crues. La contribution de Saint Zacharie est très variable selon les épisodes, alors que la contribution de Roquevaire aux volumes d'Aubagne est systématiquement supérieure au pourcentage de surface drainé (67 à 106 % d'apport en volume pour 61 % de surface du bassin versant).

Figure 36 : Rapports des volumes écoulés en fonction des surfaces drainées



### 3.4 Indices SWI et cumuls de pluies

Le tableau suivant classe les épisodes selon l'indice d'humidité du sol du jour précédent la crue.

Tableau 30 – Classement des épisodes selon le SWI (J-1)

Date	SWI	Cumul de pluie sur l'épisode (mm)			DEBITS de pointe (m3/s)		
	jour J-1	Saint Zacharie	Roquevaire	Aubagne	Saint Zacharie	Roquevaire	Aubagne
19/09/2009 (1)	0,23	30,5	38,1	41,3	1,2	6,7	10,9
06/07/2006	0,24	9,2	9,3	8,9	0,5	4,3	6,7
12/09/2004	0,25	31,5	32,5	29,4		17,2	17,9
08/10/2008	0,30	36,2	35,0	37,7	0,1	0,9	5,2
07/09/1998	0,33	92,1	94,5	93,9	1,2	14,7	21,3
15/07/2002	0,43	27,6	28,8	30,6	0,3	4,2	10,1
05/06/2011 (1)	0,49	10,5	23,0	17,7		15,7	15,5
09/09/2005	0,54	20,8	25,2	22,7		10,5	10,6
16/06/2010 (1)	0,56	71,7	67,1	63,3	1,0	9,0	11,0
31/10/2010	0,57	48,4	40,3	43,2	1,7	6,1	9,7
05/06/2011 (2)	0,57	38,3	30,8	27,1	13,1	14,3	18,5
19/09/2009 (2)	0,70	16,5	18,9	22,6	0,6	4,5	13,1
30/05/1998	0,81	7,7	10,6	11,7	0,1	2,6	9,6
20/09/1999	0,82	110,9	113,3	115,0		30,4	49,2
10/10/2002	0,85	53,6	54,9	64,6		15,7	17,9
16/06/2010 (2)	0,89	19,7	19,9	22,1	2,0	8,0	12,0
19/12/1997	0,91	41,6	40,9	45,1		8,0	11,7
04/02/2008	0,98	29,3	28,3	27,9	0,1	2,1	10,9
10/05/2002	1,01	32,7	32,5	31,2		8,7	8,0
02/12/2005	1,04	52,3	50,8	48,1		11,9	14,8
02/11/2008 (1)	1,06	21,5	20,6	21,9	0,1	1,5	12,4
09/01/1999	1,07	61,7	60,3	59,4		13,1	17,0
21/01/2003	1,09	18,7	17,6	19,9		8,8	10,8
27/04/2009	1,09	56,6	47,3	42,8	4,9	14,2	16,7
22/12/2010	1,14	58,7	45,4	44,4		12,2	13,3
26/01/2009	1,16	34,2	32,4	33,2	5,9	10,3	14,5
08/01/2010	1,19	73,0	69,6	69,8	13,0	24,0	29,0
21/10/1999 (1)	1,20	80,7	75,2	72,2		15,3	26,2
25/12/2000	1,21	64,0	59,0	58,1		28,1	33,3
02/11/2008 (2)	1,21	54,1	50,1	47,8	3,5	8,2	7,3
14/12/2008	1,26	85,5	88,4	89,1	17,6	53,5	61,0
16/11/2002	1,28	67,7	59,0	55,7		17,6	22,3
02/12/2003	1,29	91,8	94,7	92,3		22,1	28,2
07/02/2009	1,29	28,1	23,5	19,7	8,1	13,6	19,5
17/01/1978	1,30		162,0	160,0		90,0	165,0
05/11/2011	1,31	73,8	61,3	73,8	10,4	17,1	20,0
20/01/1999	1,39	77,3	73,5	75,4		28,8	31,4
21/10/1999 (2)	1,44	28,9	28,1	27,1		13,3	22,0
24/12/2009	1,45	45,7	39,8	34,9	17,0	25,1	30,0

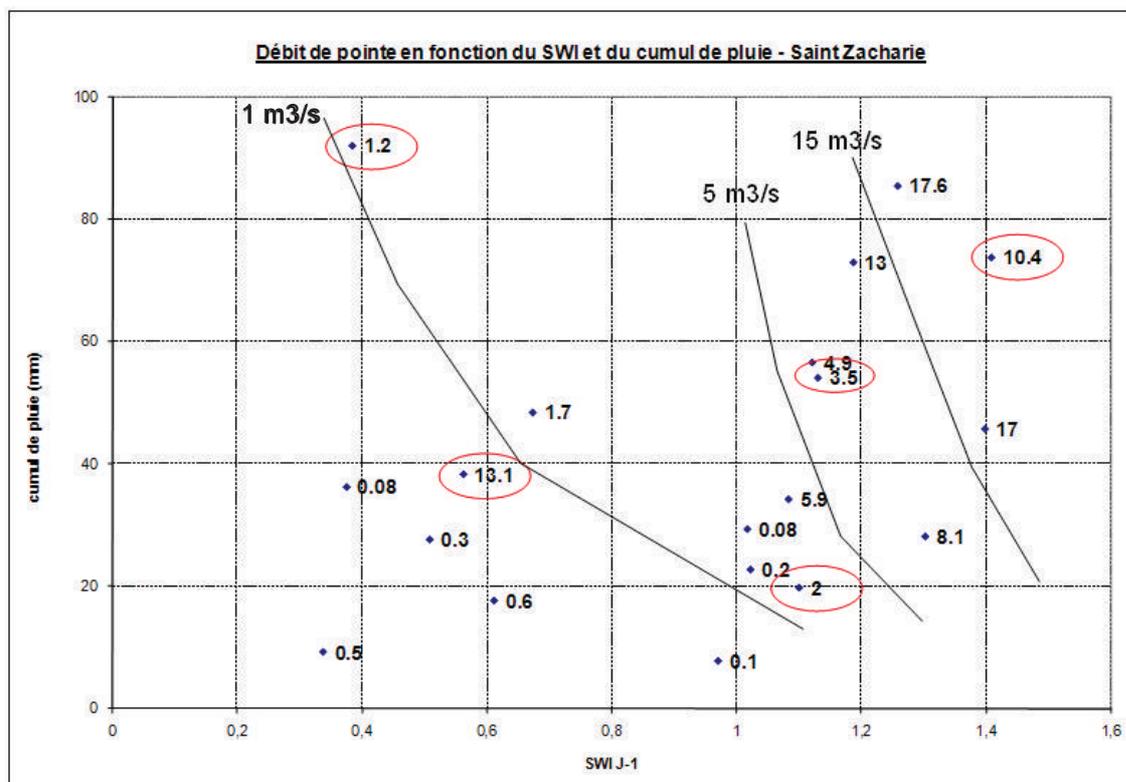
Cette hiérarchisation met en évidence 3 types de crues selon le SWI et la saison d'occurrence :

- Les crues d'été et de début d'automne (une douzaine d'épisodes entre juin et octobre), qui se produisent sur des sols secs ou peu saturés. Les indices SWI de ces événements sont compris entre 0.2 et 0.8. Les cumuls de pluies et les débits de pointe sont plutôt faibles par rapport aux autres épisodes. Les crues de septembre, les plus importantes en termes de cumuls de pluies, engendrent les plus forts débits. Les épisodes de septembre 1998 et 1999 se distinguent par leurs débits importants (septembre 1999 présente le plus fort cumul des épisodes étudiés, hors janvier 1978),

- Les crues de printemps (avril-mai), plus rares (4 épisodes), se caractérisent par des SWI assez élevés compris entre 0.8 et 1.1, et des cumuls faibles
- **Les crues d'hiver (novembre à février) sont les plus courantes et les plus fortes (23 épisodes). Elles sont caractérisées par un indice SWI supérieur à 0.9, pouvant atteindre 1.4 (janvier 1999, décembre 2009), et des cumuls de pluies importants.**

L'analyse de la variation des indices SWI et des cumuls de pluies selon les épisodes montre que l'état de saturation du sol est déterminant dans la genèse des crues amont. Les graphiques suivants permettent de visualiser les débits de pointe atteints aux stations (valeurs en étiquette) en fonction de l'indice SWI et des cumuls de pluie.

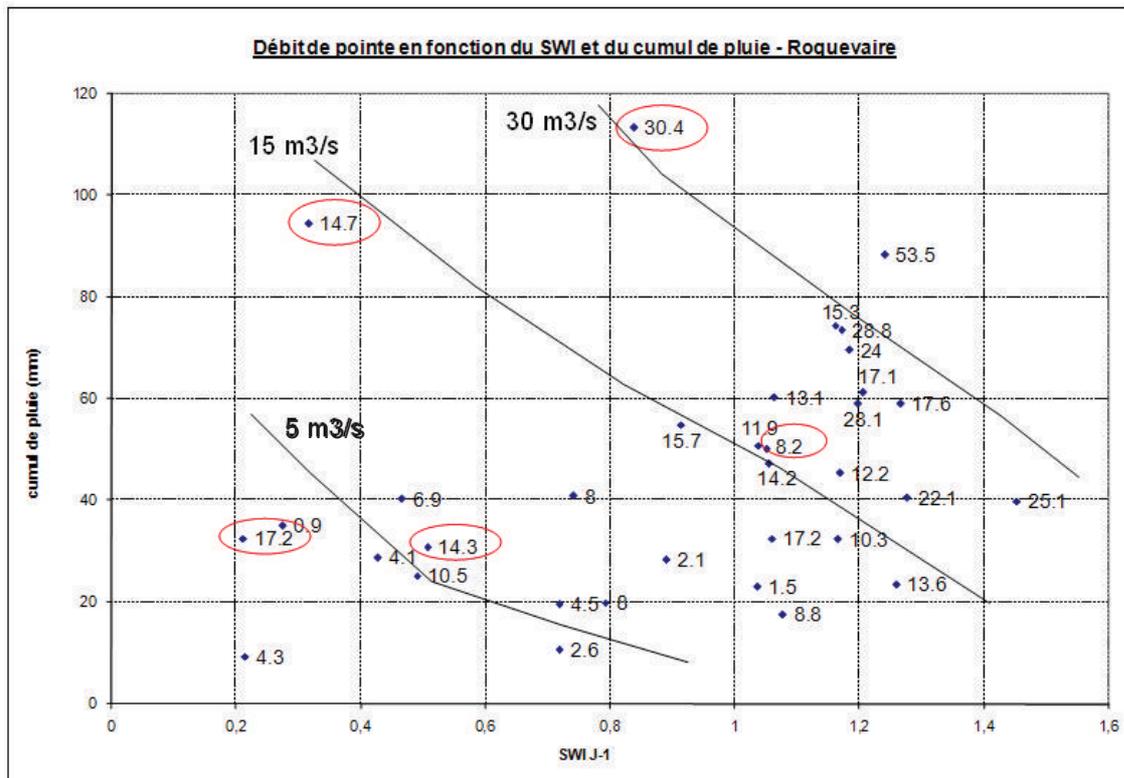
Figure 37 : Débits de pointe en fonction du SWI et du cumul de pluie – Saint Zacharie



Il y a peu de données sur la station de Saint Zacharie, ce qui rend l'analyse moins pertinente. Des courbes « iso-débits » de 1 à 15 m<sup>3</sup>/s ont été tracées à partir des données disponibles pour tenter de dégager une tendance. Elles illustrent l'augmentation des débits de pointe avec le SWI.

Les valeurs entourées correspondent aux événements de plus fortes intensités (pics de 12 à 28 mm/h), qui n'engendrent pas les plus forts débits, la réponse du bassin versant étant fortement conditionnée par l'état de saturation du karst. L'évènement de juin 2011 (débit de 13.1 m<sup>3</sup>/s) apparaît assez atypique car engendré par un cumul moyen sur un sol peu saturé. Il s'agit cependant d'une pluie brève (4h) et assez intense, dont l'épicentre est localisé sur le Plan d'Aups (cumul journalier de 78 mm à la station de Plan d'Aups, cumuls faibles ailleurs), ce qui explique le fort débit atteint en amont du bassin versant.

Figure 38 : Débits de pointe en fonction du SWI et du cumul de pluie – Roquevaire



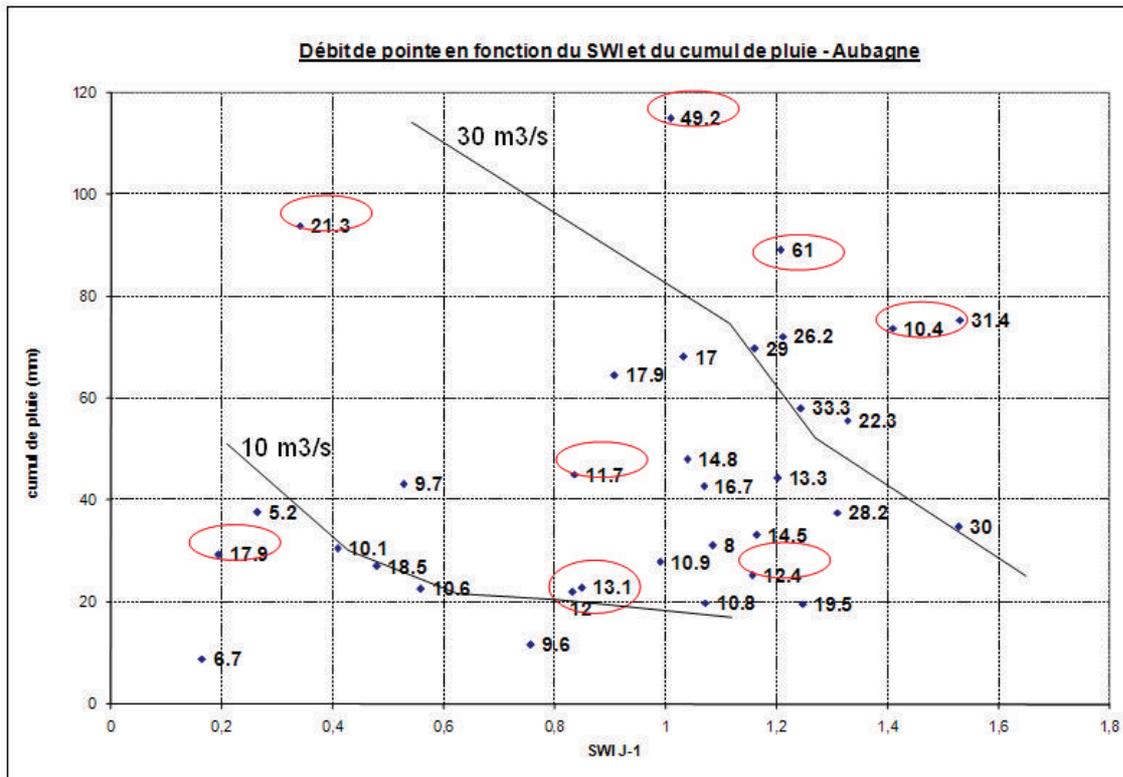
Cette station offre un plus grand nombre de données, ce qui permet voir de façon plus évidente l'influence de la saturation des sols sur les débits de pointe.

