



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

Etude de connaissance de l'aléa
inondation sur le bassin versant des
Aygaldes

Rapport de Phase 2

37502 | Juin 2017 | v2





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

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

Directeur d'affaire :

Responsable d'affaire : BLN

N°affaire : 016 37502

Fichier : 37502_RAP_Phase2_v2.doc

Version	Date	Etabli par	Vérifié par	Nb pages	Observations / Visa
1	10/05/2016	BLN	DUC	40	Création
2	12/06/2017	BLN	DUC	40	Finalisation du modèle après calage

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION.....	5
1.1	Contexte.....	5
1.2	Démarche générale	5
2	RECUEIL ET EXPLOITATION DES DONNEES DISPONIBLES.....	7
2.1	Débit.....	7
2.1.1	Station Saint-Antoine	7
2.1.2	Station Aygalades	9
2.2	Pluviométrie	13
2.2.1	Présentation des données disponibles	13
2.3	Utilisation des mesures	15
3	DETERMINATION DES PLUIES DE PROJET	16
3.1	Discussion sur l'homogénéité spatiale des pluies extrêmes.....	16
3.2	Introduction de la notion d'abattement spatial.....	16
3.3	Hyétogrammes des pluies de projet.....	18
4	CONSTRUCTION DU MODELE HYDROLOGIQUE.....	21
4.1	Présentation du bassin versant	21
4.2	Caractérisation des sous-bassins versants.....	22
4.3	Modèle pluie-débit	24
4.3.1	Modélisation de 2012	24
4.3.2	Mise à jour du modèle.....	24

ANNEXES

ANNEXE 1 : COURBES DE TARAGE DES STATIONS AYGALADES ET SAINT-ANTOINE	28
ANNEXE 2 : COEFFICIENTS DE MONTANA DU POSTE DE MARIGNANE	33
ANNEXE 3 : TRAVAUX DE RECHERCHE CONCERNANT L'ABATTEMENT SPATIAL DES PLUIES	36

FIGURES

Figure 1 : Synoptique de fonctionnement des bassins de Chaillan.....	8
Figure 2 : Hydrogrammes de crues à la station Aygalades/Gèze	10
Figure 3 : Ajustement de Gumbel à la station Aygalades/Gèze	11
Figure 4 : Stations de mesures DEA-MPM	14
Figure 5 : Hyétogrammes des pluies de projet	20
Figure 6 : Relief du bassin versant des Aygalades.....	21
Figure 7 : Découpage en sous bassin-versant	23
Figure 8 : Coefficients de ruissellement calés de bassins versants	26
Figure 9 : Temps de réponse calés des bassins versants.....	27

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Le présent rapport présente la modélisation hydrologique pour l'étude de connaissance de l'aléa inondation du bassin versant des Aygalades.

Cette étude s'inscrit dans la continuité de l'analyse déjà menée sur l'aval du bassin versant dans le cadre de l'étude EPAEM/Hydratec réalisée en 2012-2013, au cours de laquelle une grande attention a déjà été portée à la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant, via une modélisation pluie-débit basée sur des hypothèses partagées.

Il s'agit donc ici d'exploiter le modèle hydrologique développé dans le cadre de cette précédente étude afin de :

- L'adapter aux besoins de la présente étude (définition des sous-bassins versants correspondant aux points d'injections dans le modèle hydraulique à bâtir),
- Définir les débits caractéristiques correspondant aux différentes occurrences de crue à modéliser (Q10, Q100 et QExcep).

Ce document présente donc les principaux éléments de l'étude hydrologique de l'étude EPAEM/Hydratec et les adaptations mises en œuvre nécessaires à la modélisation hydraulique de l'ensemble du bassin versant.

On rappelle également que préalablement à la réalisation de cette étude, les différents acteurs du projet EUROMED se sont concertés et ont décidé pour l'étude EPAEM/Hydratec en 2012 que :

- La pluviométrie des crues de calage serait déduite des informations disponibles auprès des postes du réseau DEA-MPM.
- Les statistiques de pluie seraient déduites des ajustements obtenus sur le poste Météo France de Marignane (les chroniques des pluies des postes DEA-MPM sont trop récentes pour réaliser un ajustement statistique fiable pour les périodes de retour des crues rares).

Ces principes sont repris pour la présente étude hydrologique.

1.2 DEMARCHE GENERALE

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

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

Le modèle hydrologique permet de définir les hydrogrammes injectés dans les modèles hydrauliques qui en assurent le routage vers l'aval. Il tient compte des caractéristiques physiques des sous-bassins versants, et notamment de l'imperméabilisation liée à

l'urbanisation qui tend à augmenter le ruissellement et les volumes écoulés vers les cours d'eau.

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

Pour cette étude, le calage du modèle hydrologique sera réalisé conjointement au calage du modèle hydraulique. Les simulations de propagation du débit du modèle hydrologique présentées dans ce rapport sont présentées à titre indicatif et ne constituent pas la version définitive des apports hydrologiques qui seront utilisés pour les simulations hydrauliques.

2 RECUEIL ET EXPLOITATION DES DONNÉES DISPONIBLES

2.1 DEBIT

La DEA/MPM dispose de 3 points de mesures de débit sur le bassin versant des Aygalades, à savoir :

- Saint-Antoine, sur la partie amont du ruisseau des Aygalades,
- Aygalades, sur la partie aval du ruisseau des Aygalades en aval du boulevard du Capitaine Gèze,
- Lesseps, sur la partie aval du ruisseau de Plombières.

Ces stations sont localisées sur la carte donnée en fin de chapitre.

Les mesures réalisées sur le cours d'eau de Plombières sont réputées non fiables et ne sont pas exploitables. En effet, cette station est sous l'influence des écoulements des Aygalades à l'aval.

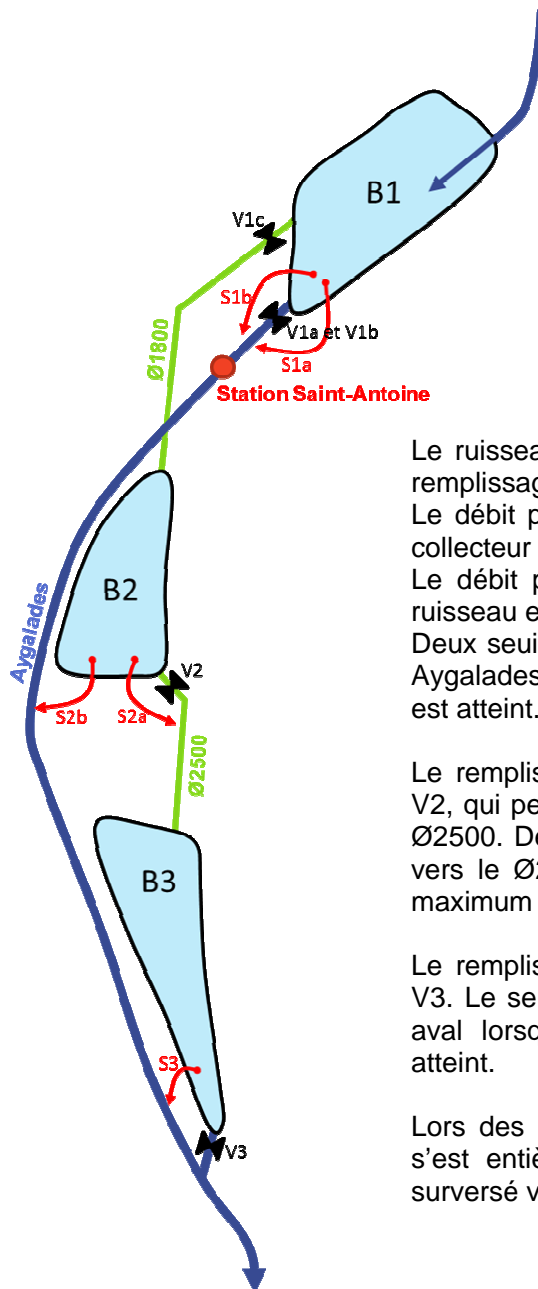
Les mesures de débits réalisées à Saint-Antoine et Aygalades n'ont, jusqu'à présent, pas fait l'objet d'une analyse critique. Les données recueillies à ces points sont présentées ci-après.

2.1.1 Station Saint-Antoine

Le capteur de Saint-Antoine a été mis en service en 1989 il est situé dans le cours du ruisseau des Aygalades en aval du bassin Chaillan n°1 (le ruisseau passe dans le fond de ce bassin). En crue, cette station ne contrôle donc qu'une partie du débit. L'autre partie transite dans les bassins de rétention n°2 et n°3. Ces bassins ont été construits en 1996.

La courbe de tarage ainsi que les jaugeages effectués à cette station sont présentés en annexe 1.

Le schéma suivant précise le fonctionnement des bassins de Chaillan :



Le ruisseau des Aygaldades entre dans le bassin B1. Le remplissage est contrôlé par les vannes V1a, V1b et V1c. Le débit par la vanne V1c alimente le bassin B2 via un collecteur Ø1800.

Le débit par les vannes V1a et V1b est dirigé vers le ruisseau en aval.

