

Communauté de Communes du Golfe de Saint-Tropez



Définition d'un référentiel hydrologique sur le territoire du Golfe de Saint-Tropez

Rapport principal

AQUA CONSEILS

Ingénieur-Conseil pour l'Eau
et l'Environnement

524, chemin Las Puntos - 31450 BAZIEGE
Téléphone : 05-34-66-09-09
e-mail : aquaconseils@club-internet.fr

Rapport n° 1705-1 - Version 4

Février 2018

Sommaire

1. INTRODUCTION.....	1
2. TYPOLOGIE DES PETITS BASSINS VERSANTS.....	2
2.1 OBJECTIFS DE LA TYPOLOGIE	2
2.2 CRITERES DE DEFINITION ENVISAGES ET ANALYSE CRITIQUE.....	2
2.2.1 <i>Réflexion préalable.....</i>	<i>2</i>
2.2.2 <i>Paramètres influençant l'hydrologie sur le territoire.....</i>	<i>3</i>
2.2.3 <i>Méthodes ou formules pouvant différer d'un cas à l'autre</i>	<i>4</i>
2.3 TYPOLOGIE RETENUE ET METHODE D'APPLICATION	5
2.3.1 <i>Méthode de sélection et analyse des critères de la typologie.....</i>	<i>5</i>
2.3.2 <i>Critères retenus</i>	<i>9</i>
3. DEFINITION DES PLUIES DE REFERENCE	12
3.1 NOTION DE PLUIE DE REFERENCE	12
3.2 METHODE DE DETERMINATION	12
3.2.1 <i>Sources de données</i>	<i>12</i>
3.2.2 <i>Mode d'exploitation des données</i>	<i>16</i>
3.2.3 <i>Bilan des données exploitées pour les cumuls mensuels et annuels.....</i>	<i>17</i>
3.2.4 <i>Bilan des données exploitées pour les cumuls journaliers</i>	<i>19</i>
3.2.5 <i>Bilan des données exploitées pour les cumuls horaires</i>	<i>21</i>
3.2.6 <i>Bilan des données exploitées pour les cumuls infra-horaires</i>	<i>21</i>
3.2.7 <i>Traitement des données de pluies moyennes annuelles et mensuelles</i>	<i>22</i>
3.2.8 <i>Traitement des données de pluies journalières</i>	<i>28</i>
3.2.9 <i>Traitement des données de pluies horaires et multi-horaires</i>	<i>43</i>
3.2.10 <i>Valeurs de référence de pluies ponctuelles au pas infra-horaire.....</i>	<i>49</i>
3.2.11 <i>Valeurs de référence de pluie longues pour le territoire de la CCGST</i>	<i>50</i>
3.2.12 <i>Quantiles de pluie exceptionnelle.....</i>	<i>54</i>
3.2.13 <i>Réflexion sur l'abatement spatial des pluies</i>	<i>54</i>
4. METHODE D'ESTIMATION DES CRUES.....	56
4.1 METHODE PROPOSEE	56

4.2	LOGICIELS NECESSAIRES A L'ANALYSE HYDROLOGIQUE ET MODE D'UTILISATION.....	56
4.3	PREPARATION DES ELEMENTS NECESSAIRES A L'ANALYSE HYDROLOGIQUE	57
4.3.1	<i>Etapes de la préparation de l'analyse hydrologique.....</i>	57
4.3.2	<i>Support cartographique conseillé</i>	58
4.3.3	<i>Délimitation des bassins versants</i>	60
4.3.4	<i>Détermination des axes principaux de drainage.....</i>	62
4.3.5	<i>Caractérisation des conditions de ruissellement à l'état initial.....</i>	64
4.3.6	<i>Caractérisation des conditions de ruissellement à l'état futur.....</i>	67
4.3.7	<i>Caractérisation du milieu récepteur en aval.....</i>	68
4.3.8	<i>Dispositif à créer de rétention ou de régulation des débits.....</i>	69
4.4	CAS PARTICULIER : BASSIN OU ZONE D'ACCUMULATION DES EAUX EXISTANT SUR LE BASSIN VERSANT.....	69
4.5	UTILISATION DE L'OUTIL D'ANALYSE HYDROLOGIQUE	71
4.5.1	<i>Présentation générale.....</i>	71
4.5.2	<i>Classeur de préparation des paramètres de modélisation</i>	71
4.5.3	<i>Adaptation du modèle hydrologique</i>	76
4.5.4	<i>Lancement des simulations et analyse des résultats.....</i>	76
4.5.5	<i>Traitement et analyse des résultats, incertitudes.....</i>	77
4.5.6	<i>Comparaison aux valeurs de référence.....</i>	78

Liste des figures

- Figure 1 : Postes pluviométriques dans le département du Var
- Figure 2 : Postes pluviométriques pris en compte dans l'analyse
- Figure 3 : Localisation des postes fictifs de « Pluie SHYREG » utilisés
- Figure 4 : Cumul moyen annuel de précipitations en France métropolitaine
- Figure 5 : Cumul moyen annuel de précipitations dans le Var
- Figure 6 : Pluie journalière décennale sur le pourtour méditerranéen selon SHYREG
- Figure 7 : Pluie journalière selon SHYREG sur le Golfe de Saint-Tropez
- Figure 8 : Distribution des pluies moyennes annuelles
- Figure 9 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de janvier
- Figure 10 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de février
- Figure 11 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de mars
- Figure 12 : Distribution des pluies moyennes mensuelles d'avril
- Figure 13 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de mai
- Figure 14 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de septembre
- Figure 15 : Distribution des pluies moyennes mensuelles d'octobre
- Figure 16 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de novembre
- Figure 17 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de décembre
- Figure 18 : Localisation des points SHYREG utilisés
- Figure 19 : Pluies journalières décennales et centennales calculées par loi GEV
- Figure 20 : Pluies journalières décennales et centennales calculées par Renouvellement
- Figure 21 : Pluies de 24h décennales et centennales calculées par SHYREG
- Figure 22 : Cartes des pluies journalières (ou de 2 jours) lors d'événements climatiques
- Figure 23 : Localisation du point SHYREG complémentaire sur le bassin de la Garde
- Figure 24 : Régionalisation des pluies longues sur le territoire de la CCGST
- Figure 25 : Carte géologique simplifiée du territoire de la CCGST

Liste des tableaux

- Tableau 1 : Nature des paramètres envisagés pour caractériser les bassins versants
Tableau 2 : Paramètres de définition de la typologie à mesurer par bassin versant
Tableau 3 : Caractéristiques des postes pluviométriques de Météo France dans le Var
Tableau 4 : Postes pluviométriques utilisés pour l'étude des pluies journalières
Tableau 5 : Ajustement statistique sur les pluies journalières (Renouvellement)
Tableau 6 : Ajustement statistique par loi GEV sur des pluies journalières de la région
Tableau 7 : Ajustement statistique de pluies journalières de la région (< 1980)
Tableau 8 : Pluies statistiques de 24h
Tableau 9 : Records de pluies journalières
Tableau 10 : Quantiles de pluies sur une durée de 1h
Tableau 11 : Quantiles de pluies sur une durée de 2h
Tableau 12 : Quantiles de pluies sur une durée de 3h
Tableau 13 : Quantiles de pluies sur une durée de 6h
Tableau 14 : Quantiles de pluies sur une durée de 12h
Tableau 15 : Quantiles de pluies sur une durée de 24h
Tableau 16 : Ratio entre pluie de 24h et pluie journalières en fréquence décennale
Tableau 17 : 1^{ère} estimation de la pluie décennale de 24h sur le territoire de la CCGST
Tableau 18 : Quantiles de pluies SHYREG au point 1 (Ramatuella)
Tableau 19 : Quantiles de pluies SHYREG au point 2 (Sainte-Maxime)
Tableau 20 : Quantiles de pluies SHYREG au point 3 (Verne)
Tableau 21 : Quantiles de pluies SHYREG au point situé sur le bassin de la Garde
Tableau 22 : Coefficients de Montana pour les pluies infra-horaires
Tableau 23 : Quantiles infra-horaires de pluies estimés pour le territoire de la CCGST
Tableau 24 : Coefficients de Montana infra-horaires sur le territoire de la CCGST
Tableau 25 : Quantiles de pluies « longues » sur la région 1 (Ramatuella)
Tableau 26 : Quantiles de pluies « longues » sur la région 2 (Côte)
Tableau 27 : Quantiles de pluies « longues » sur la région 3 (Massif des Maures)
Tableau 28 : Records observés dans le Var
Tableau 29 : Records observés dans les Alpes-Maritimes
Tableau 30 : Quantiles de pluies exceptionnelles sur le territoire de la CCGST

1. INTRODUCTION

La Communauté de Communes du Golfe de Saint-Tropez (CCGST) mène deux actions majeures sur les principaux cours d'eau de son territoire : un contrat de rivière et un Programme d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI) complet. Ces deux opérations intègrent des actions de réduction de vulnérabilité d'une part, de réduction de l'aléa « inondation » d'autre part. Or, cette démarche doit être complétée par une maîtrise des eaux de ruissellement pluvial sur les zones urbaines et sur les petits bassins versants qui n'ont pas été encore étudiés à ce jour. Pour cela, il est apparu nécessaire de définir une méthodologie unifiée et documentée, ainsi qu'un jeu de paramètres hydro-climatiques sur le territoire, tenant compte de ses spécificités et de ses hétérogénéités. Ces éléments doivent être regroupés au sein d'un référentiel hydrologique accompagné d'un guide méthodologique.

Le présent document, établi par AQUA Conseils à la demande de la Communauté de Communes du Golfe de Saint-Tropez, constitue le rapport principal de définition de ce référentiel hydrologique de la totalité du territoire de la CCGST.

2. TYPOLOGIE DES PETITS BASSINS VERSANTS

2.1 Objectifs de la typologie

La superficie d'un bassin versant n'est qu'un critère parmi de nombreux facteurs influençant son fonctionnement hydrologique : c'est ainsi que l'utilisation d'un débit spécifique (c'est-à-dire une valeur de débit de crue par unité de surface) ne fournit qu'une estimation très grossière et nettement insuffisante. Il est alors nécessaire pour obtenir une bonne estimation des débits de crue de tenir compte de tous les paramètres conditionnant la réponse hydrologique.

Les objectifs d'une typologie des petits bassins versants du territoire de la Communauté de Communes du Golfe de Saint-Tropez (CCGST) sont ainsi :

- De présenter les facteurs spécifiques de chaque bassin versant à identifier pour en effectuer une étude hydrologique,
- De décrire la signification et le mode d'identification de ces facteurs (ou paramètres hydrologiques),
- D'illustrer les diverses valeurs à affecter aux paramètres hydrologiques selon les types retenus,
- De fournir une gamme de valeurs probables prise par ces paramètres hydrologiques en fonction du type de bassin versant,
- De fixer les éléments de définition des scénarios hydrologiques à simuler, notamment en associant à chaque type de bassin versant une méthode de définition de pluies de projet.

En d'autres termes, la typologie des petits bassins versant du territoire de la CCGST est destinée à fournir un cadre de détermination des paramètres pertinents pour toute modélisation hydrologique dans le but d'estimer ses débits et volumes de crue, tant pour la description du bassin versant que pour la construction des scénarios de pluie à simuler.

Il est à noter que certains paramètres devant apparaître dans la typologie ne sont pas spécifiques à chaque bassin versant mais correspondent à des caractéristiques régionales, comme par exemple la géologie : la typologie doit donc s'appuyer sur un atlas cartographie de ces facteurs régionaux associé à des clés de lecture à appliquer à chaque bassin versant étudié.

2.2 Critères de définition envisagés et analyse critique

2.2.1 Réflexion préalable

La typologie doit permettre de couvrir tous les cas rencontrés sur le territoire, mais n'a d'intérêt que s'il existe des différences effectives de fonctionnement hydrologique entre types.

En outre, différencier des bassins versants selon la typologie n'a d'intérêt que si deux types différents sont à analyser avec des outils ou des jeux de paramètres différents.

La démarche de définition d'une typologie des bassins versants doit donc consister à lister les paramètres devant être pris en compte dans l'analyse hydrologique et à préciser la gamme ou les cas de figures pouvant se rencontrer sur le territoire.

2.2.2 Paramètres influençant l'hydrologie sur le territoire

Le point de départ de la liste des paramètres de la typologie est l'identification des paramètres influençant la réponse hydrologique d'un bassin versant du secteur du Golfe de Saint-Tropez.

Les paramètres envisagés sont les suivants :

- 1) **La superficie** : il n'y a pas proportionnalité entre débit de crue et surface, mais le paramètre du débit pseudo-spécifique varie selon la gamme de surface et la fréquence de crue. L'expérience montre qu'il peut être différent selon trois gammes de surface : très petit (quelques hectares ou dizaines d'hectares), petit (quelques centaines d'hectares), moyen (quelques km² à quelques dizaines de km²). A priori, ici la troisième classe n'est pas prise en compte, de sorte que l'on aurait plutôt deux classes, se traduisant peut-être par le choix entre deux méthodes. La qualité des estimations de débit par modélisation avec HEC-HMS utilisant CN et lag-time de l'hydrogramme unitaire est à tester.
- 2) **La géologie** : la différence majeure entre les secteurs granitiques et schisteux est le taux de ruissellement mais surtout l'interception initiale : il est nécessaire d'explorer le territoire pour identifier si d'autres types de roche-mère se rencontrent, en intégrant une analyse pédologique pour prendre en compte des éventuelles zones sédimentaires ou bien des secteurs granitiques peu arénisés... La géologie est a priori un paramètre prépondérant de la typologie.
- 3) **Le relief** : ce paramètre joue un rôle important en conditionnant la structure du réseau hydrographique et le temps de réponse du bassin versant. En zone urbaine, il pourrait cependant n'influencer que la vitesse d'écoulement et donc le temps de réponse du bassin versant, pas ou peu le taux de ruissellement. Dans ce cas, c'est un simple paramètre hydrologique (voire hydraulique) et pas un paramètre d'identification de la typologie. La façon de préciser le relief est de définir un nombre limité de gammes de valeurs (3 ou 4 gammes) à partir du MNT avec traitement et cartographie des pentes.
- 4) **La nature et type de réseau hydrographique** : il faut détailler si le réseau est naturel ou artificiel, superficiel ou souterrain, fortement ramifié ou en peigne... Ce point doit être analysé en séparant clairement les réseaux de collecte des réseaux de drainage, les réseaux naturels des réseaux artificiels. Il faut aussi tenir compte du taux de raccordement, qui peut être intégré ici ou faire l'objet d'un critère séparé.
- 5) **Le taux de raccordement au réseau public** : ce point est particulièrement important à analyser. Le mode de détermination est à préciser... A voir s'il est intégré ou non au point précédent.
- 6) **Le type de bassin versant** : il faut distinguer les bassins versants naturels, urbains, agricoles, industriels... à moins que ce point ne soit confondu avec le suivant.
- 7) **Le type d'usage et de couverture des sols** : il faut distinguer divers types de couvert végétal naturel, agricole et urbain (induisant plusieurs classes d'imperméabilisation

des sols et/ou de collecte des eaux de ruissellement) mais aussi les pratiques qui y sont faites. Par exemple, en zone boisée, il faut caractériser l'usage des sols en prenant en compte le mode de débroussaillage ou encore la présence l'élevage extensif sur le périmètre.

- 8) **La présence éventuelle de points d'accumulation des eaux** : que ce soit sous forme de zones de dépression, de fossés de forte capacité ou encore de bassins de rétention, des sites pouvant stocker temporairement un volume significatif à l'échelle du bassin versant peut réduire sensiblement le débit à l'exutoire.
- 9) **Les apports amont** : le fait d'avoir des apports amont, une « source » (ou résurgence) ou une hétérogénéité dans le bassin versant étudié n'est pas nécessairement un critère de typologie. Il sera cependant nécessaire d'adapter la méthode, en découpant le bassin en sous-bassins versants et en reconstituant les hydrogrammes... Cette distinction paraît du même niveau que celle consistant à s'intéresser aux valeurs de débit en divers points du bassin versant.

Cette liste préalable est certainement trop longue pour une typologie, et certainement redondante sur certains aspects. Il est donc apparu nécessaire de la tester sur divers petits bassins versants du territoire de la CCGST en suivant une approche classique d'analyse hydrologique fondée sur la modélisation hydrologique au moyen du logiciel HEC-HMS, avec les options de calcul (en termes de méthodes) déjà validés sur ce territoire dans le cadre des études du PAPI d'intention du Préconil et du Contrat de rivière du bassin de la Gisle. Ce travail de test et de sélection des critères pertinents pour le territoire et pour l'objectif de gestion des eaux pluviales ou d'étude de petits bassins versants est présenté ci-après au paragraphe 2.3.

2.2.3 Méthodes ou formules pouvant différer d'un cas à l'autre

Il est légitime de considérer que la typologie pourrait porter sur des fonctionnements hydrologiques différents des bassins versants, mais aussi sur des méthodes différentes d'estimation de la valeur de paramètres hydrologiques.

Ainsi, selon certaines caractéristiques du bassin versant, la méthode d'estimation du temps de réponse pourra être différente, chaque formule disposant de son propre domaine de validité.

Ainsi, en examinant les formules classiques d'estimation du temps de réponse ou de concentration d'un bassin versant et surtout le domaine d'application de ces formules, on retient que le choix doit tenir compte de la superficie, de la longueur principale et de la pente moyenne du bassin versant, mais aussi des gammes auxquelles appartiennent ces paramètres (particulièrement la superficie et la pente moyenne), ainsi que la nature dominante en termes d'occupation des sols, a minima en différenciant bassins versants en zone agricole ou naturelle et bassins versants urbains.

Il ressort donc que l'utilisation d'une modélisation hydrologique nécessite une réflexion préalable sur la validité des outils d'estimation de facteurs hydrologiques tels que le temps de réponse, l'interception initiale et le taux de ruissellement avant et après saturation. En d'autres termes, la typologie établie sur le territoire de la CCGST doit clairement indiquer la ou les formules à favoriser pour estimer les paramètres hydrologiques du bassin versant en cas de crue (ou de forte pluie).

2.3 Typologie retenue et méthode d'application

2.3.1 Méthode de sélection et analyse des critères de la typologie

La typologie a été ajustée en la testant sur le territoire, en partant d'une première série de critères pré-identifiés telle que présentée plus haut. L'application à des zones tests est en pratique destinée à juger de la pertinence des divers critères, afin d'écartier ou de regrouper certains critères et ainsi simplifier la typologie.

En parallèle de l'application cartographique, la réflexion a porté sur l'outil de modélisation hydrologique à développer, qui utilise en particulier le logiciel HEC-HMS avec modélisation des bassins versants au moyen de la méthode SCS pour la production et la méthode de l'hydrogramme unitaire pour le transfert : à l'avenir, l'application de la typologie doit surtout servir à déterminer les paramètres de modélisation en suivant un guide ou un outil de calcul de ces paramètres.

C'est en listant les paramètres à identifier pour toute étude hydrologique par modélisation avec les méthodes retenues par la CCGST que la typologie pertinente pour le projet a pu être précisée : la liste ci-après reprend alors la liste initiale et en présente une analyse spécifique à l'éclairage de l'application sur le territoire, en insistant sur les aspects essentiels pour le projet :

- **Superficie du bassin versant** : ce critère regroupe en fait trois éléments essentiels de l'analyse hydrologique, à savoir :
 - **Le découpage en bassins versants** : pour faire l'objet d'une modélisation ou plus généralement d'une analyse hydrologique, il est très important que les bassins versants étudiés présentent une certaine homogénéité, sinon les paramètres hydrologiques sont délicats à estimer et ne peuvent pas être représentatifs. En plus, certains paramètres évoluent très différemment selon la nature du bassin versant (comme par exemple l'interception initiale).
 - **La gamme de superficie** : deux cas sont à identifier ici, à savoir celui d'un petit bassin versant et celui d'un très petit bassin versant. Cette distinction est importante pour sélectionner une méthode adaptée de calcul des paramètres hydrologiques tels que le temps de réponse, ou pour l'application de débits pseudo-spécifiques par exemple. C'est aussi un paramètre essentiel pour vérifier le respect du domaine de validité de formules statistiques. Il est toutefois envisageable d'automatiser cette réflexion, l'utilisateur n'ayant qu'à saisir la superficie de chaque bassins versant.
 - **La valeur de la surface** : c'est l'un des principaux paramètres utilisés dans toute étude hydrologique. Ce n'est plus alors un critère de typologie mais un paramètre de modélisation.
 - ➔ **La superficie ne serait pas alors un critère de la typologie, mais un paramètre à traiter de manière automatique dans l'outil d'analyse hydrologique.**

- Interception initiale : ce paramètre dépend essentiellement du contexte géologique et pédologique, mais aussi de la nature de la végétation, de l'usage des sols, des pratiques agricoles et forestières, du relief, de la densité du réseau hydrographique ou de drainage, du taux d'urbanisation et d'imperméabilisation des sols, du mode de gestion des eaux pluviales à la parcelle en secteur urbain ou encore de la présence de zones d'accumulation ou de rétention des eaux de ruissellement. Ces éléments doivent donc être pris en compte dans la typologie.
- CurveNumber CN : ce paramètre mesure non seulement le taux de ruissellement, mais aussi son évolution avec le cumul de pluie, donc avec la fréquence de l'événement simulé. En ce sens, il représente un paramètre d'estimation du volume de crue plus élaboré qu'un simple pourcentage du volume de pluie (sauf à adapter le coefficient de ruissellement à chaque gamme de pluie simulée !). Le CN dépend de plusieurs facteurs, et plus particulièrement de la géologie, de la pédologie, du relief, de la densité du réseau hydrographique (ou de drainage, ou d'assainissement pluvial), de la couverture végétale, du mode d'entretien des sols, de la densité du réseau hydrographique, mais aussi du taux d'imperméabilisation des sols (à l'échelle locale) et du taux de raccordement au réseau public (ou de déversement sur la voie publique) en zone urbaine. Le paramètre doit aussi tenir compte de dispositifs de rétention tels que des bassins d'orage : il est cependant préférable de séparer les bassins versants alimentant de tels dispositifs et de « remplacer » leur apport par le débit de fuite ou de débordement. Pour pouvoir estimer la valeur du CN, ce sont donc les mêmes facteurs que pour l'interception initiale qui sont nécessaires, et qui doivent découler de la typologie.
- Taux d'imperméabilisation : ce taux n'est pas le pourcentage de surface en zone urbaine, mais un pourcentage qui est considéré comme totalement imperméable est dont le volume est totalement évacué. Si on utilise ce paramètre, le CN n'est appliqué qu'à la part restante : dans ce cas, le CN doit être représentatif non pas du bassin versant en totalité mais de la partie considérée comme non entièrement imperméabilisée... Pour préciser ce paramètre, il est alors essentiel de caractériser l'occupation des sols.
- Temps de réponse du bassin versant : considérant que la méthode sélectionnée est l'application de la méthode de l'hydrogramme unitaire, l'estimation du temps de réponse doit être aussi bonne que possible car c'est le paramètre essentiel (et presque le seul) pour estimer le débit maximal et la forme de l'hydrogramme. En pratique, il s'agit soit d'estimer le temps de concentration et d'appliquer un ratio (de l'ordre de 0,6 ou 0,65 en général, mais avec des cas particuliers pouvant se rencontrer) ou bien d'estimer directement le temps de réponse. Il est à noter que ce temps de réponse est en fait dépendant de l'évolution du taux de ruissellement, et donc de la pluie simulée. Il est aussi à noter que le temps de réponse (ou le temps de concentration) dépend de la forme du bassin versant, de la densité et de la structure du réseau hydrographique (et probablement de la nature du sol), ce qui est généralement ignoré dans les

formules classiques qui utilisent simplement la surface, la longueur et la pente moyenne du bassin versant.

- Débit de base : ce débit peut être estimé directement par l'utilisateur, ou bien proposé selon l'un des deux approches suivantes :
 - Des gammes de valeurs par tranche de surface peuvent être proposées. Le paramètre à prendre en compte est alors le contexte géologique, ou bien la situation sur le territoire dans le cas où on établirait une carte spécifique montrant le débit de base de certains cours d'eau...
 - Une valeur par unité de surface, qui est aussi à régionaliser.

→ Il apparaît que le territoire, du fait de son contexte géologique, n'est pas concerné par des résurgences, ni par un soutien d'étiage artificiel apportant un débit de base significatif (sauf sur la Verne et la Môle). Il est donc judicieux de fixer une valeur représentative à l'échelle du territoire et extraire cette notion de la liste des critères de typologie.

- Taux (ou la vitesse) de ressuyage : ce taux dépend directement de la durée de ressuyage, et donc de la structure du réseau hydrographique, de la forme du bassin versant, de la nature des sols, des pentes et du taux de ruissellement. En pratique, ce sont surtout la nature du bassin versant et les caractéristiques de son réseau hydrographique ou de son réseau d'assainissement pluvial qui permettent d'estimer ce paramètre. La typologie doit donc intégrer ces critères, déjà cités, également pour estimer ce taux de ressuyage.
- Passage de la décrue à la courbe de ressuyage : ce passage est fixé sous forme d'une valeur (qui dépend donc du bassin versant) ou d'un pourcentage par rapport au débit de pointe. Cette seconde approche est à favoriser ici, mais il faut pouvoir fixer un taux, ce dernier dépendant surtout du temps de réponse du bassin versant, et donc des paramètres qui influencent ce temps, et des mêmes facteurs que pour la vitesse de ressuyage, sans ajouter de critère supplémentaires à la typologie.
- Vitesse de propagation des crues : il s'agit en fait d'un facteur qui se calcule en fonction de la vitesse d'écoulement en lit mineur (laquelle dépend surtout de sa nature et de sa pente) et de la hauteur d'eau en lit majeur. Toutefois, les bassins versants étudiés ici sont par définition des bassins de faible superficie, avec un faible écrêtement ou laminage, et des vitesses de propagation qui pourront être assimilées aux vitesses d'écoulement dans le réseau hydraulique principal (cours d'eau, fossé, route ou collecteur). Le calcul de cette vitesse et donc du temps de propagation ou de parcours (ou de « routage ») de la crue sera simplement fait à partir de la nature de l'axe hydraulique, de sa pente moyenne et de sa longueur, les temps de propagation utilisés ici ne représentant que quelques minutes. Il s'agit donc de paramètres physiques à identifier lors de la caractérisation du bassin versant (au même titre que la superficie par exemple) plutôt que de critères de la typologie.

Le bilan de cette analyse conduit alors à lister les paramètres à mesurer d'une part, les critères de typologie à apprécier d'autre part pour estimer ces paramètres.