Si l'augmentation des débits avec le SWI est très nette, on observe également que les forts cumuls mais aussi l'intensité des pluies (valeurs entourées) ont une influence importante sur les débits de pointe, même pour des valeurs de SWI faibles. Cela met en évidence un phénomène de réponse urbaine qui n'existe pas à Saint Zacharie, mais commence à se distinguer à Roquevaire, qui reçoit notamment les apports du Merlançon.

Sur la station d'Aubagne, il est plus difficile de dégager une tendance car on observe moins nettement qu'en amont l'influence de la saturation des sols. En effet, la réponse des zones urbaines devient prépondérante à Aubagne. Les hydrogrammes résultants sont plus complexes, composés d'une réponse urbaine rapide puis de l'onde de crue rurale provenant de l'amont qui vient gonfler les débits et allonger la durée de la crue, mais n'arrive généralement qu'après la réponse urbaine.

Des épisodes intenses peuvent ainsi générer des débits conséquents malgré de faibles cumuls.

Figure 39 : Débits de pointe en fonction du SWI et du cumul de pluie – Aubagne



### 3.5 Coefficients d'écoulement

Le coefficient d'écoulement correspond au rapport du volume de pluie précipitée et du de volume d'eau écoulé (volume de l'hydrogramme).

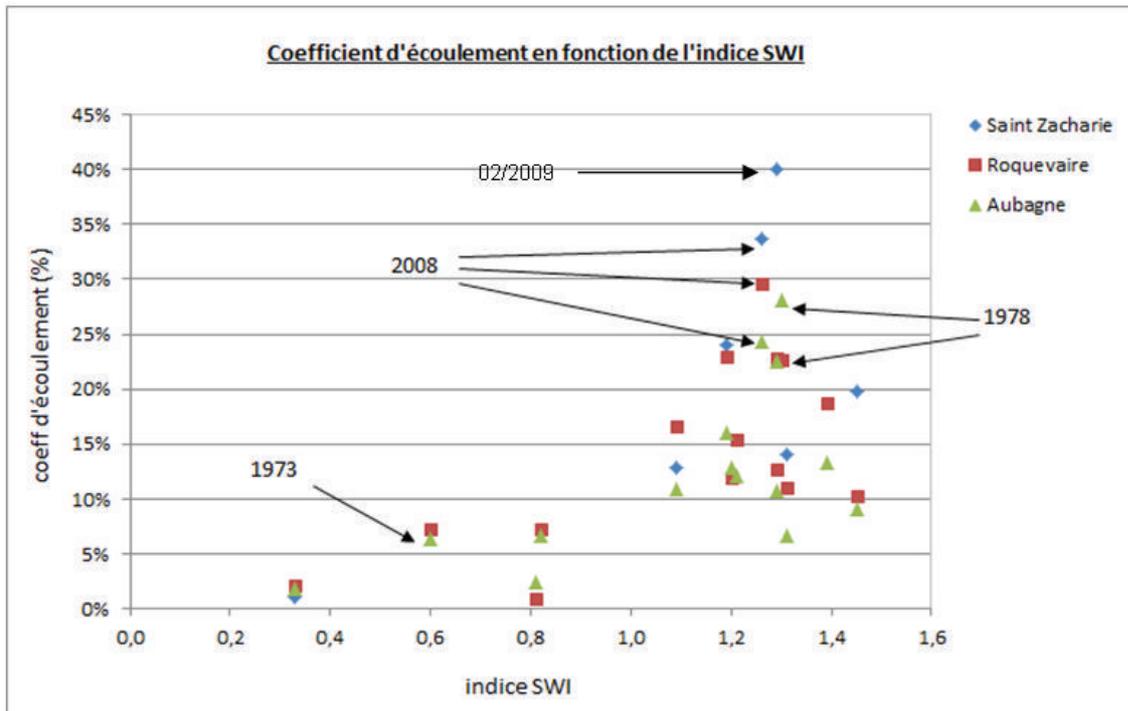
Le graphique ci-après présente les coefficients estimés pour les bassins versants de Saint Zacharie, Roquevaire et Aubagne pour chaque épisode étudié, en fonction de l'indice SWI.

Il met assez nettement en évidence une augmentation des coefficients d'écoulement lorsque l'indice SWI, et donc le degré de saturation des sols ruraux, augmente.

**Les coefficients d'écoulement obtenus pour les plus fortes crues : décembre 2008 et janvier 1978 sont relativement faibles : de l'ordre de 25 à 35% pour 2008, et 22 à 27% pour 1978.**

**La valeur maximale du coefficient d'écoulement obtenue est de 40% en février 2009.**

Figure 40 : Coefficients d'écoulement en fonction de l'indice SWI du jour précédent



#### 4 Analyse de la répartition spatiale des épisodes de pluie

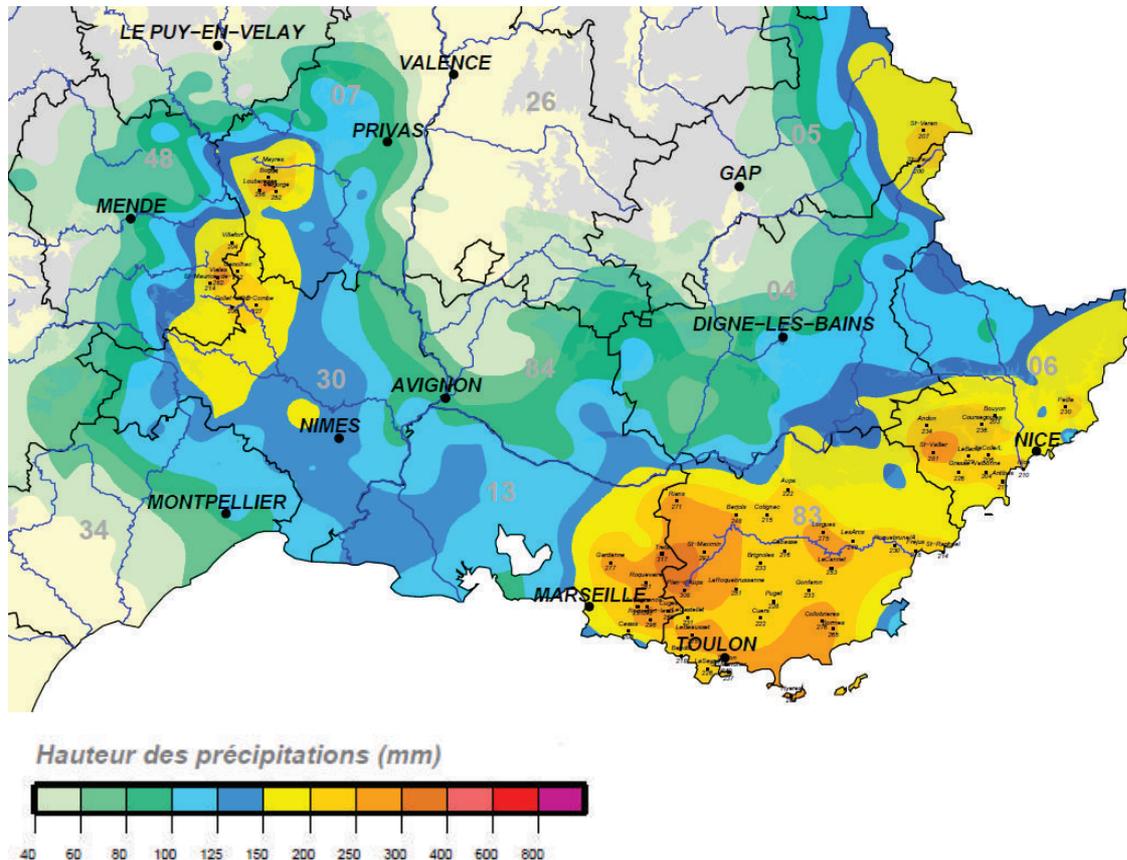
Les épisodes pluvieux rencontrés dans la région peuvent être classés en deux catégories distinctes : les épisodes de grande ampleur, et les pluies localisées très intenses.

##### ▪ LES EPISODES DE GRANDE AMPLEUR GEOGRAPHIQUE

Cette catégorie rassemble les événements s'étendant sur un à plusieurs départements. Les intensités ne sont pas nécessairement remarquables, mais ces épisodes peuvent durer plusieurs journées, aboutissant ainsi à des cumuls importants. On rencontre le plus souvent ces événements durant l'automne et l'hiver.

Un exemple de ce type d'événements sur le bassin de l'Huveaune est l'épisode de janvier 1978. Du 11 au 17 janvier, soit sur une durée de sept jours consécutifs, de fortes précipitations touchent la Provence. Sur la seule journée du 16 janvier, les cumuls atteignent 100 à 180mm, et ce sur une grande aire géographique. Au total, sur ces sept jours de pluie, on relève plus de 200mm sur le Var et plus de 300mm sur tout l'Est des Bouches-du-Rhône. Concernant le bassin de l'Huveaune, on relève sur l'ensemble de l'épisode 317mm à Trets, 308mm au Plan-d'Aups, 297mm à Aubagne, 261mm à Roquevaire, avec des intensités qui n'ont pas été très importantes, atteignant un maximum de 26mm en 2h à Trets.

**Figure 41 : Carte des précipitations (en mm) du 11 janvier 1978 à 6h UTC au 18 janvier 1978 à 6h, METEO France, édité le 11/08/2011**



#### ▪ LES PLUIES LOCALISEES TRES INTENSES

Ces événements peuvent, sur de courts laps de temps et un périmètre limité, déverser d'énormes quantités d'eau. Ils se caractérisent par des intensités record sur des pas de temps très courts. Le moteur principal de ces épisodes, souvent qualifiés de cévenols ou méditerranéens, est lié à des phénomènes météorologiques, causés notamment par l'apport d'humidité et de chaleur de la Méditerranée. Les conditions sont alors favorables à la formation de systèmes orageux, ne couvrant pas forcément des zones très étendues, mais générant de très fortes intensités de précipitations. Il est à noter que le relief peut intervenir comme élément aggravant de ces phénomènes, se produisant généralement durant l'automne.

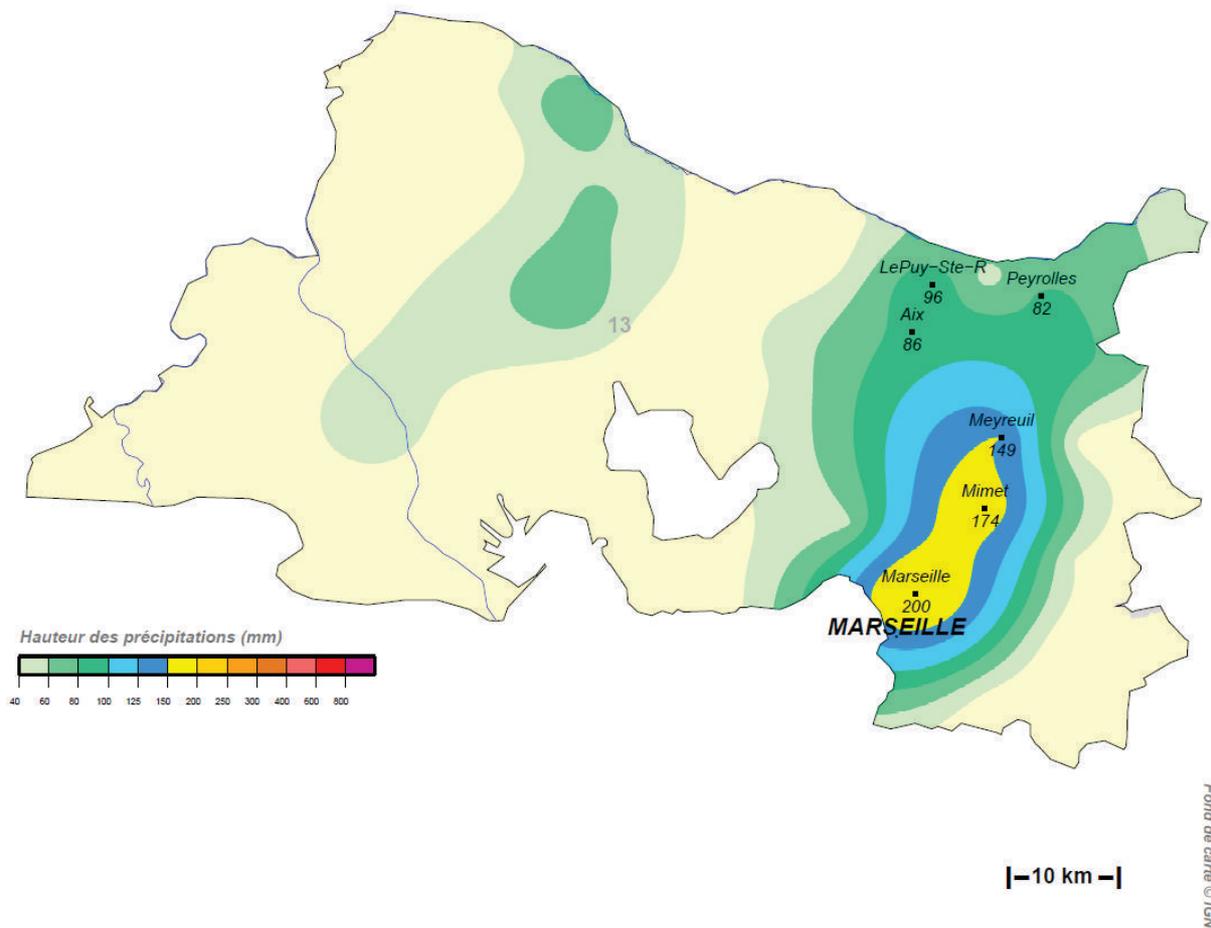
Dans ce cas-là, les orages peuvent aboutir à la formation de débits importants, tout particulièrement s'ils se produisent sur des zones urbaines avec un coefficient d'imperméabilisation important.

Quelques évènements mémorables sur le bassin de l'Huveaune sont à classer dans cette catégorie :

- L'épisode du 19 septembre 2000

L'orage était centré sur la région de Marseille, où on a relevé plus de 200mm de pluie dans la journée, avec des intensités très importantes (en une heure, 93mm à la station de Néréides, 82mm à Saint-Barnabé), alors que moins de 15mm ont été relevés à Gémenos sur l'ensemble de l'épisode.