Deux seuils S1a et S1b permettent de surverser vers les Aygaldades lorsque le niveau maximum de remplissage est atteint.

Le remplissage du bassin B2 est contrôlé par la vanne V2, qui permet d'alimenter le bassin B3 par un collecteur Ø2500. Deux seuils S2a et S2b permettent de surverser vers le Ø2500 et les Aygaldades aval lorsque le niveau maximum de remplissage est atteint.

Le remplissage du bassin B3 est contrôlé par la vanne V3. Le seuil S3 permet de surverser vers les Aygaldades aval lorsque le niveau maximum de remplissage est atteint.

Lors des événements de décembre 2003, le bassin B1 s'est entièrement rempli et les bassins B2 et B3 ont surversé vers les Aygaldades.

Figure 1 : Synoptique de fonctionnement des bassins de Chaillan

Des capteurs de niveaux sont présents sur ces bassins. Les hauteurs dans ces bassins sont disponibles depuis juin/juillet 2004 pour les bassins 1 et 2 et depuis octobre 2006 pour le bassin 3.

Le modèle hydrologique comprend la modélisation des ces ouvrages. D'après la Seramm les ouvrages restent en position fixe. Ces ouvrages feront l'objet de levés topographiques et sont pour l'instant intégrés au modèle hydrologique d'après les relevés de terrain d'Hydratec.

Les débits enregistrés à cette station sont notablement influencés (by-pass vers les bassins de rétentions, la restitution des eaux de ces bassins se fait en aval de cette station). C'est pourquoi les ajustements statistiques à cette station de Saint-Antoine ne sont pas présentés.

2.1.2 Station Ayalades

La station est située sur les Ayalades en aval du boulevard du Capitaine Gèze, le bassin versant contrôlé par cette station est de 38.7 km², elle est équipée de deux capteurs de hauteur d'eau Li1 et Li2.

D'après l'exploitant (Seramm), c'est le capteur Li2 qui est le plus fiable pour estimer les débits de crue. Seules les données à ce capteur seront donc utilisées.

La chronique des débits instantanés est disponible depuis 1998.

La chronique des hauteurs d'eau est disponible de 1990 à 1998.

La courbe de tarage ainsi que les jaugeages effectués à cette station sont présentés en annexe 1.

On peut observer qu'un seul jaugeage a été effectué pour des débits importants (35 m³/s). Celui-ci est cohérent avec la courbe de tarage utilisée ; ce qui tend à penser que les débits publiés à cette station sont fiables, au moins jusqu'à cette valeur de 35 m³/s.

a) Crues historiques

Sur la période de 1990 à 1998, le capteur Li2 présente assez fréquemment des mesures peu cohérentes avec des maximums qui paraissent peu crédibles.

Par conséquent, la chronique des débits à ce point de 1998 à 2012 ne peut donc pas être prolongée sur la période 1990 à 1997 avec les mesures de hauteurs.

A partir de 1998, les relevés à la station de mesure de débit de Gèze sur les Ayalades présentent moins d'incohérences (valeurs aberrantes, hydrogramme d'allure suspecte).

Les hydrogrammes des 4 crues les plus importantes mesurées sont représentés ci-dessous :

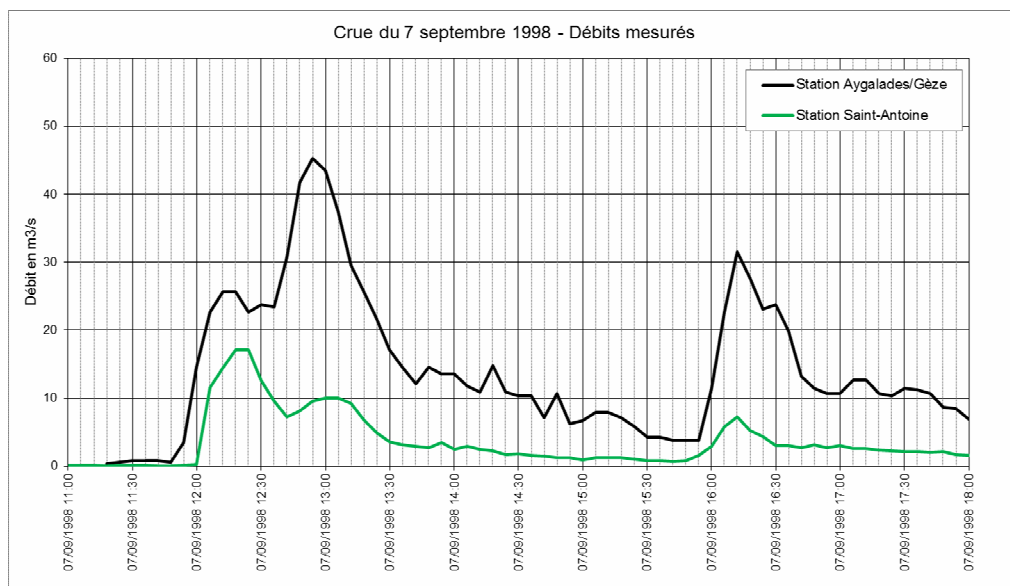
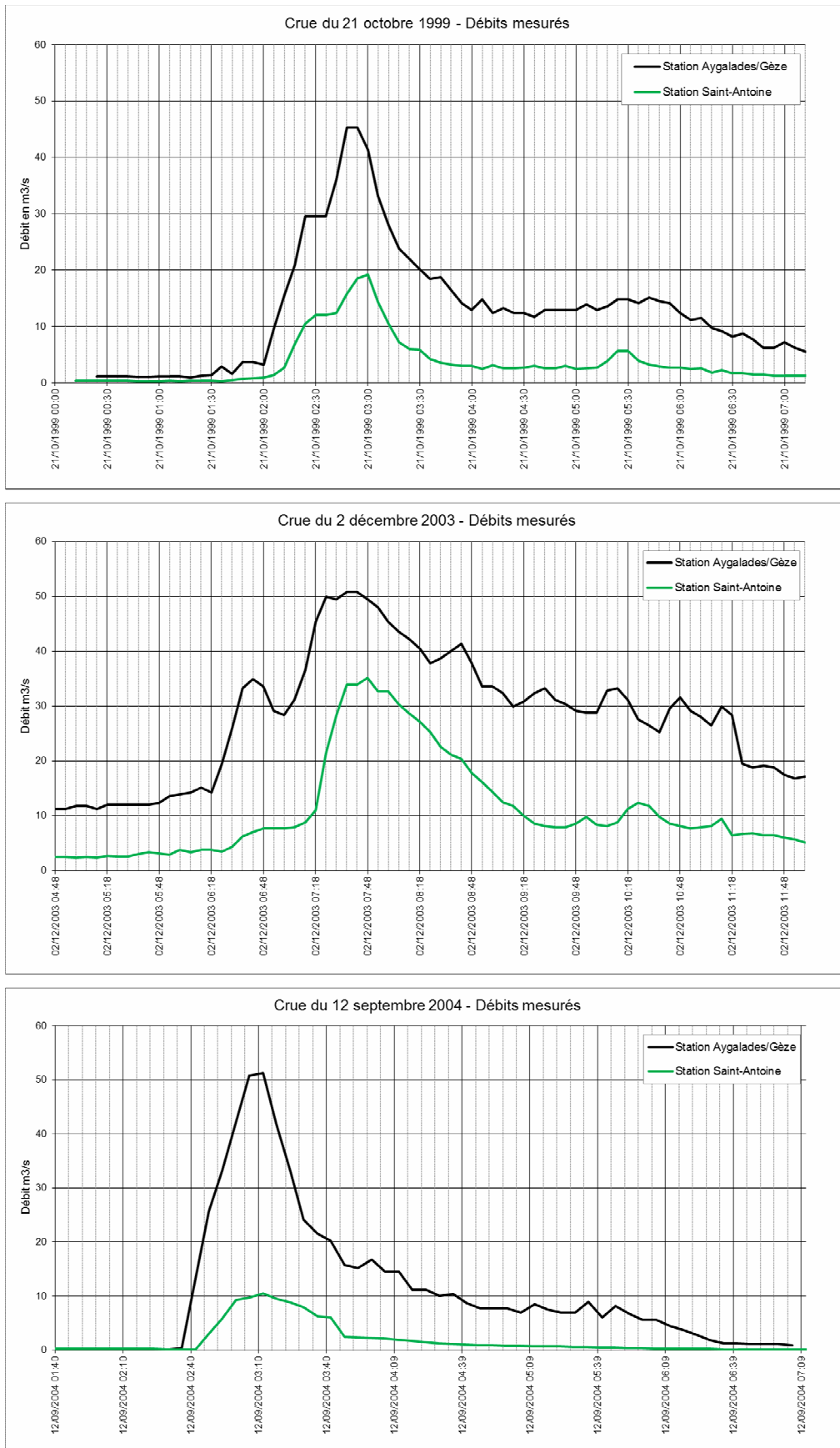


Figure 2 : Hydrogrammes de crues à la station Aygalades/Gèze



Les valeurs caractéristiques de ces crues sont données dans le tableau ci-dessous :