Ces éléments sont résumés dans le tableau suivant, la colonne « commentaires » regroupant des éléments de réflexions sur le support à exploiter ou sur l'importance de définir précisément pour les futurs utilisateurs du référentiel. Les lignes grisées permettent de repérer les éléments qui ne sont finalement pas retenus dans la liste des critères de la typologie des bassins versants, mais font l'objet de calculs interprétés automatiquement par l'outil d'analyse hydrologique :

Tableau 1 : Nature des paramètres envisagés pour caractériser les bassins versants

Paramètre à mesurer			Critère de la typologie à apprécier		
Définition	Méthode	Commentaire	Définition	Méthode	Commentaire
Surface	SIG	En hectares	Géologie/pédologie	Carte	Carte simplifiée du territoire
Longueur de bassin versant	SIG	Par bief de pentes comparables	Débit de base	Valeur standard	
Pente pondérée ou par secteur du bassin versant	SIG	La pente moyenne est non représentative si le relief est inégal	Végétation	Carte / photo aérienne	
Longueur de vecteur hydraulique	SIG	Axe recevant les apports des bassins versants	Usage des sols	Carte / photo aérienne / terrain	Type de culture, friches, garrigue...
Pente d'axe hydraulique	SIG	Idem	% imperméabilisé à 100%	Photo / terrain	Valeur par défaut
Nature du vecteur hydraulique	Plan, terrain	Cours d'eau, fossé, collecteur, route...	Pratiques agricoles ou forestière	Photo aérienne / terrain	Désherbage, débroussaillage, élevage...
Périmètre du bassin	SIG		Forme du bassin versant	Calcul	Indice de Gravélius
Relief			Relief	Carte / SIG	Carte simplifiée du territoire ?
Densité de drainage	Terrain	Hors zone urbaine	Densité du réseau hydrographique ou de drainage	Carte / SIG et terrain	Qualitatif
		En zone urbaine	Taux de raccordement au réseau public	Terrain, schéma directeur	Qualitatif

Paramètre à mesurer			Critère de la typologie à apprécier		
Définition	Méthode	Commentaire	Définition	Méthode	Commentaire
Type d'urbanisation	Terrain	Par catégories	Taille moyenne des parcelles	SIG / terrain	Valeur par quartier
			Taux d'imperméabilisation moyen des parcelles urbanisées	Terrain	Valeur par quartier

En outre, le découpage de la zone d'étude (et au-delà si nécessaire) en bassins versants est un point essentiel, en prenant soin de représenter complètement les zones d'apports au réseau hydraulique étudié, d'isoler les secteurs interceptés par une zone d'accumulation ou un bassin de rétention, et de suivre une logique d'homogénéité des bassins versants dans le découpage retenu. Il est également important de prévoir une gamme de superficie de bassins versants qui ne soit pas trop étendue de manière à étudier des bassins de temps de réponse comparables et pouvoir ainsi utiliser un jeu unique de pluies de projet.

2.3.2 Critères retenus

Le passage de la typologie envisagée au travers de tests d'application d'une part, leur intégration dans un outil spécifique d'analyse hydrologique a permis d'ajuster la typologie des bassins versants appliqué au territoire de la CCGST.

En pratique, la démarche retenue utilise la notion de critères principaux associés à des classes de typologie auxquels sont associé des critères de sous-classes. En d'autres termes, certains des critères pré-identifiés dans le paragraphe précédent ont été soit interprétés différemment, soit considérés comme pertinents uniquement pour certains types. Par exemple, la prise en compte de la pression de défrichement (ou de pâturage) n'a de sens que pour les zones naturelles alors que la densité des constructions est une sous-classe du type « zone urbaine ». Pour être retenus, les critères ont en outre été analysés en vérifiant qu'ils sont faciles à renseigner et qu'ils sont effectivement discriminants au regard de la méthode de définition des paramètres nécessaires à la méthode d'analyse hydrologique retenue.

Finalement, ces critères sont ceux qui sont nécessaires et suffisants pour estimer les valeurs de tous les paramètres à utiliser dans un modèle hydrologique dédié sous HEC-HMS, dans lequel les pluies de référence, les méthodes de calcul et divers paramètres ont d'ores et déjà été fixés.

Après une série de tests sur divers petits bassins versants sur le territoire de la CCGST, il est apparu que les bassins versants à étudier sont la plupart du temps :

- De faible superficie, à savoir de quelques hectares à quelques centaines d'hectares au maximum. L'application sans précaution de méthodes classiques telles que la formule rationnelle ou la formule de Caquot peut conduire à des valeurs aberrantes et souvent à des sous-dimensionnement de réseaux d'assainissement pluvial ;
- Hétérogène du point de vue de l'occupation et sols et plus généralement des conditions de ruissellement : la méthode retenue consiste alors à décomposer le bassin versant en sous-bassins relativement homogènes (et donc caractérisée par un seul jeu de paramètres représentatifs, associés à la typologie) ;

- Hétérogène en ce qui concerne les conditions d'écoulement, et donc les temps de réponse : l'outil d'analyse hydrologique propose alors de décomposer l'axe hydraulique principal de chaque sous-bassin en biefs successifs, chacun étant caractérisé par sa nature, sa longueur et sa pente.

Ainsi, la typologie des bassins versants est complètement orientée vers l'objectif d'une analyse hydrologique au moyen de l'outil associé au référentiel, à savoir une feuille de calcul sous EXCEL des paramètres hydrologiques et leur intégration dans un modèle hydrologique dédié sous HEC-HMS.

Les critères finalement retenus pour définir la typologie des bassins versants est résumée dans le tableau suivant :

Tableau 2 : Paramètres de définition de la typologie à mesurer par bassin versant

Critère principal	Critère secondaire	Mode de détermination	Commentaire
Superficie		SIG ou Géoportail	La délimitation de chaque bassin versant (ou sous-bassin) suppose un travail de terrain
Périmètre			
Nombre de drains	Longueur	SIG et terrain	Le nombre de drain dépend à la fois des variations de pente et des changements de nature de drain (fossé/buse...)
	Pente moyenne		
	Nature		
Occupation des sols : urbain, agricole ou naturel	Si urbain : type d'urbanisation (centre-ville, dense, petits pavillon, villas sur jardin ou parc	Terrain, SIG, Géoportail	Avec la pente et la nature géologique, il s'agit du critère fondamental d'estimation du taux de ruissellement. Il est donc essentiel de le déterminer précisément, en prenant pleinement en compte les facteurs observés sur le territoire de la CCGST qui peuvent fortement influencer ce taux de ruissellement
	Si agricole : taux d'enherbement des parcelles	Terrain	
	Si naturel : pression de défrichement ou de pâturage	Terrain, enquêtes	
Densité du réseau de drainage		Terrain, éventuellement SIG	Ce paramètre influence le taux de ruissellement et le temps de réponse
Nature géologique et pédologique		Carte géologique simplifiée, terrain	Critère pas utilisé en zone urbaine, et relativement homogène sur le territoire de la CCGST

Critère principal	Critère secondaire	Mode de détermination	Commentaire
Bassin de rétention ou point d'accumulation	Nature	Terrain, enquêtes	Un bassin de rétention ou une zone d'accumulation des eaux sur le bassin versant influence le fonctionnement hydrologique global ; la prise en compte proposée ici se veut très simple tout en restant réaliste
	Capacité maximale		
	Débit de fuite éventuel		
	Taux courant de remplissage		

La feuille de saisie des données intègre plusieurs autres aspects, qui ne sont pas directement utilisés pour l'analyse hydrologique mais pourrait servir à un calcul d'impact hydraulique et au dimensionnement d'ouvrages de rétention : selon avis de la CCGST, ces éléments seront soit supprimés, soit conservés en mentionnant leur caractère facultatif dans la version actuelle de l'outil. Il s'agit des éléments suivants :

- Des données générales de présentation du projet : commune, maître d'ouvrage, bureau d'étude, date, localisation et parcelles cadastrales d'implantation (pour intégration formatée d'une page de synthèse hydrologique dans un document d'étude, éventuellement un dossier Loi sur l'Eau) ;
- Présentation du projet en termes de répartition des surfaces et d'axe de drainage prévu : ces éléments permettent d'estimer la surface active, de calculer l'impact hydrologique de l'aménagement et de préciser le cas échéant le volume de rétention et le débit de fuite autorisé, si de telles règles sont inscrites dans le PLU de la commune concernée ;
- Un commentaire sur la manière dont les apports amont ont été pris en compte, notamment en cas de risque de coulée de boue ;
- Le calcul du débit maximal admissible en aval au regard de règles éventuelles du PLU, ou bien issu d'une étude hydraulique spécifique éventuelle, afin de comparer le débit futur avec ce débit admissible.

Ces éléments sont d'ores et déjà intégrés pour permettre une évolution de l'outil vers un calcul d'impact hydrologique et de dimensionnement d'ouvrages de rétention.

3. DEFINITION DES PLUIES DE REFERENCE

3.1 Notion de pluie de référence

Les pluies de référence sont ici les quantiles à utiliser dans le cadre des études hydrologiques, telles que les schémas directeurs d'assainissement pluvial ou la conception de système de collecte des eaux pluviales.

On désigne par « quantiles » les hauteurs (ou les intensités) de pluie relatives à diverses durées (entre 6 minutes et plusieurs heures) et à diverses période de retour (jusqu'à 100 ans).

Dans le cadre du référentiel hydrologique du territoire de la CCGST, la définition de ces pluies de référence vise à supprimer l'utilisation de valeurs statistiques anciennes, globalisées et non représentatives issues de l'Instruction Technique de 1977 (IT77) et des Recommandations pour l'Assainissement Routier de 1982 (RAR82), ou encore de formules statistiques telles que la formule CRUPEDIX.

Il est désormais nécessaire d'utiliser les valeurs fixées ici pour les pluies de référence afin de ne pas reproduire les erreurs du passé en termes de forte sous-estimation ou surestimation des débits.

3.2 Méthode de détermination

3.2.1 Sources de données

Les données utilisées pour établir les valeurs des pluies de référence sur le territoire de la CCGST sont toutes exclusivement issues des mesures effectuées au niveau de postes pluviométriques de Météo France. Selon le cas, les données sont :

- Soit exploitées en tant que données brutes pour un traitement statistique effectué ici,
- Soit issues de traitements statistiques élaborés par Météo France,
- Soit provenant de l'application de la méthode SHYREG Pluie, qui fournit des quantiles de pluie horaires (et multiples d'heures) en tout point du territoire, ceci pour diverses périodes de retour par un traitement spécifique des données brutes au niveau des postes pluviométriques.

Cependant, la base de données est plus ou moins riche selon le paramètre pris en compte :

- Pour un traitement statistique, il est nécessaire de disposer d'un échantillon représentatif, donc couvrant une période si possible continue et couvrant plusieurs décennies (au moins 30 à 50 ans sont nécessaires pour estimer correctement les pluies d'une période de retour de 10 ans). Ainsi, les stations du territoire et de ses abords ne fournissant que quelques années de mesure sont difficiles à exploiter ;
- Les mesures sont effectuées à des pas de temps différents selon la nature du poste pluviométrique : ce pas de temps varie entre 6 minutes pour les stations automatiques et 24h pour les postes à enregistrement quotidien (avec en outre des relevés qui n'ont souvent pas été informatisés et ne sont donc pas traités par Météo France à des fins de statistiques).

Pour ces raisons, le nombre de postes pluviométriques exploitables ici est relativement réduit, surtout pour les pluies de faible durée.

La carte suivante montre la localisation des postes pluviométriques utilisés par Météo France dans le département du Var :

Figure 1 : Postes pluviométriques dans le département du Var



Cette carte localise les postes pluviométriques et indique leur numéro ainsi que leur nature par l'intermédiaire d'un code :

- 0 est une station synoptique (exploitée en prévision) et automatique, à enregistrement continu échantillonné au pas de temps de 6 minutes. Seules ces stations permettent un traitement statistique d'intensité de pluie sur de courtes durées, c'est-à-dire entre 6 minutes et une heure ;
- 1 est une station synoptique mais non automatique, avec personnel sur place et qui mesure en temps réel les cumuls de précipitations ;
- 2 est une station automatique sans personnel présent, avec mesures en temps réel ;
- 3 est une station automatique mais expertisée en temps différé ;
- 4 est une station climatique bénévole, expertisée en temps différé ;

- 5 est une station automatique ou non, interrogée de manière occasionnelle et non expertisée.

Il est à noter que cette carte de synthèse est associée au tableau suivant, qui indique la localisation des stations, leur type, leur altitude et l'année de mise en service de la station:

Tableau 3 : Caractéristiques des postes pluviométriques de Météo France dans le Var

Station	Type	Commune	Altitude (m)	Début
83004004	2	Les Arcs	56	1950
83007004	2	Aups	497	1951
83031001	0	Le Cannet des Maures (ou : Le Luc)	80	1950
83043005	2	Collobrières	128	1950
83044001	4	Comps/Artuby	884	1951
83044003	1	Comps/Artuby	892	1950
83046001	4	Cotignac	375	1951
83049005	2	Cuers	72	1950
83061001	2	Fréjus	7	1950
83067002	2	Gonfaron	151	1950
83069002	2	Hyères	137	1950
83074002	4	La Martre	974	1950
83080001	4	Mons	796	1950
83101001	2	Ramatuelle	107	1950
83102005	2	Régusse	561	1951
83104001	4	Rians	363	1895
83115001	4	Sainte-Maxime	24	1950
83116001	4	Saint-Maximin-la-Sainte-Baume	310	1937
83116004	2	Saint-Maximin-la-Sainte-Baume	295	1950
83124002	2	Seillans	278	1951
83137001	0	Toulon	23	1895 / 1950
83138002	2	Tourrettes	240	1951

Il est toutefois important de noter les points suivants, qui sont essentiels pour le présent projet :

- Météo France a informatisé ses données pour les commercialiser via internet, avec notamment pour conséquences l'inaccessibilité de données anciennes pour la plupart des stations, ou encore de stations de type 4, dont celle de Sainte-Maxime.
- Les données vendues par Météo France apparaissent fortement incomplètes par rapport à l'ensemble des données historiques accumulées : c'est ainsi que les moyennes mensuelles ou annuelles de cumul de précipitations ne sont disponibles que pour la période 1981-2010, sans actualisation avec les mesures depuis 2010, ce qui est dommage considérant la fréquence élevés de phénomènes marquants au cours de la dernière décennie.

- D'autres stations ont été implantées récemment, dont une station à Cogolin (depuis 1997), à Porquerolles ou sur l'Île du Levant, mais ne sont pas inscrites sur les cartes de synthèses diffusées par Météo France.
- Il existe au plan national un réseau associatif (Infoclimat) qui diffuse des données climatiques, dont des mesures de précipitations sur des postes suivis par Météo France ou bien par des amateurs. C'est notamment le cas à Besse-sur-Issole. L'inconvénient majeur de cette source de données est que les mesures présentent de très nombreuses lacunes mais aussi des valeurs aberrantes, ce qui rend délicat l'utilisation de ces données.

Afin d'analyser la pluviométrie sur le territoire de la CCGST, avec notamment une analyse de distributions spatiales éventuelles, les stations effectivement prises en compte sont localisées sur la carte suivante :

Figure 2 : Postes pluviométriques pris en compte dans l'analyse

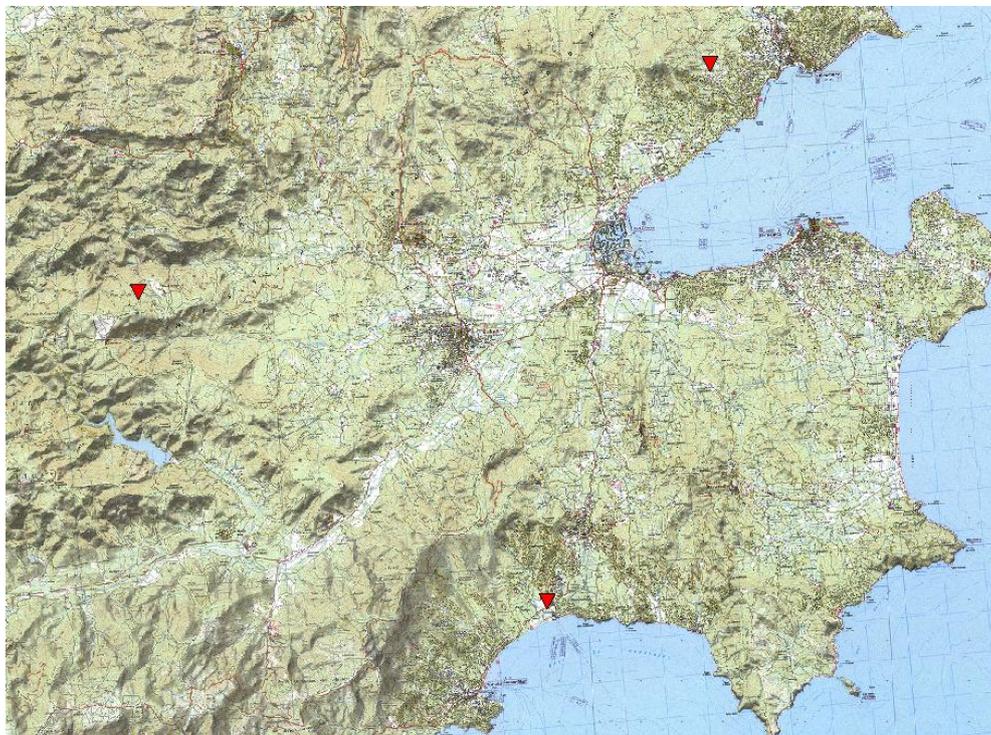


La prise en compte des diverses stations a été faite de manière différente selon l'aspect analysé : ce point est détaillé au paragraphe suivant. **Il est à noter que la station « Le Luc » est aussi identifiée « Le Cannet des Maures » selon le document utilisé.**

Il est à noter que l'IRSTEA a développé une méthode particulière (Méthode SHYREG) d'interpolation des quantiles de pluie, c'est-à-dire des cumul de précipitations pour diverses durées et diverses périodes de retour, de manière à produire un jeu de tels quantile en tout point du territoire national métropolitain par pixels de 1 km². Ces « pluies SHYREG » sont aujourd'hui commercialisées par Météo France : afin de confirmer une éventuelle

distribution spatiale des pluies en fonction de la longitude et de la distance à la mer (avec un effet probable du relief) et de disposer d'une estimation de ces quantiles, nous avons fait l'acquisition de ces estimations sur trois pixels du territoire : la carte suivante montre la localisation de ces trois points :

Figure 3 : Localisation des postes fictifs de « Pluie SHYREG » utilisés



3.2.2 Mode d'exploitation des données

Le mode d'exploitation des données diffère selon la durée de mesure des précipitations :

- tout d'abord, l'ensemble des stations a été utilisé pour identifier une éventuelle différence d'un secteur à l'autre. Cependant, compte tenu de la nature des données disponibles, cette analyse a été faite sur les moyennes mensuelles et annuelles.
- En utilisant les stations pour lesquelles les données de pluies journalières sont disponibles, après sélection d'une série d'événements notables ayant conduit à des records au cours des quelques dernières années (sur la dernière décennie à peu près), une tentative de régionalisation de ces pluies journalières a aussi été faite.
- La même démarche a été faite au pas de temps horaire sur quelques événements significatifs sur le territoire, considérant toutefois que, comme pour les pluies journalières, la plupart des événements ne sont intenses que sur des espaces relativement limités : les conclusions dépendent du choix des événements analysés...

Ces premiers éléments de réflexion, destinés à alimenter la connaissance d'une éventuelle distribution spatiale des pluies à grand pas de temps est ensuite complétée par une comparaison des valeurs statistiques de pluie à des pas de temps moyens (une à quelques heures) et faibles (de 6 minutes à une heure) : cette analyse ne peut cependant se faire qu'au niveau de postes pluviométriques pour lesquels sont disponibles des séries à ces pas de temps et sur un nombre important d'années pour produire des ajustements statistiques : il n'existe pas de tel poste sur le territoire même de la CCGST : il est donc nécessaire d'utiliser

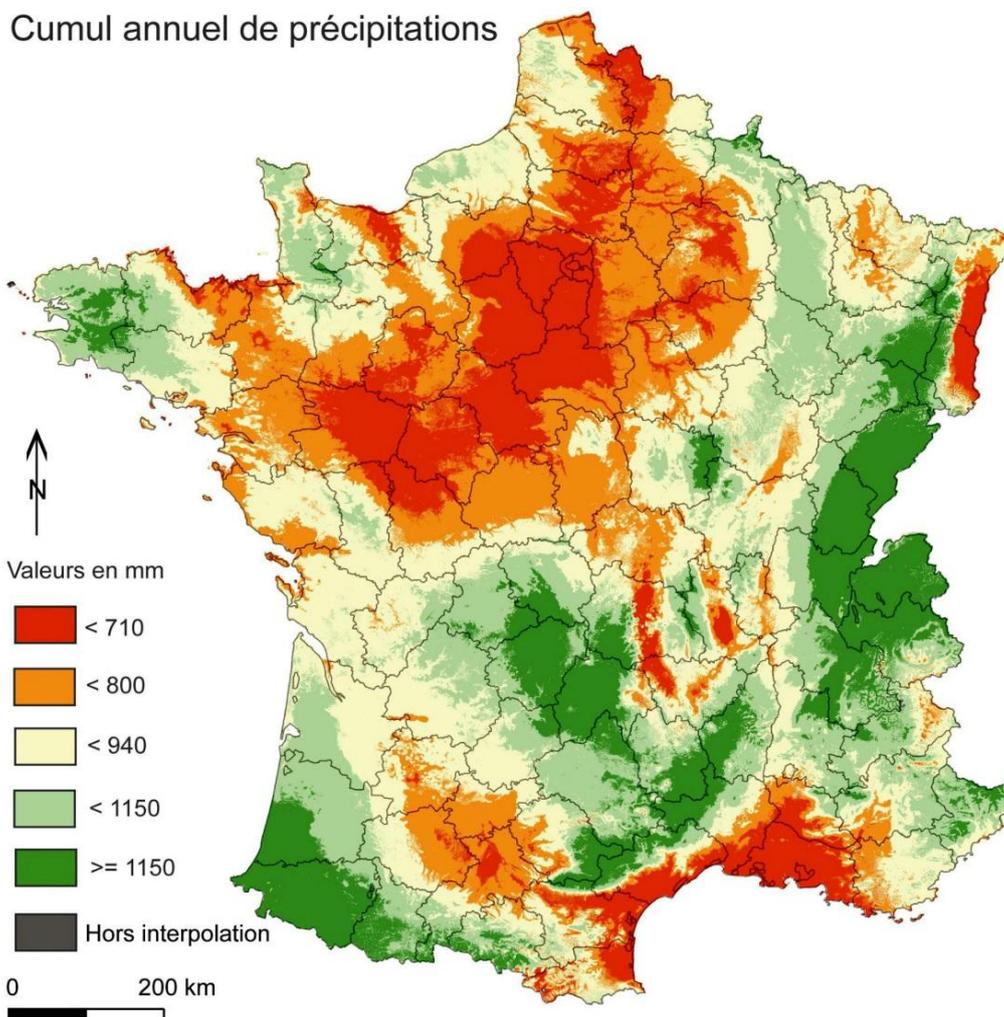
les valeurs statistiques sur d'autres postes du département (Fréjus, Toulon, Le Luc et Hyères) et d'émettre des hypothèses quant à leur représentativité ou aux « corrections » à porter pour estimer ces paramètres sur le territoire de la CCGST.

La prise en compte des PLUIES SHYREG permet en outre de conforter ces hypothèses et de proposer une « adaptation » des paramètres statistiques établies au niveau des stations situées hors du territoire de la CCGST pour les pluies de faibles durées.

3.2.3 Bilan des données exploitées pour les cumuls mensuels et annuels

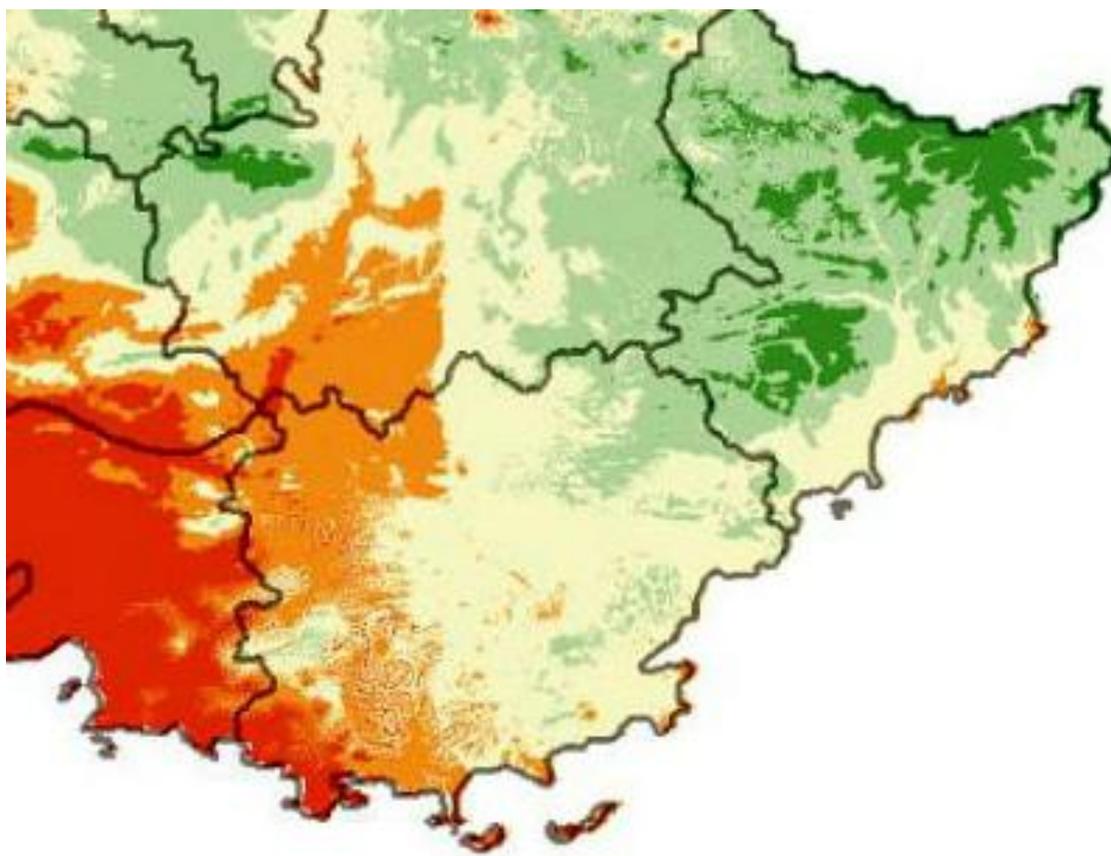
Compte tenu du caractère commercial des données provenant de Météo France, il n'est pas possible de les reproduire ici : l'objet de ce paragraphe est de présenter la liste des données utilisées, les données libres et des cartes de synthèse issues de la bibliographie. La carte synthétique suivante présente la distribution des cumuls annuels de précipitations à l'échelle de la métropole :

Figure 4 : Cumul moyen annuel de précipitations en France métropolitaine



Un zoom sur le Var fait apparaître une hétérogénéité autour du Golfe de Saint-Tropez probablement lié au relief et à la distance à la mer, la zone plus « arrosée » correspondant à la partie Est du Massif des Maures ; on note en outre une pluviométrie moindre sur la plaine des Maures par rapport à la région côtière :

Figure 5 : Cumul moyen annuel de précipitations dans le Var



On note également une forte régionalisation, avec des cumuls annuels de plus en plus forts de l'est vers l'Ouest, mais ceci à l'échelle de la région PACA et pas vraiment du secteur du Golfe de Saint-Tropez.