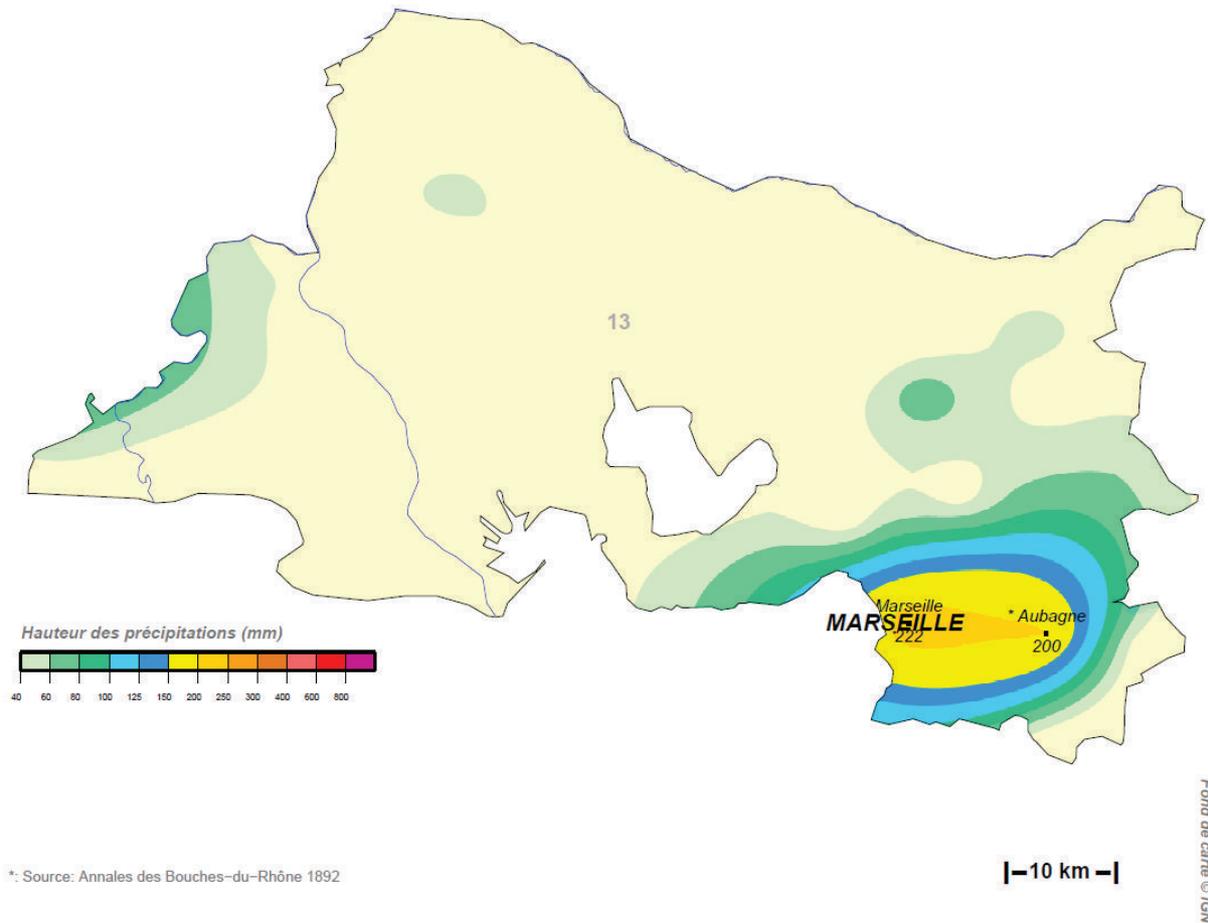
**Figure 42 Hauteur des précipitations (en mm) du 19 septembre 2000 à 6h UTC au 20 septembre 2000 à 6h UTC, METEO-FRANCE, édité le 11/08/2011**



- L'épisode du 1<sup>er</sup> octobre 1892

L'épicentre de cet orage était l'axe Marseille-Gémenos. Les précipitations observées ont été exceptionnelles. A la station de l'Observatoire de Marseille, on relève ainsi 221.5mm en seulement 4 heures, dont notamment 27mm en 13 minutes et 64mm en 40 minutes.

**Figure 43 Hauteur des précipitations (en mm) du 1<sup>er</sup> octobre 1892 à 6h UTC au 2 octobre 1892 à 6h UTC, METEO-FRANCE, édité le 11/08/2011**



Le Tableau 31 fournit les surfaces des isohyètes des cartes des épisodes les plus marquants, ainsi que les ratios entre la pluie moyenne de la partie la plus intense, et la pluie moyenne de chaque zone considérée. On constate que les zones intenses de cumuls entre 150 et 200 mm (pluie moyenne 175 mm) couvrent des surfaces de 150 à 350 km<sup>2</sup>. Pour l'épisode de 1892, la zone intense de cumul compris entre 200 et 250 mm couvre une surface de 50 km<sup>2</sup>.

**Tableau 31 Répartition spatiale des épisodes marquants**

Episode	surface (km <sup>2</sup> )	pluie moyenne (mm)	ratio pluie moyenne/pluie zone intense
<b>01/10/1892</b>	<b>49</b>	<b>220</b>	
	196	175	0.80
	119	125	0.57
	225	75	0.34
	192	25	0.11
<b>05/10/1960</b>	<b>163</b>	<b>112.5</b>	
	355	90	0.80
	311	70	0.62
<b>02/10/1973 ouest</b>	<b>365</b>	<b>175</b>	

Episode	surface (km2)	pluie moyenne (mm)	ratio pluie moyenne/pluie zone intense
<b>02/10/1973 ouest</b>	403	137	0.78
<b>02/10/1973 est</b>	<b>164</b>	<b>175</b>	
	233	137	0.78
<b>16/01/1978</b>	<b>239</b>	<b>175</b>	
	387	137	0.78
	477	112	0.64
	532	90	0.51
<b>01/12/2003</b>	<b>356</b>	<b>175</b>	
	145	137	0.78
	216	112	0.64
	179	90	0.51
<b>14/12/2008</b>	<b>244</b>	<b>112</b>	
	632	90	0.80

#### ▪ ABATTEMENT SPATIAL SUR LA VILLE DE MARSEILLE

Concernant l'abattement spatial, une étude du Cemagref a été réalisée sur la Ville de Marseille, à partir des données de 25 postes pluviométriques sur 5 années (période 1993-1997) [Variabilité des pluies fortes à Marseille – Cemagref Lyon – Septembre 2004]. Un modèle de simulation de champs de pluies fortes au pas de temps 6 minutes à 24h a été utilisé pour générer des pluies sur une période d'au moins 200 ans, avec les caractéristiques des pluies de la période d'observation.

Les résultats de cette étude sont les suivants :

- des courbes IDSF ont été établies (courbes intensité-durée-fréquence en fonction de la surface)
- des coefficients d'abattement spatial probabilistes ont été calculés. Les résultats montrent que ce coefficient varie fortement en fonction de la durée et de la période de retour prise en compte : par exemple pour une surface de 300 km<sup>2</sup>, le coefficient d'abattement spatial varie de 0.57 à 0.73 entre la durée de 1h à 6h, pour la période de retour 10 ans. Pour la période de retour 100 ans, ce coefficient est réduit, il varie entre 0.53 et 0.69 pour les mêmes durées. Pour une surface de l'ordre de 50 km<sup>2</sup>, le coefficient d'abattement spatial varie entre 0.76 et 0.86 pour la période de retour 100 ans et la durée 1h à 6h.
- des coefficients d'épicentrage sont calculés, qui définissent le ratio entre la pluie ponctuelle maximale en un point quelconque sur une surface donnée et la pluie maximale en un point fixe (poste pluvio). Ce coefficient varie selon la surface, la durée et la période de retour. Pour la période de retour 10 ans et la durée 1h, ce coefficient est compris entre 1,8 (surface de l'ordre de 50 km<sup>2</sup>) et 3 (surface de l'ordre de 300 km<sup>2</sup>). Pour la période de retour 100 ans, ce coefficient est compris entre 1.7 et 2 pour les mêmes surfaces. Cela signifie par exemple que pour un épisode centennal avec une pluie ponctuelle qui vaut 80mm en 1h (issue de la courbe IDF), on peut observer une pluie de 190 mm en un point quelconque d'une surface de 300 km<sup>2</sup> pour ce même épisode.

Du fait de la méthode et des données utilisées, le Cemagref précise que ces résultats ne sont pas exploitables directement pour des superficies supérieures à 300 km<sup>2</sup> environ.

Cette étude fournit des éléments intéressants et une méthodologie d'analyse de l'abatement spatial, cependant, elle est basée sur une faible durée d'observation et ne prend pas en compte spécifiquement les épisodes intenses et généralisés qui nous intéressent. Pour ces épisodes, il est donc préférable de se baser sur les répartitions spatiales observées.

**Toutes ces analyses précédentes montrent qu'il n'y a pas eu récemment de forts épisodes pluvieux sur le bassin versant de l'Huveaune et donc de forte crue associée. En effet les cumuls de pluies maxima ont été de l'ordre de 300mm, sur des zones peu étendues, ce qui est nettement inférieur aux forts cumuls de pluie que l'on peut attendre sur le pourtour méditerranéen français. En effet les épisodes de crue marquant de l'arc méditerranéen (type Vaison la Romaine, Nîmes, Draguignan ...) étaient de l'ordre de 400mm sur des superficies de bassin versant plus importantes.**

## 5 Modélisation hydrologique

### 5.1 Modèle utilisé

La modélisation hydrologique du bassin versant de l'Huveaune a été menée à l'aide du logiciel AGYR, qui permet un découpage en sous-bassins versants, et la représentation de la transformation pluie-débit. C'est le modèle GR4 qui a été utilisé. Les tests réalisés notamment en vue de représenter la réponse des zones karstiques nous ont conduits à prendre en compte une fonction d'infiltration à partir du réservoir sol. Cela permet de reproduire les pertes importantes par infiltration qui alimentent le karst profond et sont drainées en dehors du bassin versant, et ne participent pas aux écoulements de surface.

Ce type de modèle représente de manière globale les différentes sources possibles d'écoulement pour générer le débit à l'exutoire : le ruissellement et les écoulements souterrains. Le modèle GR4 permet de représenter avec un nombre réduit de paramètres (4) à la fois les phénomènes de ruissellement et de transfert souterrain par l'intermédiaire du transfert dans deux réservoirs (le réservoir sol et le réservoir eau gravitaire), le débit calculé à l'exutoire étant composé du débit superficiel et du débit souterrain.

Le ruissellement sur les zones urbaines a été représenté à l'aide du modèle RERAM.

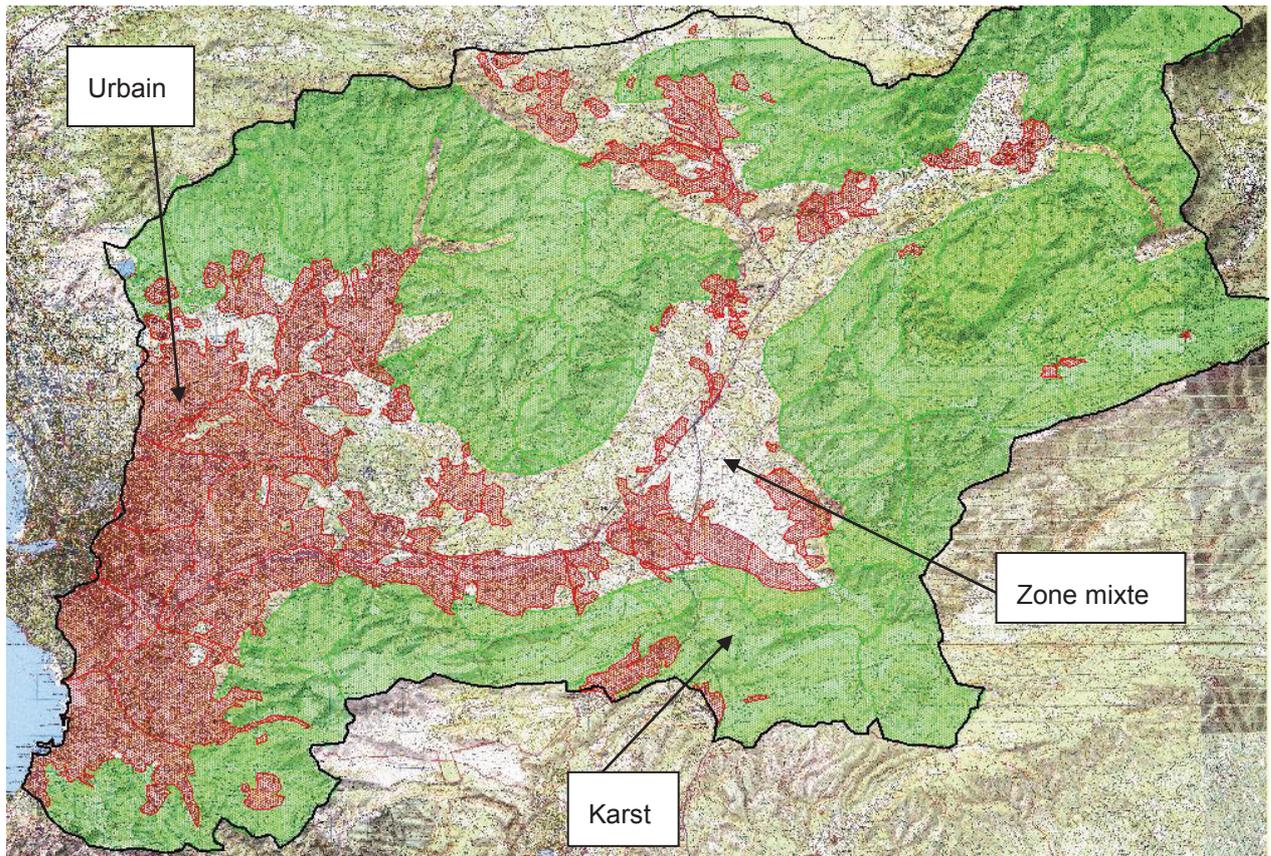
Les différents tests préalables réalisés nous ont conduits à distinguer pour chaque sous-bassin versant 3 composantes :

- Une composante karstique,
- Une composante urbaine,
- Une composante mixte.

La surface affectée à chaque composante a été définie à partir de la carte géologique du bassin versant et des caractéristiques de l'occupation du sol. La composante mixte correspond aux zones de dépôts alluvionnaires et/ou détritiques qui surmontent le calcaire karstique dans les vallées et en pied de versant.

La Figure 44 indique la répartition des zones karstiques, urbaines et mixtes identifiées sur le bassin versant.