	Débit max m ³ /s	Débit moyen m ³ /s	Durée caractéristique heures	Coefficient de pointe
07-sept-98	45.3	30.6	1.3	1.5
21-oct-99	45.3	32.6	1.1	1.4
02-déc-03	50.8	35.2	4.8	1.4
12-sept-04	51.3	39.6	0.7	1.3

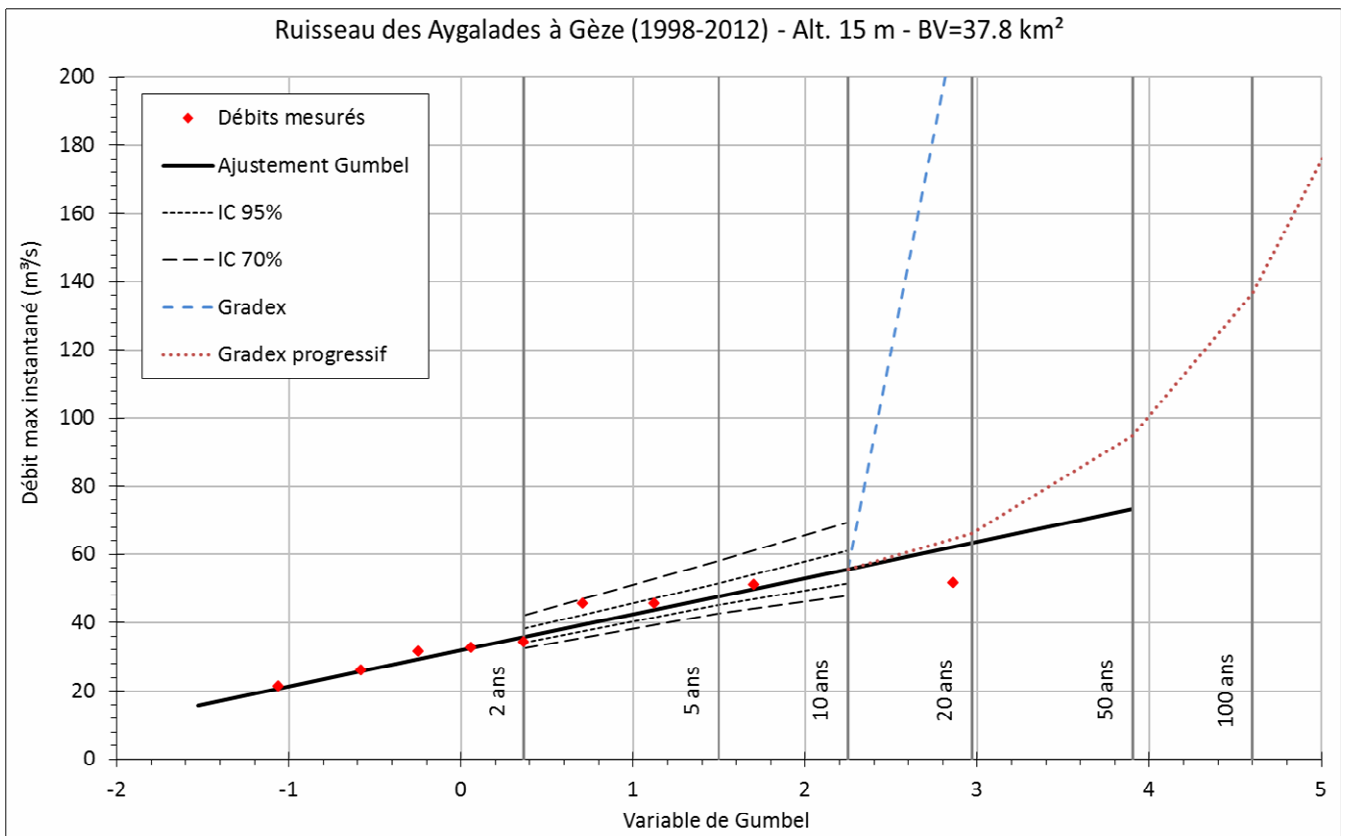
b) Estimation du débit décennal

On réalise un ajustement statistique à partir de la chronique des débits à partir de 1998.

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

Le débit décennal calculé est 56 m³/s.

Figure 3 : Ajustement de Gumbel à la station Aygalades/Gèze



c) Estimation du débit centennal

Méthode du gradex

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

La méthode du gradex est utilisée pour l'estimation des crues de fréquence rare. Elle se base sur l'hypothèse qu'à partir d'un certain seuil de précipitation (point pivot), les sols arrivent à saturation et la totalité de la pluie supplémentaire ruisselle et participe à la

formation de la crue. Sur un graphique de Gumbel, la loi d'ajustement de débits suit donc celle des pluies.

L'estimation du débit de pointe s'écrit :

$$Q_i(T) = Q_i(T_0) + K_p * gr(D) * (u(T) - u(T_0))$$

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

- T_0 : durée de retour pour le point pivot
- $Gr(D)$: gradex des débits sur la durée caractéristique D et $grP(D)$: gradex des pluies avec :

$$gr(D) = \frac{S * grP(D)}{3.6 * D}$$

- K_p coefficient de pointe de l'hydrogramme ($K_p = Q_{max}/Q_{moy}$)

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

- Point pivot à $T=10$ ans ; en l'absence de données de calage concernant la saturation des sols, c'est la valeur couramment admise pour les bassins versants de taille réduite.
- Durée caractéristique de crue D estimé sur la forme des hydrogrammes historiques mesurés : 1 heure
- Coefficient de pointe K_p estimé sur la forme des hydrogrammes historiques mesurés : 1.40

Estimation du gradex des pluies

Le gradex des pluies sur la durée caractéristique des crues retenues à la station Aygalades est défini à partir des pluies décennales et centennale issues des courbes de Montana de la station de Marignane (voir paragraphe 2.2).

La valeur retenue est la suivante : gradex des pluies = 17.0

Gradex Progressif

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

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

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

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

avec :

- $VCXD(T)$: débit moyen calculé sur une durée caractéristique de crue D ou volume écoulé sur la durée D de période de retour T (m³/s)
- Gr : gradex des débits moyens (m³/s)
- GPD : gradex des débits moyens ($VCXD$) pour les périodes de retour inférieures à T_{pivot} (m³/s)

- u_T : variable réduite de Gumbel pour la période de retour T
- T_{pivot} : temps de retour du point pivot (ans), pris ici égal à 10 ans

Débit centennial calculé

Le débit centennial calculé par la méthode du gradex progressif est de $137 \text{ m}^3/\text{s}$.

D'après ces ajustements la période de retour de la crue de 2003 est estimée à $T_{2003} = 10$ ans.

2.2 PLUVIOMETRIE

2.2.1 Présentation des données disponibles

Le secteur d'étude est couvert par un réseau de pluviographes de la DEA MPM permettant la restitution de fichiers de mesures pluviométriques au pas de temps 6 min exploité par le Seramm. Il a été mis en service à la fin des années 80 – début des années 90. Ce réseau de pluviographes a déjà fait l'objet d'une analyse critique lors de précédentes études et il est réputé fiable sur le bassin versant objet de l'étude.

La carte présentée ci-après permet de localiser ces stations pluviométriques.

Météo France ne dispose pas de stations pluviométriques à pas de temps fin sur le bassin versant des Aygalades. Cependant, à proximité, il existe 3 postes Météo France qui disposent de données à pas de temps inférieur à 24 heures sur une longue chronique, à savoir :

- Marseille observatoire (depuis 1963),
- Marignane (depuis 1960),
- Cassis (depuis 1994).

Préalablement à la réalisation de cette étude, les différents acteurs du projet EUROMED se sont concertés et ont décidé pour l'étude EPAEM/Hydratec en 2012 que :