S'agissant d'une carte de synthèse globale sur la métropole, il est délicat d'en tirer des conclusions pour le projet. Les données suivantes ont pu être acquises pour préciser ce point, c'est-à-dire la distribution spatiale des cumuls mensuels et annuels de précipitations :

- Fiches climatiques des stations de Toulon, Hyères, Le Luc, Cogolin et Cap Camarat (Ramatuella) donnant les moyennes mensuelles et annuelles à ces stations pour la période 1981-2010 (seulement 1997-2010 pour Cogolin) ;
- Tableau de synthèse des moyennes mensuelles et annuelles pour la période 1961-1990 aux stations de Cap Camarat (Ramatuella), Fréjus et Toulon, via le site « infoclimat » ;
- Tableau de cumuls mensuels et annuels des pluies pour la période 2012-2017 aux stations de Cuers, Fréjus, Ile du Levant, Ile de Porquerolles, Toulon, Bormes-les-Mimosas, Vidauban, Cogolin, Collobrières, Draguignan et Les Arcs tel que diffusé par la DDTM83. Ces données combinées avec celles des périodes antérieures nous ont en outre permis de calculées des moyennes sur la durée cumulée ;
- Des observations de pluies très lacunaires diffusées par Infoclimat pour diverses stations dont Besse-sur-Issole ou Solliès-Ville. Ces données sont apparues douteuses et n'ont pas été conservées pour l'analyse des cumuls mensuels et annuels.

Le traitement qui a été fait de ces données est une série d'interpolation selon deux méthodes (tenant compte d'un maillage par triangulation du territoire pour l'une, de la distance relative aux postes pluviométrique pour l'autre) pour établir des cartes de synthèse montrant une éventuelle distribution spatiales des cumuls mensuels et annuels de pluie sur le secteur du Golfe de Saint-Tropez.

3.2.4 Bilan des données exploitées pour les cumuls journaliers

Les données utilisées ici pour analyser les cumuls journaliers au niveau de postes de la région du Golfe de Saint-Tropez sont de quatre natures :

- Les pluies SHYREG au niveau des trois « postes fictifs » sur le territoire de la CCGST indiqués plus haut : pour chacun de ces pixels, les données transmises par Météo France sont les valeurs statistiques des cumuls sur 1 h, 2 h, 3h, 4h, 6h, 12h, 24h, 48h et 72h, ceci pour des périodes de retour de 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans et 100 ans. Egalement utilisées pour l'analyse des pluies horaires, ces éléments fournissent des éléments utiles au pas de temps de 24 heures (par périodes glissantes et non de 0h à minuit ou de 8h à 8h le jour suivant), en prenant soin de ne pas l'assimiler au pas de temps journalier ;
- Les ajustements statistiques de la pluie journalière par loi GEV établis par Météo France au niveau des stations de Toulon, Fréjus, Le Luc, Gonfaron, Hyères et Bormes-les-Mimosas hors du territoire de la CCGST;
- Le traitement effectué à l'échelle du bassin versant de l'Argens pour le compte du département du Var, par interpolation entre postes pluviométriques et fournissant les ordres de grandeur de la pluie journalière pour des fréquences de 10 et 100 ans ; cette analyse ne couvre toutefois pas le territoire de la CCGST et n'est utilisé qu'à titre de comparaison ;
- Les pluies journalières mesurées sur des durées variables (à compter de 1958 dans le meilleur des cas) au niveau des postes pluviométriques de Cavalaire-sur-Mer, de Sainte-Maxime, de Grimaud, de Saint-Tropez et de Cogolin. Toutefois, seule une petite partie des données est disponible, essentiellement pour Sainte-Maxime ; pour les autres postes, on dispose des cumuls journaliers pour quelques datées marquées par une averse significative. En outre, la plupart de ces stations couvrent une période courte et qui diffère d'un poste à l'autre. En pratique, seules les données au poste de Sainte-Maxime permettent un ajustement statistique de bonne qualité, les quatre postes ne devant être utilisés ici qu'à titre de comparaison pour juger d'éventuelles hétérogénéités sur le territoire.

Pour mémoire, la méthode SHYREG a été appliquée en utilisant les données sur 2 812 postes pluviométriques mais uniquement pour la période 1980-1999 et il n'est pas prévu d'actualisation : la fiabilité des quantiles annoncés pour des événements rares, d'une période de retour supérieure à 10 ans, peut alors être remis en cause...

A titre indicatif, l'application de la méthode SHYREG a permis de produire des cartes de synthèse au plan national notamment pour illustrer la distribution spatiale des pluies journalières de fréquence décennale notamment : cette carte, largement diffusée dans la littérature scientifique est reproduite ci-après, avec un zoom sur le Var montrant effectivement une certaine hétérogénéité des pluies journalières sur le secteur du Golfe de Saint-Tropez :

Figure 6 : Pluie journalière décennale sur le pourtour méditerranéen selon SHYREG

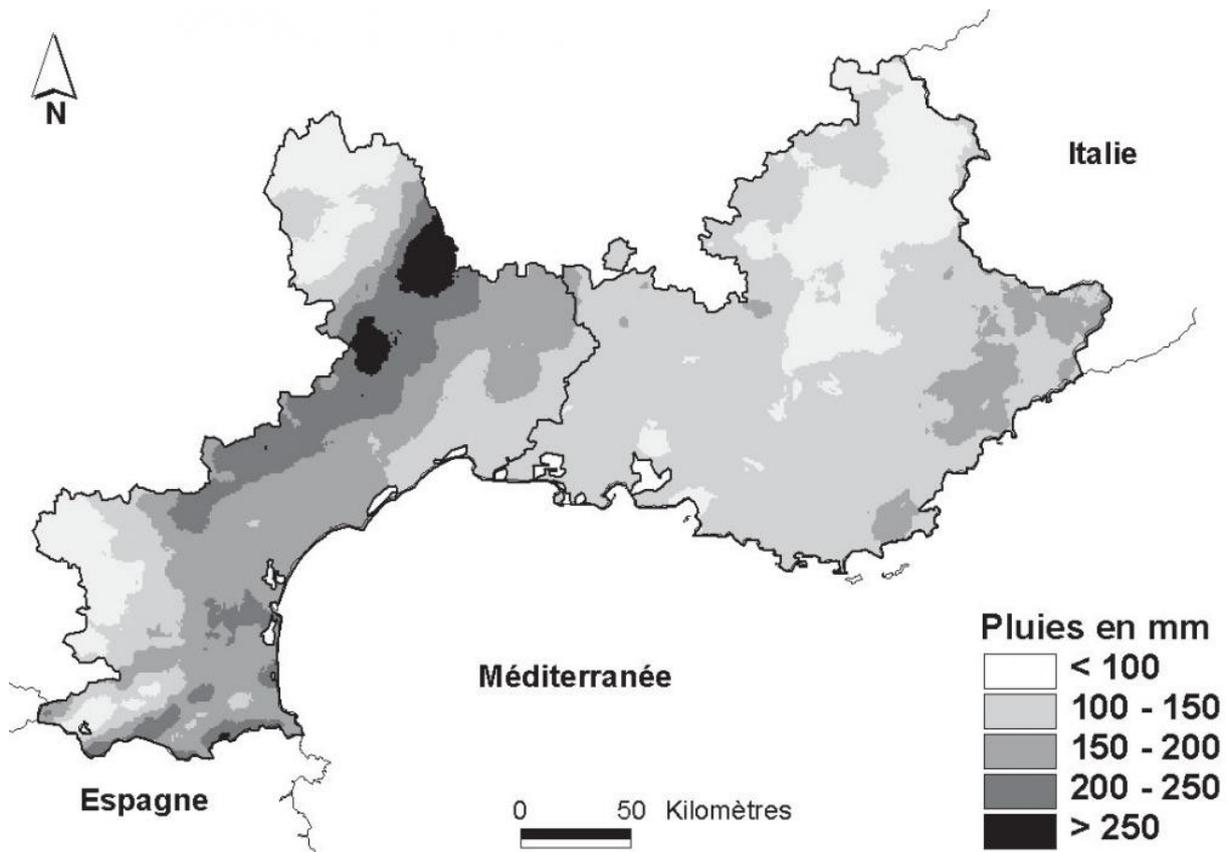


Figure 7 : Pluie journalière selon SHYREG sur le Golfe de Saint-Tropez



Le tableau suivant résume alors la liste des stations ou postes pluviométriques utilisées pour l'analyse des pluies journalières, les périodes couvertes et commentent la qualité d'un ajustement statistique par loi de Gumbel sur ces données :

Tableau 4 : Postes pluviométriques utilisés pour l'étude des pluies journalières

Poste	Altitude	Période	Nb années exploitées	Ajustement
Bormes-les-Mimosas	175 m	Depuis 1973	41	Bon
Cap Camarat	107 m	Depuis 1894	64	Moyen
Cavalaire	10 m ?	1950-1982	33	Mauvais
Cogolin	20 m	Depuis 1997	19	Moyen
Fréjus	7 m	Depuis 1919	84	Bon
Le Luc	80 m	Depuis 1946	64	Mauvais (*)
Sainte-Maxime	24 m	Depuis 1949	64	Mauvais (*)
Fréjus-Saint-Raphaël	10 m ?	1983-2002	20	Moyen
Toulon	23 m	Depuis 1936	64	Bon

(*) C'est l'événement du 15 juin 2010 qui induit une mauvaise qualité de l'ajustement sur les événements extrêmes.

Cette analyse a été faite dans le cadre de l'étude hydrologique établie par AQUA Conseils pour le PAPI d'intention du Préconil et de ses affluents, avec prise en compte du bassin de la Giscle.

3.2.5 Bilan des données exploitées pour les cumuls horaires

Les données exploitables en termes de cumuls horaires pour un traitement statistique se résument aux mesures faites aux stations pour lesquelles sont effectivement disponibles des cumuls de précipitations au pas horaire ; parmi ces stations, seules celles pour lesquelles la durée d'observation est de plusieurs décennies peuvent permettre un traitement statistique utilisable ici.

Sur le territoire de la CCGST, seul le poste de Cogolin fournit des pluies au pas horaire, mais avec une période trop courte pour des ajustements statistiques : le poste est utilisé à titre de comparaison et de corrélation avec les autres postes utilisés ici.

Les stations pluviométriques utilisées pour préciser les quantiles de pluie au pas horaires, et pour diverses durées (entre 1h et 24h) sont ceux de : Hyères, Le Luc, Fréjus-Saint-Raphaël et Toulon.

Par ailleurs les pluies SHYREG prennent ici tout leur intérêt, car elles correspondent aux durées et périodes de retour recherchées, avec toutefois les réserves émises plus haut : les quantiles calculés sur trois pixels du territoire de la CCGST ont alors un intérêt particulier : la comparaison avec les quantiles aux autres postes, sachant que les pluies à pas de temps infra-horaires ne sont pas fournis par la méthode SHYREG et qu'une corrélation est à trouver pour ces pluies de courtes durées avec les quantiles estimés au niveau de ces postes.

3.2.6 Bilan des données exploitées pour les cumuls infra-horaires

Il n'existe pas de station pluviométrique avec un suivi suffisamment long pour établir des valeurs statistiques sur le territoire de la CCGST à un pas de temps inférieur à une heure :

seuls les postes de Toulon, Hyères, Le Luc et Fréjus permettent un tel traitement et la production de quantiles de pluies pour diverses périodes de retour sur des durées comprises entre 6 minutes et une heure.

Ces données sont diffusées par Météo France sous forme de coefficients de Montana a et b ajustés pour diverses périodes de retour et pour des durées variables. Il est à noter que le serveur de Météo France propose de tels paramètres pour des durées choisies par l'utilisateur comprises entre 6 minutes et 24 heures. Or, l'ajustement de Montana n'est pas unique, pour une station et une période de retour donnée, de sorte que des coefficients de Montana calculés sur une durée comprise entre 6 minutes et une heure sont très différents de coefficients moyens calculés pour des durées comprises entre 6 minutes et 24 heures !

Pour mémoire, les coefficients de Montana a et b permettent une estimation d'un cumul de pluie P sur une durée t par la simple formule : $P = a \cdot t^{1-b}$ où t est exprimée en minutes et la pluie cumulée P sur cette durée en mm. Les paramètres régionaux a et b dépendent de la période de retour, mais aussi de la gamme de durée.

3.2.7 Traitement des données de pluies moyennes annuelles et mensuelles

La distribution spatiale des pluies en termes de cumuls annuels, mensuels et journaliers est suggérée par les cartes données plus haut à l'échelle du territoire de la CCGST.

Afin de vérifier et de qualifier cette hétérogénéité sur les moyennes annuelles et mensuelles, les traitements suivants ont été effectués :

- Compilation de données dans des tableaux de synthèse, qui donnent les valeurs normales de cumuls mensuels et annuels pour une quinzaine de postes pluviométriques. Selon le poste considéré, la durée d'observation varie de quelques années à une trentaine d'années : considérant que le climat a changé au cours des dernières années, il y a un risque de perturber les résultats, puisqu'une différence de moyenne entre deux postes peut provenir soit d'une hétérogénéité spatiale des pluies, soit d'une modification des moyennes par traitement de périodes différentes, ce qui fait que les deux séries ne sont pas comparables. L'analyse a donc été faite d'une part en considérant les échantillons sur des durées identiques, d'autre part avec les séries complètes.
- Ces tableaux de synthèse ont fait l'objet d'un calcul de moyenne et d'écart-types et d'une représentation graphique de comparaison des stations.
- Une cartographie a été produite par interpolation entre les stations, de manière à couvrir le territoire d'étude (qui va au-delà de celui de la CCGST), en testant une interpolation par triangulation (TIN) et par distance inverse (IDW), ce qui produit ici des résultats comparables. Les cartes d'interpolation ont été calculées pour les cumuls moyens de chaque mois et pour l'année.

Les cartes suivantes montrent les résultats de ce traitement sous forme cartographique pour les cumuls annuels et mensuels des mois de janvier, février, mars, avril, mai, septembre, octobre, novembre et décembre :