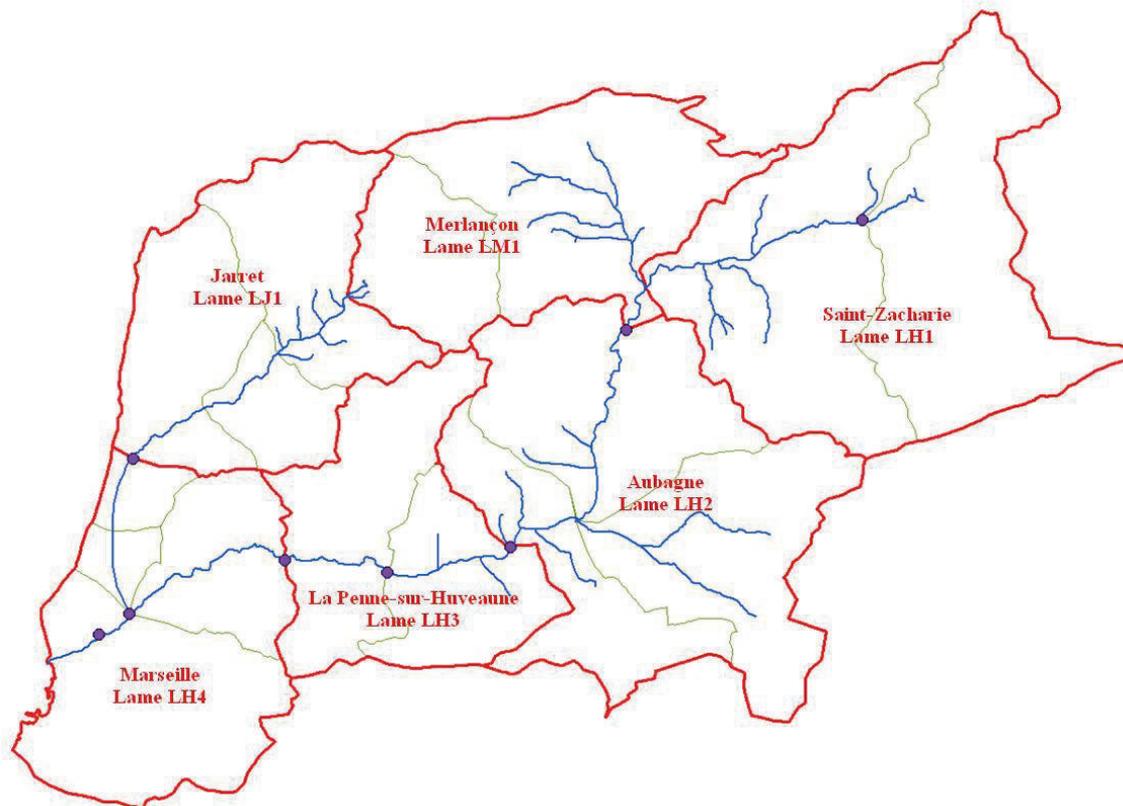
**Figure 44 Répartition des zones karstiques, urbaines et mixtes sur le bassin versant de l'Huveaune**



## 5.2 Calage

Les modèles ont été calés sur les hydrogrammes de crue des crues récentes, et notamment la crue de décembre 2008. La crue de février 1978 a également été utilisée pour le calage, à partir des informations disponibles. Les crues historiques ont été utilisées pour la validation du modèle.

Le calage a été effectué aux stations hydrométriques, en distinguant les réponses différentes des parties karstiques et non karstiques des bassins versants, et celles des parties urbanisées. Un découpage du bassin versant en sous-bassins versants a été effectué, tenant compte de la position des stations hydrométriques et des différents massifs karstiques identifiés. Le découpage est représenté dans la Figure 45. A ce découpage est superposé un découpage en zones de lame d'eau : 6 zones de lame d'eau ont été prises en compte dans le calcul pour tenir compte de la répartition spatiale de la pluviométrie pour les différentes crues de calage simulées.



**Figure 45 Découpage en sous-bassins versants et zones de lames d'eau pour la modélisation hydrologique**

Le calage a été réalisé en réalisant des sous-modèles, ayant en entrée l'hydrogramme observé à la station amont. Par exemple, le calage des paramètres des bassins versants entre Saint Zacharie et Roquevaire a été réalisé en prenant en compte en entrée du modèle l'hydrogramme observé à Saint Zacharie, lorsqu'il est disponible. Cela permet de s'affranchir des écarts de modélisation qui peuvent se produire sur la partie amont (dans cet exemple à Saint Zacharie), et de ne pas cumuler ces écarts de l'amont vers l'aval. Le modèle est ensuite utilisé en calcul pluie-débit depuis l'amont vers l'aval.

Un travail important a été effectué afin de représenter au mieux le comportement des trois types de composantes, et notamment l'incidence de l'état initial en début de crue.

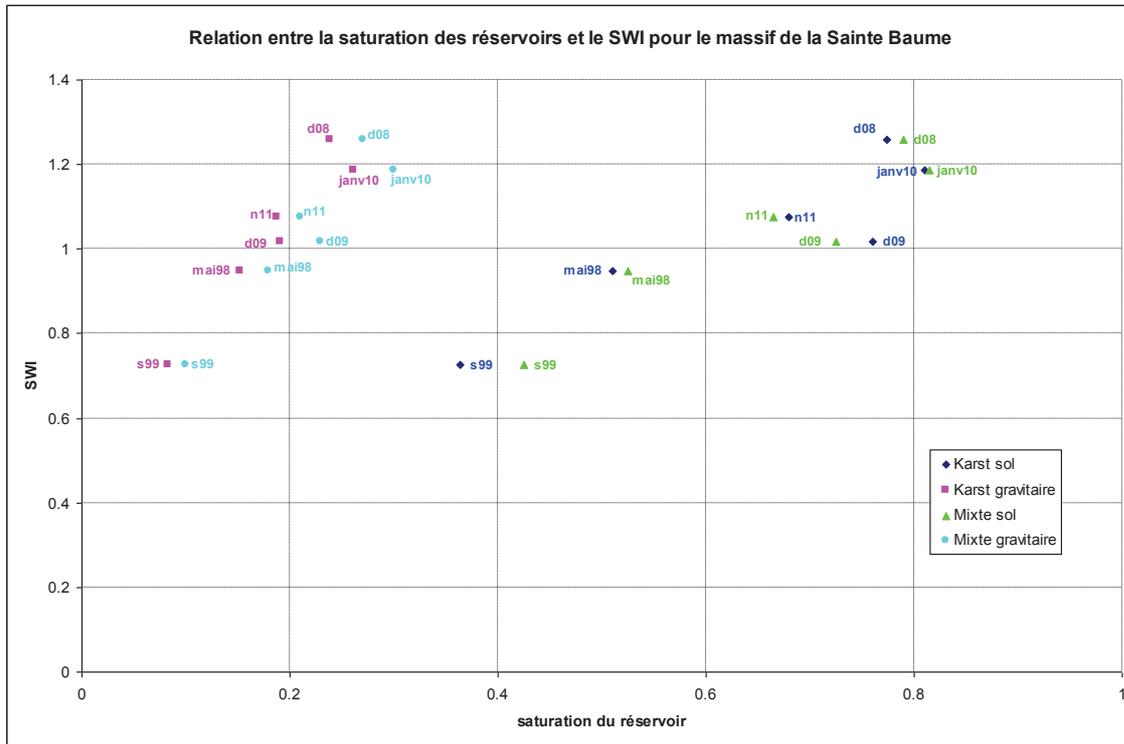
En effet, l'analyse hydrologique a montré que le SWI pouvait être relié au débit de la crue, en fonction du cumul de pluie. On a donc recherché à ajuster au mieux les tailles des réservoirs et leur état initial en fonction du SWI, afin d'obtenir une relation état initial/SWI cohérente.

Un exemple de la relation obtenue pour le massif de la Ste Baume est fourni en Figure 46. On obtient une bonne corrélation entre l'état initial et le SWI, pour les crues de calage.

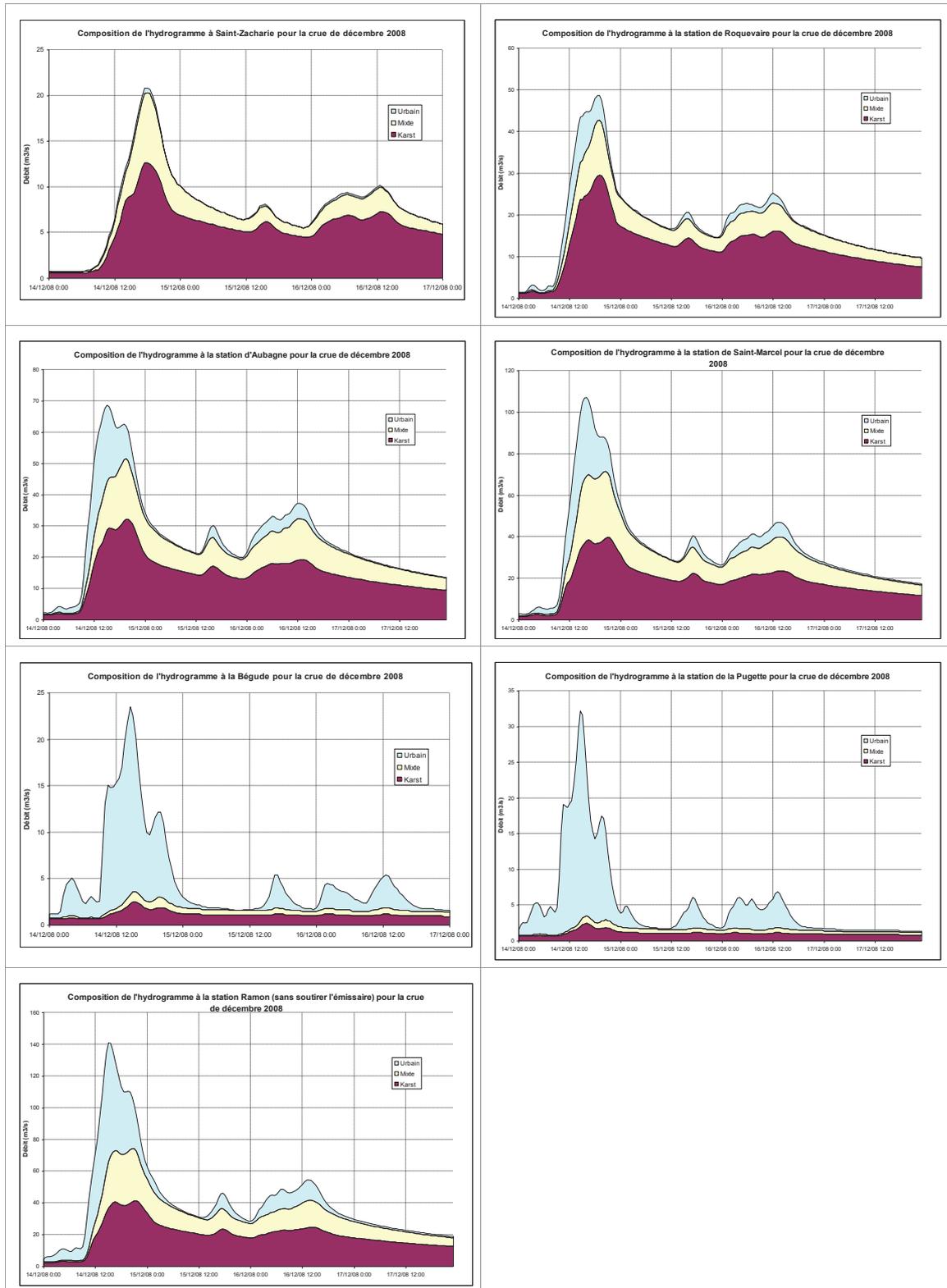
Les figures 47 et 48 montrent des exemples de résultats, avec l'indication des différentes composantes de l'écoulement pour les crues de décembre 2008 et novembre 2011. Ces figures permettent de visualiser l'importance de l'apport des zones urbaines, qui se renforce depuis l'amont vers l'aval, et est prépondérante sur le Jarret.

Le calage obtenu est satisfaisant, les problèmes rencontrés s'expliquant principalement par la représentativité spatiale de la pluie. Il faut cependant souligner que le calage est réalisé sur des crues de moyenne importance, et peu ou pas débordantes comme la crue de décembre 2008.

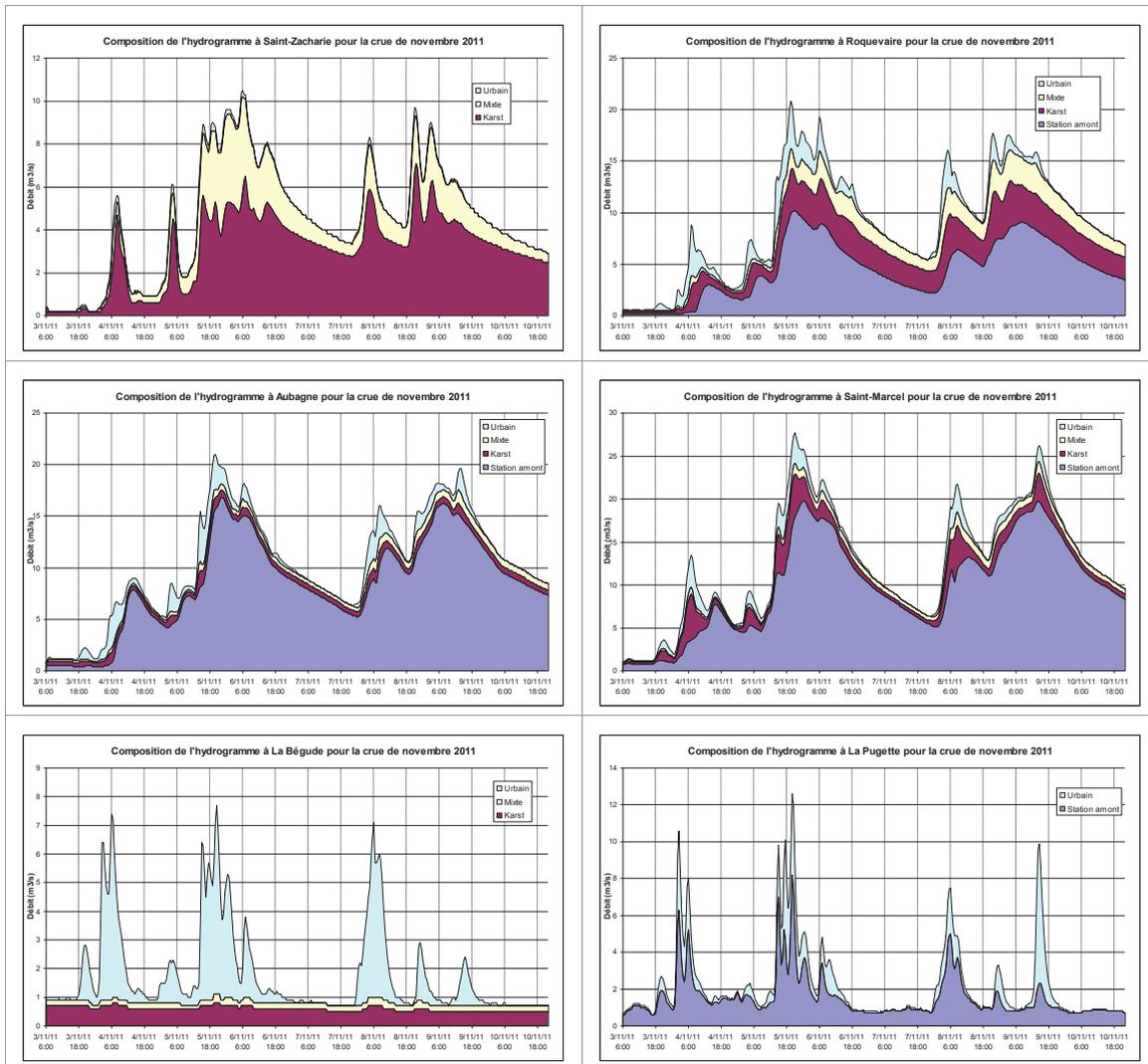
**Figure 46 Exemple de relation entre le SWI et l'état initial des réservoirs sol et eau gravitaire pour le massif de la Ste Baume**



**Figure 47 Crue décembre 2008 – Contribution des zones karstiques, urbaines et mixtes aux différentes stations hydrométriques**



**Figure 48 Crue novembre 2011 – Contribution des zones karstiques, urbaines et mixtes aux différentes stations hydrométriques**