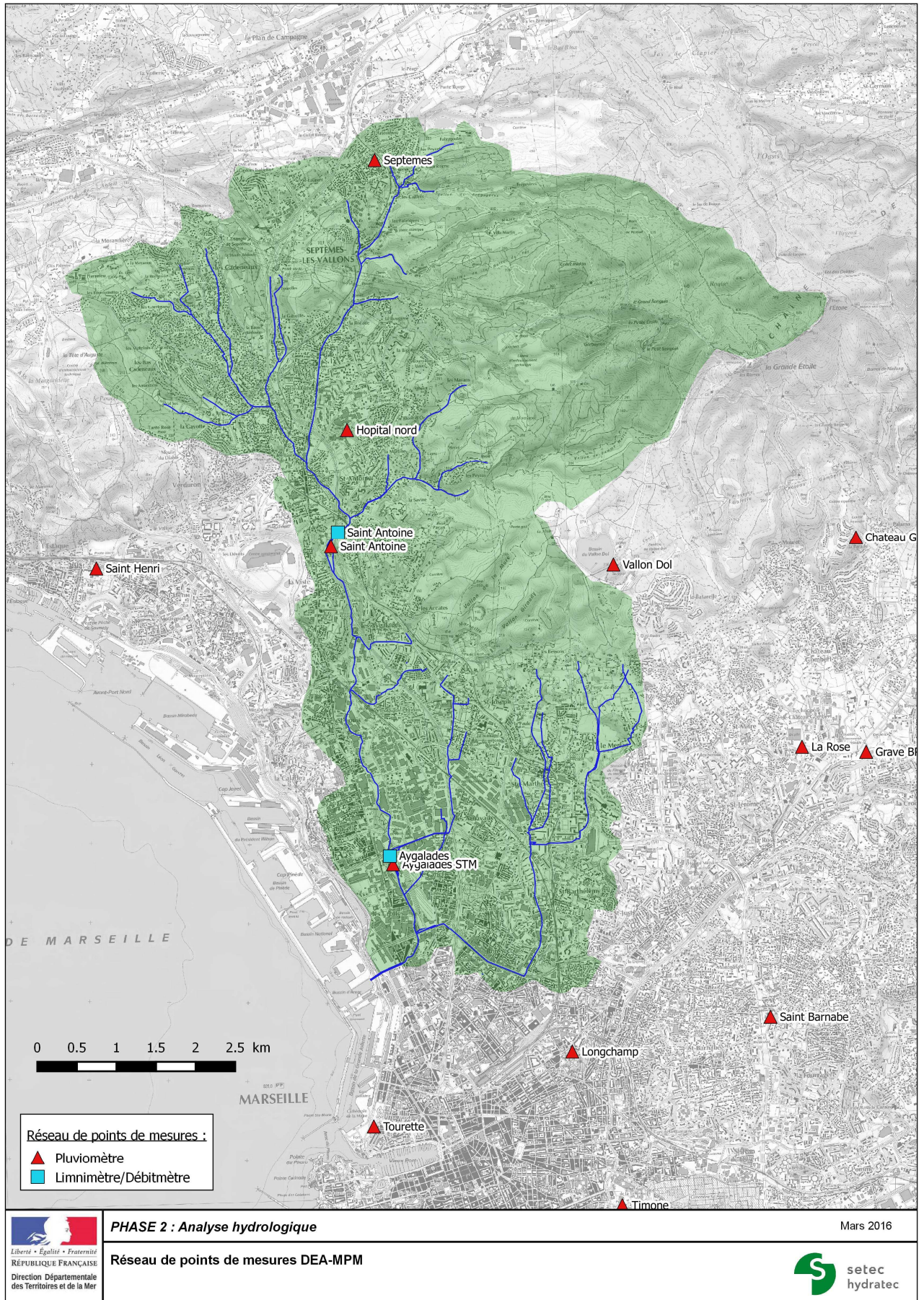
- La pluviométrie des crues de calage serait déduite des informations disponibles auprès des postes du réseau Seramm.
- Les statistiques de pluie seraient déduites des ajustements obtenus sur le poste Météo France de Marignane (les chroniques des pluies des postes du Seramm sont trop récentes pour réaliser un ajustement statistique fiable pour les périodes de retour des crues rares).

Ces principes sont repris pour la présente étude hydrologique.

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

Les données au poste de Marignane sont comparées aux ajustements statistiques obtenus sur quelques postes du réseau DEA-MPM. Ces ajustements ont été réalisés par la DDTM (données fournies par Mr. Chaptal). Il est ici rappelé que les statistiques sur les postes du réseau DEA-MPM sont à prendre avec précaution, notamment pour les périodes de retour rares, vu qu'ils ne sont en service que depuis 20 ans environ.

Figure 4 : Stations de mesures DEA-MPM



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

Nota : Les statistiques pour 100 ans sur les postes DEA-MPM sont uniquement données à titre informatif. Les incertitudes sur ces données sont grandes compte tenu de la faible longueur de l'échantillon de données. Le plus souvent l'intervalle de confiance à 95 %, pour la période de retour 100 ans, est compris dans un rapport de 1 à plus de 2.*

Durée en minutes	Hauteur de pluie (mm) pour une période de retour 10 et 100 ans et intervalle de confiance à 95 % pour les postes DEA-MPM							
	Marignane Météo France		Hôpital Nord		Saint-Antoine		Aygaldes	
	10 ans	100 ans	10 ans	100 ans*	10 ans	100 ans*	10 ans	100 ans*
10	15.5	22	-	-	-	-	-	-
20	25	41.5	-	-	-	-	-	-
30	34.5	61	41 [33-58]	63 [49-95]	44 [35-69]	70 [53-116]	39 [31-57]	59 [46-93]
60	43	83	51 [41-74]	80 [62-123]	60 [46-106]	94 [69-180]	49 [39-72]	75 [58-120]
90	49	96	57 [50-67]	88 [68-135]	60 [46-94]	96 [72-160]	54 [43-80]	83 [64-132]
120	54	105	58 [47-84]	90 [70-137]	71 [53-124]	111 [81-211]	58 [46-86]	90 [70-137]

Pour la période de retour 10 ans, les grandeurs obtenues sur le poste de Marignane correspondent à la fourchette basse des statistiques obtenues sur les postes DEA-MPM localisés sur le bassin versant des Aygalades.

Pour la période de retour 100 ans, bien que les incertitudes sur les postes DEA-MPM soient grandes, les grandeurs obtenues sont comparables à celles obtenues sur le poste de Marignane.

2.3 UTILISATION DES MESURES

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

3 DÉTERMINATION DES PLUIES DE PROJET

3.1 DISCUSSION SUR L'HOMOGENEITE SPATIALE DES PLUIES EXTREMES

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

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

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

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

3.2 INTRODUCTION DE LA NOTION D'ABATTEMENT SPATIAL

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

Or, pour des « petits » bassins versants de la taille de celui des Aygalades, le temps de réaction aux précipitations est court (inférieur à 2 h), ce qui oblige à étudier les précipitations sur des pas de temps courts.

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

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

Le coefficient probabiliste d'abattement spatial est défini ainsi :

$$\alpha(S, T, \Delta t) = \frac{\text{Lame}_\text{précipitée}_\text{moyenne}}{\text{Lame}_\text{précipitée}_\text{ponctuelle}}$$

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

Hydratec a effectué une recherche bibliographique sur les travaux de recherche s'étant intéressés à cette notion d'abattement spatial dans le contexte méditerranéen ; ces travaux sont cités en annexe 3.

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

Synthèse des résultats de cette étude

(voir rapport de synthèse complet en annexe 3)

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

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

Les données pluviométriques étudiées concernent la période 1991-1999.

Démarche et résultats de l'étude

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

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

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

Cette relation est (pour $S > 30 \text{ km}^2$) :

$$\alpha = 5^{(-0.064 + 0.014 \ln(\Delta t))}$$

Unités : Δt en heures et S en km^2

Le rapport conclut en comparant ce résultat à l'analyse des images radar de 2 événements (26/08/1996 et 7/09/1998). Elle conclut que « *pour les petits pas de temps – typiquement quelques dizaines de minutes – la valeur du coefficient d'abattement semble être essentiellement déterminée par le déplacement des cellules orageuses intenses* ».

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

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

Cette relation est (pour $S > 30 \text{ km}^2$) :

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

Soit un coefficient d'abattement de **0.80** pour $S= 50 \text{ km}^2$ et $\Delta t = 1.5\text{h} = 90 \text{ minutes}$;

Ou encore un coefficient d'abattement de 0.77 pour $S= 50 \text{ km}^2$ et $\Delta t = 0.75\text{h} = 45 \text{ minutes}$.

On retiendra pour l'exemple développé ci-après la valeur de 0.80 pour une pluie de durée intense 90 minutes.

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

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

3.3 HYETOGRAMMES DES PLUIES DE PROJET

Les pluies de projet de type double triangle ont été retenues car générant les débits les plus importants sur le bassin versant.

La durée totale est égale à 3 fois la durée intense, correspondant à la durée de la pluie simple triangle provoquant les maximums de débit. La période de retour pour la durée totale est deux fois plus faible que la période de retour pour la durée intense.

Des tests de sensibilité sur la durée de la pluie ont été conduits lors de l'étude Hydratec de 2012 et complétés lors de la présente étude pour déterminer l'évènement qui maximise les débits de crue.

Les tests de sensibilité menés ont permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- Sur le bassin versant des Lions, c'est pour une durée de pluie de 40 minutes que le débit le plus important est calculé. Il existe cependant peu de variation du débit maximum pour des durées de pluies comprises entre 35 et 50 minutes.
- Pour le bassin versant de Plombières, c'est pour la durée 45 min, que le débit maximum est calculé. Il existe cependant peu de variation du débit maximum pour des durées de pluies comprises entre 35 et 60 min.
- Sur la partie amont du bassin versant des Aygalades c'est pour la durée 30 minutes que le débit maximum est atteint sur la Gavotte en amont de la Bédoule et pour une durée de 60 minutes que le débit maximum est atteint en amont immédiat des bassins de Chaillan.
- Pour les Aygalades à Gèze, c'est pour la durée 90, que le débit maximum est calculé. Il existe cependant peu de variation du débit maximum pour des durées de pluies comprises entre 70 et 120 minutes.
- Pour les Aygalades en aval de la confluence avec Plombières, c'est également pour une durée de pluie de 90 minutes que le débit le plus important est calculé. Il existe cependant peu de variation du débit maximum pour des durées de pluies comprises entre 70 et 120 minutes.