Figure 8 : Distribution des pluies moyennes annuelles

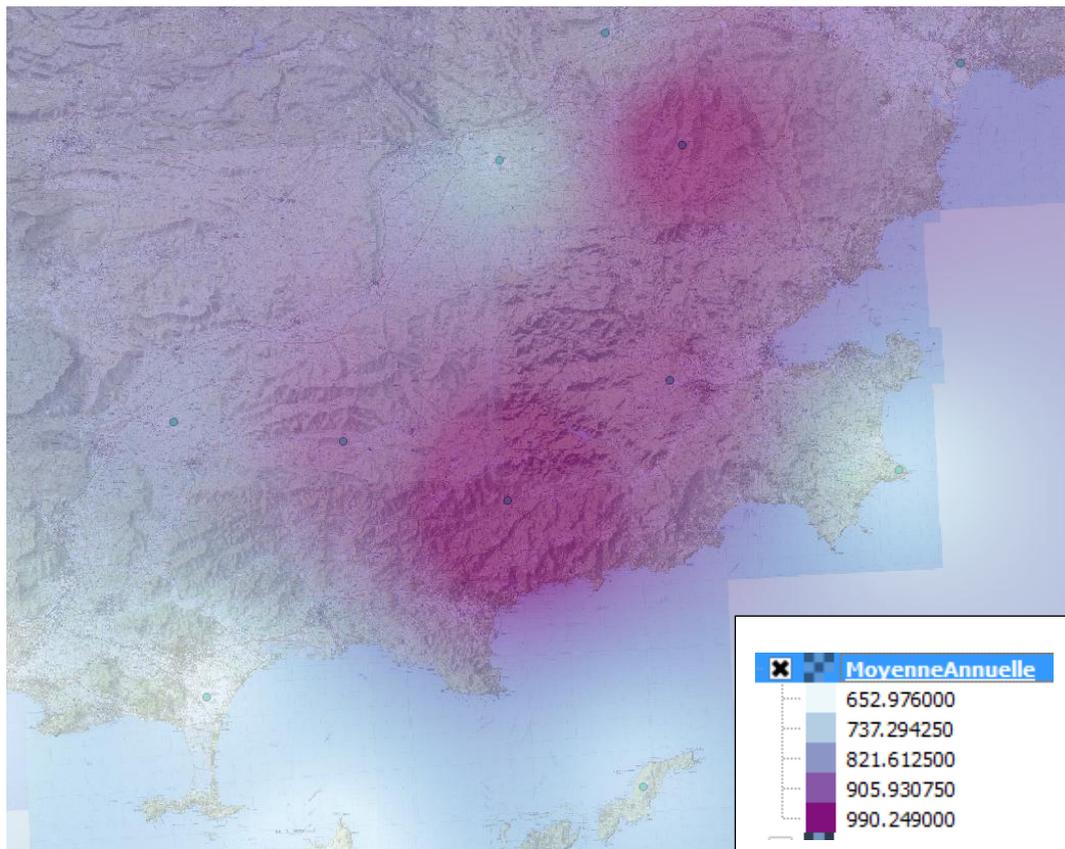


Figure 9 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de janvier

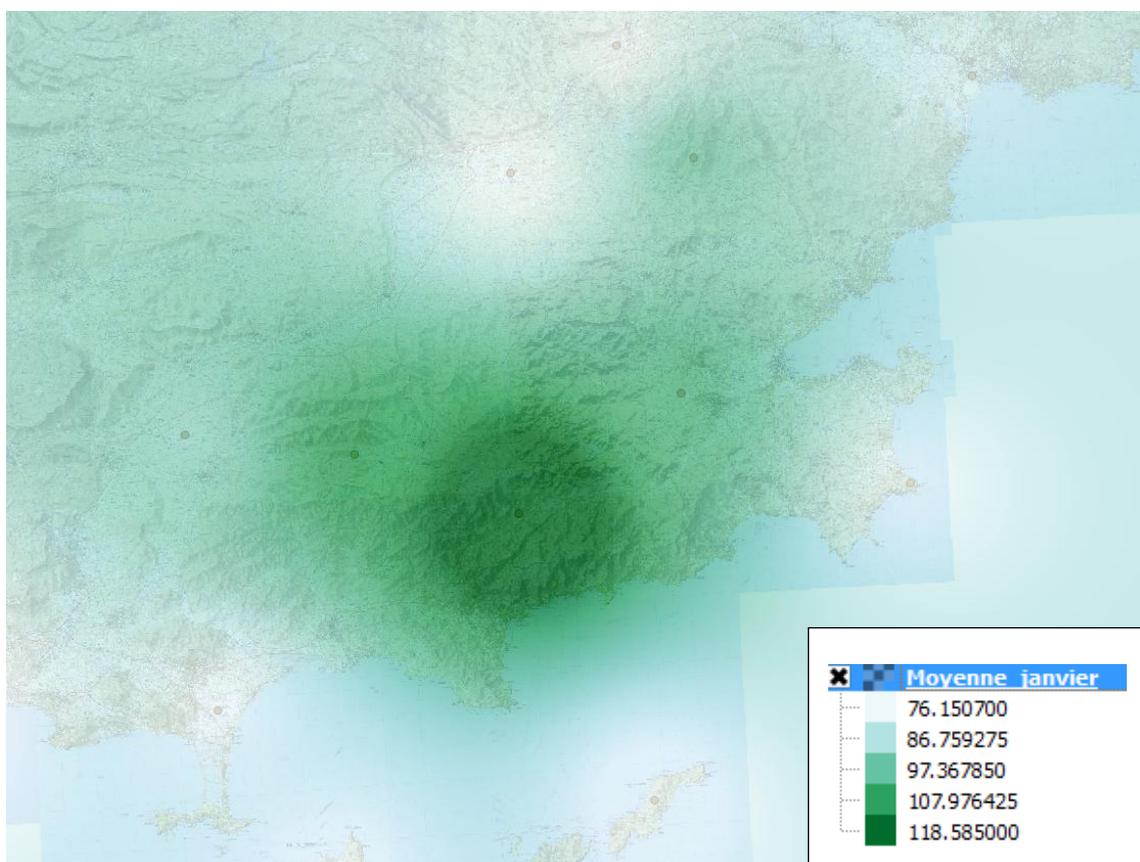


Figure 10 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de février

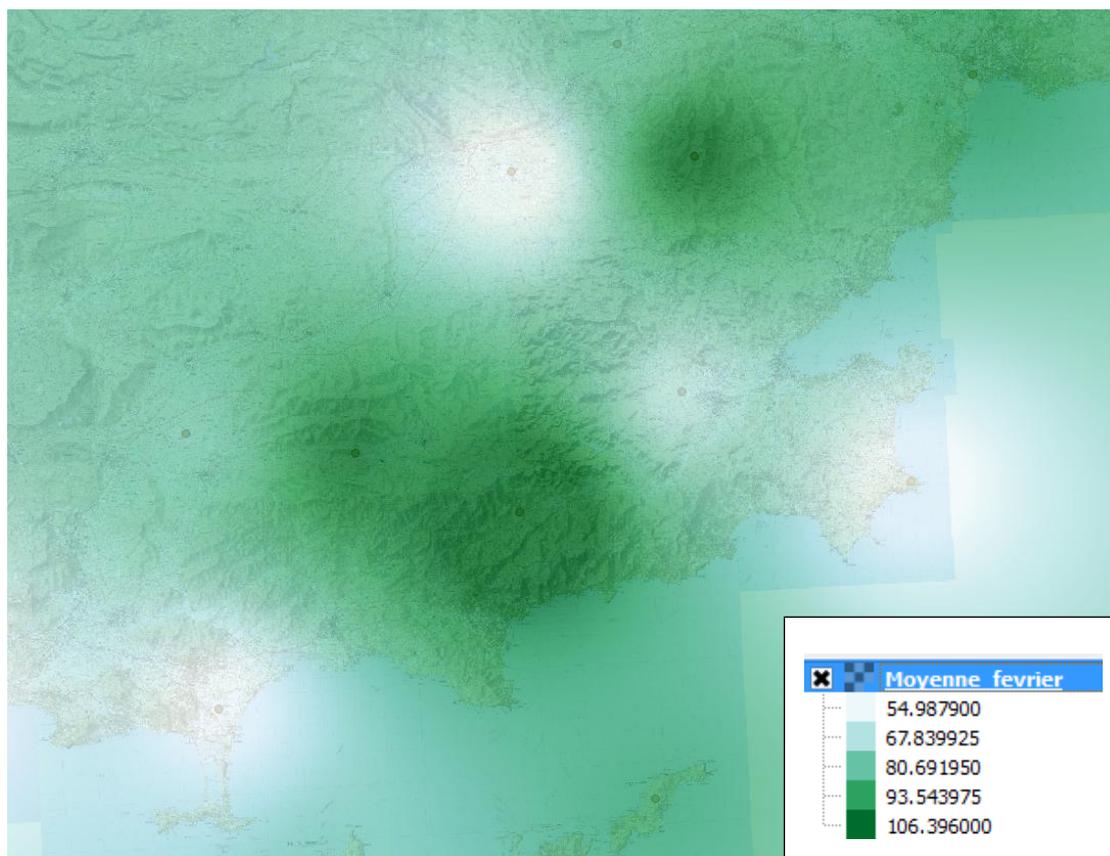


Figure 11 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de mars

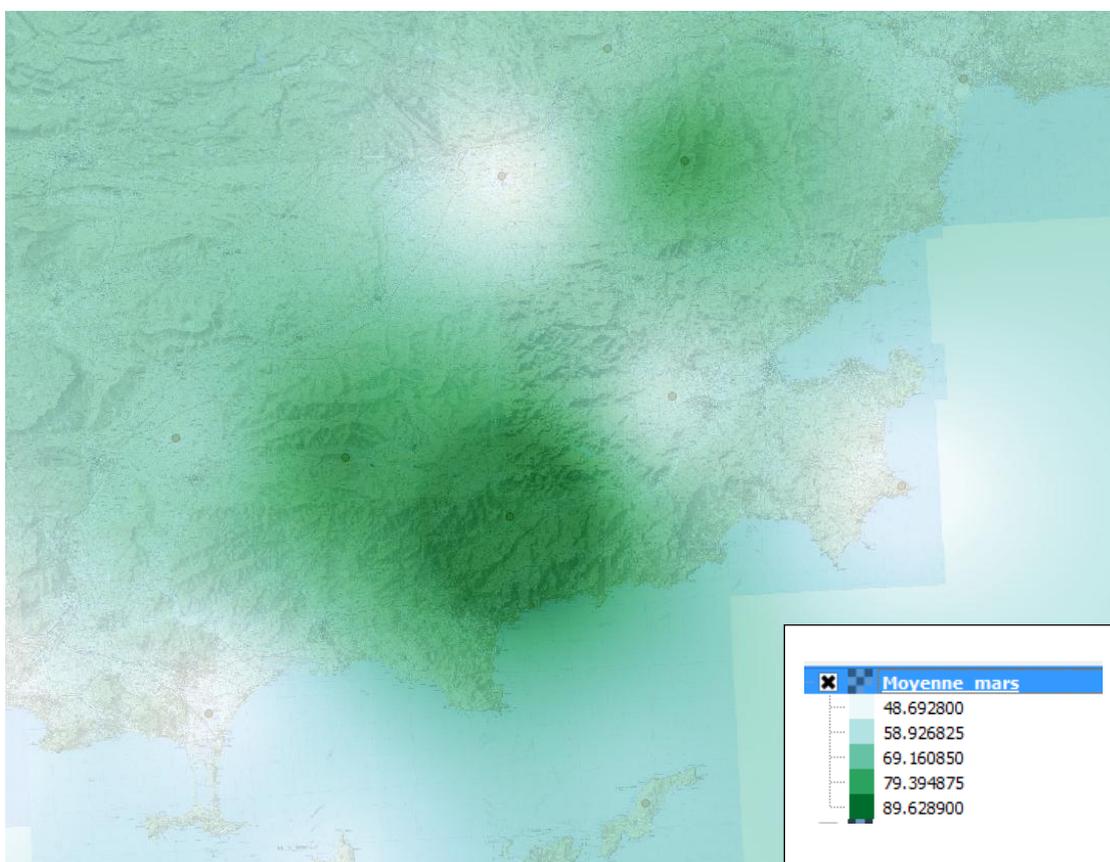


Figure 12 : Distribution des pluies moyennes mensuelles d'avril

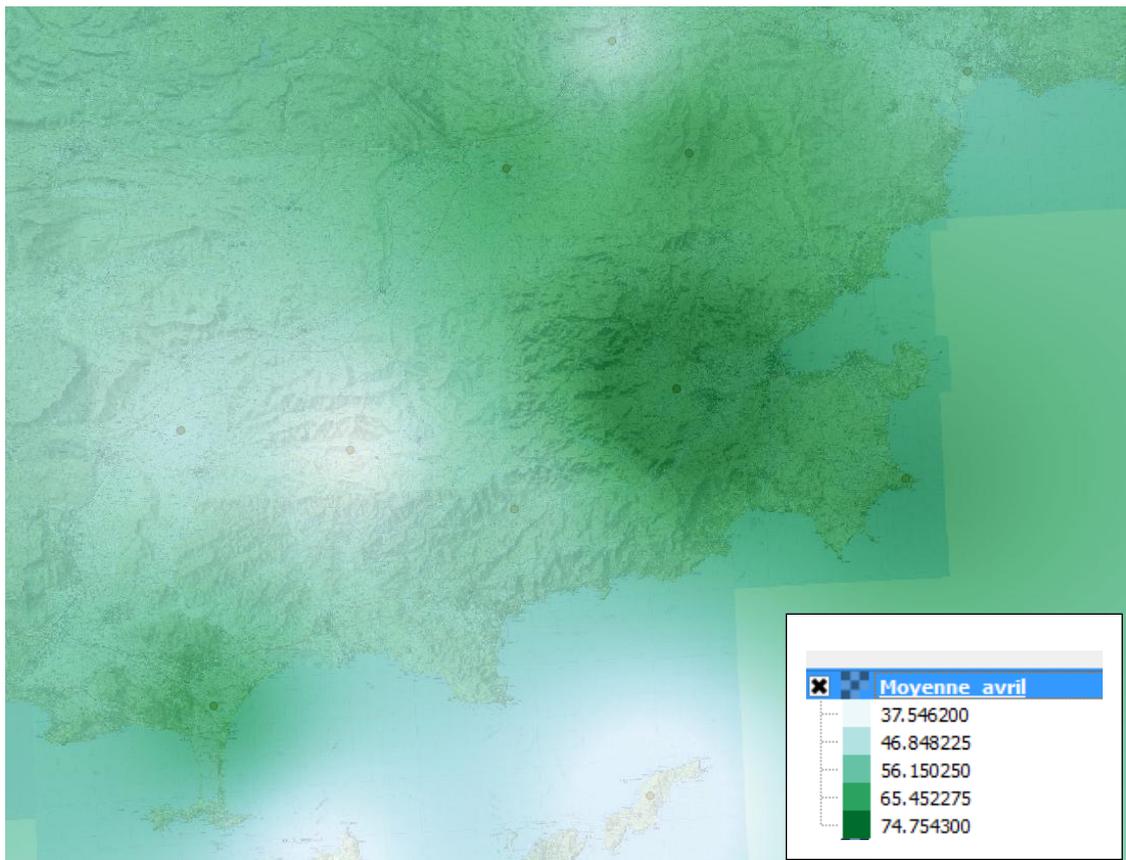


Figure 13 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de mai

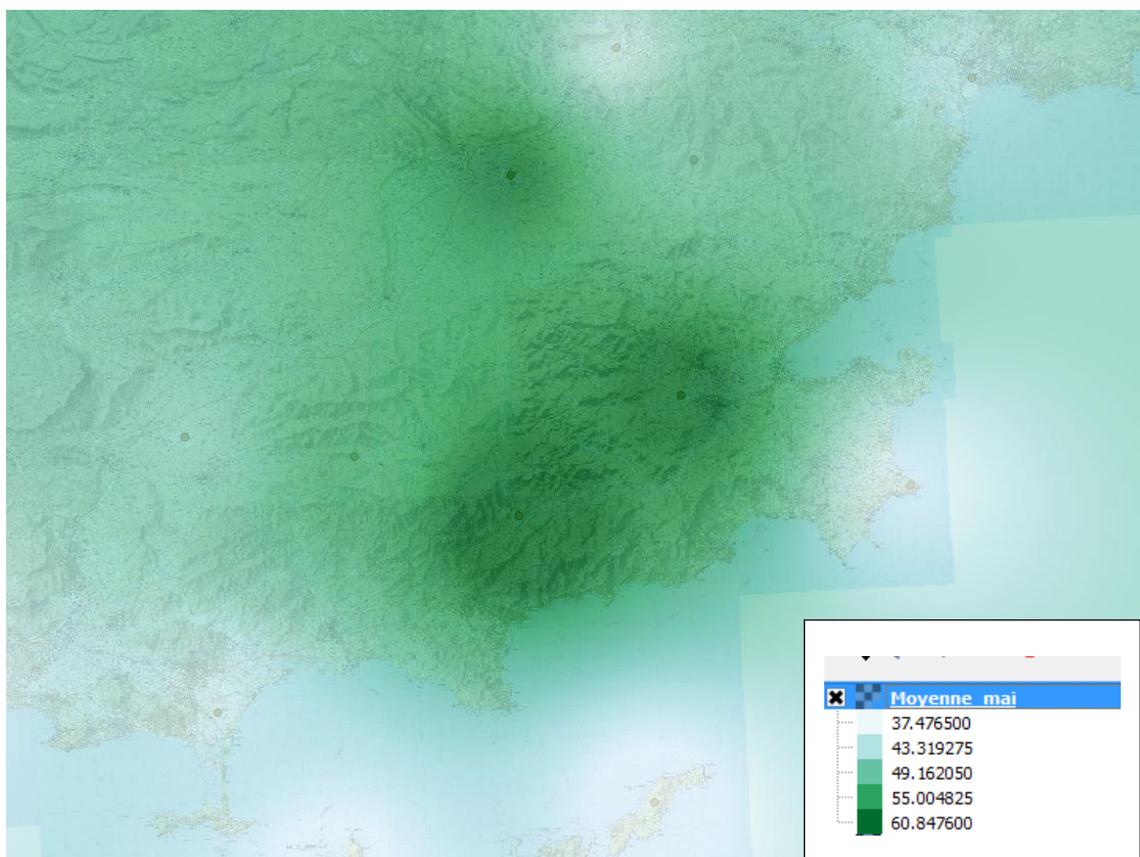


Figure 14 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de septembre

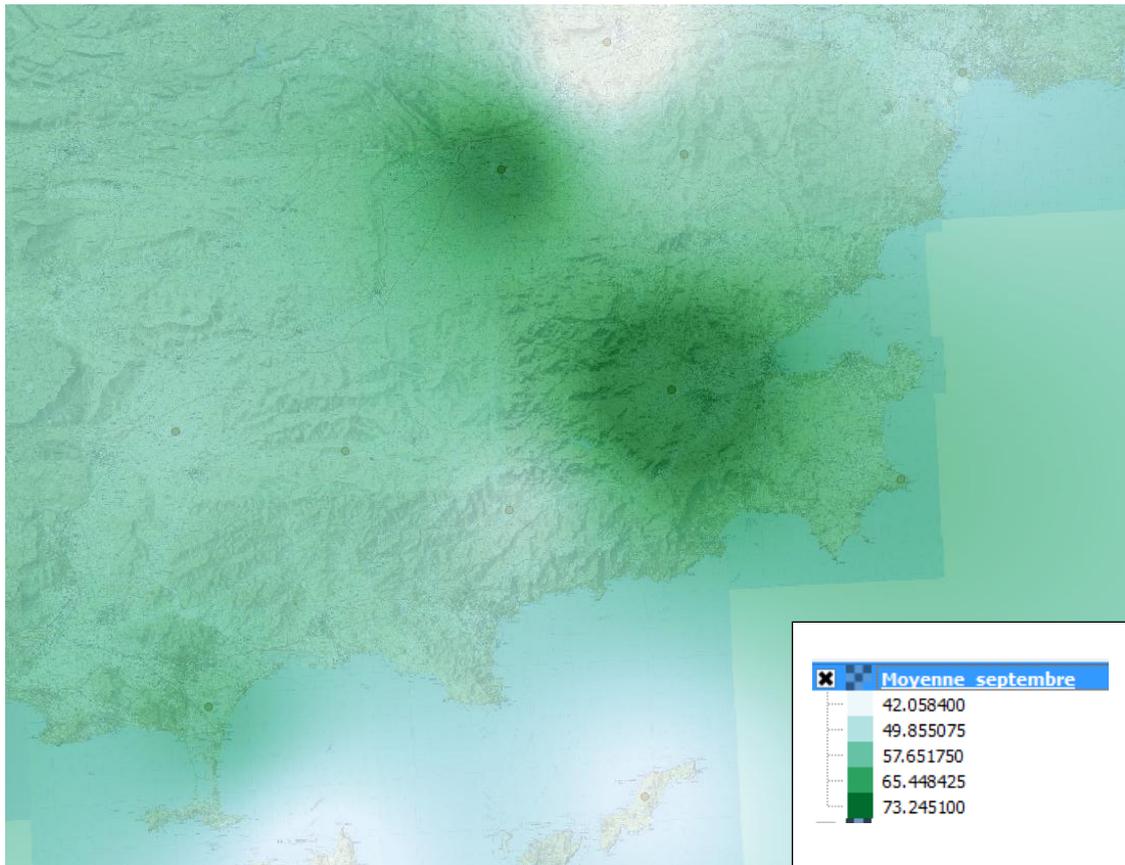


Figure 15 : Distribution des pluies moyennes mensuelles d'octobre

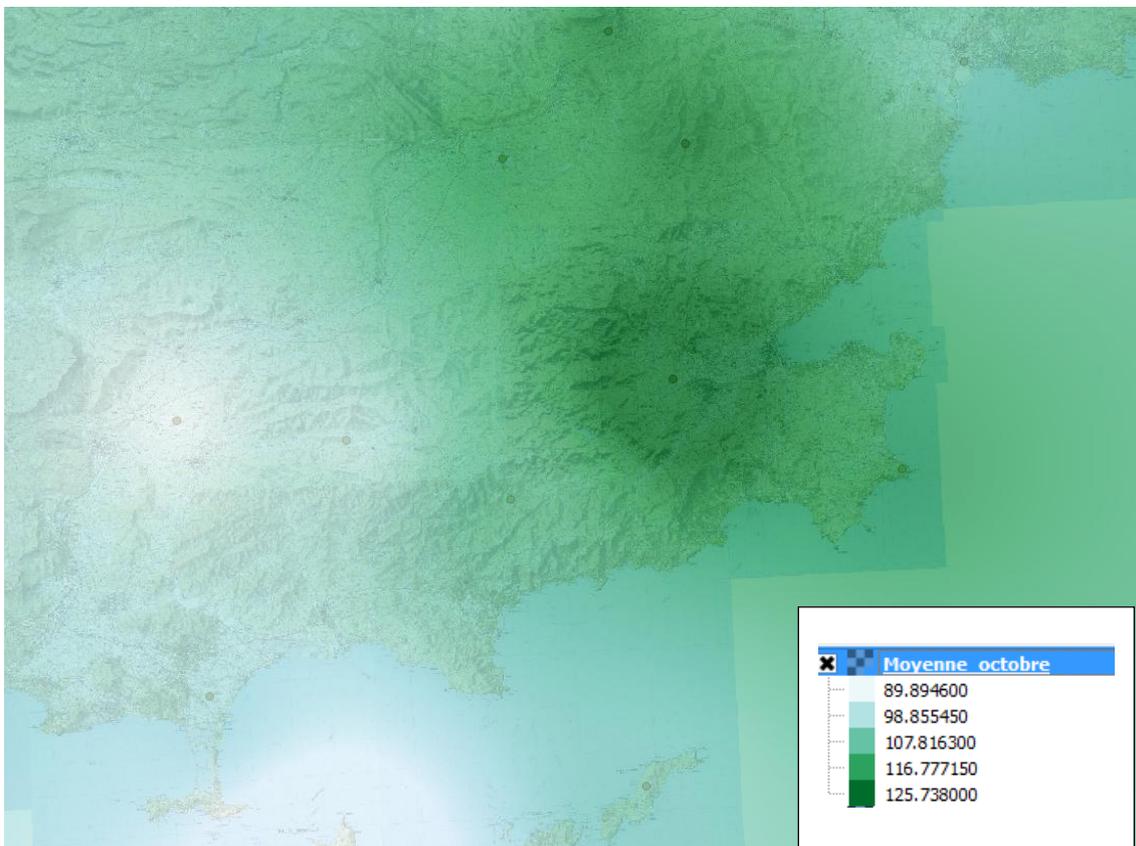


Figure 16 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de novembre

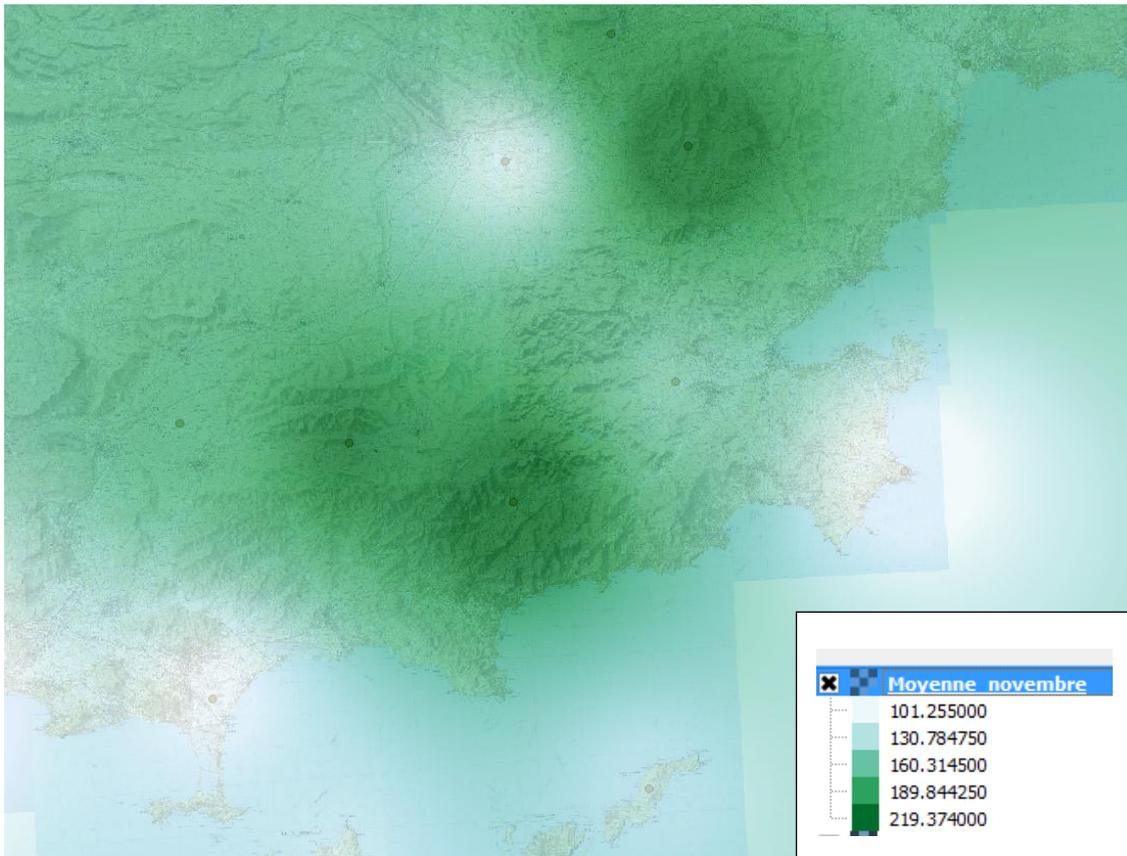
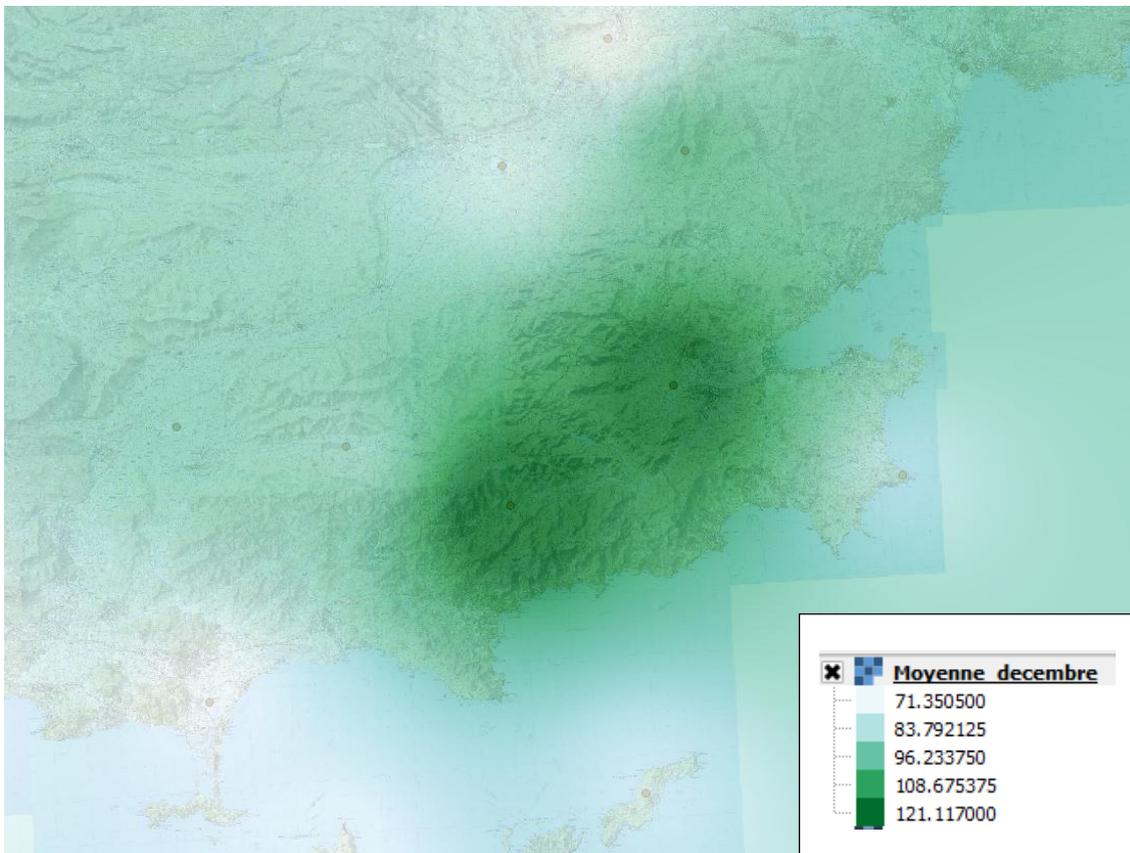


Figure 17 : Distribution des pluies moyennes mensuelles de décembre



Ces cartes successives semblent montrer une légère hétérogénéité des pluies moyennes mensuelles et annuelles à l'échelle du territoire de la CCGST : il convient toutefois de rester prudent sur les conclusions à apporter et il est nécessaire de parler plutôt de tendances que de certitudes, ceci d'autant plus que les échantillons utilisés sont (au moins pour certains) de faibles tailles, et donc fortement influencés par des événements marquants comme par exemple les très fortes pluies de janvier 2014 sur le secteur de Collobrières et La Londe-les-Maures qui pourraient expliquer des moyennes plus fortes sur ce secteur en janvier.

Il faut en outre noter que la palette de couleur est peu étendue, de sorte qu'un ton plus soutenu ne signifie que quelques millimètres de pluies supplémentaires !

On retiendra néanmoins les points suivants :

- Les cumuls de pluies d'hiver semblent un peu plus forts sur la partie ouest, alors que les pluies de printemps sont comparables sur tout le territoire (bien qu'un peu moins importantes sur la partie nord) et que les pluies d'automne paraissent les plus fortes sur la moitié est du territoire. Ce point est peut-être à relier aux directions dominantes de vents en fonction de la saison sur ce secteur ;
- Il apparaît toujours des cumuls de pluie moins forts sur les îles que sur le continent ;
- Il semblerait que le Massif des Maures marque une limite nette, avec des cumuls de pluies nettement plus faibles sur la Plaine des Maures et vers Draguignan qu'au niveau du territoire de la CCGST ;
- La presqu'île de Ramatuelle et Saint-Tropez paraît recevoir des cumuls en peu plus faibles que le reste du territoire de la CCGST, ceci en pratiquement toutes les saisons ;
- En termes de cumul annuels, ces tendances se traduisent par des valeurs plus fortes aux abords du Massif des Maures avec des valeurs comparables sur la baie de Cavalaire et sur le Nord de Sainte-Maxime, avec un cumul sensiblement moins important sur la presqu'île de Ramatuelle et Saint-Tropez et un peu moins important sur le secteur de Grimaud et de La Garde-Freinet. On observe un cumul nettement plus faible sur la Plaine des Maures, et plus faible encore sur le secteur d'Hyères, probablement par simple effet du relief très peu marqué sur ce secteur.

Bien qu'il soit impossible d'établir des corrélations à partir de ces éléments, les tendances paraissent toutefois assez fortes, malgré les écarts liés à la faible taille des échantillons traités.

En termes de valeurs, il paraît acceptable de retenir pour l'ensemble du territoire de la CCGST des moyennes caractéristiques de secteurs homogènes en fonction du relief, de la distance à la côte et de la longitude.

3.2.8 Traitement des données de pluies journalières

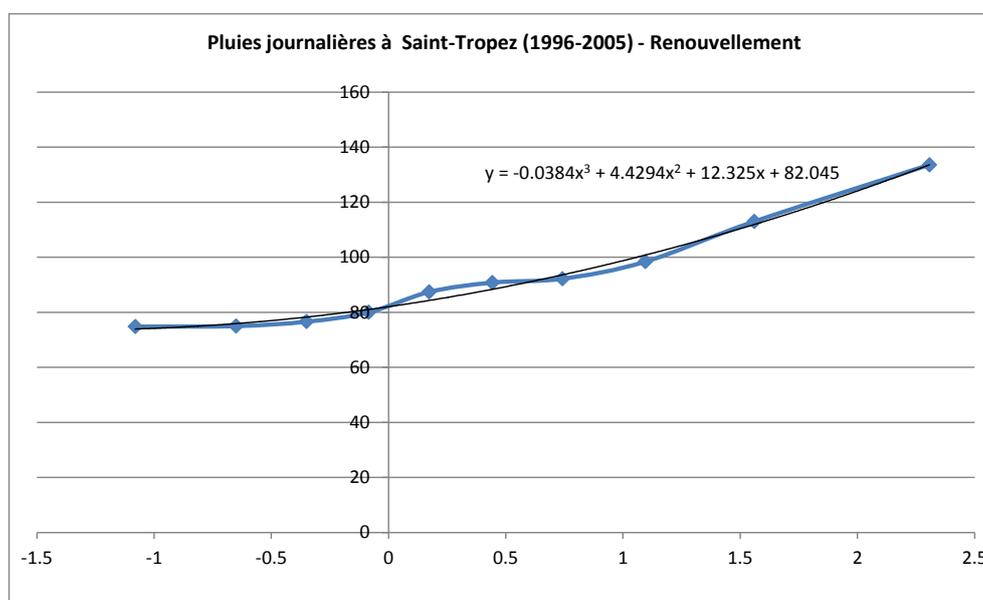
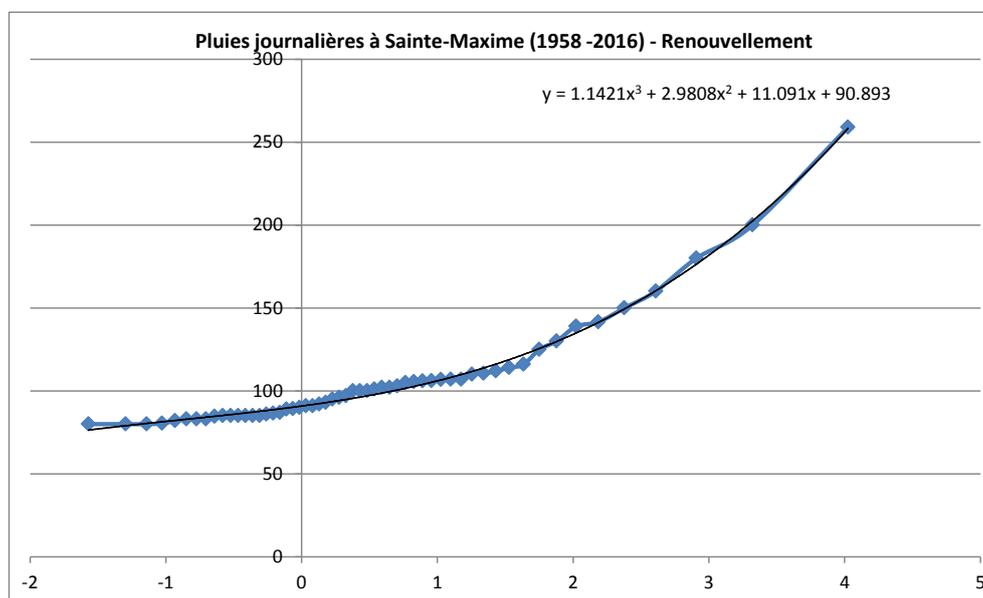
Pour l'analyse des pluies journalières, deux méthodes complémentaires ont été employées :

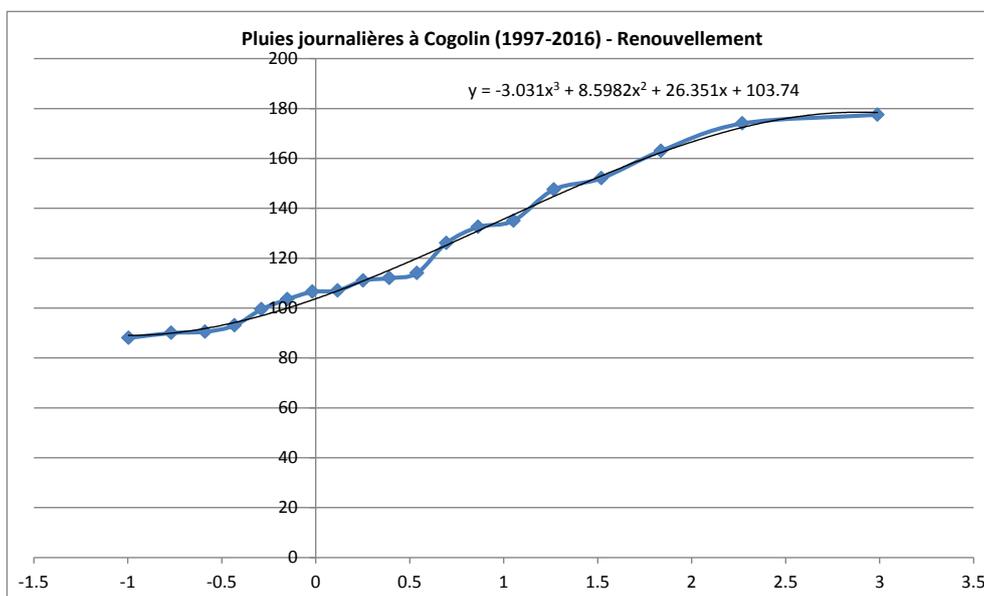
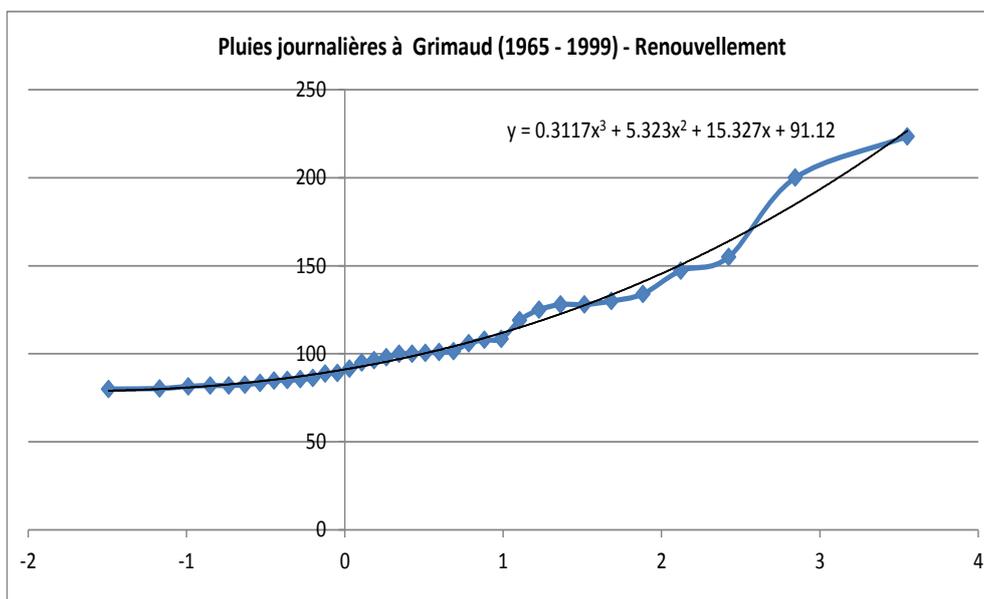
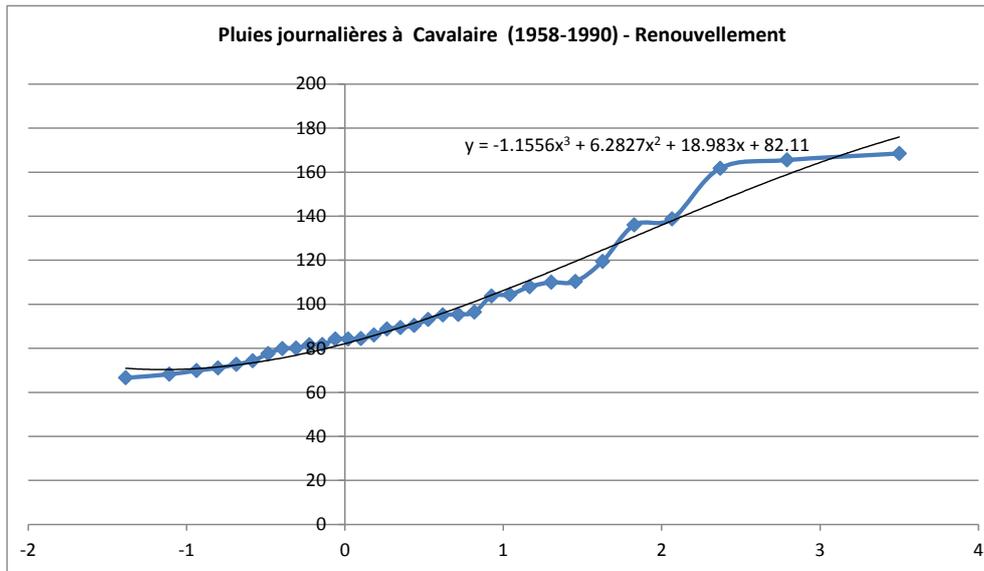
- La première méthode, similaire à celle utilisée pour les pluies mensuelles et annuelles, consiste à établir un tableau de synthèse des pluies journalières de diverses périodes de retour statistique et à cartographier une interpolation à partir de ces valeurs au niveau de postes pluviométriques autour du golfe de Saint-Tropez ;
- La deuxième méthode consiste à comparer les pluies journalières enregistrées au niveau de divers postes pour une même série d'événements, ce qui permet non

seulement de prendre en compte d'éventuels facteurs de saisonnalité mais aussi de s'affranchir des effets liés à l'homogénéisation des séries statistiques : les échantillons servant au calcul des valeurs statistiques ne couvrent pas la même durée ni la même période de sorte que des événements très forts peuvent influencer les statistiques sur les postes où ils sont pris en compte alors, qu'ils n'apparaissent pas dans d'autres...