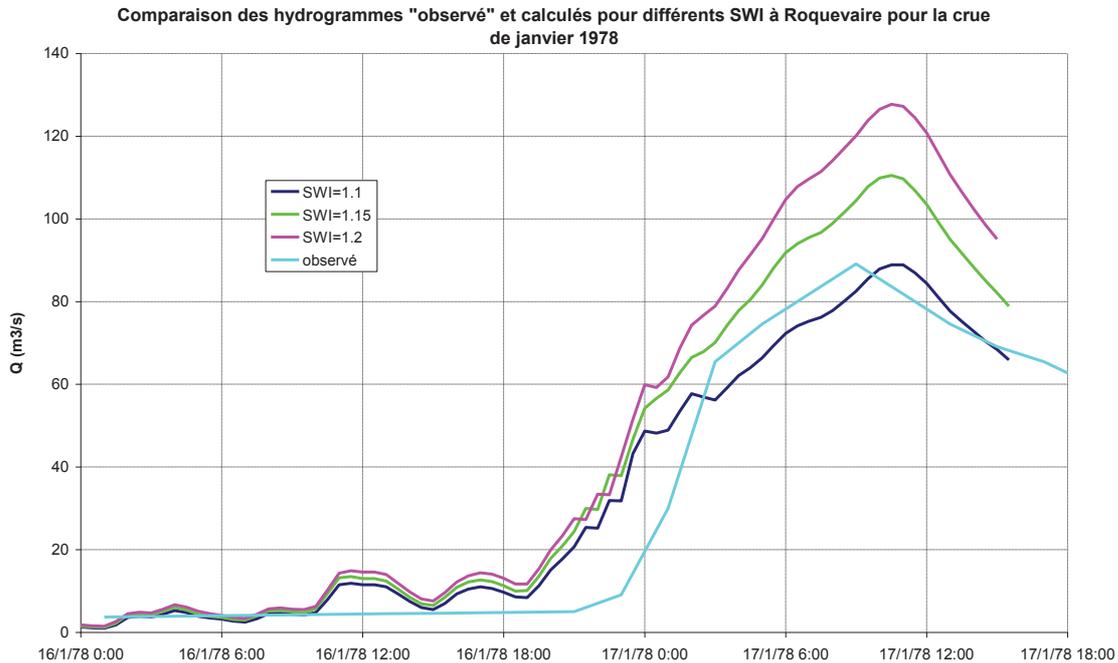
Pour la crue de 1978, nous disposons des hydrographes reconstitués lors d'études antérieures (Etude Egcem 1978), ainsi que des hyétogrammes de pluie horaire. Les débits estimés comportent une incertitude du fait des débordements qui se sont produits à Roquevaire et surtout entre Roquevaire et Aubagne.

Le SWI en début d'épisode a été reconstitué à partir des pluies journalières précédant l'épisode pluvieux ayant généré la crue. L'épisode pluvieux du 16 janvier 1978 a été précédé de 5 jours de pluie, les valeurs de SWI en début d'épisode sont donc supérieures aux valeurs moyennes de janvier. En janvier, les valeurs moyennes des SWI sont élevées, voisines de 1 et l'accroissement des SWI dans ces conditions est de l'ordre de 0.1 pour 20 mm de pluie. Les valeurs prises en compte sont donc de 1.15 sur la partie amont, 1,3 sur la partie Sud-Est de la Ste Baume et 1,2 sur l'aval.

Dans cette gamme de valeurs de SWI, le modèle montre une forte sensibilité, cependant la valeur du SWI lui-même est moins variable qu'en période automnale et son estimation est donc plus robuste.

Les tests de sensibilité effectués pour la crue de février 1978 montrent que le débit de pointe peut varier à Roquevaire entre 90 et 120 m³/s lorsque le SWI varie entre 1.1 et 1.2. (cf Figure 49).

**Figure 49 Comparaison des hydrogrammes observé et calculés à Roquevaire pour la crue de janvier 1978 avec différentes valeurs de SWI**



Entre Roquevaire et Aubagne, les apports sont relativement faibles pour les crues de notre échantillon. Pour la crue de janvier 1978, les apports seraient plus importants (d'après les estimations de débits issues des études antérieures). Cela indique une réponse différente du karst, qui se manifesterait dans des conditions de saturation importante (SWI élevés). Pour cette crue en effet, on évalue à 1.3 la valeur du SWI sur la partie de la Ste Baume située entre Roquevaire et Aubagne.

### 5.3 Calculs des hydrogrammes de crue pour les crues historiques

Ces calculs permettent de conforter le calage du modèle, notamment concernant les relations SWI/état initial des réservoirs. Les SWI ne sont pas connus précisément pour ces crues anciennes, cependant, les informations disponibles concernant la pluie antérieure permettent d'estimer de façon relativement précise une valeur du SWI en début de crue. Ainsi les valeurs des SWI estimées en début de crue pour les crues historiques sont fournies dans le Tableau 32.

**Tableau 32 Crues historiques – estimation des SWI**

Date crue	Données de pluie utilisées et méthode d'estimation des débits	Estimation du SWI en début d'épisode
1 <sup>er</sup> octobre 1892	Hyétogramme précis utilisé Estimation du débit non fait à partir de calculs hydrauliques	SWI 0,8 → cohérent avec situation une pluviométrie moyenne
Novembre 1907	Indication sur répartition de la pluie (113m en 4h30) Estimations de débits par modèles pluie-débit	SWI 1,2 → cohérent avec situation une pluviométrie excédentaire, et des cumuls faibles les jours précédents

Date crue	Données de pluie utilisées et méthode d'estimation des débits	Estimation du SWI en début d'épisode
11 novembre 1935	Estimation de la répartition horaire des pluies  Forte pluie sur la partie nord-est du bassin (crue exceptionnelle de l'Arc)  Pas de crue remarquable sur Marseille	SWI 1,5 sur l'amont → cohérent avec une situation pluviométrique excédentaire et de forts cumuls les jours précédents.  Forte incertitude sur la répartition temporelle des pluies
Oct 1960	Estimation de la répartition horaire des pluies	SWI 1,4 : cohérent avec une situation pluviométrique excédentaire (épisode de plusieurs jours pris en cours)
3 Oct 1973	Hyétogramme de pluie disponible	SWI 0,8 → cohérent avec une situation pluviométrique moyenne
16 Janvier 1978	Hyétogramme de pluie disponible  Débit estimé à Roquevaire jugé faible par EGCEM  Ecrêtement entre Roquevaire et Aubagne, et surtout entre Aubagne et Dromel	SWI 1,15 en amont et 1,3 à Gémenos (cohérent avec une situation sèche depuis mi-décembre, et une période pluvieuse de 5 jours avant la crue, ayant apporté un cumul important)

Les hydrogrammes de crue calculés pour les crues historiques ont ainsi été calculés. On obtient une reconstitution satisfaisante des hydrogrammes des crues de 1973, et des débits de pointe pour les crues les plus anciennes. Des tests de sensibilité sur la valeur du SWI en début d'épisode ont été effectués.

La comparaison des débits de pointe calculés et estimés dans les études antérieures est présentée dans le Tableau 33.

Le calcul fait pour la crue d'octobre 1960 pour laquelle les estimations indiquent qu'il y aurait eu des apports importants entre Roquevaire et Aubagne montre qu'il est nécessaire de renforcer la réponse du karst pour cette crue comme pour la crue de janvier 1978. Cela semble cohérent avec l'hypothèse faite d'une réponse différenciée de la zone karstique entre Roquevaire et Aubagne à partir de conditions de saturation élevées (SWI égal à 1.4 pour la crue de 1960).

Cependant, les estimations des débits de pointe des crues anciennes ont été effectuées avec des méthodes variables qui sont rappelées dans le tableau 25. Les méthodes hydrauliques locales (par opposition à une modélisation hydraulique du lit mineur et du lit majeur) permettent d'obtenir une meilleure précision, surtout si des estimations sont effectuées en plusieurs points, cependant les débits de débordement peuvent ne pas être correctement pris en compte. Les méthodes pluie-débit prennent en compte l'ensemble du débit mais sans considérer d'écrêtement liés aux débordements et généralement avec des incertitudes plus élevées, dépendant du calage éventuel du modèle et des hypothèses.

Il existe donc une incertitude importante sur ces estimations, ainsi que sur les reconstitutions faites avec le modèle Agyr du fait de l'absence de certaines données (par exemple répartition temporelle de la pluie absente pour certaines crues).

**Tableau 33 Comparaison des débits estimés dans les études antérieures aux débits calculés avec Agyr à Roquevaire, Aubagne et Marseille**

<b>Station Roquevaire</b>		
<b>Crue</b>	<b>Q observé ou estimé (m3/s)</b>	<b>Q calculé Agyr (m3/s)</b>
Octobre 1892	70	71
Novembre 1935	183	194
Octobre 1960	120-170	137
Décembre 1972	50	49
Octobre 1973	47	46
Janvier 1978	90	110
Décembre 2008	53.5	
<b>Station Aubagne</b>		
<b>Crue</b>	<b>Q observé ou estimé (m3/s)</b>	<b>Q calculé Agyr (m3/s)</b>
Novembre 1935	170-190	193
Octobre 1960	184	208
Décembre 1972	70	63
Octobre 1973	55	64
Janvier 1978 (*)	160	193
Décembre 2008	61	
<b>Station Marseille</b>		
<b>Crue</b>	<b>Q observé ou estimé (m3/s)</b>	<b>Q calculé Agyr (m3/s)</b>
Octobre 1892	380	400 à Ramon 555 à l'exutoire
Novembre 1907	330	297 à Ramon 343 à l'exutoire
Octobre 1973	80 à Dromel 115 l'exutoire	89 à Ramon 106 à l'exutoire
Janvier 1978 (*)	140 à Borély	267 à Ramon 282 à l'exutoire
Décembre 2008	66.5 à Ramon	

(\*) : écrêtement entre Aubagne et Marseille non pris en compte dans le modèle Agyr, constaté dans les observations de 1978 (Roquevaire/Aubagne et Aubagne/Dromel).

**Remarques : les calculs sont faits pour la situation d'urbanisation actuelle.**

## 5.4 Calculs des hydrogrammes de crue pour les petits affluents

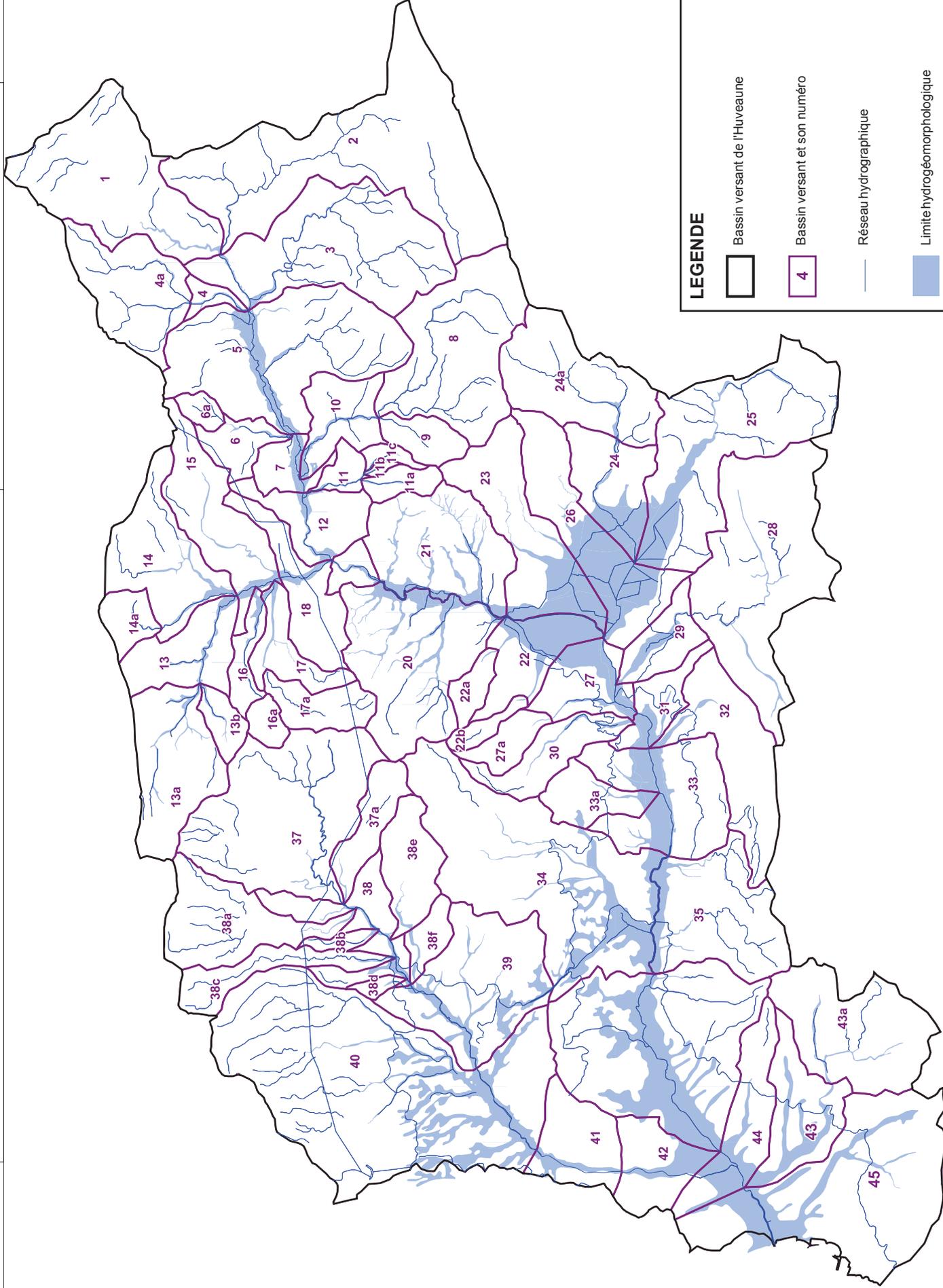
Le modèle utilisé pour le calage a été affiné de manière à représenter les sous-bassins versants des affluents pour lesquels sera conduite une modélisation hydraulique.

Le découpage réalisé est représenté sur la Figure 50.

Les paramètres des sous-bassins versants sont restés identiques aux paramètres de calage pour les différents secteurs homogènes, avec une adaptation du temps de réponse de manière à retrouver des hydrogrammes identiques aux nœuds de calcul principaux du modèle de calage.

Chaque sous-bassin versant est représenté si nécessaire par trois composantes : karst, mixte et urbain.

Ce modèle détaillé permet de calculer directement des hydrogrammes pour tous les sous-bassins versants, ce qui assure une cohérence des débits aux différentes échelles spatiales.



**LEGENDE**

-  Bassin versant de l'Huveaune
-  Bassin versant et son numéro
-  Réseau hydrographique
-  Limite hydrogéomorphologique

2 km

1/100 000

## 5.5 Synthèse du calage

La modélisation « globale » est conceptuelle. Les bassins versants (contours identifiés par le réseau hydrographique de surface) sont représentés par trois composantes :

- Réponse du karst : forte incidence de l'état initial, taille importante des réservoirs, écoulement de base, pertes n'alimentant pas l'écoulement de surface
- Réponse des zones urbaines : pas d'incidence de l'état initial, incidence directe de l'intensité de la pluie
- Réponse des zones mixtes : réponse plus « classique », zones de dépôts détritiques, alluviaux créant une interface avec le karst, pouvant se saturer plus rapidement.