Nous proposons donc de définir, pour chaque période de retour étudiée, 3 scénarios de pluies double triangle de différentes durées totale et intense :

- 270 minutes, durée intense 90 minutes,
- 135 minutes, durée intense 45 minutes,

- 90 minutes, durée intense 30 minutes.

L'aléa inondation pour une période de retour donnée correspondra alors à l'enveloppe maximale des hauteurs d'eau calculées pour ces différents scénarios de pluies, avec à priori des hauteurs d'eau maximales obtenues pour les pluies de courtes durée sur les petits bassins versants et pour les pluies de plus longue durée sur les grands bassins versants. Cette méthodologie présente l'intérêt de conserver les hypothèses retenues dans le cadre des études EPAEM pour la caractérisation de l'aléa du cours d'eau en aval du ruisseau des Aygalades, tout en l'étendant à l'échelle du bassin versant.

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

Les caractéristiques des pluies de type double triangle homogènes **après application de l'abattement spatial de facteur 0.8** sont récapitulées ci-après.

		Période de retour (ans)					
		10			100		
<i>Durée totale</i>	<i>Durée intense</i>	<i>Lame d'eau totale</i>	<i>Lame d'eau intense</i>	<i>Intensité maximale</i>	<i>Lame d'eau totale</i>	<i>Lame d'eau intense</i>	<i>Intensité maximale</i>
<i>min</i>	<i>min</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm/h</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm/h</i>
270	90	44	39	49	91	76	92
135	45	36	31	78	72	60	145
90	30	31	28	103	63	53	190

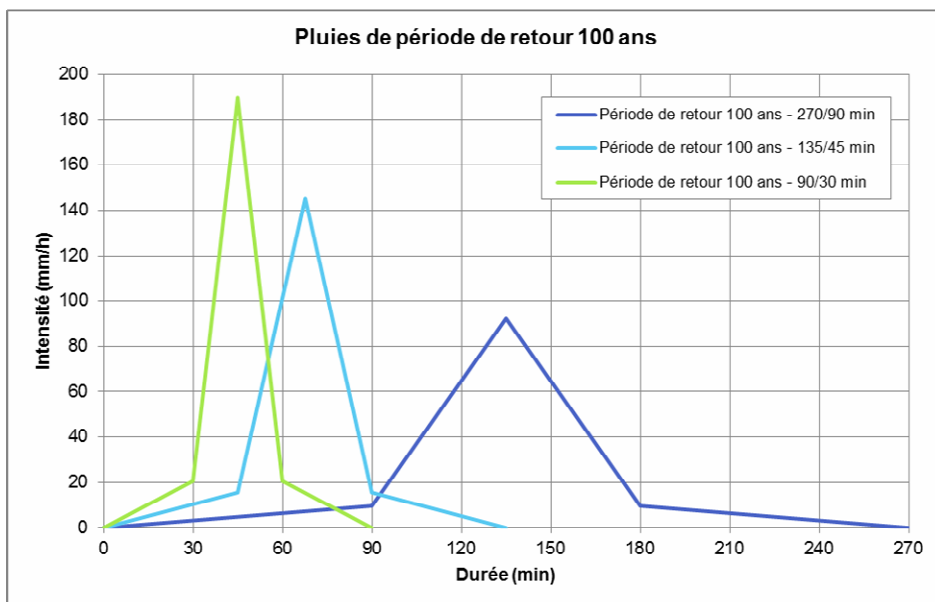
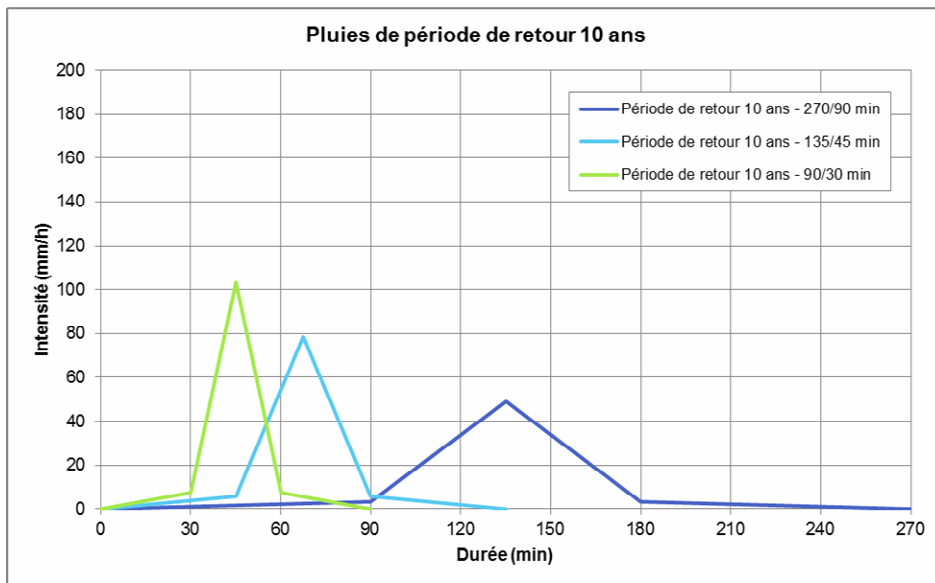


Figure 5 : Hyétoammes des pluies de projet

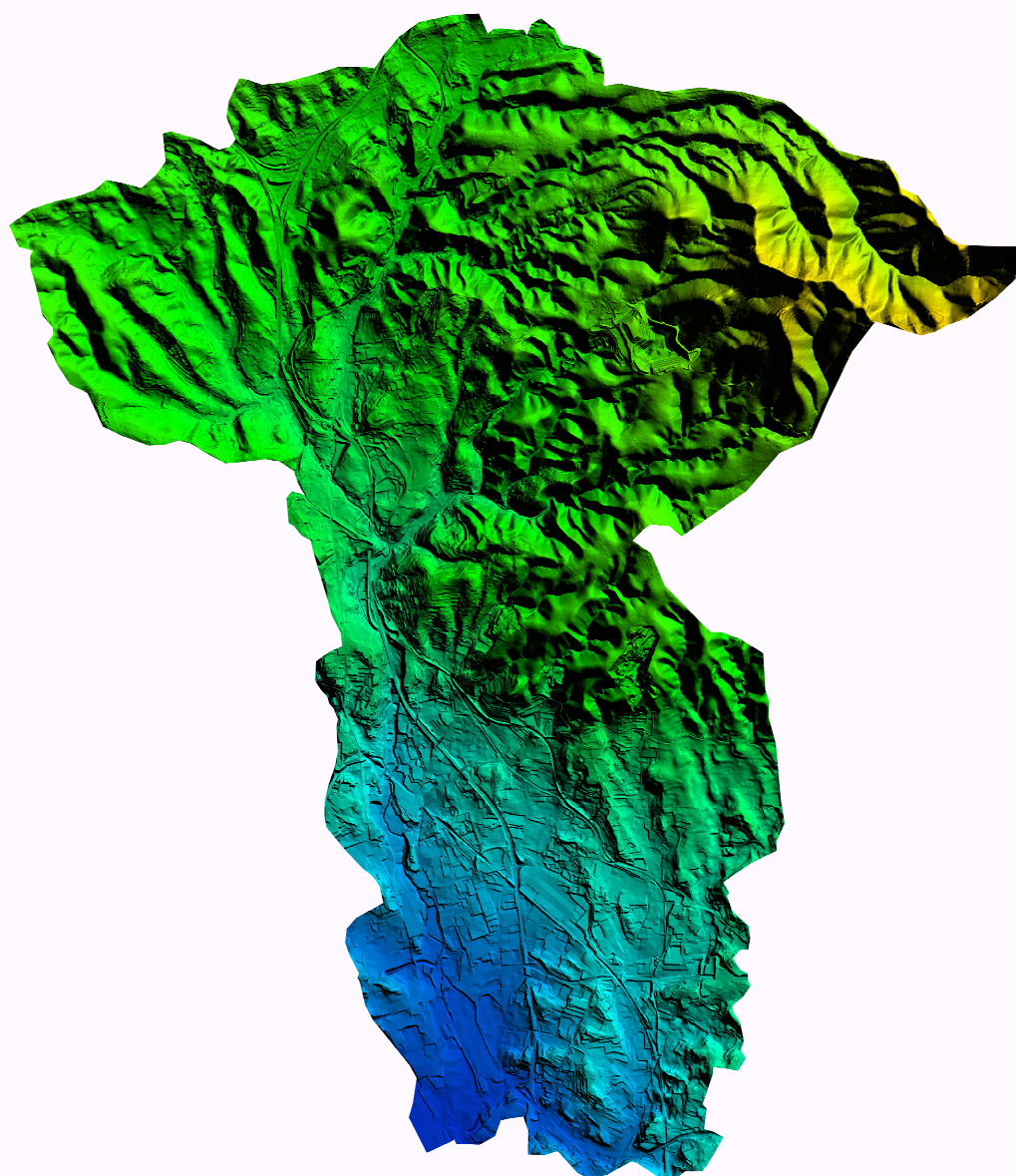
4 CONSTRUCTION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE

4.1 PRESENTATION DU BASSIN VERSANT

L'altitude du bassin versant des Aygalades varie entre 500 mNGF au nord-est du bassin versant à 0 mNGF environ à l'exutoire.