Concernant les pluies journalières sur des postes du territoire de la CCGST (Sainte-Maxime, Saint-Tropez, Cavalaire, Grimaud et Cogolin, avec des mesures disponibles depuis 1958 pour Sainte-Maxime et Cavalaire), une sélection a été opérée sur des événements marqués par un cumul dépassant 60 mm dans le but d'appliquer un ajustement par la méthode du Renouveau. Le choix de cette méthode se justifie par la taille limitée des échantillons, un ajustement classique (par exemple par loi de Gumbel) sur les valeurs maximales de chaque année étant de mauvaise qualité.

Les graphiques suivants montrent les ajustements obtenus par cette méthode au niveau des cinq stations du territoire de la CCGST :





On note des ajustements relativement bon, avec cependant une évidente mauvaise estimation de la période de retour statistique des événements les plus forts pour Cavalaire, Grimaud et surtout Cogolin : pour cette dernière station, l'ajustement est faussé par une forte sous-estimation de la période de retour du ou des deux événements les plus forts pris en compte, induisant un « aplatissement » de l'ajustement et probablement une surestimation de la pluie journalière de fréquence décennale.

Il en résulte que les pluies journalières ne doivent être estimées à partir de ces ajustements que pour des périodes de retour ne dépassant pas 10 à 20 ans. Pour les événements plus rares, il paraît meilleur d'utiliser un ratio appliqué à la pluie journalière de fréquence décennale, qui est généralement de l'ordre de 1,5 à 1,65 pour la fréquence centennale : cette valeur maximale est retenue ici à titre indicatif.

Le tableau suivant résume les valeurs obtenues par ces ajustements et l'application d'un ratio maximal de 1,65 pour estimer la fréquence centennale :

Tableau 5 : Ajustement statistique sur les pluies journalières (Renouvellement)

Site	Pluie journalière pour une période de retour de :					1,65 * P10	Gradex
	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans		
Sainte-Maxime	118.1	144.0	180.1	247.4	316.2	237.5	39.8
Saint-Tropez	110.4	131.8	156.7	195.3	228.7	217.4	36.5
Cavalaire	120.8	143.5	163.6	183.2	189.9	236.7	39.7
Grimaud	127.1	156.1	191.8	250.5	304.6	257.6	43.2
Cogolin	152.4	172.0	178.4			283.9	47.6

Dans ce tableau, les valeurs en fréquences cinquantennale et centennale sont données à titre indicatif et jugés peu fiables ; étant aberrantes, elles ne sont pas calculées pour Cogolin.

On constate néanmoins une certaine cohérence et des valeurs comparables pour la pluie journalière de fréquence décennale, avec toutefois des valeurs plus fortes pour Cogolin qui pourrait être lié au caractère récente de cette station, et qui mesure donc les pluies sur les deux dernières décennies probablement marquées par une pluviométrie plus intense qu'au cours des décennies antérieures ; il faut aussi retenir que ces ajustements proviennent de séries très lacunaires et parfois très courtes, de sorte que cette analyse doit être complétée par d'autres approches.

Tout d'abord, ces valeurs ont été comparées à celles issues d'ajustements statistiques par Loi GEV présentées par Météo France sur diverses stations de la région :

Tableau 6 : Ajustement statistique par loi GEV sur des pluies journalières de la région

Site	Période de retour				
	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Hyères	97.8	116.9	135.6	160.4	179.4
Gonfaron	108.9	124.6	138.2	153.9	164.4
Bormes-les Mimosas	125.6	146.1	165.8	191.4	210.7

Il existe par ailleurs des synthèses nationales qui, bien qu'assez anciennes (datant de 1980), donne des indications quant aux valeurs statistiques de hauteurs de précipitations journalières. Ces éléments sont présentés sous forme cartographique et sous forme de tableaux. Ils indiquent, pour l'ensemble du secteur du Golfe de Saint-Tropez, une pluie décennale journalière de l'ordre de 130 mm, avec toutefois des valeurs estimées au niveau de postes pluviométriques, comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau 7 : Ajustement statistique de pluies journalières de la région (< 1980)

Station	Pluie journalière décennale	Pluie journalière centennale
Le Luc	116	161
Porquerolles	83	113
Cap Camarat (Ramatuella)	98	135
Toulon	91	125

Bien que trop anciennes pour être jugées représentatives, ces estimations permettent de confirmer d'une part des pluies plus faibles sur les îles que sur le continent, d'autre part une assez nette hétérogénéité des pluies sur la région d'étude au niveau des pluies journalières comme des pluies mensuelles et annuelles. Il est en outre probable que la dernière ou les deux dernières décennies ont été marquées par une pluviométrie plus forte que durant les décennies antérieures, avec des événements intenses qui paraissent plus fréquents : les valeurs statistiques du passé sont ainsi nettement plus faibles que celles d'aujourd'hui. **On retiendra enfin que ces valeurs statistiques, pourtant employées en appliquant la méthode CRUPEDIX et la formule de Caquot suivant l'instruction technique IT1977 de dimensionnement des réseaux d'assainissement pluvial, sont définitivement obsolètes et très inférieures aux valeurs de référence à utiliser.**

Une autre source de données a été utilisée, à savoir les pluies de 24 heures telles que calculées par application des coefficients de Montana calculés par Météo France, ajustement statistique (par Renouvellement et loi GEV, avec estimation d'un intervalle de confiance) par Météo France et par la méthode SHYREG par l'IRSTEA : il ne s'agit pas des pluies journalières (mesurée entre 6h et 6h le lendemain en général) mais de cumuls de pluies sur des périodes glissantes de 24 heures. Les valeurs issues de ce traitement sont donc un peu plus fortes que les pluies journalières. Le tableau suivant résume les valeurs de pluies de 24 heures sur plusieurs sites de la région :

Tableau 8 : Pluies statistiques de 24h

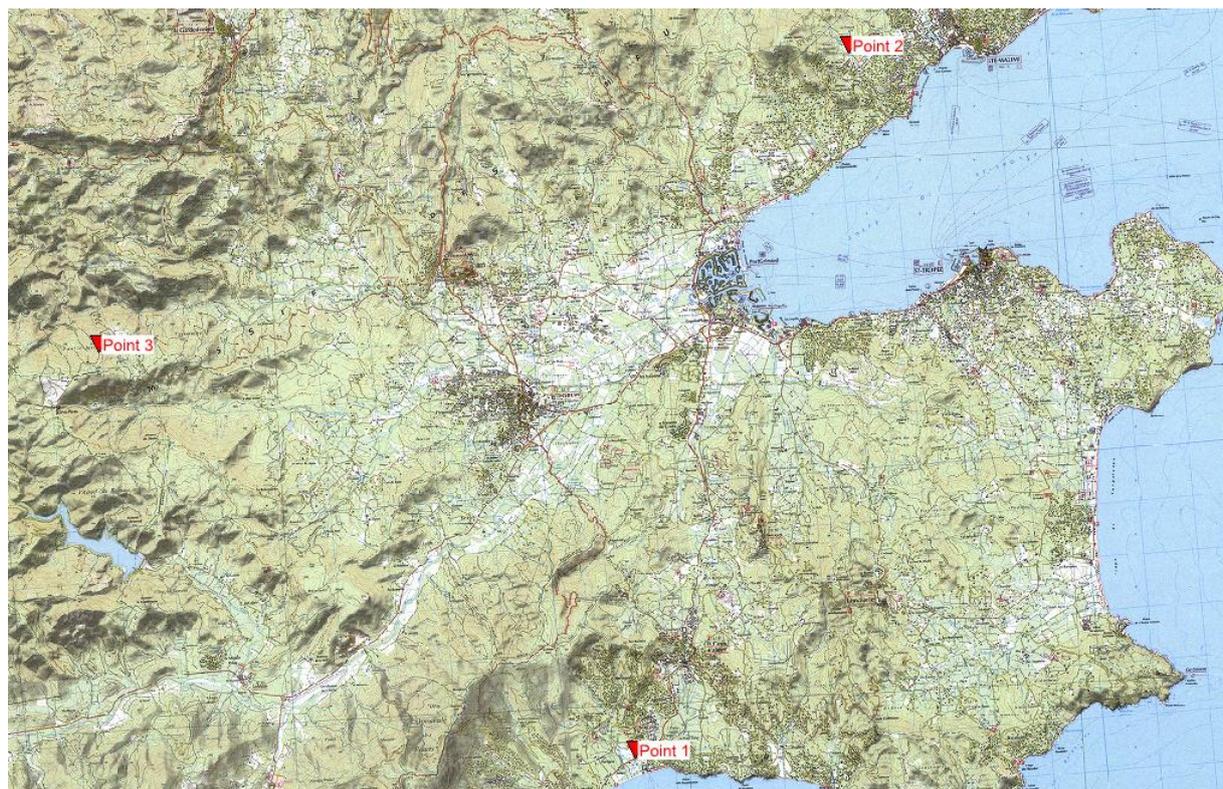
Site	Méthode	Période de retour				
		5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Le Luc	Montana	115	142	176	218	259
Hyères		128.5 / 111.6	157.9 / 134.1	191.5 / 158.5	245.8 / 196.5	297.0 / 228.1
Fréjus		107	126	145	197	228
Toulon		104	123	141	165	184
Le Luc	Loi GEV	108-134	122-161	136-187	153-221	215-293
Hyères		97-122	111-149	125-175	142-208	208-297
Fréjus		97-122	111-149	125-175	142-208	198-245
Toulon		100-128	116-157	132-186	152-224	186-225
1 Ramatuella	SHYREG	112.8	132.5	155.1	190.2	219.3
2 Ste-Maxime		115.7	135.7	158.5	193.8	223.6
3 Verne		135.6	160.9	189.6	232.2	266.6

Il est à noter que les hauteurs de pluies calculées avec les coefficients de Montana dépendent du mode de calcul de ces coefficients : par exemple pour Hyères, les deux valeurs indiquées

sont calculées à partir des coefficients calculés par Météo France pour des durées comprises entre 6 minutes et 24 heures pour la première et entre 6 minutes et 48 heures pour la deuxième ! Les écarts sont considérables pour des durées élevées (24 heures) et des événements rares, traduisant un ajustement d'assez mauvaise qualité. Ainsi un ajustement par loi de Gumbel donne aussi des valeurs de quantiles de pluie sensiblement différents de ceux fournis par la Loi GEV et la méthode du Renouvellement. En d'autres termes, les quantiles provenant de ces données (portant « officielles » !) sont approximatives.

Les points 1 à 3 pour la méthode SHYREG utilisés ici sont localisés sur la carte suivante :

Figure 18 : Localisation des points SHYREG utilisés



Météo France a mené des travaux d'analyse de pertinence de diverses méthodes d'estimation des quantiles de pluies peu fréquentes, en comparant notamment les valeurs obtenues par loi GEV, par la méthode du Renouvellement et par la méthode SHYREG. Dans le cadre de cette analyse, des cartes de synthèse nationale ont été diffusées et sont partiellement reproduites ci-après. On montre ci-après des cartes de synthèse nationale des pluies journalières de fréquences décennale et centennale calculées par la loi GEV puis par la méthode du Renouvellement, suivie de cartes pour les pluies de 24h de mêmes périodes de retour estimées par la méthode SHYREG :

Figure 19 : Pluies journalières décennales et centennales calculées par loi GEV

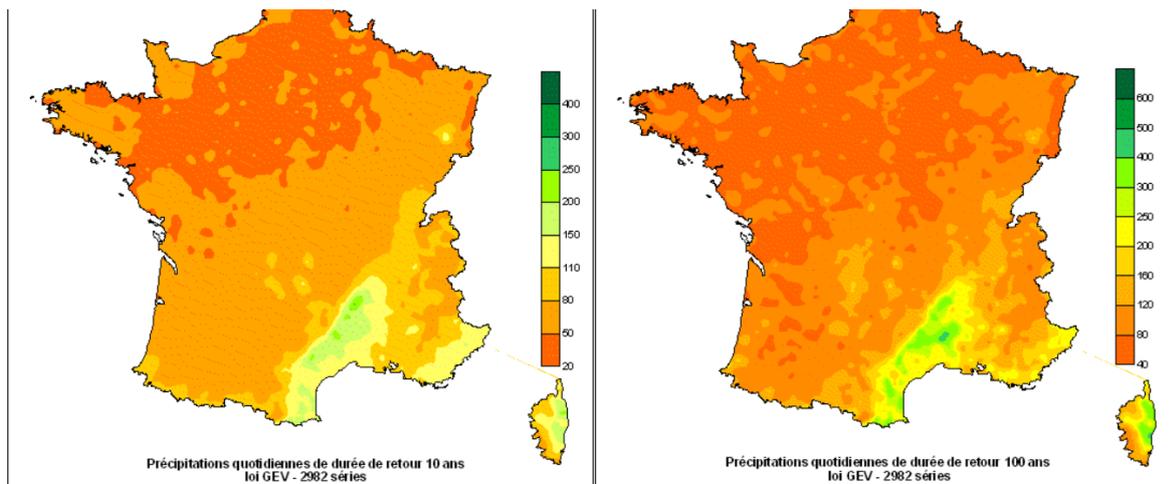


Figure 20 : Pluies journalières décennales et centennales calculées par Renouveau

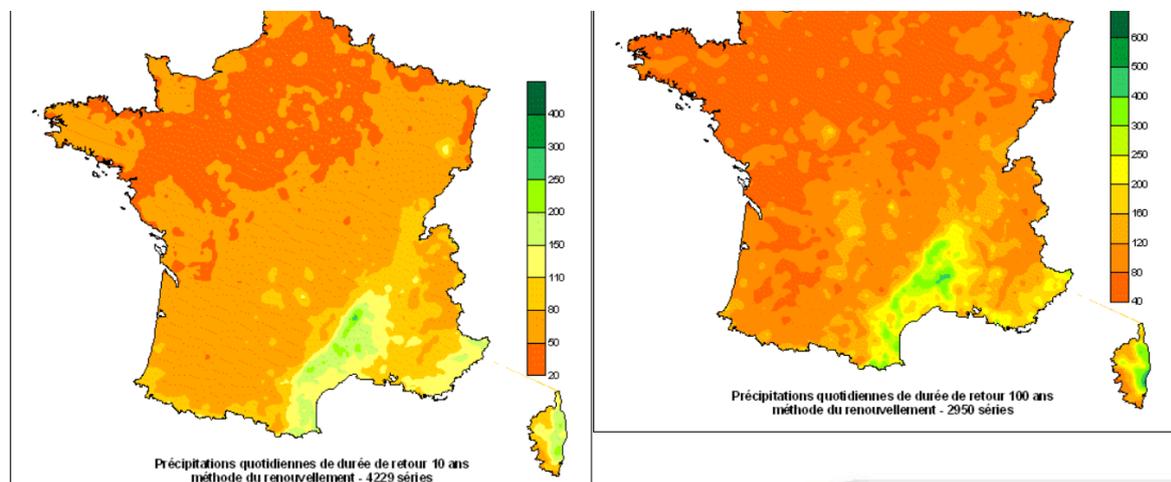
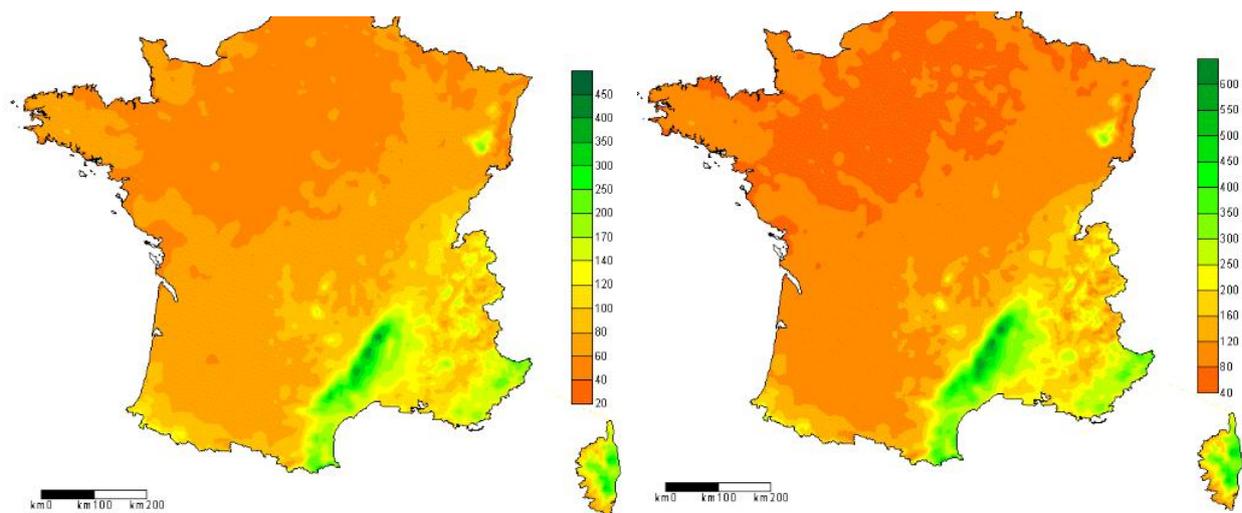


Figure 21 : Pluies de 24h décennales et centennales calculées par SHYREG



Sur le secteur du Golfe de Saint-Tropez, ces cartes indiquent les aspects suivants :

- Pour la fréquence décennale, la loi GEV donne un caractère homogène de la pluie journalière, avec des valeurs un peu plus forte le long de la côte selon un gradient orienté Sud-Est / Nord-Ouest marqué. Ce point est confirmé par la méthode du Renouveaulement avec cependant une influence du relief et des différences d'un secteur à l'autre de la côte d'Azur. La méthode SHYREG accentue le rôle du relief mais donne aussi des valeurs plus fortes que les deux autres approches sur le secteur du Golfe de Saint-Tropez.
- Pour la fréquence centennale, la loi GEV et la méthode du Renouveaulement montrent un rôle sensible du Massif des Maures, avec des cumuls journaliers plus importants sur la côte que sur la plaine des Maures. La méthode SHYREG indique une tendance comparable mais donne en outre des valeurs sensiblement plus fortes.

Météo France considère que les quantiles SHYREG sont globalement supérieurs à ceux obtenus par loi GEV ou la méthode du Renouveaulement et sont surestimés, surtout pour les fréquences faibles, ceci même si elle prend en compte l'effet du relief (qui est peu intégré par Météo France dans sa méthode). Il est en outre à noter que la méthode SHYREG s'appuie sur des données couvrant une faible durée d'observation et ne produit pas d'intervalle de confiance.

A titre indicatif, selon ces cartes de synthèse, les ordres de grandeur des pluies journalières sur le secteur du Golfe de Saint-Tropez seraient de :

- En fréquence décennale : de 110 à 150 mm pour Météo France et de 120 à 200 mm pour SHYREG ;
- En fréquence centennale : de 160 à 250 mm pour Météo France et de 200 à 350 mm pour SHYREG.

Un tel écart en utilisant pourtant les mêmes données brutes n'est pas vraiment rassurant ; il pourrait toutefois provenir d'un effet d'homogénéisation des données, car un écart beaucoup moins grand apparaît quand on compare des valeurs calculées et non des cartes de synthèse, dont il faut alors se méfier...

On retiendra alors simplement de cette analyse conduite par Météo France que :

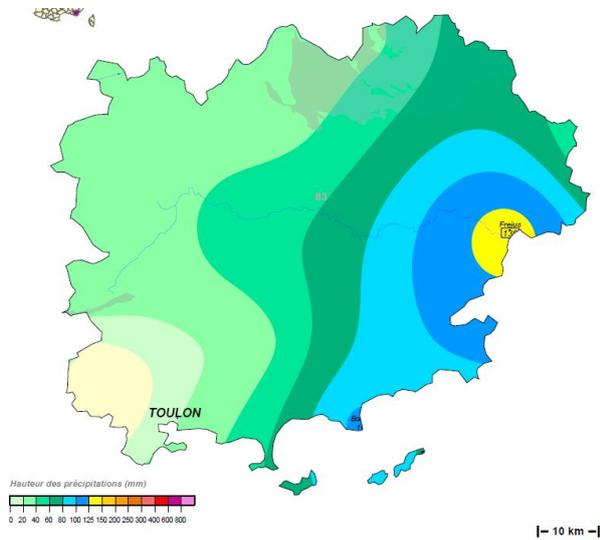
- Les quantiles de pluie sur des durées importantes (de l'ordre de 24h) et pour des périodes de retour élevées (de l'ordre de 100 ans) estimés par la méthode SHYREG sont probablement un peu surestimés, mais cohérents dans les autres situations ;
- Il existe un effet de régionalisation ou de distribution spatiale hétérogène des pluies journalières sensible surtout pour les fortes périodes de retour sur le secteur du Golfe de Saint-Tropez.

L'analyse des valeurs de quantiles calculés par la méthode SHYREG au niveau des trois points sélectionnés sur le territoire de la CCGST confirme cet effet pour les pluies journalières, avec une valeur plus forte d'environ 20% dans le Massif des Maures que sur la côte. Elle montre aussi des valeurs plus faible de 2 ou 3% sur le secteur de Ramatuelle que sur le secteur de Sainte-Maxime.