Le modèle utilisé est le modèle GR4 du Cemagref, avec une vidange du réservoir sol représentant les pertes par infiltration dans le karst profond (qui ne vont pas alimenter le ruissellement à l'exutoire du bassin versant).

Des relations de bonne qualité ont été établies pour l'initialisation des réservoirs du modèle GR4 en fonction du SWI, ce qui montre la bonne cohérence du modèle.

**La modélisation est satisfaisante sur les crues de calage, et l'on arrive à représenter de manière correcte les différents comportements des trois composantes prises en compte : le karst, les zones urbaines et les zones mixtes. Cependant, le calage s'est effectué sur des crues moyennes du fait de l'absence de forte crue récente.**

De plus, pour les crues observées y compris la crue de janvier 1978, on n'arrive pas à une saturation du karst, les coefficients d'écoulement restant relativement faibles. Il semble également que la partie karstique située entre Roquevaire et Aubagne ait une réponse différenciée lorsqu'elle se trouve dans des conditions de saturation élevées (SWI élevés), avec des apports qui sont faibles dans des conditions de crues courantes, et qui peuvent devenir plus importants lorsque le SWI augmente. Dans ces conditions de SWI élevés, on se trouve dans une zone de forte sensibilité de la réponse des zones karstiques à la pluie.

Les autres crues historiques connues correspondent à des événements pluvieux plus importants, et ont généré des débits nettement plus élevés. Compte-tenu de l'incidence des zones karstiques où une partie importante de la pluie s'infiltré et est drainée vers le karst profond puis vers l'extérieur du bassin, l'extrapolation du comportement du karst pour les événements pluvieux plus importants nécessite d'exploiter au maximum les informations disponibles concernant les crues historiques. Nous avons donc essayé d'exploiter au maximum les informations des crues historiques, afin d'essayer de préciser le comportement du bassin pour des épisodes de pluie très importants.

Cependant, les informations disponibles pour la reconstitution des crues historiques sont souvent partielles (par exemple peu d'information en général sur la répartition horaire de la pluie) et les estimations faites comportent des incertitudes qui peuvent être importantes. Les tests de sensibilité effectués montrent également que l'on se trouve généralement pour ces épisodes dans une zone de forte sensibilité de la réponse des zones karstiques à l'état initial (état de saturation représenté par le SWI). L'utilisation du modèle pour l'estimation des débits caractéristiques à partir de pluies de projet doit par conséquent prendre en compte cette sensibilité et ces incertitudes, qui sont le reflet de la complexité physique du bassin.

## 6 Estimation des débits caractéristiques

### 6.1 Méthodologie pour l'estimation des débits caractéristiques

Les débits caractéristiques ont été estimés à partir de pluies de projet de même période de retour. Le modèle hydrologique détaillé a été utilisé, afin d'obtenir des débits cohérents aux différentes échelles spatiales. Le modèle hydrologique a donc permis d'obtenir les hydrogrammes de chaque sous bassin versant, pour différents scénarios de pluies.

Les modèles hydrauliques mis en œuvre en phase 5 ont alors été exploités, et ont permis d'améliorer la représentativité du modèle hydrologique pour les fortes crues, notamment lorsque des débordements se produisent et influencent les conditions de propagation.

Ainsi les débits caractéristiques présentés en cartographie de synthèse sont issus des résultats des modèles hydrauliques, après propagation des hydrogrammes le long des linaires modélisés.

Les hypothèses de calcul sont décrites dans les paragraphes suivants. Elles concernent :

- La durée et la forme des pluies,
- La répartition spatiale des épisodes sur le bassin,
- L'état initial représenté par l'indice SWI. Compte-tenu de l'importance de ce paramètre, des tests de sensibilité ont été effectués.

Les éléments d'information exploitables par des méthodes statistiques ont également été mis à profit à titre de comparaison, notamment par la prise en compte d'informations sur les crues historiques à Aubagne.

Pour les différentes périodes de retour, les débits spécifiques obtenus sont comparés aux débits des études antérieures et commentés.

### 6.2 Construction des pluies de projet

#### 6.2.1 Durée et forme des pluies

Les pluies de projet ont été construites pour chaque zone de lame d'eau utilisée pour le modèle (6 zones) sur le modèle de Keifer, c'est-à-dire en considérant une fréquence identique quelle que soit la durée considérée. Les pluies construites ont une durée de 24 heures. Le pas de temps est de 1 heure, avec une pointe d'intensité en 30 minutes. Les pluies ont été construites pour les périodes de retour 10 ans, 50 ans et 100 ans. La répartition temporelle a été définie en positionnant la partie la plus intense de l'épisode en fin de période.

Des pluies de durée 2 jours ont également été construites, sur le même principe, en considérant une période de pluie régulière sur le jour précédant l'épisode de pluie intense qui va générer la crue. Pour ces pluies, le cumul sur 1 jour et 2 jours a une période de retour identique. Seule la pluie de durée 2 jours a été considérée, le cumul supplémentaire pour la durée de 3 jours étant très faible.

Pour chaque zone de lame d'eau, les valeurs des pluies caractéristiques ont été calculées à partir des quantiles Shyreg, sur la base d'une pondération avec les coefficients de Thiessen.

Les valeurs des quantiles Shyreg ont été corrigées comme décrit en Chapitre 2 – 1.4.3.

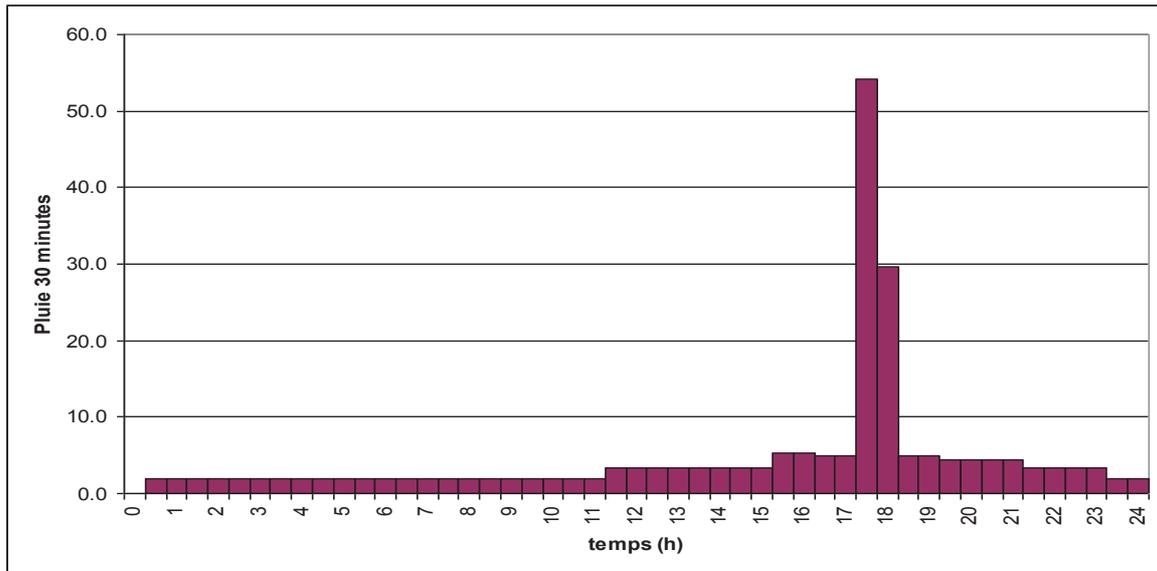
Les caractéristiques des pluies de projet de durée 24 heures et les cumuls 48h pour chaque zone de lame d'eau sont fournies dans le Tableau suivant.

Les zones de lames d'eau correspondent aux zones de la Figure 45.

**Tableau 34 Caractéristiques des pluies de projet**

		Lame LH1 (St Zacharie)	Lame LH2 (Aubagne)	Lame LH3 (La Penne)	Lame LH4 (Marseille)	Lame LM1 (Merlançon)	Lame LJ1 (Jarret)
Pluie de projet 100 ans	H 1/2h (mm)	54.1	54	54.7	54.6	49.8	53.6
	H 1h(mm)	83.8	83.6	84.8	84.6	77.2	83.1
	H 2h (mm)	93.8	93.7	94.6	93.9	86.8	92.9
	H 4h (mm)	114.3	113.9	114.8	113.5	105.5	112.7
	H 24h (mm)	219.3	212.2	212.6	204.5	188.6	203.9
	H 48h (mm)	250.3	243.2	243.6	235.5	219.6	234.9
Pluie de projet 50 ans	H 1/2h (mm)	50.4	50.1	50.8	50.6	46.3	49.7
	H 1h(mm)	75.4	75	76.1	75.7	69.2	62.0
	H 2h (mm)	85	84.6	85.3	84.4	78.5	69.8
	H 4h (mm)	103.7	103.2	103.8	102.5	95.7	85.0
	H 24h (mm)	193.8	186.6	186.8	179.4	166.8	149.2
Pluie de projet 10 ans	H 1/2h (mm)	37	36.4	36.9	36.5	33.6	35.9
	H 1h(mm)	51	50.2	50.8	50.3	46.3	49.5
	H 2h (mm)	59.1	58.1	58.5	57.6	54	57.3
	H 4h (mm)	73.4	72.1	72.4	70.9	67.1	71
	H 24h (mm)	130.9	125.3	125.4	120.4	114.3	120.7
	H 48h (mm)	151.9	146.3	146.4	141.4	135.3	141.7

Le hyétogramme de la pluie prise en compte pour l'épisode de 24h générant la crue est représenté sur la Figure 46



**Figure 46 Hyétoqramme type d'une pluie de projet de durée 24h (pluie 100 ans pour la lame d'eau LH1)**

## 6.2.2 Répartition spatiale

L'analyse de la répartition spatiale des épisodes pluvieux importants sur le bassin de l'Huveaune (tels qu'octobre 1892, décembre 2003, janvier 1978) montre que la partie intense de l'épisode peut concerner une surface de l'ordre de 200 à 300 km<sup>2</sup>. Il serait par conséquent pessimiste de considérer un épisode intense touchant l'ensemble du bassin de l'Huveaune. De plus, dans le cas d'épisodes très intenses comme celui d'octobre 1892, l'épicentre de l'épisode concerne une zone de taille plus réduite, qui peut atteindre environ 50 à 70 km<sup>2</sup>. Les valeurs de pluies caractéristiques définies précédemment à partir des quantiles Shyreg corrigés correspondent à la pluie maximale « locale » qui peut être observée dans la zone de l'épicentre (elles résultent d'analyses de données à des postes pluvios).

La construction des épisodes de projet a été effectuée en tenant compte des formules d'abattement spatial établies par l'Irstea suite à des réanalyses d'images radar. Les valeurs de l'abattement surfacique établies pour le bassin de l'Huveaune pour la période de retour 10 ans sont les suivantes :

Durée de pluie	Surface de bassin versant (km <sup>2</sup> )				
	9 km <sup>2</sup>	25 km <sup>2</sup>	81 km <sup>2</sup>	225 km <sup>2</sup>	729 km <sup>2</sup>
1h	0.98	0.96	0.9	0.8	0.67
3h	0.99	0.98	0.95	0.9	0.82
6h	0.99	0.99	0.97	0.94	0.88
24h	0.99	0.99	0.97	0.95	0.9

**Tableau 35 : abattement surfacique pour différentes durées de pluie pour la période de retour 10 ans (source : réanalyses IRSTEA)**

Remarque : la formule d'abattement de Luc Neppel établie pour le Languedoc Roussillon pour des données journalières fournit des valeurs un peu plus faibles, mais l'écart avec les valeurs de réanalyses de l'IRSTEA est de quelques % (4% pour la surface 81 km<sup>2</sup> par exemple). La formule d'abattement de Luc Neppel est également fournie pour la période de retour 100 ans, l'écart avec les valeurs pour la période de retour 10 ans étant minime (baisse de 1 à 2%).

Dans ces conditions, on propose de retenir les valeurs de l'IRSTEA, en conservant pour la période de retour 100 ans des valeurs identiques à celles de la période de retour 10 ans.

**Les épisodes de projet ont ensuite été construits en considérant des incréments de surface de l'ordre de 60km<sup>2</sup>, soit un découpage du bassin-versant complet en 8 sous-zones. Chaque épisode prend en compte les 8 sous-zones avec un coefficient d'abattement spatial différent, de façon à obtenir pour chaque surface cumulée la valeur de l'abattement global correspondant.**

Plusieurs épisodes de projet ont été construits, correspondant à différents scénarios de positionnement de la partie intense de l'épisode sur le bassin de l'Huveaune. En effet, les analyses précédentes ont montré de nombreux types de réponses du bassin versant en fonction de la pluie (plutôt karst, plutôt urbain, ou mixte). Il n'y a donc pas à priori de zone de pluie « préférentielle » générant les fortes crues.

Les zones voisines de la zone intense sont ensuite affectées d'un coefficient d'abattement spatial qui diminue progressivement en fonction de l'éloignement, le coefficient étant calculé de manière à obtenir le coefficient voulu pour la surface cumulée. Les épisodes construits sont décrits dans le Tableau 36.

La Figure 51 représente schématiquement la répartition spatiale de la pluie pour chaque épisode : chaque zone de lame d'eau est positionnée selon le coefficient d'abattement retenu (8 valeurs sont possibles, correspondant à des surfaces cumulées de 60 à 480km<sup>2</sup>).