Il présente des secteurs de très forte pente à plus de 10 % au nord et des secteurs de pente quasi nulle en aval en milieu très urbanisé.

Figure 6 : Relief du bassin versant des Aygalades



0 0.5 1 1.5 2 2.5 km

4.2 CARACTERISATION DES SOUS-BASSINS VERSANTS

Le découpage en sous bassin versant repose sur celui réalisé par Hydratec en 2012. Il est affiné pour détailler la modélisation hydraulique. Le bassin versant est découpé en 107 sous-bassins versants.

Chaque sous bassin versant a été caractérisé par :

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

Le coefficient d'imperméabilisation a été déterminé en zonant les surfaces dont l'occupation du sol est de même type (urbanisation très dense, dense, peu dense...) à partir des orthophotoplans.

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

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

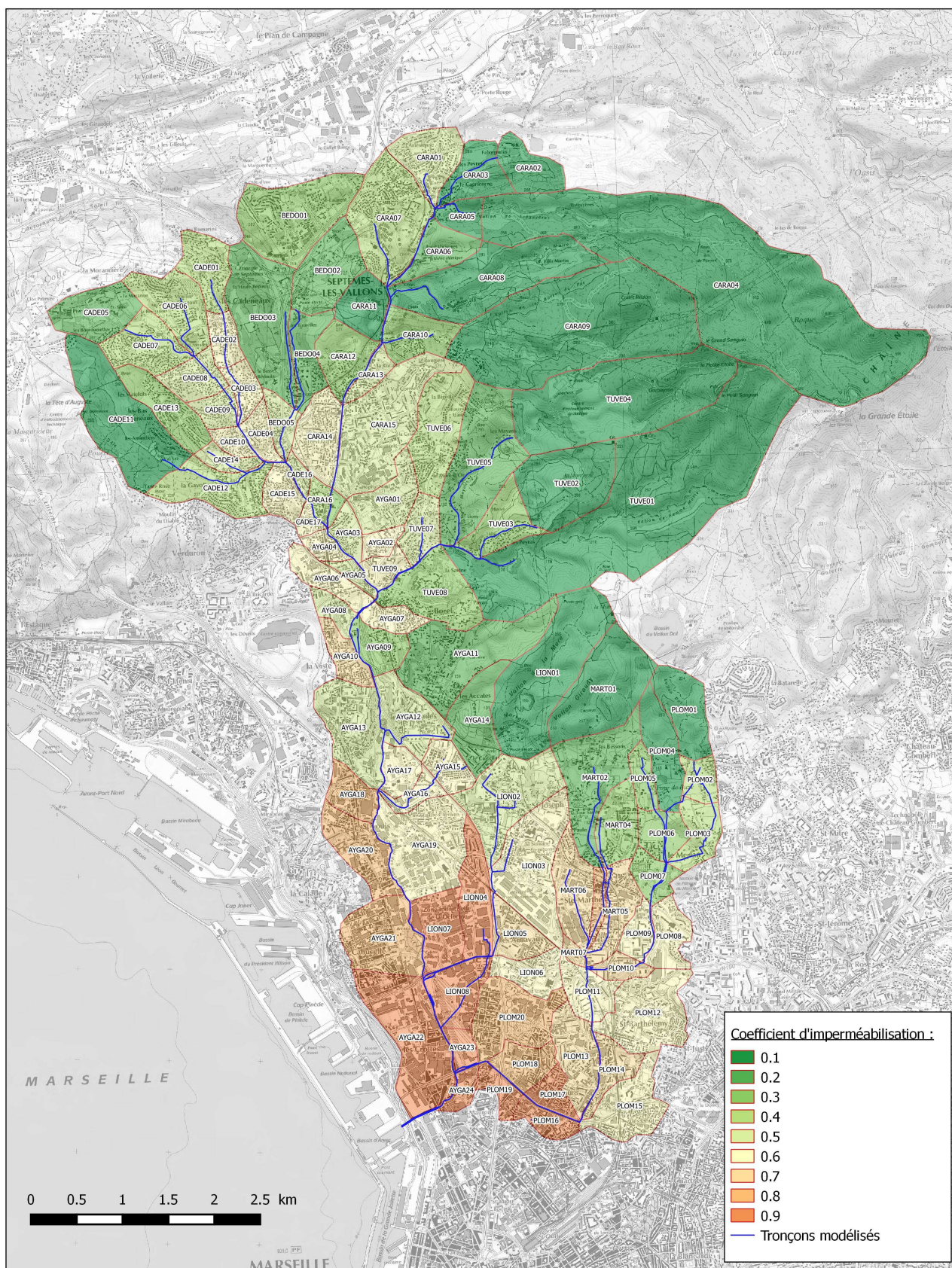
Occupation du sol	Coefficient d'imperméabilisation
Zone de bois ou forêt	0.05
Garrigue	0.20
Habitat diffus	0.20
Quartiers résidentiels (habitat individuel)	0.30
Quartiers résidentiels (habitat collectif) :	0.50
Habitat dense, zones industrielles et commerciales	0.65
Habitat très dense, centres-villes, parkings	0.80

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

Les surfaces de bassins versants sont réparties en km² par grandes unités de la façon suivante :

Aygalades aval	1.8
Aygalades Chaillan	6.4
Bédoule	2.8
Cadeneaux	5.1
Caravelle	5.1
Caravelle amont	8.2
Ruisseau des Lions	4.5
Plombières aval	3.4
Plombières amont	5.3
Vallons des Tuves	9.2
TOTAL	52 km²

Figure 7 : Découpage en sous bassin-versant



PHASE 2 : Analyse hydrologique

Mars 2016

Sous-bassins versants modélisés - Coefficient d'imperméabilisation



4.3 MODELE PLUIE-DEBIT

4.3.1 Modélisation de 2012

Les choix de modélisation effectués en 2012 étaient les suivants :

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

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

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

$$C_p(t) = \alpha * \exp(-\beta * P_a(t))$$

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

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

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

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

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

Avec, $Q_e(t)$: exprimé en m^3/s

C_{imp} : Coefficient d'imperméabilisation

$i(t)$: Intensité de la pluie en mm/h

S : Surface du bassin versant en ha

4.3.2 Mise à jour du modèle

Pour la présente modélisation, la loi de transformation pluie-débit est également de type réservoir linéaire avec un temps de réponse calculé suivant la formulation de Desbordes, qui correspond bien à un bassin versant relativement urbanisé.

Pour la transformation pluie brute / pluie nette, nous proposons de mettre en œuvre un modèle à coefficient de ruissellement constant.

Les fonctions de production de pluie nette utilisant la notion de coefficient de ruissellement supposent qu'à l'échelle de la surface réceptrice, la pluie nette ou le débit ruisselé peuvent

s'exprimer sous la forme d'une fraction C de la pluie brute. Les pertes liées au ruissellement sont donc continues et proportionnelles à la pluie brute.

Cette hypothèse reste néanmoins fortement simplificatrice, de nombreux travaux ayant démontré la complexité inhérente à la détermination de la valeur d'un coefficient de ruissellement, cette dernière étant fortement influencée par de nombreux facteurs extérieurs tels que l'état initial des sols. Par ailleurs, les coefficients de ruissellement ainsi déterminés peuvent produire des valeurs de débit surestimées pour des pluies simulées d'intensités moyennes à faibles [CERTU, 2003]. Ceci étant lié à l'absence de prise en compte des pertes initiales (lame d'eau ne contribuant pas au ruissellement), notamment expliquées par des phénomènes tels que l'interception par le couvert végétal, le stockage dans les dépressions du sol ou l'évapotranspiration.

Dans le cas de pluies plus intenses (supérieures à 40 mm en 2h, les pertes initiales deviennent négligeables devant les pertes continues par ruissellement, et peuvent donc ne pas être considérées.

Le choix de cette fonction de production pour la modélisation intéressée ici a donc été retenu en raison d'une part des taux d'imperméabilisation rencontrés, et d'autre part au vu des pluies de projet simulées, de périodes de retour et donc d'intensités importantes.

La lame d'eau ruisselant sur le bassin versant est égale à $Q_e(t) = \frac{S.Cr.i(t)}{360}$

Avec, $Q_e(t)$: exprimé en m^3/s

Cr : Coefficient de ruissellement,

$i(t)$: Intensité de la pluie en mm/h

S : Surface du bassin versant en ha

Les coefficients de ruissellement des bassins versants et les temps de réponse calés sont présentés sur la carte ci-après.