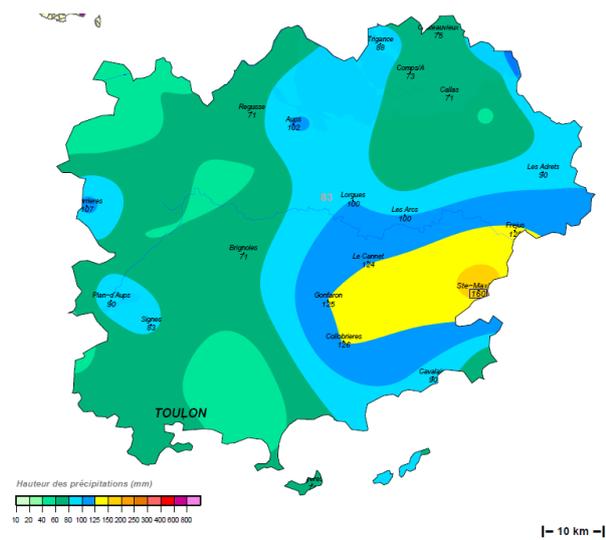
Afin de compléter cette analyse sur les pluies journalières, nous avons analysés la distribution spatiale des pluies lors d'événements survenus ces dernières décennies afin de

confirmer ou d'infirmer cette tendance de « régionalisation » des pluies sur le territoire de la CCGST, voire d'effet de la saison. Cette analyse a été faite à partir de cartes de synthèse établies par Météo France pour les événements marquants de la région :

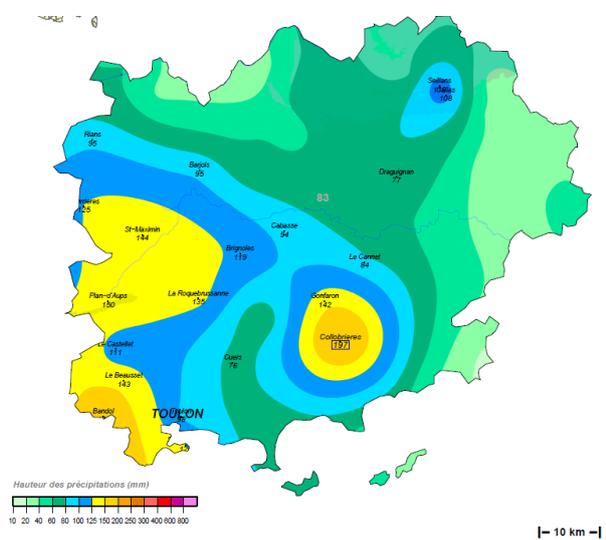
Figure 22 : Cartes des pluies journalières (ou de 2 jours) lors d'événements climatiques



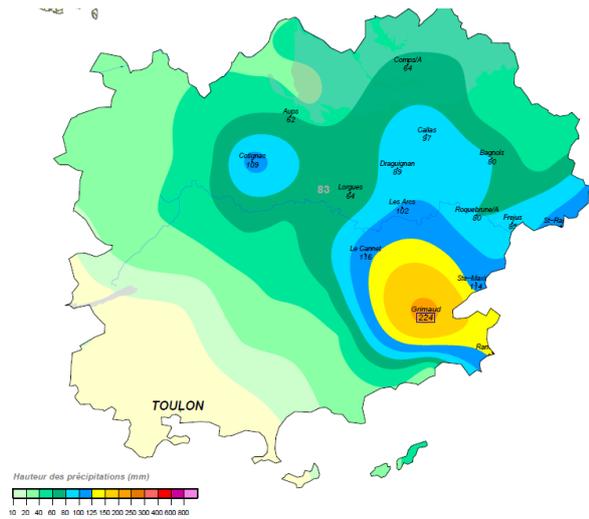
28 septembre 1932



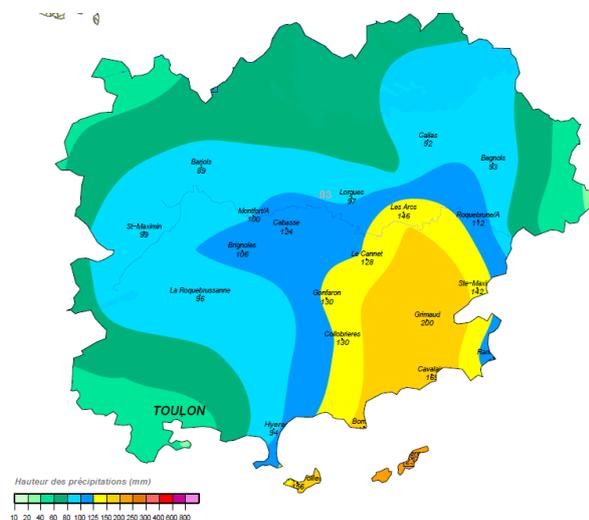
1^{er} décembre 1959



26 et 27 décembre 1972

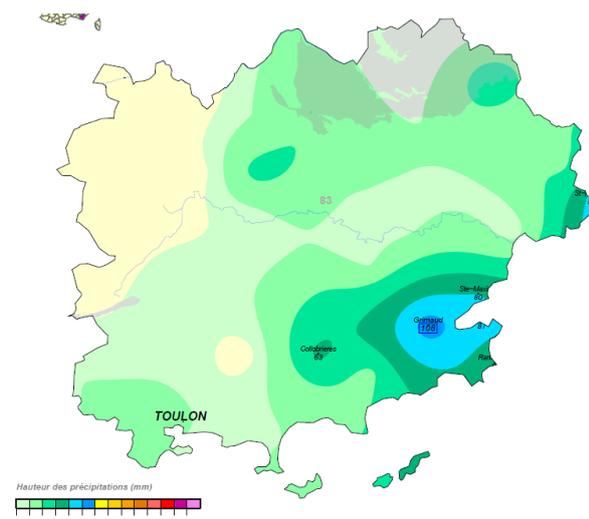


18 juillet 1976



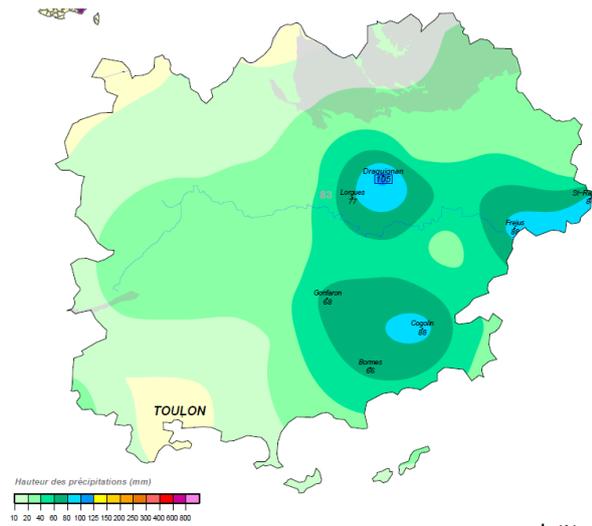
27 août 1980

[- 10 km -]

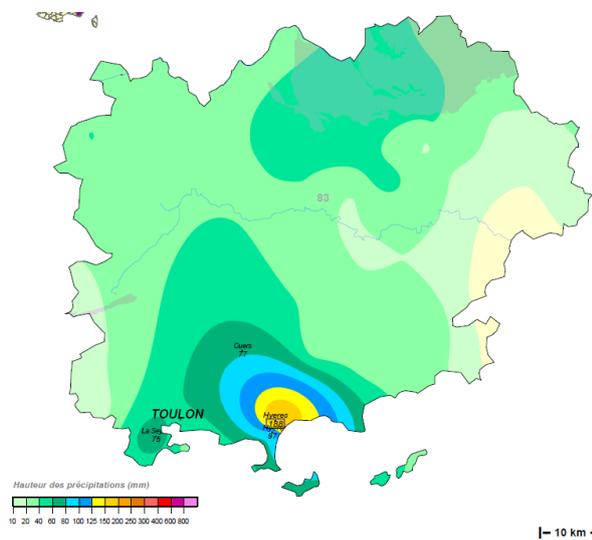


22 septembre 1996

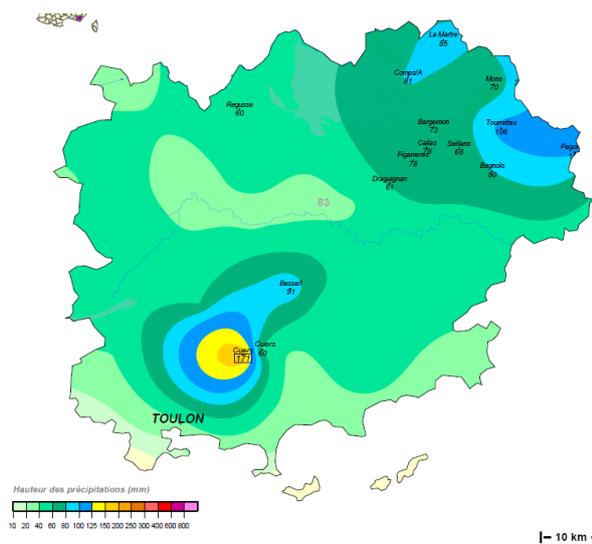
[- 10 km -]



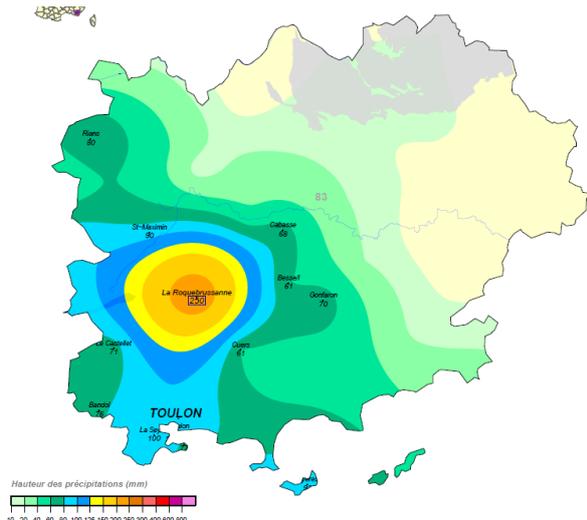
13 juillet 2002



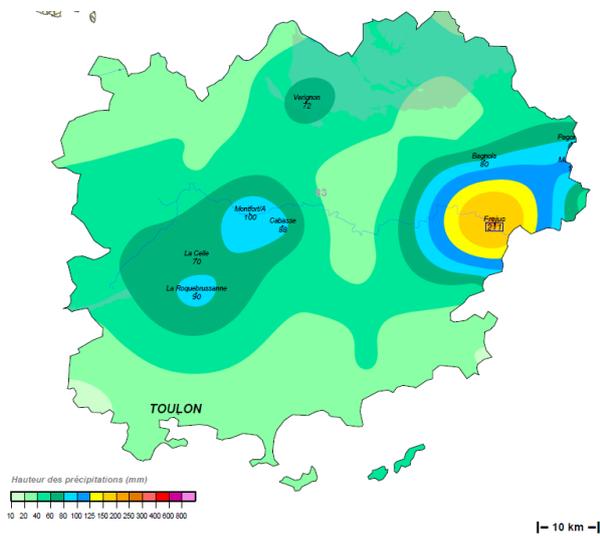
17 mai 2005



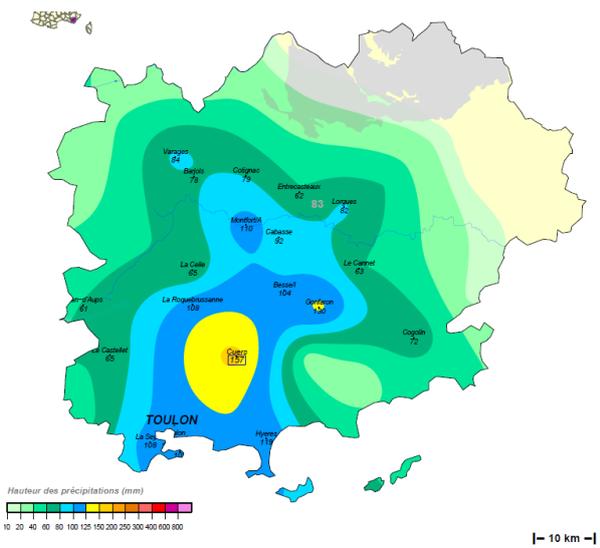
2 décembre 2005



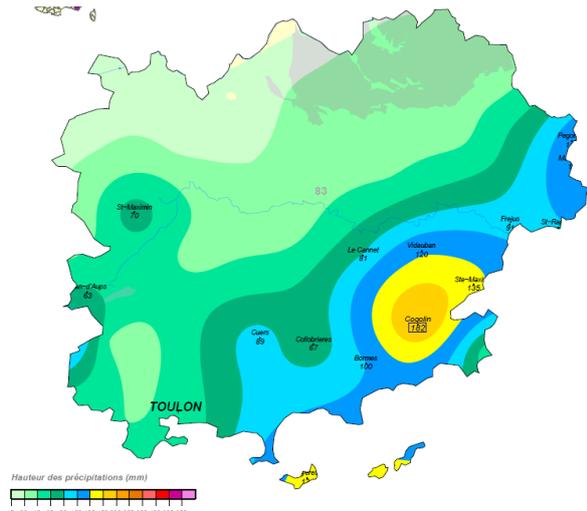
27 janvier 2006



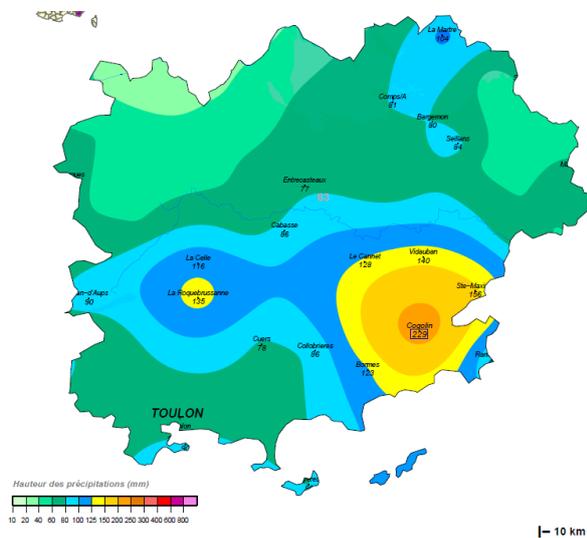
2 décembre 2006



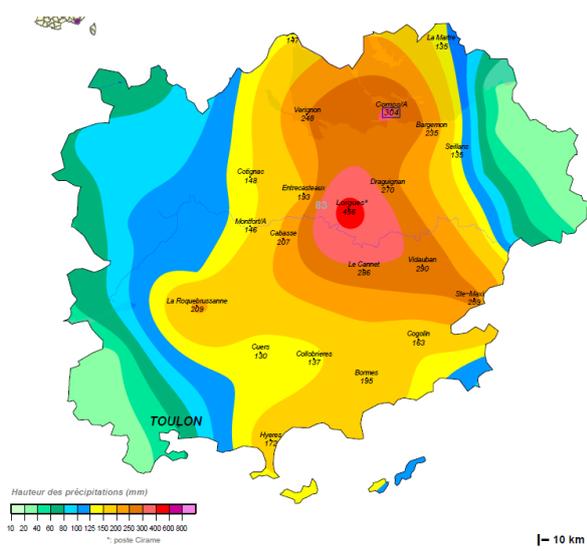
8 octobre 2008



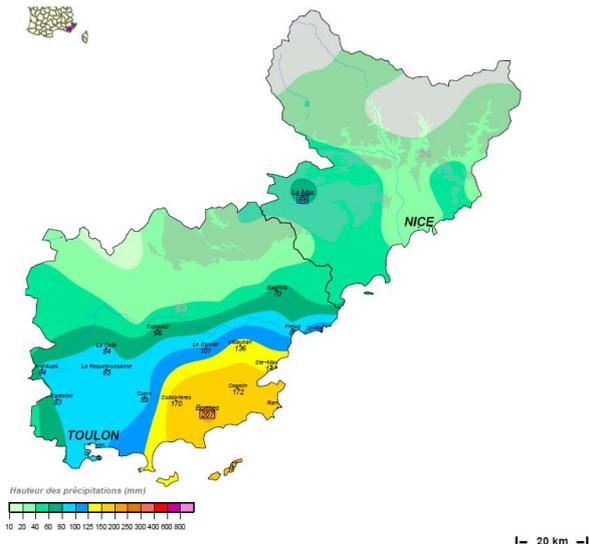
18-19 septembre 2009



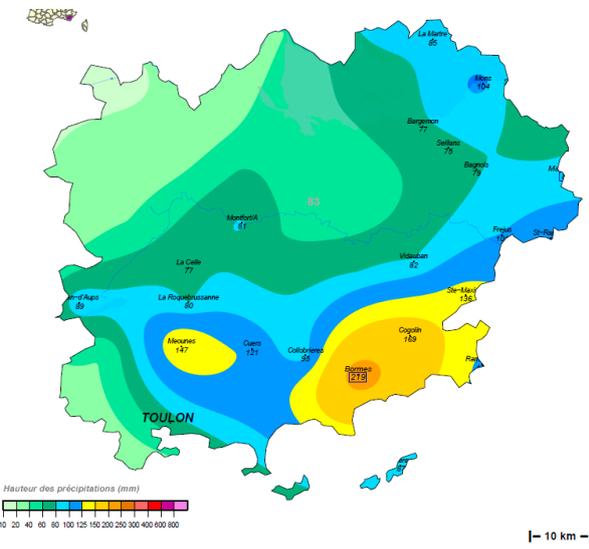
21-22 octobre 2009



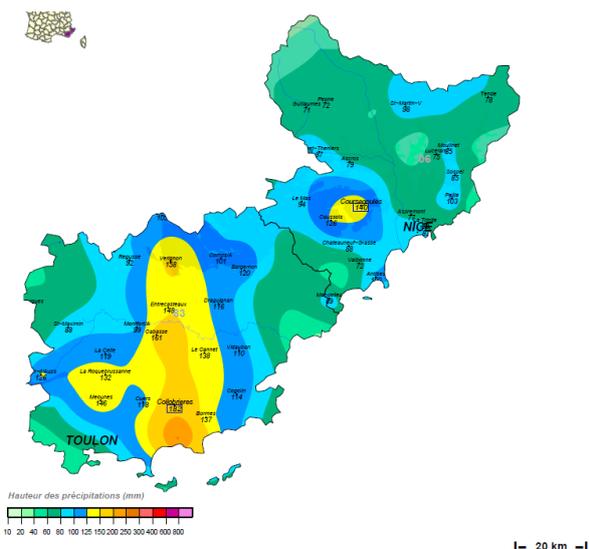
15 juin 2010



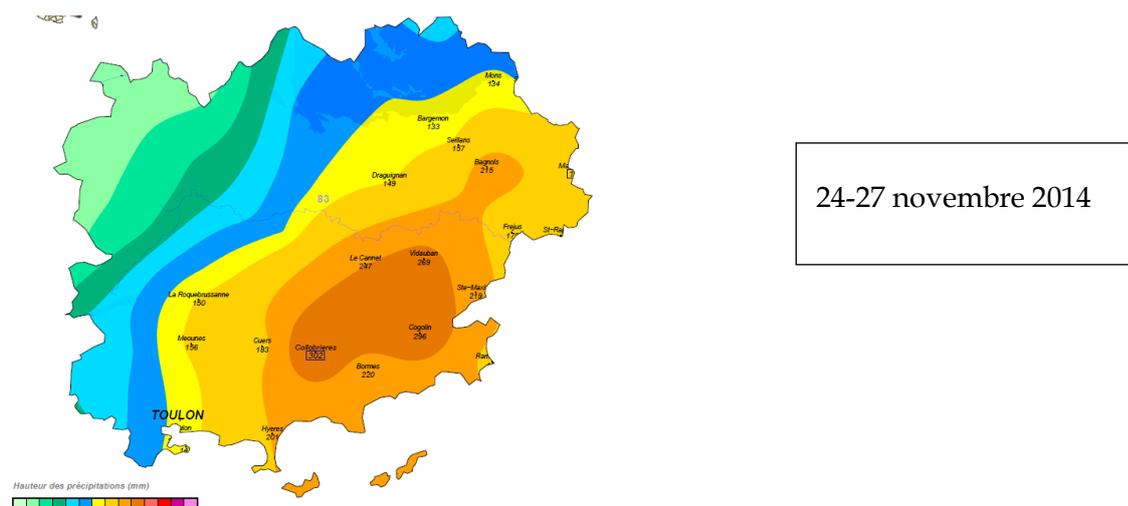
7-8 novembre 2011



13-14 décembre 2012



18-19 janvier 2014



La comparaison de la distribution de la pluie journalière au cours de ces divers événements montre des tendances en partie observées au niveau des pluies moyennes mensuelles et annuelles, en particulier :

- Des précipitations presque toujours moindres sur la presqu'île de Saint-Tropez et Ramatuelle (surtout sur la façade Sud) que sur le reste du territoire de la CCGST ;
- Un gradient assez fort de pluie selon un axe Sud-Est / Nord-Ouest par effet cumulé de la distance à la côte et du Massif des Maures, sauf si les cellules atteignent principalement le secteur de Hyères avant de s'orienter au nord vers la plaine des Maures ;
- Les pluies journalières sont souvent homogènes en hiver sur presque tout le territoire de la CCGST, nettement plus hétérogènes en été ou en automne et avec une légère tendance à toucher plutôt la moitié Nord de ce territoire et à s'intensifier près du relief.

Le dernier élément utilisé pour comparer les pluies journalières sur le territoire de la CCGST et ses abords est la comparaison de records enregistrés sur quelques stations pluviométriques. Le tableau suivant compare ainsi les postes de Cogolin et de Cap Camarat (Ramatuelle) :

Tableau 9 : Records de pluies journalières

Poste	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Cogolin	132.5	68	90	135	88	163	60	58.9	174	177.5	124	152
Cap Camarat	88.4	105	77.1	111	88.6	101.4	131	107.2	112	140.5	117	93.2

Bien que la période d'observation soit nettement plus faible pour Cogolin (depuis 1997) que pour Cap Camarat (depuis 1894), les maximaux de pluie journalières sont sensiblement plus élevés à Cogolin.

Par ailleurs, une comparaison des pluies journalières enregistrées lors d'événements notables tend à montrer des valeurs comparables à Cogolin et Sainte-Maxime, mais un peu plus fortes qu'à Fréjus.

3.2.9 Traitement des données de pluies horaires et multi-horaires

Le nombre de postes pour lesquels on dispose de données de pluie horaire, avec une période d'observation suffisamment grande (au moins 25 ans) pour établir des valeurs statistiques est en fait très réduit. De telles statistiques sont traduites par les valeurs de coefficient de Montana au niveau de ces stations : il s'agit de : Le Luc, Hyères, Toulon et Fréjus.

Comme déjà indiqué, les hauteurs de pluies calculées par la formule de Montan dépendent de la durée sur laquelle ces coefficients moyens ont été établis, ce qui peut conduire à des écarts très importants. Nous avons en outre utilisés les résultats d'ajustements statistiques par loi de Gumbel et par la méthode du Renouvellement au niveau de ces stations.

Le tableau suivant présente la liste des valeurs obtenues avec ces diverses approches, ceci pour diverses durées :

Tableau 10 : Quantiles de pluies sur une durée de 1h

Poste	Méthode	Période de retour					
		5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
Le Luc	Gumbel	44	53	61		71	
	Renouv.	43	51	58		67	74
	Montana	43	50	55	58	61	65
Hyères	Montana	40	49	58	64	73	85
Fréjus	Gumbel	42	50	59		70	
	Renouv.	37	42	47		54	59
	Montana	35	42	49	53	58	66
Toulon	Gumbel	41	50	59		71	
	Renouv.	34	40	45		52	57
	Montana	34	41	48	52	57	64

Tableau 11 : Quantiles de pluies sur une durée de 2h

Poste	Méthode	Période de retour					
		5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
Le Luc	Gumbel	56	68	79		94	
	Renouv.	45	52	58		65	71
	Montana	51	60	68	73	79	87
Hyères	Montana	50	61	72	79	87	101
Fréjus	Gumbel	56	70	83		99	
	Renouv.	44	50	56		64	70
	Montana	45	54	64	70	77	88
Toulon	Gumbel	52	63	73		86	
	Renouv.	44	50	56		64	70
	Montana	48	57	65	70	76	84

Tableau 12 : Quantiles de pluies sur une durée de 3h

Poste	Méthode	Période de retour					
		5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
Le Luc	Gumbel	69	87	105		127	
	Renouv.	54	62	70		80	87
	Montana	58	70	80	86	95	106
Hyères	Montana	57	69	82	89	99	113
Fréjus	Gumbel	70	88	106		129	
	Renouv.	51	59	66		75	82
	Montana	52	64	75	82	91	104
Toulon	Gumbel	59	71	83		98	
	Renouv.	53	63	71		83	91
	Montana	54	64	74	80	87	97

Tableau 13 : Quantiles de pluies sur une durée de 6h

Poste	Méthode	Période de retour					
		5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
Le Luc	Gumbel	84	104	122		147	
	Renouv.	68	78	87		99	108
	Montana	74	90	106	116	129	149
Hyères	Montana	73	87	102	111	122	138
Fréjus	Gumbel	83	102	121		145	
	Renouv.	68	79	88		101	111
	Montana	68	83	98	108	120	138
Toulon	Gumbel	81	98	115		137	
	Renouv.	68	79	88		101	111
	Montana	67	80	92	99	107	120

Tableau 14 : Quantiles de pluies sur une durée de 12h

Poste	Méthode	Période de retour					
		5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
Le Luc	Gumbel	105	127	148		175	
	Renouv.	88	102	114		130	142
	Montana	94	117	141	156	177	209
Hyères	Montana	93	110	128	139	151	170
Fréjus	Gumbel	99	119	138		163	
	Renouv.	87	100	112		128	140
	Montana	89	108	129	142	158	183
Toulon	Gumbel	95	114	133		157	
	Renouv.	80	93	105		120	132
	Montana	84	99	114	123	133	149

Tableau 15 : Quantiles de pluies sur une durée de 24h

Poste	Méthode	Période de retour					
		5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
Le Luc	Gumbel	118	138	156		180	
	Renouv.	109	125	141		161	176
	Montana	115	142	176	186	218	259
Hyères	Montana	112	134	159	175	197	228
Fréjus	Gumbel	107	126	145		168	
	Renouv.	105	121	137		157	172
	Montana	115	141	168	187	209	243
Toulon	Gumbel	111	133	154		181	
	Renouv.	99	115	130		150	165
	Montana	104	123	141	152	165	184

Par ailleurs, nous avons utilisés quatre postes pluviométriques où ont été estimées à la fois les pluies journalières de fréquence décennale et les pluies de 24 heures pour cette même fréquence : la comparaison entre les deux fournit une estimation du ratio à appliquer, au moins pour cette période de retour. Le tableau suivant résume ces éléments :

Tableau 16 : Ratio entre pluie de 24h et pluie journalières en fréquence décennale

Poste	Pluie 24h décennale	Pluie journalière décennale	Ratio
Cogolin	178 mm	172 mm	1.04
Le Luc	142 mm	122 mm	1.16
Hyères	134 mm	117 mm	1.15
Fréjus	141 mm	109 mm	1.29
Toulon	123 mm	106 mm	1.16

NB : le ratio pour Cogolin est peu précis, car la période d'observation ne permet pas une bonne estimation des quantiles de pluie.

Il est alors proposé de considérer un ratio de 1,2 comme représentatif pour la région. Appliqué aux postes du territoire de la CCGST, ce ratio conduit aux valeurs suivantes pour les quantiles de pluie décennale sur 24 heures :

Tableau 17 : 1^{ère} estimation de la pluie décennale de 24h sur le territoire de la CCGST

Site	Pluie journalière décennale	Pluies décennale en 24h
Sainte-Maxime	144	173
Saint-Tropez	132	158
Cavalaire	144	173
Grimaud	156	187
Cogolin	172	206

Ce tableau a ici vocation à comparer ces quantiles avec les valeurs des pluies SHYREG.