**Au total, 16 épisodes sont construits, de durée 24h.**

	Position de la zone intense
Episodes 1a.1, 1a2, 1a3	Amont St Zacharie (LH1a)
Episodes 1b1, 1b2, 1b3	St Zacharie - Auriol (LH1b)
Episodes 2.1, 2.2	Merlançon (LM1)
Episode 3a	Maïre (LH2a)
Episode 3b	Aubagne (LH2b)
Episodes 4.1, 4.2	Jarret amont (LJ1)
Episodes 5.1, 5.2	Marseille (LH4)
Episodes 6.1, 6.2	La Penne (LH3)

**Tableau 36 : Caractéristiques des épisodes de projet sur le bassin de l'Huveaune**

**Remarque : les zones de lame d'eau LH1 et LH2 ont été divisées en deux zones dénommées a et b, de manière à obtenir des sous-zones ayant une surface correspondant aux hypothèses de répartition spatiale de l'épisode (de l'ordre de 60km<sup>2</sup>), comme indiqué sur la figure ci-après.**

**Ainsi les 6 zones de pluies de projet initiales deviennent, après application des 8 coefficients d'abattement, 8 zones de pluies de projet différentes.**

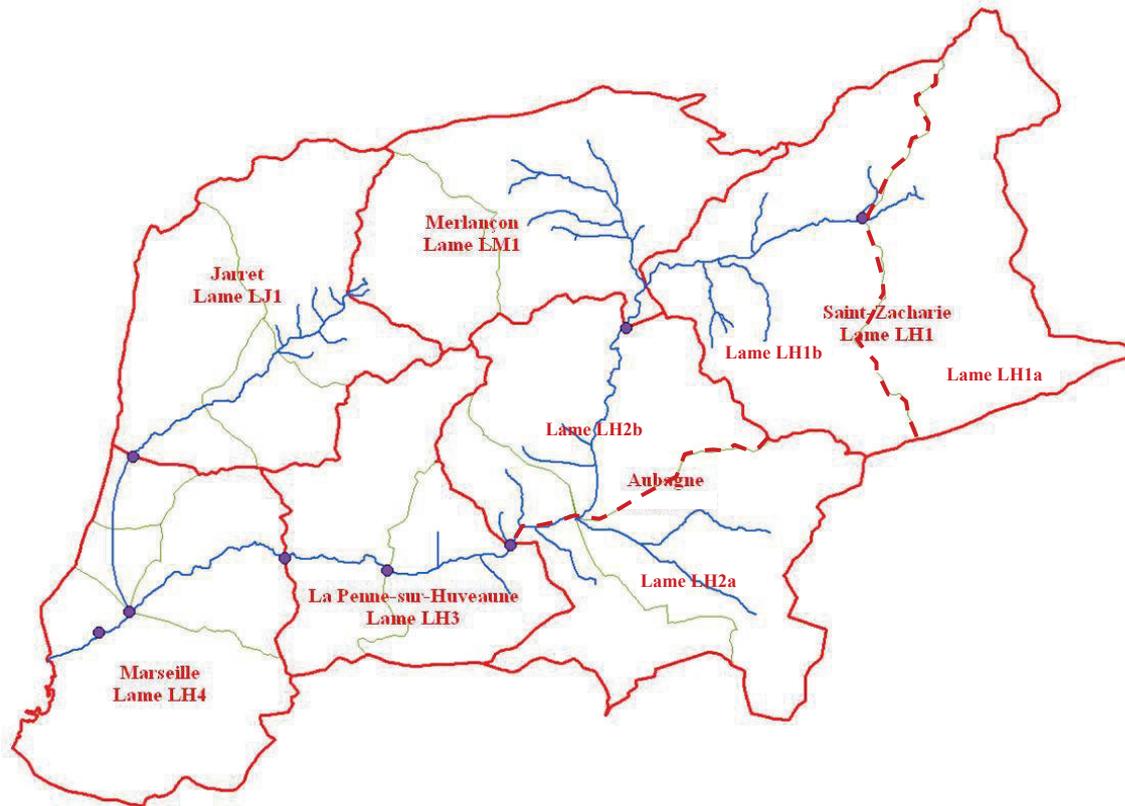
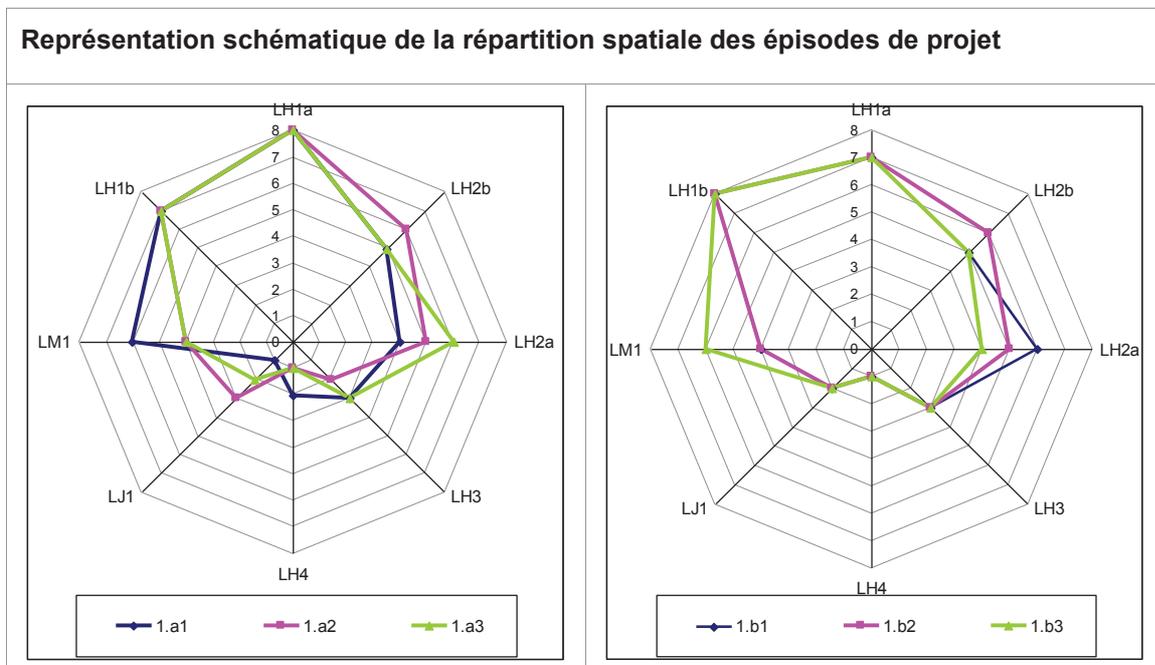


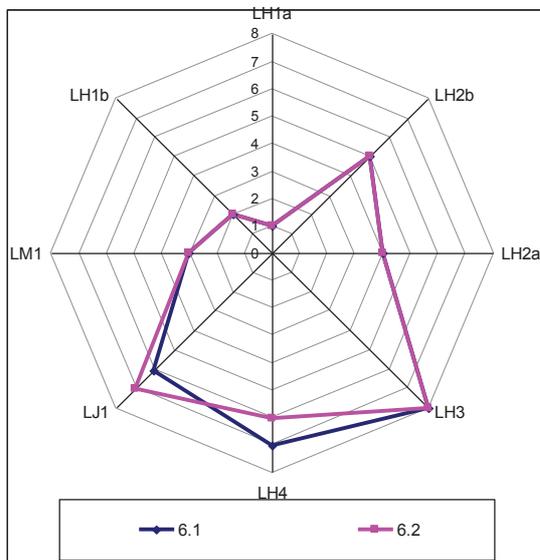
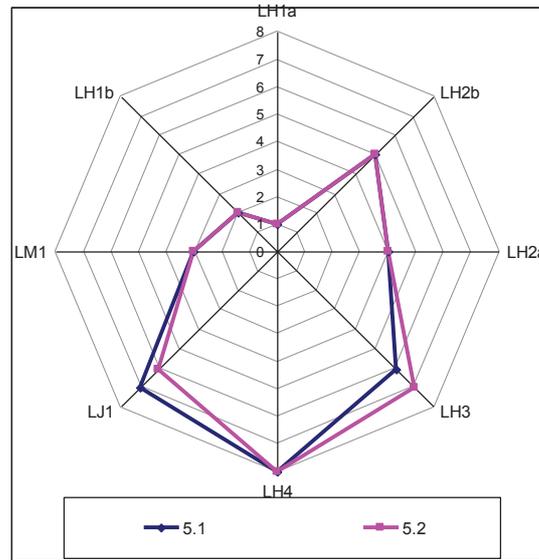
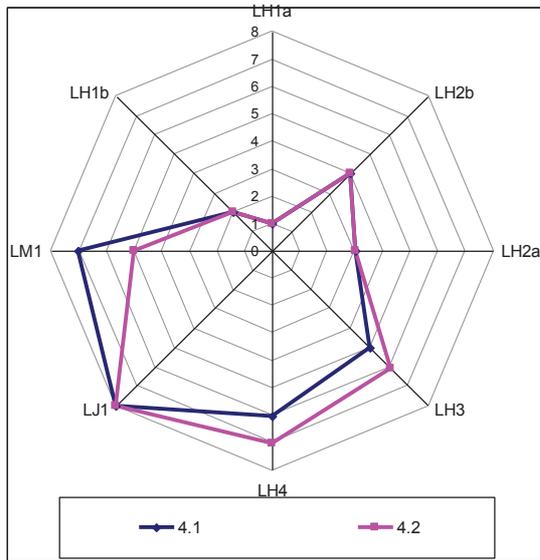
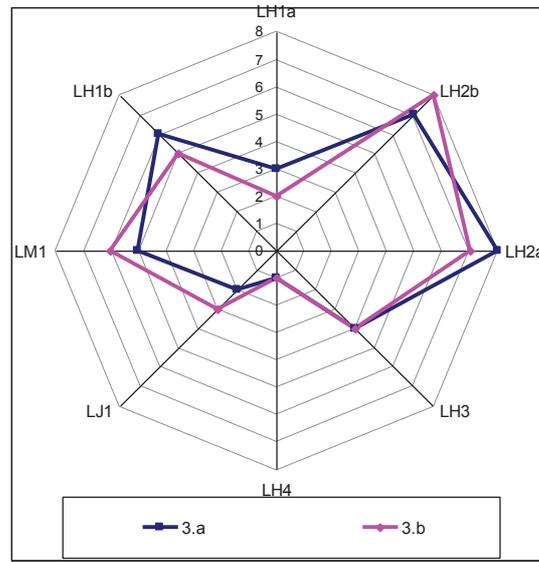
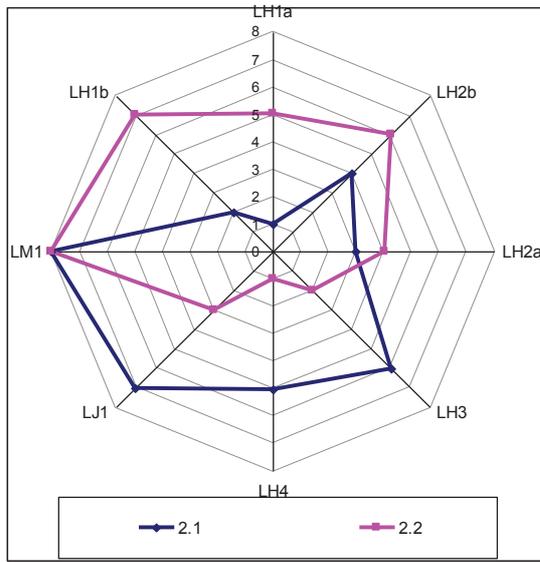
Figure 51 : répartition spatiale des pluies

**Schémas de répartition spatiale de la pluie pour les épisodes de projet**

**Représentation schématique de la répartition spatiale des épisodes de projet**



Représentation schématique de la répartition spatiale des épisodes de projet



Chaque zone de lame d'eau est positionnée sur une échelle de 1 à 8, qui indique un abattement spatial du plus élevé (1), au plus faible (8). L'abattement spatial le plus faible correspond à la zone de pluie la plus intense.

### 6.2.3 Etat initial

Comme vu précédemment, la valeur plancher du SWI en période hivernale est de 1.1.

La pluie des jours précédant l'épisode intense qui va générer la crue va contribuer à augmenter l'état de saturation des bassins versants (notamment du karst), et donc conduire à une valeur de SWI supérieure en début d'épisode.

Les caractéristiques statistiques des pluies de projet de durée jusqu'à 3 jours montrent que les cumuls supplémentaires sont relativement faibles pour la durée 2 jours et très faibles pour la durée 3 jours.

Pour la durée 2 jours, un cumul supplémentaire de 31mm est obtenu pour la période de retour 100 ans et de 21 mm pour la période de retour 10 ans. Le cumul supplémentaire pour la durée 3 jours est très faible et n'aura pas d'impact sur la saturation.

En hiver, un cumul de 31 mm conduit à un accroissement du SWI de l'ordre de 0.08.

Il s'agit d'une estimation faite à partir de l'évolution du SWI en fonction des cumuls de pluie observés pour différents épisodes.

Afin de valider la cohérence de cette estimation, on a vérifié qu'avec le modèle, on obtient des résultats proches si l'on considère une pluie centennale de 2 jours avec un état initial de SWI égal à 1.1, et une pluie centennale de 1 jour avec un état initial de SWI égal à 1.2.

Cette valeur de 1.2 correspond à une valeur courante, toujours en hiver, obtenue après une période de pluies de cumuls peu importants.

**C'est donc cette hypothèse (un SWI égal à 1.2 au début de l'épisode de 24h qui va générer la crue) qui a été retenue.**

## 6.3 Calcul des débits caractéristiques

### 6.3.1 Mise en œuvre du modèle hydrologique

Le modèle hydrologique a été mis en œuvre pour les épisodes de projet définis précédemment, (16 épisodes définis), et avec des conditions initiales de SWI égales à 1.2., afin de calculer les apports des bassins versants. Ces apports sont ensuite intégrés en entrée des modèles hydrauliques.

### 6.3.2 Mise en œuvre du modèle hydraulique

Après calage, les modèles hydrauliques mis en œuvre (phase 5 de l'étude) ont été exploités pour les crues de projet. Ils ont été utilisés pour préciser les conditions d'écoulement dans les tronçons présentant des débordements significatifs et ayant un impact sur la forme de l'hydrogramme.

Comme les modèles hydrologiques, les modèles hydrauliques ne sont calés que sur des crues moyennement débordantes (crue de février 1978 notamment), ou très peu débordantes (décembre 2008). Cependant, les modèles hydrauliques ayant, eux (contrairement aux modèles hydrologiques), une bonne représentativité des écoulements en lit majeur, ils permettent de préciser les conditions d'écoulement pour les fortes crues.

Les résultats obtenus amènent aux constats suivants :

- De manière générale, la propagation de la crue centennale est un peu plus lente que celle de la crue de 1978, du fait de débordements plus importants : le temps de propagation est de l'ordre de 6h entre St Zacharie et Marseille en crue centennale,
- Huveaune en amont du Merlançon : l'hydrogramme se déforme peu
- Confluence Huveaune-Merlançon : la pointe du Merlançon passe à la confluence un peu avant celle de l'Huveaune amont, la propagation sur le Merlançon est également ralentie pour les forts débits et débordements associés, ce qui favorise la concomitance.
- Huveaune entre Roquevaire et le Pont de l'Etoile, l'hydrogramme se déforme peu
- Huveaune entre le pont de l'Etoile et la station d'Aubagne (aval A50) : cette zone est complexe, du fait de la présence d'ouvrages, des débordements de l'Huveaune vers la Maire et de l'étalement de la Maire avant la confluence avec l'Huveaune. La zone inondable est ici très large.
- Maire : l'apport de la Maire est très retardé par l'étalement dans la plaine, et l'hydrogramme subit un laminage très important. On peut assimiler ce fonctionnement à celui d'une zone de stockage. Du fait de la forme très plate de l'hydrogramme à l'exutoire. Il y a concomitance avec la pointe de l'Huveaune. Le débit max de la Maire à son exutoire est de l'ordre de 40 m<sup>3</sup>/s (y compris la dérivation du Merlançon d'Aubagne), alors que les apports pourraient générer un débit total de l'ordre de 100 m<sup>3</sup>/s.
- A La Penne sur Huveaune les débordements sont très importants, notamment en rive droite, et submergent l'autoroute et la voie ferrée. Les apports sur le secteur sont néanmoins importants et le débit de pointe augmente vers l'aval. L'écrêtement du fait des débordements en lit majeur est donc limité.
- Sur le Jarret de manière générale il n'y a pas de déformation d'hydrogramme, du fait notamment de l'artificialisation importante du secteur. Les débordements se font en amont des parties enterrées de Plan de Cuques et l'écoulement se propage alors vers l'aval via les rues en surface.

On a également des débordements au niveau du stade. En aval, c'est dans le quartier de La Rose que les débordements sont les plus importants : la canalisation sous le nœud routier de la N1547 et de la RD4c est insuffisante et l'eau passe en surface sous la Rn via la RD908.