Figure 8 : Coefficients de ruissellement calés de bassins versants

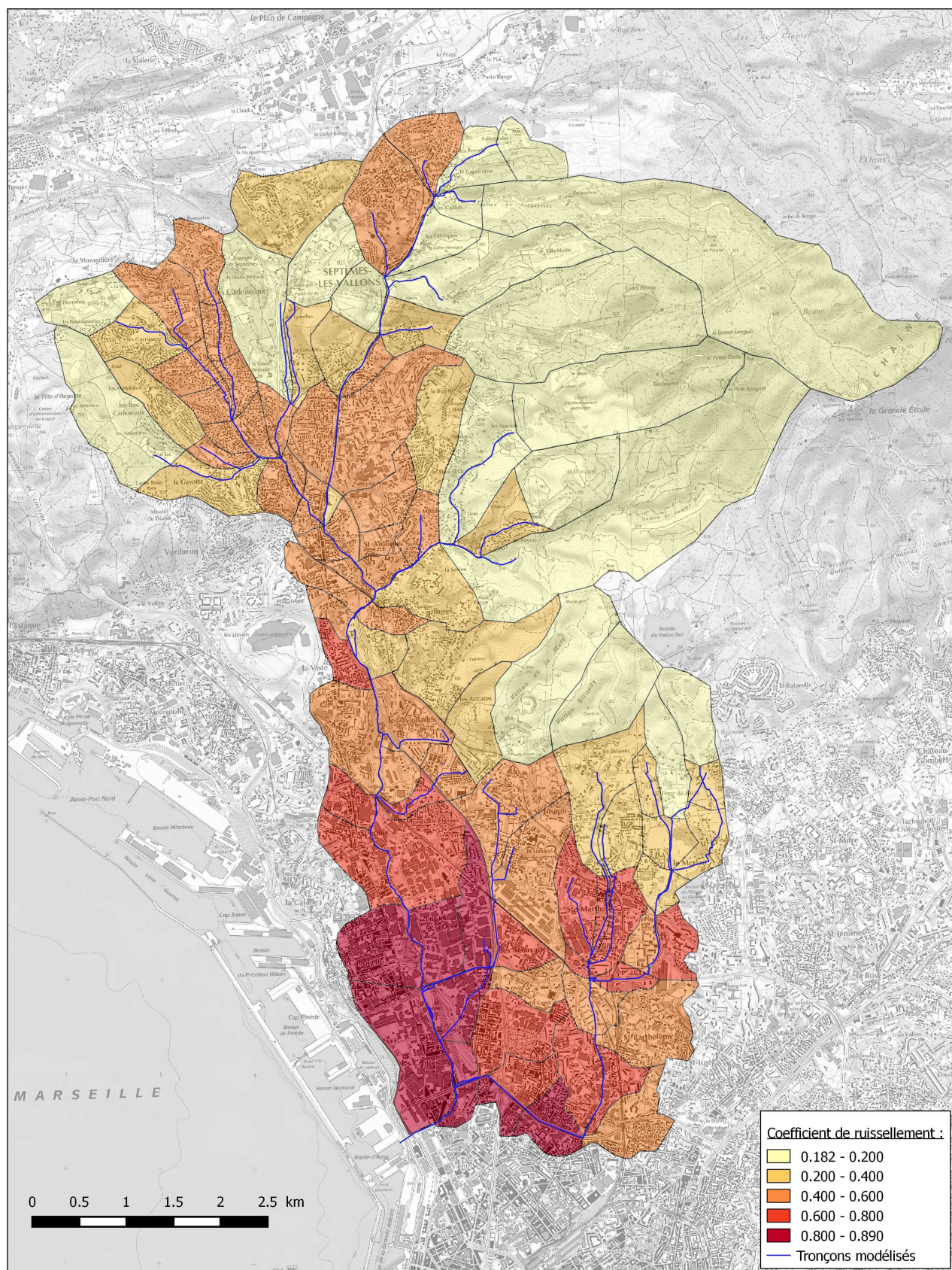
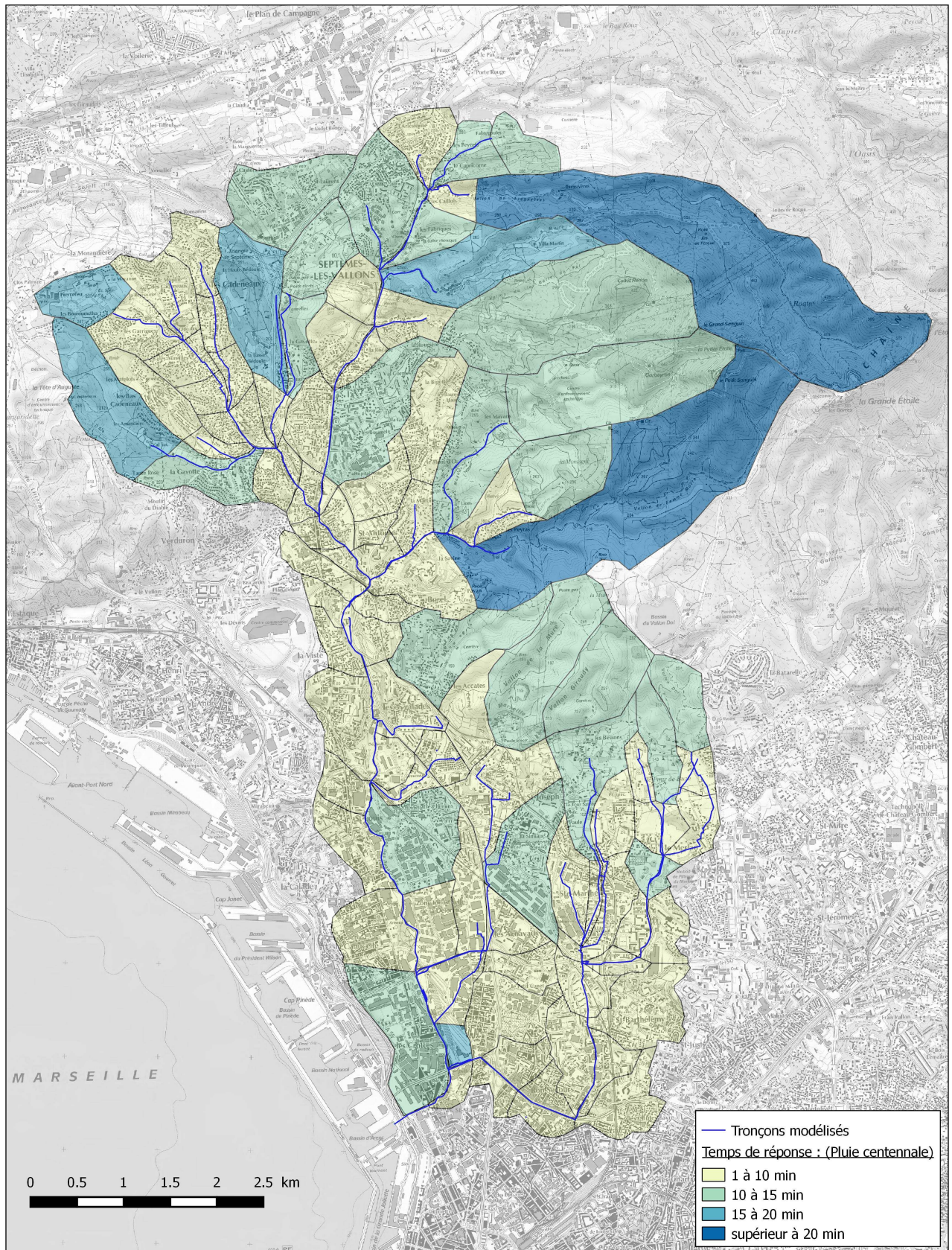