Enfin, l'utilisation de pluies SHYREG permet de proposer des valeurs pour les pluies au pas horaire (en fait pour 1h, 2h, 3h, 4h, 6h, 12h, 24h, 48h voire 72h) sur le territoire de la CCGST :

Tableau 18 : Quantiles de pluies SHYREG au point 1 (Ramatuella)

Durée	Période de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
1 h	33	44	53	62	74	83
2 h	40	51	60	70	82	92
3 h	45	58	68	78	92	102
4 h	50	64	74	85	101	113
6 h	58	73	86	99	117	132
12 h	74	93	109	126	152	173
24 h	90	113	133	155	190	219

Tableau 19 : Quantiles de pluies SHYREG au point 2 (Sainte-Maxime)

Durée	Période de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
1 h	33	43	52	60	72	81
2 h	40	52	60	70	82	92
3 h	47	59	69	79	92	103
4 h	52	65	76	87	102	114
6 h	60	75	88	100	118	133
12 h	76	96	112	129	155	175
24 h	93	116	136	159	194	224

Tableau 20 : Quantiles de pluies SHYREG au point 3 (Verne)

Durée	Période de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
1 h	35	47	56	66	79	89
2 h	44	57	67	77	91	101
3 h	51	65	76	88	103	115
4 h	57	73	84	97	114	127
6 h	67	84	98	113	134	151
12 h	87	110	129	149	179	204
24 h	107	136	161	190	232	267

Il ressort de toutes ces estimations, plus ou moins grossières selon le cas, une assez bonne cohérence pour les pluies décennale de 24h entre les ajustements statistiques et les pluies SHYREG, et probablement une surestimation de ces quantiles pour les postes du territoire de la CCGST : cette surestimation provient certainement d'une légère surestimation des pluies

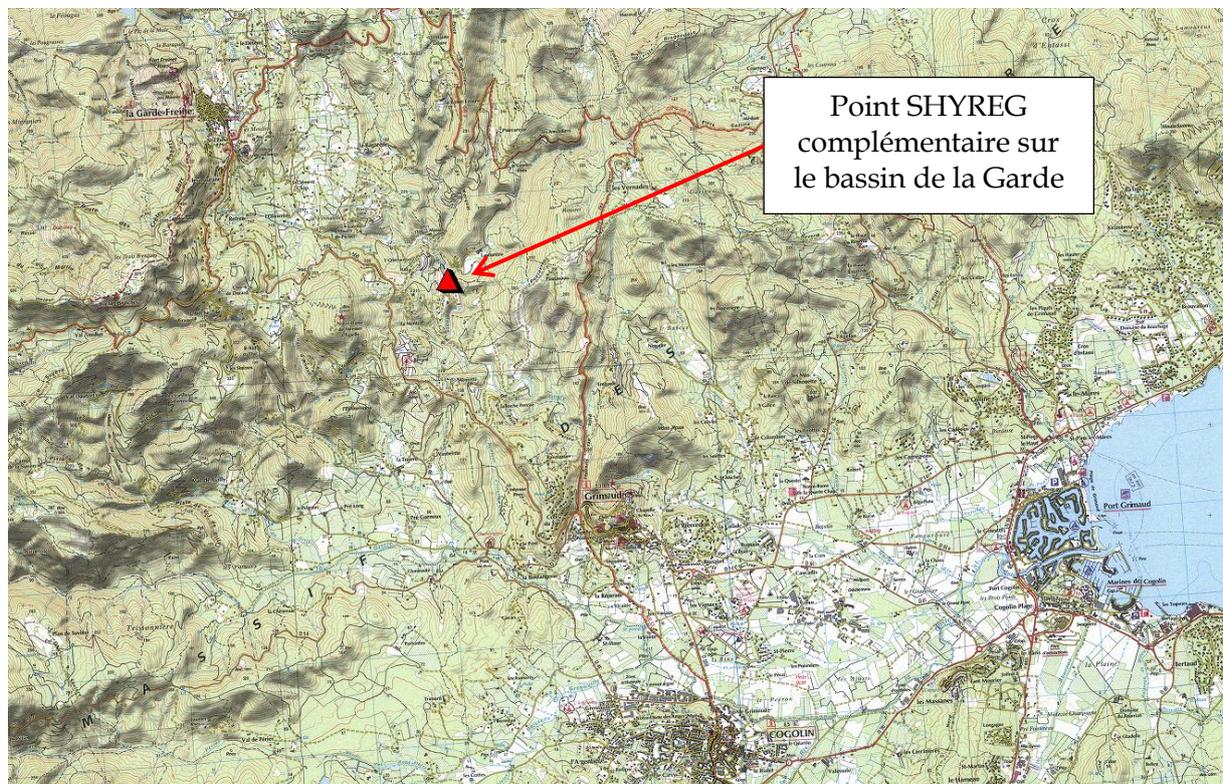
journalières décennales, surtout dans le cas de Cogolin (la période d'observation étant courte et « fortement pluvieuse »).

Par ailleurs, la comparaison des quantiles SHYREG avec les quantiles issus d'ajustements apparaissent comparables pour les diverses périodes de retour et les différentes durées, en notant tout de même les points suivants :

- Les quantiles estimés par la loi de Gumbel et par la méthode du Renouvellement paraissent très proches de ceux obtenus par la formule de Montana pour les périodes de retour ne dépassant pas 20 ans. En revanche, on note un écart important entre les estimations par la méthode du Renouvellement et par la formule de Montana (dont les coefficients proviennent en fait d'un ajustement de Gumbel) pour les fréquences cinquantennale et centennale ; ce même écart se retrouve au niveau des pluies SHYREG, qui donne des quantiles comparables à ceux obtenus par la formule de Montana pour les stations du Luc, Hyères et Fréjus (dans une moindre mesure pour Toulon, moins représentatif du secteur du Golfe de Saint-Tropez).
- Les ratios entre les quantiles de pluie centennale et décennale, calculés sur les valeurs estimés par la formule de Montana comme par les pluies SHYREG, ceci quelle que soit la durée considérée, varient entre 1,45 et 1,65 pour toutes les durées entre 1h et 6h. En revanche, ce ratio passe à 1,7 ou 1,8 pour les durées de 12 ou 24h pour les quantiles issus de la formule de Montana, uniquement pour les pluies de 24h pour les pluies SHYREG. A titre d'exemple, pour le point 1 SHYREG, les ratios pour les durées successives de 1h à 24h sont successivement de 1.57, 1.53, 1.50, 1.53, 1.53, 1.59 et 1.65. Ceci provient certainement d'une surestimation faite sur les quantiles de pluie de fréquence centennale par ajustement de Gumbel, et que l'on retrouve au travers des coefficients de la formule de Montana, à moins qu'il ne s'agisse d'une sous-estimation des pluies pour les fréquences plus élevées...Il paraît alors judicieux de « corriger » tous ces quantiles en appliquant un ratio du même ordre de grandeur pour les durées de 12h et 24h que pour les autres durées, considérant que ce ratio tend naturellement à diminuer avec la durée d'averse plutôt que l'inverse. **Pour les pluies SHYREG, un ratio de 1.55 à 1.6 serait à appliquer pour mieux estimer les quantiles sur des périodes de retour de 100 ans par rapport à la décennale pour les durées de 1 à 6 heures.**
- Pour les durées variant entre 1h et 6h, quelle que soit la période de retour considérée, les pluies SHYREG apparaissent comparables mais systématiquement un peu supérieures aux quantiles calculés à Hyères, Le Luc et Fréjus : cet écart est cohérent avec l'analyse faite plus haut sur les pluies annuelles, mensuelles et journalières, avec des valeurs légèrement supérieures sur le secteur du Golfe de Saint-Tropez. Cette tendance sera conservée comme hypothèse pour estimer les quantiles de pluies sur le territoire de la CCGST sur des durées infra-horaires.
- Les pluies SHYREG indiquent une majoration des quantiles dans le Massif des Maures par rapport à la zone côtière de l'ordre de 9% pour les pluies d'une durée de 1h ou 2h, de 12% pour les pluies d'une durée de 3 à 6h, de 17 % pour les pluies d'une durée de 12h et de 20% pour les pluies de 24h. ce point correspond à l'analyse faite quant aux pluies journalières, sensiblement plus fortes sur le relief. En revanche, l'écart se réduit fortement sur les faibles durées, car il ne se produit pas alors d'effet de « blocage » d'averse par le relief.

Remarque : dans le cadre de l'étude hydrologique du bassin de la Garde, un autre point SHYREG a été utilisé. Ce point se situe sur la commune de La Garde-Freinet, près de la limite de commune avec Grimaud et à peu près entre les deux villages :

Figure 23 : Localisation du point SHYREG complémentaire sur le bassin de la Garde



Les valeurs de quantiles associés à ce point sont les suivantes :

Tableau 21 : Quantiles de pluies SHYREG au point situé sur le bassin de la Garde

Durée	Période de retour					
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
1 h	36	48	57	67	80	90
2 h	45	57	68	78	92	103
3 h	52	66	77	88	104	116
4 h	58	73	85	98	115	129
6 h	67	85	99	114	135	153
12 h	86	109	129	149	180	206
24 h	105	134	159	187	231	267

Avec un écart maximal de 2 mm (soit en plus soit en moins), ce sont les mêmes valeurs que celles obtenues sur le secteur du barrage de la Verne, confirmant une forte homogénéité des pluies de projet (au pas horaire du moins) dès que l'on s'éloigne de la côte.

3.2.10 Valeurs de référence de pluies ponctuelles au pas infra-horaire

Pour les pluies infra-horaires, qui sont celles qui nous intéressent majoritairement pour la gestion du ruissellement pluvial, les seules sources de données sont les quantiles de pluies calculés sur des pas de temps d'au moins 6 minutes par application de la formule de Montana avec des coefficients déterminés au niveau des stations de : Le Luc, Hyères, Fréjus et Toulon. L'analyse faite précédemment sur les pas de temps de 1h à 24h (SHYREG) sert à appliquer une corrélation.

Le tableau suivant rappelle les valeurs des coefficients de Montana estimés à chacune de ces stations pour des pluies d'une **durée comprise entre 6 minutes et une heure**, ceci en fonction de la période de retour :

Tableau 22 : Coefficients de Montana pour les pluies infra-horaires

Poste	Coefficients de Montana	Période de retour					
		5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
Le Luc	a	4.559	5.097	5.569	5.768	6.006	6.287
	b	0.451	0.445	0.442	0.438	0.435	0.431
Hyères	a	3.847	4.436	4.932	5.172	5.396	5.656
	b	0.431	0.416	0.398	0.385	0.365	0.338
Fréjus	a	3.975	4.192	4.228	4.244	4.235	4.161
	b	0.413	0.383	0.345	0.324	0.298	0.260
Toulon	a	4.868	6.144	7.695	8.718	10.257	12.288
	b	0.522	0.536	0.554	0.565	0.581	0.605

L'analyse des pluies au pas horaire a permis de mettre en évidence que les quantiles sur une telle durée sur le territoire de la CCGST sont un peu plus forts qu'au niveau des trois premières stations, et nettement plus forts qu'à Toulon. A défaut de mesure permettant de quantifier cet écart pour les pluies infra-horaires, la méthode suivante a été retenue pour estimer les quantiles infra-horaires en tout point du territoire de la CCGST :

- Pour les faibles durées, c'est-à-dire entre 6 et 15 minutes, les quantiles calculés sur les stations de Fréjus, Hyères et le Luc sont proches : les valeurs les plus fortes parmi ces trois postes sont conservés pour le territoire de la CCGST ;
- Pour les durées plus importantes, c'est-à-dire entre 15 et 60 minutes, une majoration forfaitaire de 15% est appliquée par rapport aux quantiles calculés au niveau des stations pluviométriques de Fréjus, Hyères et Le Luccar cette majoration permet de retrouver les quantiles estimés sur des durées d'une heure, connus à partir de statistiques locales et des données SHYREG. Les valeurs ainsi obtenues sont assez proches et fournissent alors des ordres de grandeur de pluies intenses brèves susceptibles de tomber en n'importe quel point du territoire de la CCGST en introduisant une légère « sécurité » (ou majoration).

Cette approche permet de tenir compte d'une part d'un risque probable d'orage plus intense sur le territoire de la CCGST que sur le secteur des trois postes (du fait du relief) et conduit en outre à des valeurs de quantiles sont cohérents avec les valeurs de pluies SHYREG calculés au niveau des trois points représentatifs de ce territoire.

L'application de ces majorations aux quantiles calculés par la formule de Montana conduit aux valeurs indiquées dans le tableau suivant. Il est à noter que les valeurs statistiques infra-horaires vendues par Météo France n'intègrent pas la période de retour de 2 ans, pourtant utiles pour répondre à la doctrine de la MISEN du Var : les quantiles relatifs à cette fréquence ont été estimés à partir de ceux de fréquences quinquennale et décennale par application d'un ratio établi pour des pluies horaires, qui est par ailleurs très proche du ratio habituellement appliqué en France. :

Tableau 23 : Quantiles infra-horaires de pluies estimés pour le territoire de la CCGST

Durée de pluie	Période de retour						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
6 minutes	11	15	17	20	21	23	25
15 minutes	17	23	27	31	33	36	40
30 minutes	24	33	39	44	48	52	58
45 minutes	29	40	47	55	59	65	72
60 minutes	34	46	55	64	69	75	85

Nous avons ensuite effectué un ajustement sur ces valeurs de quantiles pour en déduire les coefficients de Montana à appliquer sur le territoire de la CCGST :

Tableau 24 : Coefficients de Montana infra-horaires sur le territoire de la CCGST

Coefficient	Période de retour						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
a	4.266	6.199	6.826	7.992	8.239	9.028	9.598
b	0.509	0.511	0.491	0.495	0.482	0.484	0.470

Ces coefficients s'utilisent en appliquant la formule de Montana pour estimer les hauteurs H de pluie (en mm) sur la durée d'averse t (en minutes) comprise entre 6 minutes et 1 heure :

$$H(t) = a.t^{1-b}$$

Les coefficients a et b dépendent de la période de retour de l'événement.

Cette formule permet d'estimer la hauteur de pluie **ponctuelle** en tout point du territoire de la CCGST pour des averses intense d'une durée comprise entre 6 minutes et une heure. Il n'est pas possible d'identifier d'effet du relief ou de la distance à la mer jouant sur des orages brefs et on considèrera qu'un tel événement peut se produire avec la même probabilité en tout point du territoire.

3.2.11 Valeurs de référence de pluie longues pour le territoire de la CCGST

Le tableau ci-dessus donne les coefficients de Montana pour estimer les hauteurs de précipitations sur toute durée entre 6 minutes (pas moins) et 1 heure (pas plus), ceci en fonction de la période de retour étudiée. Il est également possible d'utiliser directement le tableau de valeurs de quantiles données en page précédente. **Ces quantiles sont à appliquer en tout point du territoire de la CCGST pour les durées inférieures à 1 heure, en**

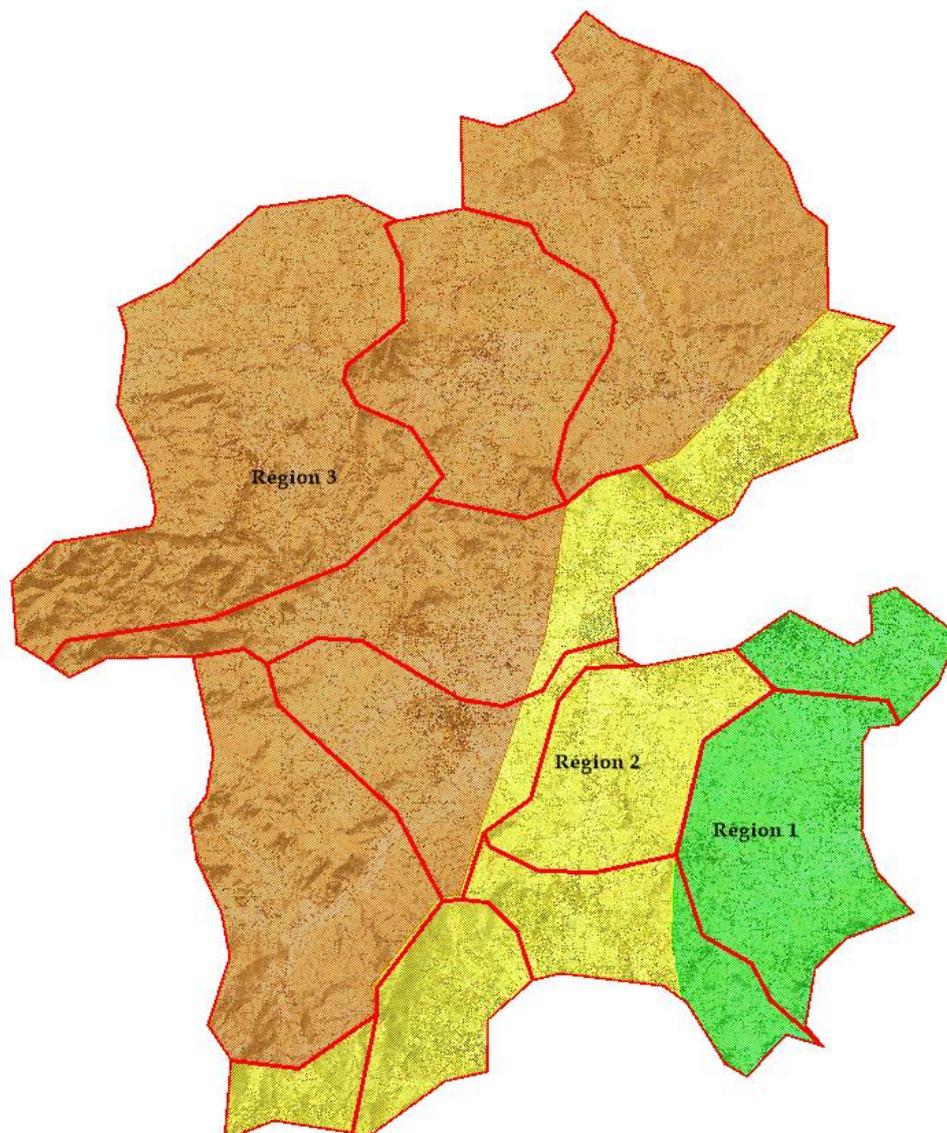
considérant qu'ils correspondent à une averse brève et intense, avec un effet modéré de la distance à la côte et du relief.

Pour les pluies d'une durée supérieure à une heure mais ne dépassant pas 24 heures, il est nécessaire de tenir compte de la localisation du bassin versant étudié, les quantiles de pluies n'étant pas homogènes sur tout le territoire. Ainsi, pour des pluies d'une durée comprise entre 1 heure et 24 heures, on distingue trois « régions » :

- La rive Sud de la presqu'île de Saint-Tropez et Ramatuelle,
- La frange côtière,
- Le versant du massif des Maures.

Considérant les effets de la distance à la mer et du relief, mis en évidence sur les pluies moyennes à l'échelle de l'année, du mois et de la journée, également confirmés par le traitement statistiques de mesures sur divers postes de la région comme par la méthode SHYREG, il est apparu nécessaire de différencier trois secteurs, même si les écarts entre quantiles de pluies sont assez faibles. Ces trois régions sont délimitées sur la carte suivante:

Figure 24 : Régionalisation des pluies longues sur le territoire de la CCGST



A ces différentes « régions » correspondent les quantiles de pluie suivants (les quantiles pour la période de retour de 30 ans, non intégrée dans les valeurs SHYREG, est estimée à partir des quantiles pour 20 et 50 ans selon le ration donné par le traitement statistique fourni par Météo France au niveau de ses postes pluviométriques pour les pluies horaires :

Tableau 25 : Quantiles de pluies « longues » sur la région 1 (Ramatuëlle)

Durée	Période de retour						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
1 h	30	40	48	56	61	67	77
2 h	36	47	54	63	68	74	86
3 h	42	54	62	71	77	83	99
4 h	47	59	68	78	85	92	110
6 h	54	68	79	90	98	106	127
12 h	68	86	101	114	125	136	157
24 h	79	99	116	135	150	165	190

Tableau 26 : Quantiles de pluies « longues » sur la région 2 (Côte)

Durée	Période de retour						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
1 h	33	44	53	62	68	74	85
2 h	40	52	60	70	76	82	96
3 h	47	59	69	79	85	92	110
4 h	52	65	76	87	94	102	122
6 h	60	75	88	100	109	118	141
12 h	76	96	112	129	142	155	179
24 h	93	116	136	159	176	194	224

Tableau 27 : Quantiles de pluies « longues » sur la région 3 (Massif des Maures)

Durée	Période de retour						
	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
1 h	35	47	56	66	72	79	90
2 h	44	57	67	77	84	91	107
3 h	51	65	76	88	95	103	122
4 h	57	73	84	97	105	114	134
6 h	67	84	98	113	122	134	157
12 h	87	110	129	149	164	179	204
24 h	107	136	161	190	211	232	267

NB : en moyenne, le cumul annuel est plus faible de 20% sur Cap Camarat que sur Cogolin : pour l'ensemble de la région 1, un ratio de l'ordre de 0.85 à 0.9 est appliqué sur les pluies par rapport à la région 2.

A titre de comparaison, le record journalier enregistré à Cap Camarat (région 1) est de 140.5 mm le 18 octobre 1982 ; le record est de 177.5 mm le 22 octobre 2009 à Cogolin (région 2) : dans les deux cas, ces événements auraient une période de retour de l'ordre de 30 ans.

Enfin, le tableau suivant rappelle les records enregistrés par Météo France sur l'ensemble du département du Var, ainsi que dans le département des Alpes-Maritimes :

Tableau 28 : Records observés dans le Var

Durée	6 min	15 min	30 min	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h
Date	09/11/2014	09/11/2014	11/08/2005	25/09/2006	24/09/2006	17/05/2005	15/06/2010	15/06/2010
Cumul	25 mm	47 mm	72 mm	102 mm	131 mm	145 mm	224 mm	285 mm

Tableau 29 : Records observés dans les Alpes-Maritimes

Durée	6 min	15 min	30 min	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h
Date	03/10/2015	03/10/2015	03/10/2015	03/10/2015	03/10/2015	03/10/2015	03/10/2015	31/10/2010
Cumul	22 mm	41 mm	69 mm	115 mm	175 mm	177 mm	194 mm	248 mm

En analysant les records dans le département du Var, on note par exemple que le record en une heure est un peu supérieur à la valeur retenue pour la région 3 en fréquence centennale, mais reste du même ordre de grandeur (102 mm en record, pour 90 mm pour la pluie centennale en région 3). La même remarque peut être faite pour des pluies de 2 et 3 heures ; en revanche, les valeurs statistiques sur le Golfe de Saint-Tropez pour des pluies longues (de 6 ou 12 heures) sont nettement inférieures aux records départementaux, ce point résultant probablement du fait que les méthodes classiques d'ajustement peuvent produire une sous-estimation des événements rares, à moins que les records n'aient une période de retour nettement supérieure à 100 ans...Il est aussi possible que le contexte géographique et topographique du Golfe de Saint-Tropez rend ce secteur susceptible de connaître des pluies intenses et brèves, mais peut-être moins exposé à des pluies longues de fort cumul, ce qui n'est pas certain...

On note par ailleurs que les valeurs de quantiles de pluies courtes retenues pour l'ensemble du territoire de la CCGST en fréquence centennale sont comparables ou légèrement inférieures aux records départementaux.

Par ailleurs, la comparaison des records dans le Var et les Alpes-Maritimes montre des valeurs assez proches, sauf pour les pluies de 1 h et 2 h : en fait, pour des durées de 6 minutes à 6 heures, les records dans les Alpes-Maritimes sont ceux de l'événement du 3 octobre 2015 sur le secteur de Cannes, marqué par une durée longue (environ 3 heures de pluie forte), et qui se trouve dans une configuration comparable à celle du Golfe de Saint-Tropez tout en étant assez peu distant.

3.2.12 *Quantiles de pluie exceptionnelle*

C'est à partir de ces records sur le Var et les Alpes-Maritimes qu'ont été fixés les quantiles de pluie exceptionnelle dans le référentiel hydrologique de la CCGST : pour des durées inférieures à 1 heure ou supérieure à 3 heures, il s'agit des records dans le Var et, en concertation avec la MISE du Var, ce sont les records des Alpes-Maritimes qui sont retenus pour des durées de 1 heure à 3 heures. Pour la plupart des projets, cette prise en compte d'un événement rare non enregistré sur le département n'est pas pénalisant en termes de dimensionnement, car ils sont concernés par des pluies de courte durée : l'événement exceptionnel n'a pas vocation à servir de base de dimensionnement mais il est attendu de porteurs de projet qu'ils envisagent ce qui peut arriver sur le site du projet et ses abords en cas de pluie exceptionnelle.

Le tableau suivant résume les valeurs retenues pour un événement pluvieux exceptionnel sur le territoire de la CCGST :

Tableau 30 : Quantiles de pluies exceptionnelles sur le territoire de la CCGST

Durée	6 min	15 min	30 min	1 h	2 h	3 h	6 h	12 h
Pluie (mm)	25	47	72	115	175	177	224	285

3.2.13 *Réflexion sur l'abattement spatial des pluies*

L'analyse présentée plus haut montre que, pour les pluies longues, on observe une tendance selon laquelle les cumuls sont un peu plus faibles sur la côte qu'à l'intérieur des terres : la question de l'abattement spatial des pluies concerne le caractère plus ou moins hétérogène de toute averse.

Il n'existe aucune « règle » permettant de prévoir si une pluie va donner une même valeur de cumul sur un périmètre plus ou moins étendu, il est simplement intuitif qu'à l'échelle du km² la pluie est souvent homogène, et qu'elle ne l'est pas à l'échelle de la centaine de km².

Par traitement statistique, diverses formules ont été proposées pour l'arc méditerranéen (notamment) dans la littérature pour exprimer un coefficient d'abattement de pluie en fonction de la surface du bassin versant considéré : ce coefficient est utilisé pour « corriger » la valeur de lame d'eau moyenne tombant sur le bassin versant par rapport au quantile de pluie, puisque ces quantiles représentent des cumuls de précipitation susceptibles de survenir en un point du territoire avec diverses valeurs de probabilité.

Trois réflexions s'imposent ici :

- La prise en compte d'un abattement n'a de sens que si l'on considère un bassin versant de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de km² : le référentiel hydrologique de la CCGST n'a pas vocation à s'intéresser à cette gamme de surface de bassins versants ;
- Les quantiles de pluie intégrés dans le référentiel ne sont fixés qu'avec une précision modérée liée au manque de mesures sur de longues périodes : chercher une précision de l'ordre du mm par une prise en compte d'un abattement spatial n'aurait que peu de sens ;

- S'agissant de petits bassins versants, les quantiles de pluie utilisés à partir de ce référentiel seront attachés à des courtes durées et donc de l'ordre de quelques dizaines de mm : un abattement sur un bassin versant de faible superficie étant de l'ordre de 1%, une « correction » des quantiles de pluie porterait sur des dixièmes de millimètres seulement.

En conclusion, le référentiel hydrologique de la CCGST ne retient pas la prise en compte d'un éventuel abattement spatial des pluies pour les bassins versants de moins de 5 km².

Pour les bassins versants de superficie supérieure à 5 km², un abattement peut être pris en compte en utilisant une des nombreuses formules données dans la littérature et qui conduisent à un abattement de l'ordre de 10 % en général. A titre d'illustration, on peut considérer une formule établie par Eric Gaume (en 2000) pour la région de Marseille et qui exprime un coefficient d'abattement de pluie sous la forme :

$$K = S^{\alpha} \quad \text{avec } \alpha = -0.056 + 0.01 \times \ln(t)$$

où S est la surface en km² et t le temps en heures (t < 24 h).

Ainsi, une pluie de deux heures affectant un bassin versant de 10 km² aurait un coefficient d'abattement K = 0,91 ce qui indique que les quantiles de pluie estimés sur un point devraient être multipliés par 91% à l'échelle du bassin versant : une pluie de fréquence décennale donnant 56 mm en un point ne serait en moyenne que de 51 mm sur l'ensemble du bassin versant.

Cette formule présente les avantages d'avoir été établie sur la région PACA et d'être simple d'utilisation : c'est celle qui est proposée ici à l'utilisateur souhaitant prendre en compte un abattement spatial des pluies.

4. METHODE D'ESTIMATION DES CRUES

4.1 Méthode proposée

La méthode proposée pour estimer les crues, ou plus précisément les débits et les volumes de crue à l'exutoire de bassins versant ou le long de réseaux de collecte, consiste à utiliser un modèle hydrologique développé sous HEC-HMS, logiciel gratuit et simple d'utilisation.

Afin de permettre une utilisation à la fois homogène sur le territoire de la CCGST et simple, accessible par les non spécialistes de l'hydrologique, ce modèle est accompagné d'un outil développé sous forme d'un classeur EXCEL destiné à « traduire » automatiquement des données faciles à mesurer en paramètres du modèle hydrologique ; cette feuille comporte essentiellement une seule feuille de saisie, une feuille de synthèse des paramètres préparés pour la modélisation, et des feuilles (internes) de calcul.

L'avantage pour l'utilisateur de cette méthode est qu'il n'a pas à se préoccuper des pluies : les pluies de projets conformes au référentiel hydrologique sont déjà intégrées dans le modèle. L'utilisateur doit simplement sélectionner la période de retour d'événement qu'il souhaite simuler, les périodes proposées étant de 2 ans, 5 ans, 10 ans, 20 ans, 30 ans, 50 ans et 100 ans ; un événement exceptionnel peut aussi être simulé.