- Sur Marseille les débordements importants en amont de la confluence avec le Jarret lamine quelque peu la crue. La confluence avec le Jarret amène de nouveau une hausse importante de débit, néanmoins la pointe de crue du jarret passe avant l'arrivée de la pointe de crue de l'Huveaune.

Ces éléments ont été pris en compte dans le modèle hydrologique afin d'améliorer sa représentativité pour les fortes crues, d'être cohérent avec les modèles hydrauliques, et de pouvoir utiliser le modèle hydrologique pour les tests de sensibilité (gains en temps de calcul).

Ainsi, le paramètre de la propagation a été modifié sur certains tronçons dans le modèle hydrologique. En particulier sur la Maire, les conditions d'écoulement ont été modifiées pour tenir compte de l'écrêtement très important des débits dans la plaine en amont de la confluence avec l'Huveaune.

Le modèle hydrologique permet de représenter ces phénomènes par l'ajustement d'un paramètre : le retard en fonction du débit.

### 6.3.3 Débits caractéristiques

Les débits de pointe maximaux obtenus aux principaux points de calcul pour les périodes de retour 100 ans, 50 ans et 10 ans sont présentés dans le Tableau 37.

Ce sont donc les débits de crue résultants des simulations hydrologiques et hydrauliques.

L'épisode générant le débit maximal est indiqué pour la période de retour 100 ans, ainsi que le débit spécifique.

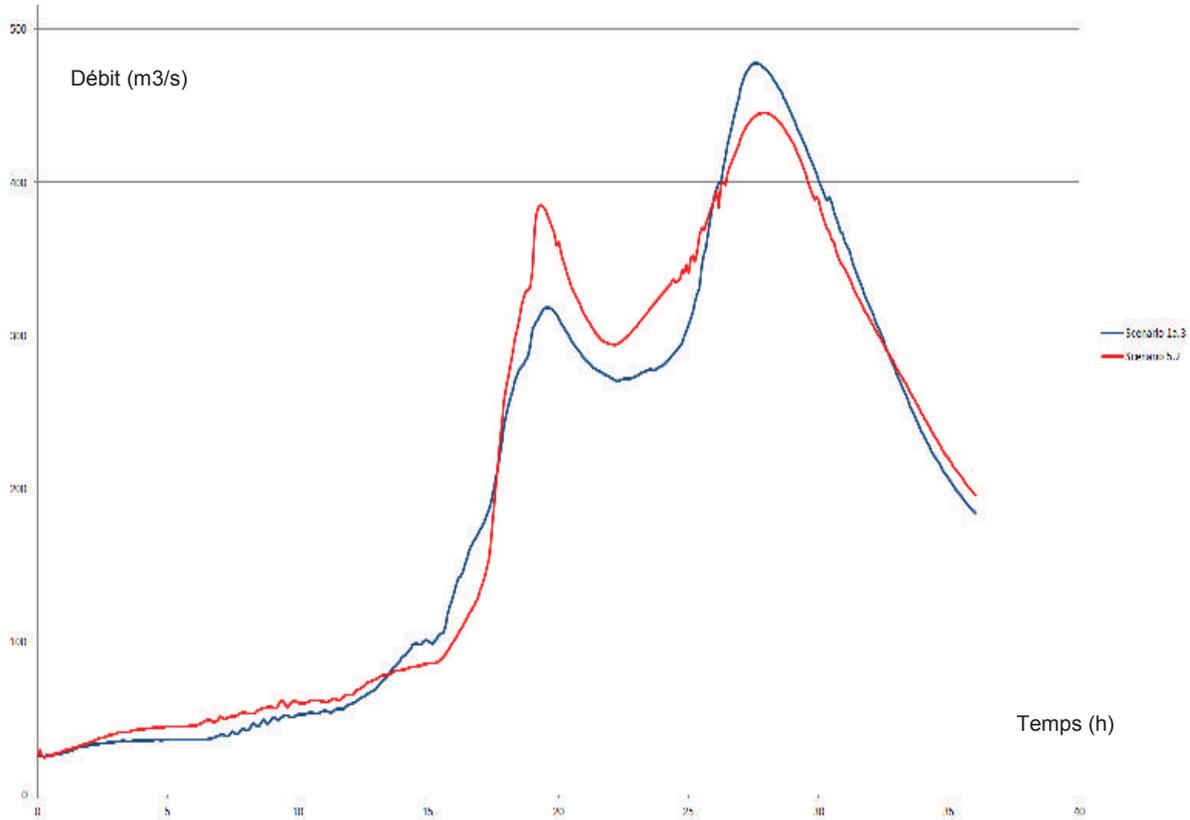
**On constate que l'influence de la réponse du karst est forte sur l'ensemble de l'Huveaune, c'est en effet l'épisode 1a.1 (centré en amont de St Zacharie) qui fournit les débits de pointe maximaux jusqu'à Roquevaire, et l'épisode 1a.3 jusqu'à l'embouchure Huveaune.**

**Il convient néanmoins noter que sur Marseille, le débit centennal de l'épisode centré sur la ville (scenario 5.2) donne un débit de pointe quasiment égal au maximum issu du l'épisode centré sur le karst (scenario 1a.3).**

**Ainsi 2 types de pluie totalement différentes engendrent un débit de crue à Marseille aux environ de  $450\text{m}^3/\text{s}$ .**

La comparaison des hydrogrammes de crues centennales de l'Huveaune à Marseille en aval de la confluence Jarret est indiquée sur la figure suivante (comparaison entre l'épisode de pluie centré sur le karst (1a.3) en bleu ou sur la ville de Marseille (5.2) en rouge).

Cette figure illustre bien la non concomitance des pointes de crues issues du Jarret (1<sup>er</sup> pic) et issues de l'Huveaune amont (2<sup>eme</sup> pic).



**Figure 52 : comparaison des hydrogrammes à Marseille pour 2 scenarios de pluies centennales**

Remarque : les débits de la crue exceptionnelle ont été obtenus en multipliant les débits de pointe des apports des modèles hydrauliques par 2, conformément aux souhaits de la DDTM13. Les résultats sont également fournis dans le tableau de synthèse ci-dessous.

**Tableau 37 : Débits caractéristiques maxima du BV de l'Huveaune**

Point de calcul	Surface drainée (km <sup>2</sup> )	100 ans			10 ans	50 ans	Q <sub>excep</sub>
		Q max (m <sup>3</sup> /s)	Q <sub>spéc</sub> (m <sup>3</sup> /s/km <sup>2</sup> )	Episode générant Q <sub>max</sub> 100 ans	Q max (m <sup>3</sup> /s)	Q max (m <sup>3</sup> /s)	Q max (m <sup>3</sup> /s)
<b>Huveaune</b>							
Saint Zacharie	56.0	124	2.21	1a.1	50	110	285
Auriol (amont confluence Merlançon)	116.6	230	1.97	1a.1	70	170	350
Roquevaire (aval confluence Merlançon)	165.8	297	1.79	1a.1	110	220	540
Aubagne (amont confluence Maire)	207.6	341	1.64	1a.3	115	240	615
Aubagne (station)	281.0	360	1.28	1a.3	135	275	660
Le Mouton	305.2	374	1.23	1a.3	140	295	665
Saint Marcel	339.9	400	1.23	1a.3	150	325	780
Marseille (amont confluence Jarret)	361.5	360	1.00	1a.3	150	260	675
Marseille (aval confluence Jarret)	463.2	460	0.99	1a.3	220	340	960
<b>Le Merlançon</b>							
Souque Nègre - confluence	25.1	67	2.65	2.2	32	52	115
Exutoire	47.9	105	2.2	2.2	53	87	240
<b>La Maire</b>							
Affluent cône de déjection	4.0	8.5	2.1	3.a	3	7	17
Fauge (amont confluence Maire)	19.6	57	2.9	3.a	25	45	120
Maire (amont confluence Fauge)	9.5	20	2.11	3.a	7	15	39
<b>Le Jarret</b>							
Plan de Cuques – amont urbain	21	41	1.95	4.1	16	31	80
Plan de Cuques – Bourdonnière	38	80	2.10	4.1	32	63	163
Plan de Cuques Roubauds	60	127	2.15	4.1	56	102	256
Aval croix Rouge	69	152	2.20	4.1	62	120	342
La Bégude	92	205	2.24	4.1	80	155	430
La Pugette	102	202	1.98	4.1	90	175	430

Pour les petits affluents modélisés en régime permanent (cf figure 49), les débits obtenus et modélisés ont été obtenus par la méthode des transferts surfacique à partir des débits des bassins versants principaux calés précédemment, et ce pour chacune des 3 composantes (karst, mixte et urbain). Sur certains bassins versants, la somme des débits de pointe des 3 composantes n'est pas égale au débit de pointe total, elle est supérieure, du fait des temps de réponses différents des 3 composantes (les pointes des 3 hydrogrammes ne se superposent pas). Un abattement équivalent de la somme des 3 composantes a donc été pris en compte dans ces cas là également pour le calcul des débits des sous-bassins versants. Les débits des sous-bassins versant retenus (colonne « Q100 retenu » dans le tableau suivant) sont donc inférieurs à la somme des 3 composantes (colonne « Total Q » dans le tableau suivant). Ainsi on obtient par exemple pour la crue centennale les résultats suivants :

*La cartographie de synthèse des débits de crues retenus en divers point du réseau hydrographique du bassin versant de l'Huveaune est fournie en annexe 5.*

Tableau 38 : calculs des débits caractéristiques 100 ans des petits affluents 1D

B V	Karst		Mixte		Urbain		Total		Q 100 retenu	Valat
	S	Q	S	Q	S	Q	S	Q		
37	18.05	30.8	2.6	9	0.32	1	20.97	40.5		
37a	2.86	4.9	0.25	0.9	0.24	0.8	3.35	6.5	6.5	Oule
38	17.42	40	1.34	4.6	5.72	23.2	24.47	60.7		
38a	7.58	17.4	0	0	0.2	0.8	7.78	18.2	16.4	Mordeau
38b	0.31	0.7	0	0	0.42	1.7	0.73	2.4	2.2	Routabou
38c	3.56	8.2	0	0	0.39	1.6	3.95	9.8	8.1	Escombes
38d	0.53	1.2	0	0	0	0.0	0.53	1.2	1.1	
38e	3	6.9	0.95	3.3	0.53	2.1	4.48	12.3	11.1	Amandier
38f	0.16	0.4	0.33	1.1	1.2	4.9	1.69	6.4	5.7	Rascous
11	2.05	5.3	0.25	0.8	1.47	6.7	3.76	10.8		
11a	0.94	2.43	0.24	0.77	0.35	1.60	1.52	4.79	3.6	Basseron
11b	0.086	0.22	0	0	0.15	0.68	0.23	0.91	0.5	
11c	0.61	1.58	0	0	0.091	0.41	0.71	1.99	1.7	
4	7.45	16.3	1.35	3.3	0.26	1.5	9.06	20.1		
4a	7.18	15.71	0.9	2.2	0	0	8.12	17.91	18	Fenouilloux
6	2.63	6.7	0.23	0.7	0.56	3.7	3.41	8.5		
6a	0.95	2.42	0	0	0.009	0.06	0.96	2.48	2.4	Barres
13	1.54	2.9	9.42	20	4.89	19.6	15.85	42.5		
13a	0.21	0.40	5.94	12.62	2.66	10.65	8.81	23.66	23.6	
13b	0	0	1.31	2.79	0.36	1.43	1.67	4.22	4.5	Pré Gaillard
14	5.35	11.5	2.36	5	2.71	11.8	10.42	28.1		
14a	0.92	1.98	0.84	1.78	0.31	1.35	2.09	5.11	5.6	Tonneau
15	5.75	12.40	0.89	1.90	1.1	4.30	7.75	18.60	18.6	Playes
16	0.99	1.9	0.88	1.9	1.27	6.1	3.15	9.5	9.5	Grand Pré
16a	0.99	1.9	0.12	0.26	0.076	0.37	1.18	2.52	2.4	
17	4.11	7.8	1.03	2.2	1.41	6.6	6.55	16.2	16.2	
17a	3	5.69	0.26	0.56	0.08	0.37	3.27	6.62	6.4	Destrousse
22	2.7	1.6	2.6	3.5	2.25	10.1	7.55	15.2		
22a	1.087	0.6	0.45	0.6	0.013	0.1	1.55	1.3	1.3	Joinville
22a aval	1.087	0.6	0.7	0.9	0.213	1.0	2	2.5	2.5	
22b	1.06	0.6	0.06	0.1	0	0	1.12	0.7	0.7	Beudinard
22b aval	1.06	0.6	0.66	0.9	0.6	2.69	2.32	4.2	4.2	
27	2.016	1.19	1.05	1.2	3.56	11.8	6.61	6.626		
27a	2.016	1.19	0.124	0.1	0	0	2.14	1.3	1.3	Liguière
27a aval	2.016	1.19	0.624	0.7	0.5	1.66	3.14	3.6	3.6	
30	2.29	1.40	1.59	2.1	0.35	1.16	4.23	4.7	4.7	Légion

B V	Karst		Mixte		Urbain		Total		Q 100 retenu	Valat
	S	Q	S	Q	S	Q	S	Q		
<b>33</b>	2.46	2.9	3.6	19.1	6.85	17.5	12.9	35.7		
<b>33a</b>	0.58	0.7	1.34	7.1	1.3	3.3	3.22	11.1	<b>11.1</b>	Aumone
<b>32</b>	8.19	14.7	0.02	0.1	0.71	3.1	8.92	17.9	<b>17.9</b>	Charrel

La même méthode est appliquée pour le calcul des débits de période de retour 50 et 10 ans.

Le débit exceptionnel est lui obtenu en multipliant le débit centennal par 2.

Les résultats sont fournis dans le tableau suivant :

**Tableau 39 : Débits caractéristiques retenus sur les petits affluents**

Valat	Q excep retenu (m3/s)	Q 100 retenu (m3/s)	Q50 retenu (m3/s)	Q10 retenu (m3/s)
Oule	13.0	6.5	5.4	2.7
Mordeau	32.8	16.4	12.8	8.0
Routabou	4.4	2.2	1.8	1.0
Escombes	16.3	8.1	7.0	4.1
Amandier	22.2	11.1	9.2	4.6
Rascous	11.5	5.7	4.8	2.4
Basseron	7.2	3.6	2.9	1.8
	1.0	0.5	0.5	0.3
	3.4	1.7	1.4	0.8
Fenouilloux	36.0	18.0	14.9	8.3
Barres	4.8	2.4	2.0	0.9
Pré Gaillard	9.0	4.5	3.8	1.9
Tonneau	11.2	5.6	4.6	2.4
Playes	37.2	18.6	15.0	8.8
Grand pré	4.8	2.4	1.9	1.2
Destrousse	12.8	6.4	5.1	3.2
Joinville	2.6	1.3	1.1	0.5
	5.0	2.5	2.1	1.1
beaudinard	1.4	0.7	0.6	0.3
	8.4	4.2	3.3	2.2
Liguière	2.6	1.3	1.1	0.5
	7.2	3.6	2.9	1.7
Légion	9.4	4.7	4.0	2.0
Aumone	22.2	11.1	9.0	4.1
Charrel	35.8	17.9	14.4	8.0