Figure 9 : Temps de réponse calés des bassins versants

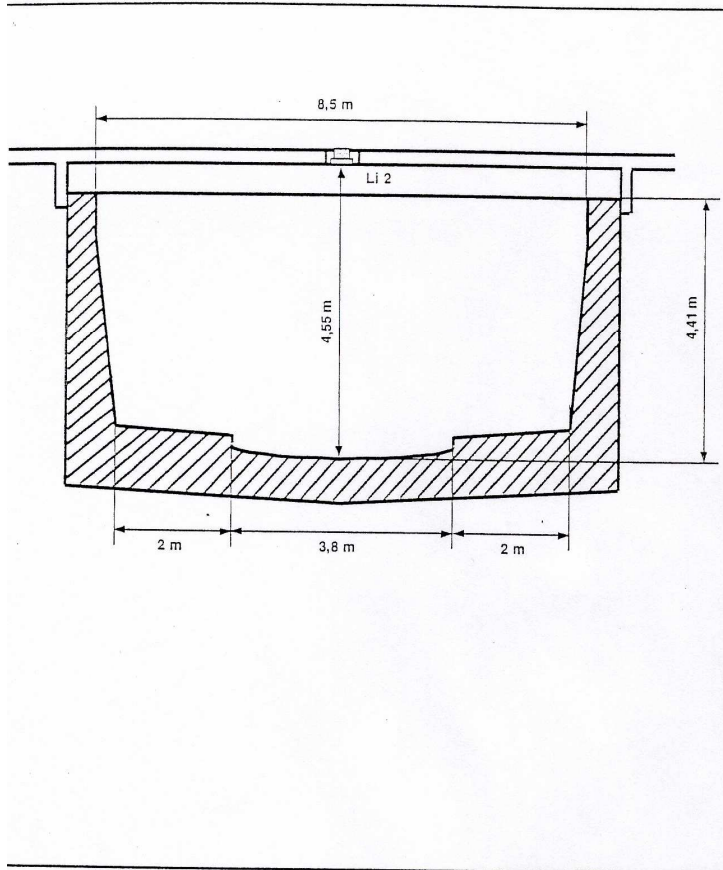


ANNEXE 1 : COURBES DE TARAGE DES STATIONS AYGALADES ET SAINT-ANTOINE

Ouvrage : RUISSEAU DES AYGALADES

mise à jour le : 28-nov-96

Coupe de l'ouvrage



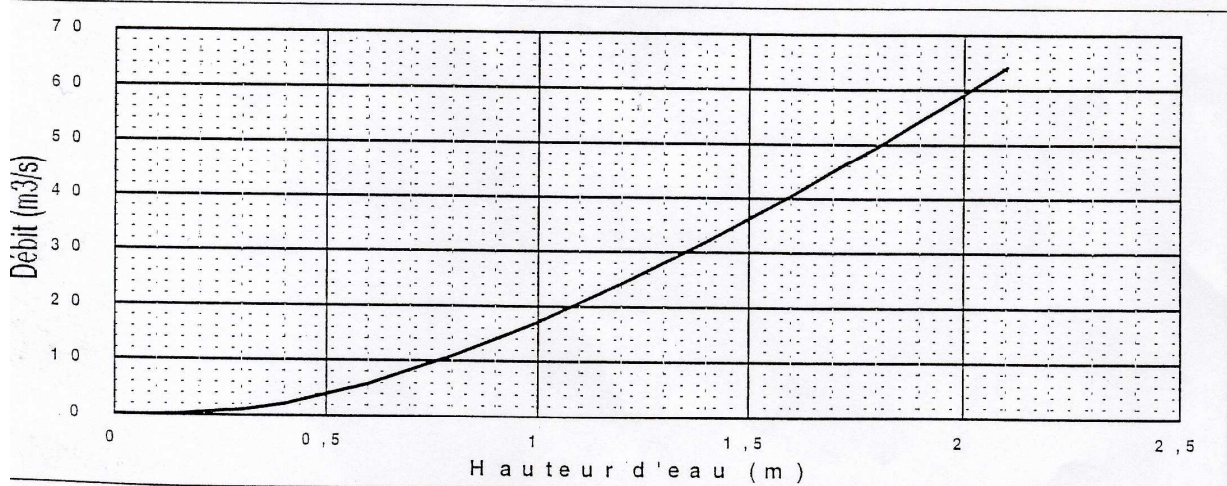
Caractéristiques de la mesure

Type du capteur	ULTRASON	
Emplacement	m N.G.F.	m Relatif
Voûte	*	*
Banquette	10,85	0,32
Radier	10,53	0

Variations hauteur d'eau par temps sec	m N .G.F	m Relatif
Hauteur mini par temps sec	10,56	0,03
Hauteur maxi par temps sec	10,78	0,25

Relation hauteur . débit	$Q=Ks.S.Rh^{2/3}.i^{1/2}$	
S	Section mouillée (m²)	S=f(hauteur)
RH	Rayon hydraulique (m)	Rh=f(hauteur)
KS	Coefficient de Strickler (m ^{1/3} /s)	50
I	Pente (m/m)	0,005

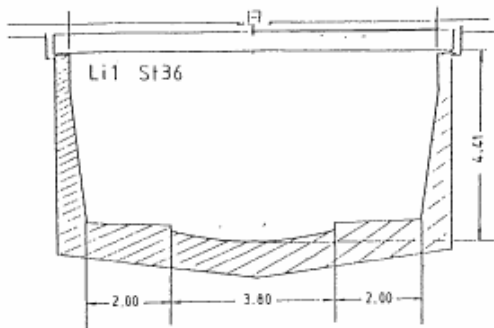
Courbe de tarage



hauteurs / coefficients	a0	a1	a2	a3	a4	a5
de 0 m à 0,32 m	0,015071	-2,283358	37,067526	-57,982845	-0,000009	-0,000007
de 0,33 m à 2,1 m	1,842262	-16,071388	52,010266	-29,029214	9,860024	-1,378965

STATION N° 36 Capteur Li 1

Coupe de l'ouvrage

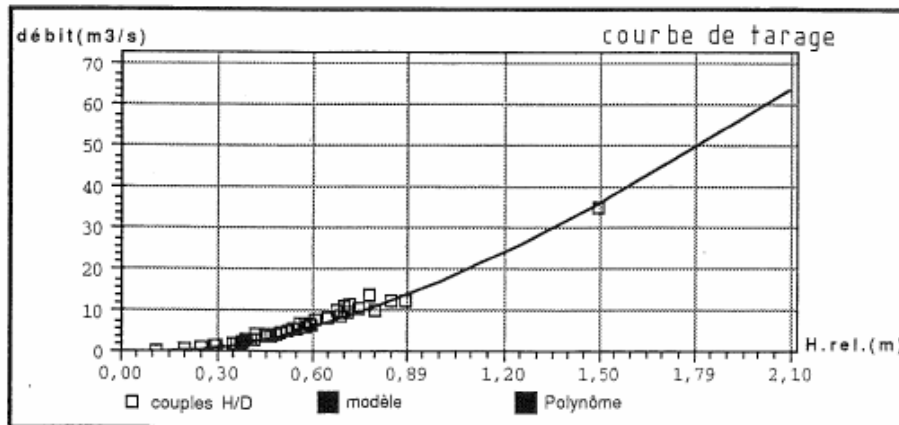


Caractéristique de la mesure

Type de Capteur Ultrasons

Capteur-Radier	4,70 m	En Relatif
N.G.F. Voûte	*	*
N.G.F. Capteur	15,28	4,70 m
N.G.F. Banquette	*	*
N.G.F. Radier	10,58	0

$K_S = 50 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$



H bas(m)	H haut(m)	coeff a0	coeff a1	coeff a2	coeff a3	coeff a4	coeff a5
0,00	0,32	0,015071	-2,283358	37,067526	-57,982845	-0,000009	-0,000007
0,32	2,10	1,842262	-16,071388	52,010266	-29,029214	9,860024	-1,378965

ANNEXE 2 : COEFFICIENTS DE MONTANA DU POSTE DE MARIGNANE

Montana marignane

ANNEXE 3 : TRAVAUX DE RECHERCHE CONCERNANT L'ABATTEMENT SPATIAL DES PLUIES

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

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

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

Les données pluviométriques étudiées concernent la période 1991-1999.

Démarche et résultats de l'étude

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

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

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

Cette relation est (pour $S > 30 \text{ km}^2$) :

$$\alpha = 5^{(-0.064 + 0.014 \ln(\Delta t))}$$

Unités : Δt en heures et S en km^2

Le rapport conclut en comparant ce résultat à l'analyse des images radar de 2 événements (26/08/1996 et 7/09/1998). Elle conclut que « *pour les petits pas de temps – typiquement quelques dizaines de minutes – la valeur du coefficient d'abattement semble être essentiellement déterminée par le déplacement des cellules orageuses intenses* ».

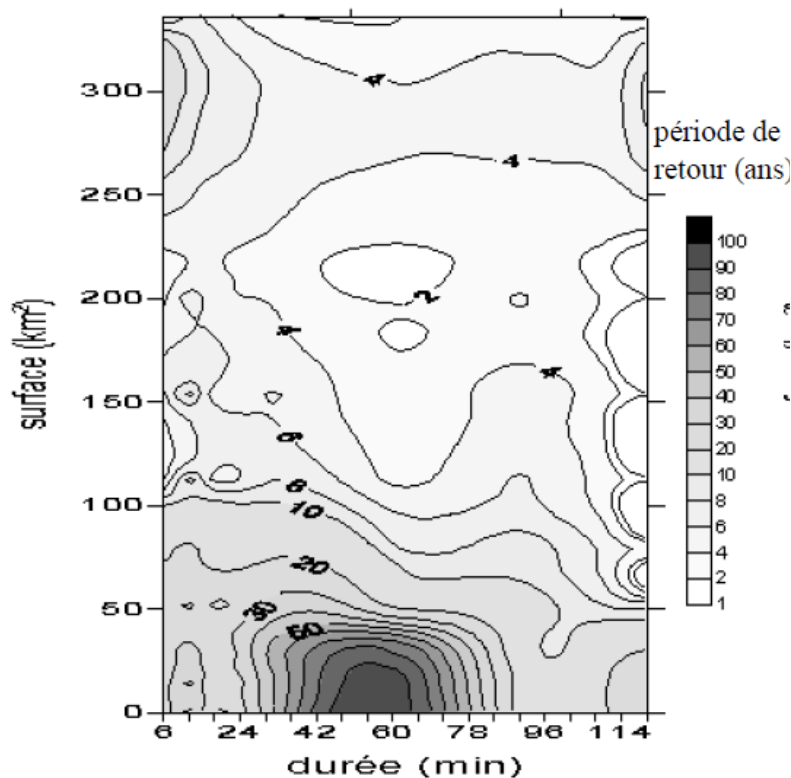
- **Analyse de la pluviométrie sous des systèmes nuageux convectifs, étude de cas sur des données de la Ville de Marseille et de la méthode ISIS de Météo-France, thèse de Maria RAMOS, 2002**

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

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

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

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



a) 22-23 septembre 1993

D'autres études ont été consultées, notamment :

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