A titre de comparaison, les débits maximaux issus de ces simulations peuvent être comparés à des valeurs obtenues à partir de valeurs moyennes de débits spécifiques ou pseudo-spécifiques établis sur le territoire de la CCGST : ces valeurs sont précisées en fin de rapport.

4.2 Logiciels nécessaires à l'analyse hydrologique et mode d'utilisation

L'outil d'analyse hydrologique lié au référentiel utilise :

- Un tableur du Pack Office (EXCEL) ou de la suite Open Office, qui est gratuite. Afin d'assurer la portabilité, les feuilles de calcul ont été développées sans macros.
- Le logiciel HEC-HMS, gratuit et disponible en téléchargement sur le site USACE (US Army Corps of Engineers) et directement téléchargeable (logiciel et documentation) à l'adresse suivante : <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Bien qu'une nouvelle version (version 4.2.1) soit disponible depuis 2017, il est recommandé dans un premier temps d'utiliser la version 3.5 qui est relativement stable alors que le retour sur la version 4.2.1 est encore insuffisant et que cette nouvelle version n'apporte pas d'options utiles ici..

Pour ceux qui souhaitent se perfectionner dans l'utilisation du logiciel HEC-HMS, une documentation complète est disponible en ligne et peut être téléchargée en au format pdf.

Il est à noter que le logiciel HEC - DSSVue permet un post-traitement plus poussé des résultats de simulation sous HEC-HMS : ce logiciel et sa documentation (en anglais) sont également téléchargeables depuis le même site, à l'adresse suivante : <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-dssvue/>.

Le logiciel HEC-HMS est un outil de modélisation hydrologique qui a été conçu pour simuler les processus de transformation de pluie en ruissellement de surface, c'est-à-dire les mécanismes de formation et de propagation des crues ; il peut être appliqué aussi au cas de grands bassins versants que de petits centres urbains. Les résultats de simulation peuvent être visualisés, tabulés et analysés au moyen d'outils classiques de post-traitement intégrés

au logiciel. Ils peuvent aussi être exportés sous tableur ou vers d'autres logiciels, dont HEC-DSS Vue ou des logiciels de modélisation hydraulique.

HEC-HMS est applicable dans un large éventail de zones géographiques et inclut de très nombreuses options pour rendre en compte des situations et des configurations très variées, avec par exemple un effet majeur de la canopée ou encore d'un manteau neigeux. Il résulte de cette grande variété de possibilité une gamme complexe de formulations mathématiques adaptées à chaque cas, et qui peut être déroutante pour un utilisateur peu expérimenté. C'est pour éviter ce problème d'options de calcul et de choix de modèles, formules ou jeux de paramètres qu'un modèle attaché au référentiel a été construit en fixant :

- Toutes les options de modélisation et de calcul ;
- Les pluies de projet ;
- Les valeurs de certains paramètres.

Les paramètres de modélisation, spécifiques à chaque projet, sont calculés automatiquement par le classeur sous tableur à partir de paramètres descriptifs que fournit l'utilisateur, sans nécessiter de sa part ni savoir-faire avec le logiciel, ni même de compétence avancée en hydrologie ; un utilisateur expérimenté pourra toutefois bien sûr ajuster les paramètres calculés automatiquement.

4.3 Préparation des éléments nécessaires à l'analyse hydrologique

4.3.1 Etapes de la préparation de l'analyse hydrologique

La préparation de l'analyse hydrologique correspond à l'établissement d'un ensemble de mesures et d'informations descriptives du ou des bassins versants à étudier. Cette préparation s'appuie sur les étapes suivantes :

1. Délimitation et mesure du ou des bassins versants du projet,
2. Détermination et description de leur axe de drainage principal,
3. Caractérisation des conditions de ruissellement à l'état actuel sur ce ou ces bassins versants, selon les éléments de la typologie élaborée pour le territoire,
4. Le cas échéant, paramètres descriptifs d'un bassin de rétention ou d'une zone d'accumulation des eaux sur le bassin versant et qui modifie le fonctionnement hydrologique.

Bien que non directement utilisé dans la version actuelle, mais qui pourront aider à l'analyse d'impact hydrologique d'un aménagement, l'utilisateur peut aussi procéder dès ce niveau à l'analyse des points suivants :

5. Si le projet conduit à une modification du ruissellement sur le ou les bassins versants, caractérisation du ruissellement pour la situation future
6. Caractérisation de l'exutoire, afin de déterminer le rejet admissible

Cette méthode ne nécessite pas la détermination de pluies de projet, les valeurs à utilisées ayant été fixées dans le référentiel hydrologique de la CCGST.

La suite de ce paragraphe détaille comment identifier et préparer les données descriptives des éléments nécessaires à une telle analyse hydrologique.

4.3.2 Support cartographique conseillé

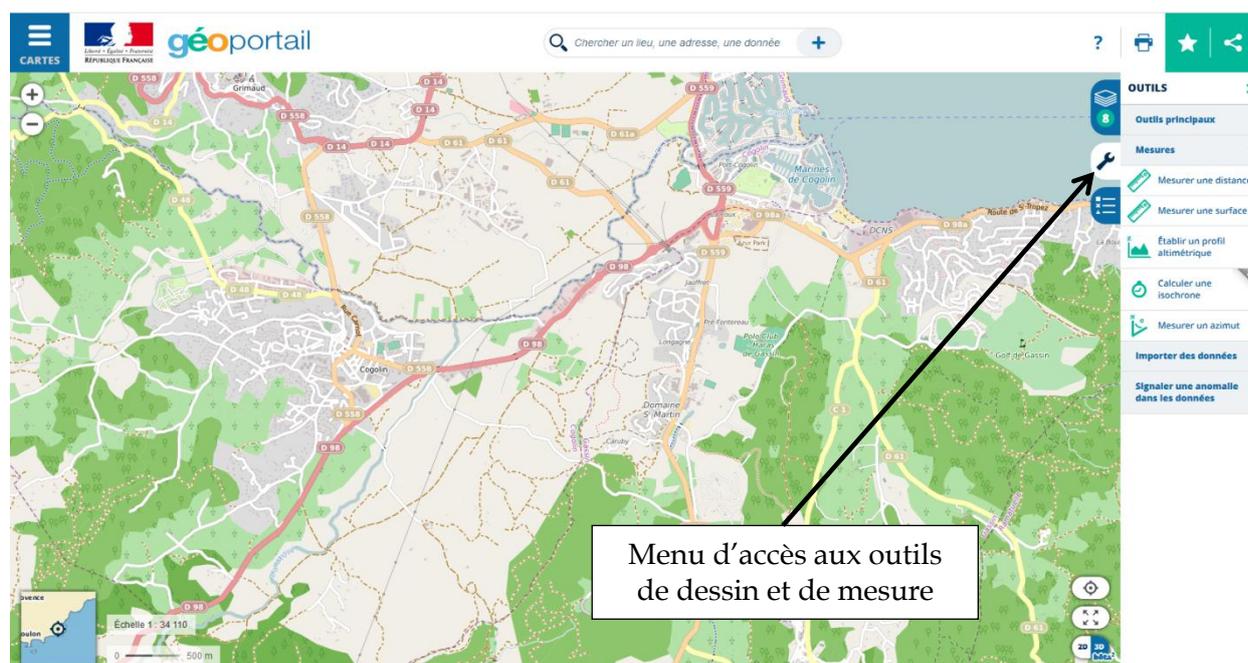
L'analyse des bassins versants est à faire de préférence sur SIG, ce qui permet d'obtenir immédiatement diverses informations telles que la superficie. Un autre avantage est que l'utilisation en arrière-plan du SCAN25 (ou d'une autre carte topographique de l'IGN) permet d'avoir le réseau hydrographique ou hydraulique superposé au fond de plan, mais aussi de faire apparaître des cotes altimétriques ou des lignes de niveau, fournissant simplement les éléments nécessaires à l'analyse des pentes.

A défaut de SIG, ou en complément, une alternative très pratique est l'utilisation du site GEOPORTAIL, libre d'accès, et qui permet de superposer non seulement des couches d'information de natures différentes (fond topographique, géologie, réseau hydrographique, relief, cartographie et noms de rues et même cadastre par exemple), mais aussi des photographies aériennes (ou des orthophotoplans) récentes ou anciennes (à partir de 1946), ce qui est utile et plus précis que les cartes de l'IGN pour visualiser l'occupation des sols. Du point de vue pratique, il est possible d'ouvrir simultanément plusieurs couches, de les ranger dans l'ordre souhaité et de visualiser la superposition des informations en réglant la transparence des couches.

GEOPORTAIL intègre des outils pratiques de dessin et d'analyse morphométrique pour :

- Mesurer une surface (de forme quelconque),
- Mesurer une distance le long d'un chemin quelconque (rectiligne ou non),
- Etablir un profil altimétrique, c'est-à-dire un profil en long selon un chemin quelconque défini par l'utilisateur.

Ces outils sont accessibles depuis la barre d'outils, qui est une barre verticale à droite de l'écran (symbole de clé anglaise) :



L'utilisation des outils est très simple :

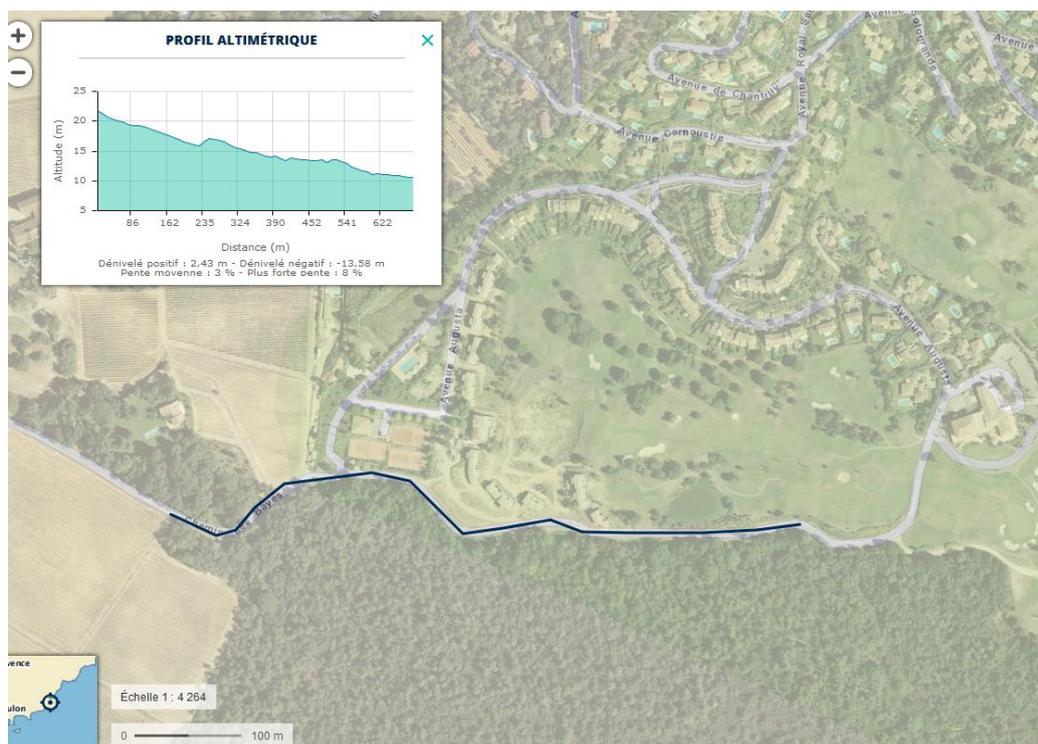
- Pour une distance :



- Pour une surface :



- Pour un profil altimétrique :



L'outil de dessin automatique de profil altimétrique indique en outre le dénivelé total et la pente moyenne le long de l'itinéraire.

Le menu propose un outil d'annotation de la carte, avec possibilité d'insérer sur la carte tout texte au choix de l'utilisateur, ainsi qu'un outil d'affichage des coordonnées du point sélectionné par le pointeur de la souris.

En alternative à une simple saisie d'écran, un bouton du menu permet d'imprimer le projet (envoi vers une imprimante physique ou vers un fichier de type pdf moyennant l'utilisation d'un logiciel de création de pdf dans la liste d'imprimantes) ; une telle impression doit se faire sans oublier de mentionner le Copyright IGN pour toute utilisation ; moyennant la création (gratuite) d'un compte, GEOPORTAIL propose de sauvegarder les projets ou de les partager avec d'autres utilisateurs.

Il est également possible d'importer et d'exporter sous GEOPORTAIL des couches spécifiques ou des projets au format .KML, à condition qu'il s'agisse de données vectorielles.

Pour une présentation plus détaillée et une prise en main de GEOPORTAIL, l'IGN a développé une série de tutoriels : <https://www.geoportail.gouv.fr/tutoriels>.

4.3.3 Délimitation des bassins versants

La délimitation des bassins versants nécessite d'une part la connaissance de la topographie, par exemple à partir de cartes de l'IGN, d'un levé topographique ou d'un MNT, d'autre part des investigations de terrain, considérant d'ailleurs que de telles investigations sont nécessaires pour caractériser les conditions de ruissellement et identifier les axes hydrauliques.

Le bassin versant associé à un point (par exemple l'exutoire d'un cours d'eau ou la tête d'un réseau de collecte, ou simplement d'une parcelle concernée par un projet d'aménagement) est l'espace géographique dont les eaux de ruissellement se déversent vers ce point. Si un bassin versant naturel se délimite en suivant des lignes de crêtes topographiques, ou des lignes de partage des eaux, des aménagements et des infrastructures ont parfois pour effet d'en modifier les limites : par exemple, une route interceptant un versant peut conduire les eaux collectées par un fossé vers un bassin versant voisin. En zone urbaine, particulièrement lorsque le relief est peu marqué, les réseaux de collecte des eaux pluviales (caniveaux et collecteurs souterrains) peuvent fortement modifier les limites des bassins versants.

Il est donc essentiel de délimiter les bassins versants, surtout s'ils sont de faible superficie, en tenant compte à la fois de la topographie et de la structure des réseaux hydrauliques, ce qui nécessite en général des investigations de terrain.

Par ailleurs, pour pouvoir établir des paramètres représentatifs, il est nécessaire que les bassins versants étudiés présentent une certaine homogénéité dans leur fonctionnement hydrologique, et donc tant au niveau de l'occupation des sols que des conditions de drainage, ces facteurs influençant les volumes de ruissellement mais aussi les vitesses d'écoulement des eaux en surface et donc les temps de réponse. Le bassin versant global étudié doit donc être « découpé » en sous-bassins en considérant les trois aspects suivants :

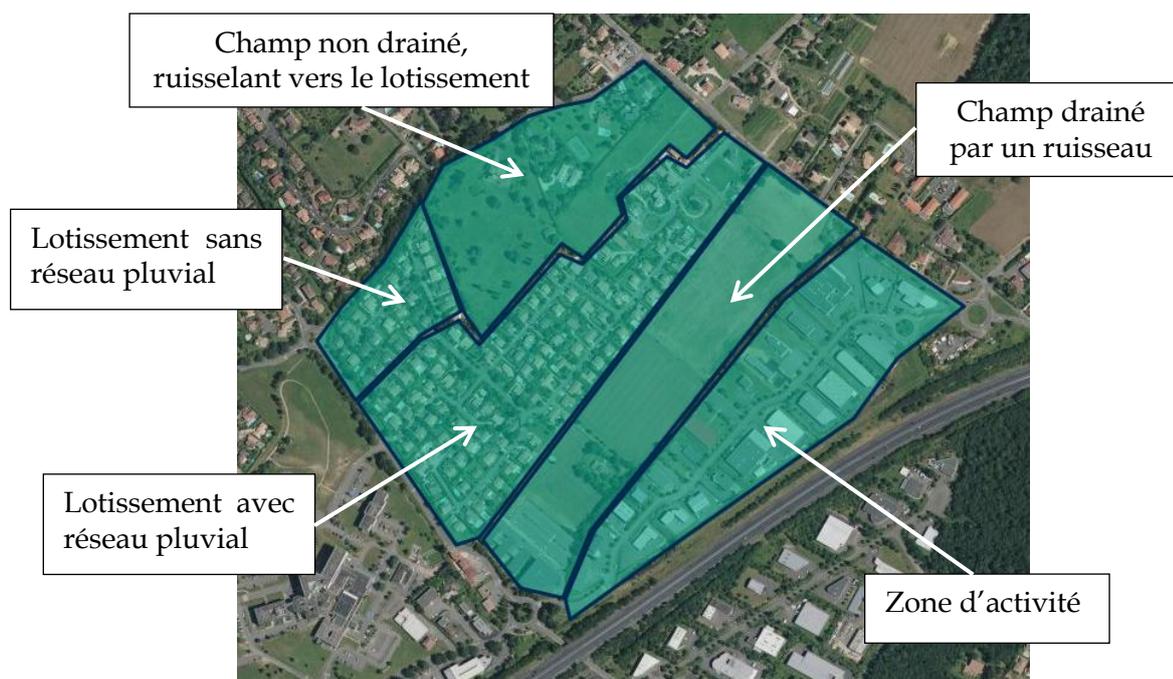
- Un sous-bassin doit être délimité à chaque point d'enjeu, où une estimation de débit est nécessaire ;

- Chaque sous-bassin doit être assez homogène du point de vue de l'occupation des sols ;
- Chaque sous-bassin doit être assez homogène du point de vue de ses conditions de drainage.

A titre d'exemple, le bassin versant suivant est particulièrement hétérogène, puisqu'il contient une zone d'activités, un lotissement équipé d'un réseau collectif d'eaux pluviales sous la voirie principale, un champ drainé par un ruisseau, un champ sans drainage et un lotissement sans réseau pluvial collectif :



Ce bassin versant doit alors être découpé en cinq sous-bassins versants :



Sur cet exemple, ce découpage se justifie par les aspects suivants :

- Un lotissement avec ou sans réseau pluvial ne produit pas les mêmes gammes de débit ; un lotissement sans réseau ne concentre pas les eaux vers un exutoire unique : si l'objet de l'analyse est le fonctionnement du réseau en aval, il est donc essentiel de différencier ces deux sous-bassins ;
- Le champ drainé par un ruisseau participe au débit de ce ruisseau franchi par une route, alors que le champ non drainé peut créer des coulées boueuses vers le lotissement voisin ;
- La zone d'activité est presque totalement imperméabilisée, alors que les lotissements intègrent des espaces verts et des jardins, avec un ruissellement moindre que cette zone d'activité.

Cet exemple illustre le fait que le découpage en sous-bassins versants doit être effectué en fonction des objectifs même de l'analyse hydrologique.

Les paramètres à extraire de cette délimitation du bassin versant et éventuellement de ses sous-bassins versants sont la superficie du ou de ces bassins versants à modéliser, ainsi que leurs périmètres.

A extraire :

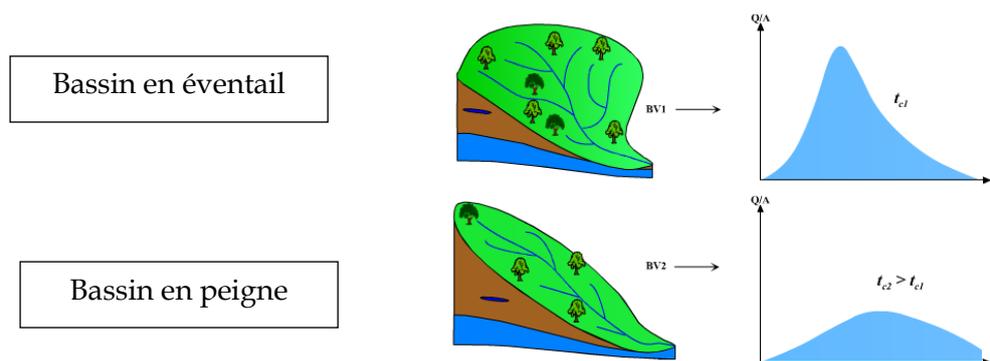
- **superficie du ou des bassins versants (en km² ou ha)**
- **périmètre du ou des bassins versants (en km ou m)**

4.3.4 Détermination des axes principaux de drainage

Pour chaque bassin versant, les axes principaux de drainage doivent être précisément identifiés et caractérisés car ils représentent l'un des paramètres essentiels du temps de réponse de ce bassin versant.

Cette détermination doit être faite en considérant l'ensemble du réseau hydrographique ou hydraulique, sachant que l'on rencontre en général l'un des trois types suivants :

- Bassin possédant un seul axe de drainage : c'est une configuration couramment rencontrée dans le cas d'un talweg naturel alimenté par ruissellement diffus ;
- Bassin versant possédant un réseau en peigne, c'est-à-dire avec un axe principal alimenté par des apports concentrés plus ou moins régulièrement répartis : il s'agit d'une variante du cas précédent mais avec une réponse plus rapide due à la densité du réseau ;
- Bassin versant en éventail, caractérisé par un réseau assez fortement ramifié : le bassin versant est alors assimilable à un ensemble de sous bassins dont les apports sont presque concomitants et induisent alors des débits plus forts que pour une structure en peigne :



L'axe de drainage principal est alors celui qui apparaît comme le plus représentatif, du bassin versant dans l'objectif d'estimer le temps de concentration et le temps de réponse de ce bassin versant : ce n'est pas nécessairement le plus long mais celui qui draine la plus grande partie du bassin versant.

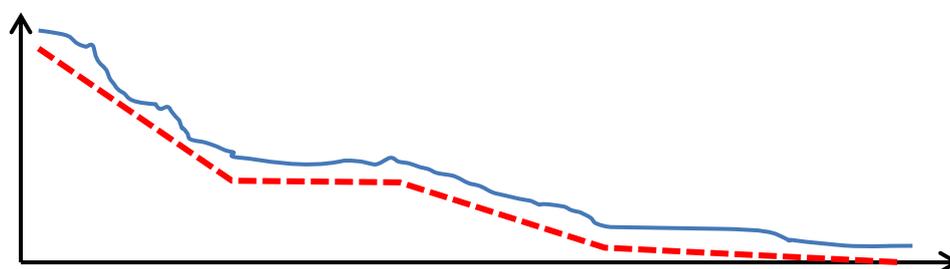
Une fois cet axe identifié, il est nécessaire de reporter son tracé sur la carte portant la délimitation du bassin versant ; si ce report se fait sous SIG ou sous GEOPORTAIL, on obtient immédiatement sa longueur.

La superficie du bassin versant et la longueur de son axe de drainage principal sont utilisés pour estimer un coefficient de compacité, qui sert d'indice pour apprécier le ruissellement.

Par ailleurs, la pente moyenne pondérée de cet axe hydraulique influence le temps de concentration et le temps de réponse du bassin versant. Pour calculer la pente moyenne pondérée, il est tout d'abord nécessaire de « découper » le linéaire de l'axe de drainage principal en tronçons homogènes caractérisés à la fois par la nature du bief (fossé, collecteur souterrain...) et par une valeur de pente moyenne à peu près homogène ; la pente moyenne pondérée s'obtient en sommant la valeur de pente de chaque tronçon multipliée par la proportion de linéaire correspondante, comme l'illustre le schéma suivant :

Détermination de la pente moyenne pondérée d'un axe hydraulique

Le profil réel (en bleu) est schématisé (en rouge) par une succession de quatre biefs de pentes moyennes et de longueurs p_1/L_1 , p_2/L_2 , p_3/L_3 et p_4/L_4 .
 La pente moyenne pondérée est : $(p_1 \times L_1 + p_2 \times L_2 + p_3 \times L_3 + p_4 \times L_4) / L$ où $L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4$



La pente moyenne (dénivelée totale divisé par la longueur) n'est représentative que si la pente est assez régulière.

Il est à noter que les pentes moyennes et les longueurs de chaque bief sont des paramètres utiles à l'estimation des temps de concentration et de réponse : ce sont donc ces paramètres qui doivent être mesurés.

A extraire :

- **Nombre de tronçons homogènes (six au maximum)**
- **Nature de chaque tronçon homogène (cours d'eau, fossé, talweg, caniveau, cunette, collecteur souterrain...)**
- **Longueur de chaque tronçon homogène de l'axe de drainage principal (en m ou km)**
- **Pente moyenne de chaque tronçon homogène**

Remarque : plutôt que de demander à l'utilisateur de déterminer si la structure du réseau hydrographique est plutôt en éventail ou en peigne, il lui est demandé de fournir la surface et le périmètre de chaque bassin versant. Ces deux paramètres sont utilisés pour calculer automatiquement l'indice de compacité de Gravélius, qui est ensuite interprété dans les calculs (automatiques) des paramètres du ruissellement.

4.3.5 Caractérisation des conditions de ruissellement à l'état initial

Les conditions de ruissellement dépendent de plusieurs facteurs de poids différents :

- La couverture et l'usage des sols : il n'est pas suffisant d'indiquer s'il s'agit d'un bassin versant de type agricole ou urbain, car ce type de description est particulièrement imprécis. En effet, le fonctionnement hydrologique d'un versant de vignes sur terre à nu longé par des fossés de drainage et très différent de celui d'un espace de vignes avec enherbement des rangs et aménagés en restanques par exemple. Un espace boisé aura un impact hydrologique très différent s'il s'agit d'une forêt naturelle, d'espaces de garrigue dense ou d'une zone d'exploitation forestière avec fort défrichement. De même, un quartier pavillonnaire est à l'origine de débits en période pluvieuses très différent s'il s'agit de petites parcelles en grande partie imperméabilisées (allées en béton, dallages, terrasses revêtues...) avec évacuation des eaux vers la voie publique ou s'il s'agit de parcelles à fort taux de jardin et sans système de drainage vers un réseau public. Les conditions de collecte et d'évacuation des eaux de pluie des toitures influencent aussi fortement les débits à gérer sur les voies publiques ou les réseaux d'assainissement pluvial.
- La pente du bassin versant : cette pente n'est pas nécessairement celle de l'axe de drainage principal. Par exemple, dans le cas d'un petit bassin versant drainé par un fossé en « fonde de vallée » encadré par des versants très pentus, le ruissellement sur les versants pourra être rapide, alors que l'écoulement dans le fossé sera lent si sa pente est très faible.
- La densité du réseau de drainage, qu'il s'agisse d'un véritable réseau hydraulique (de fossés, collecteurs ou caniveaux), ou bien de talwegs temporaires tels que ceux qui se

forment au travers de vignes en période de forte pluie, un réseau de drainage dense conduit à un faible temps de concentration et un taux de ruissellement plus élevé que dans le cas d'un bassin versant naturel où le eau s'écoulent assez lentement en surface entre de nombreux « obstacles » (buissons, rochers, troncs et système racinaire en surface...) et sont en grande partie retenues sur le versant.

- La nature géologique et pédologique : l'épaisseur de sol plus ou moins meuble influence fortement le ruissellement : l'épaisseur et la nature de cette couche de sols dépendent de facteurs climatiques, de la couverture végétale, d'événements tels que des incendies et bien sûr de la géologie régionale. En outre, lorsque la roche est quasiment affleurante, le ruissellement dépend aussi de sa nature géologique : une roche granitique avec tendance à l'arénisation produit un ruissellement moins intense et plus lent qu'une roche métamorphique peu érodable ; un socle calcaire souvent marqué par une structure faillée (voire de lapiaz) et avec une surface très irrégulière engendre un ruissellement souvent modéré à faible : un socle schisteux présente aussi une perméabilité en grand souvent plus élevé qu'une roche peu friable...

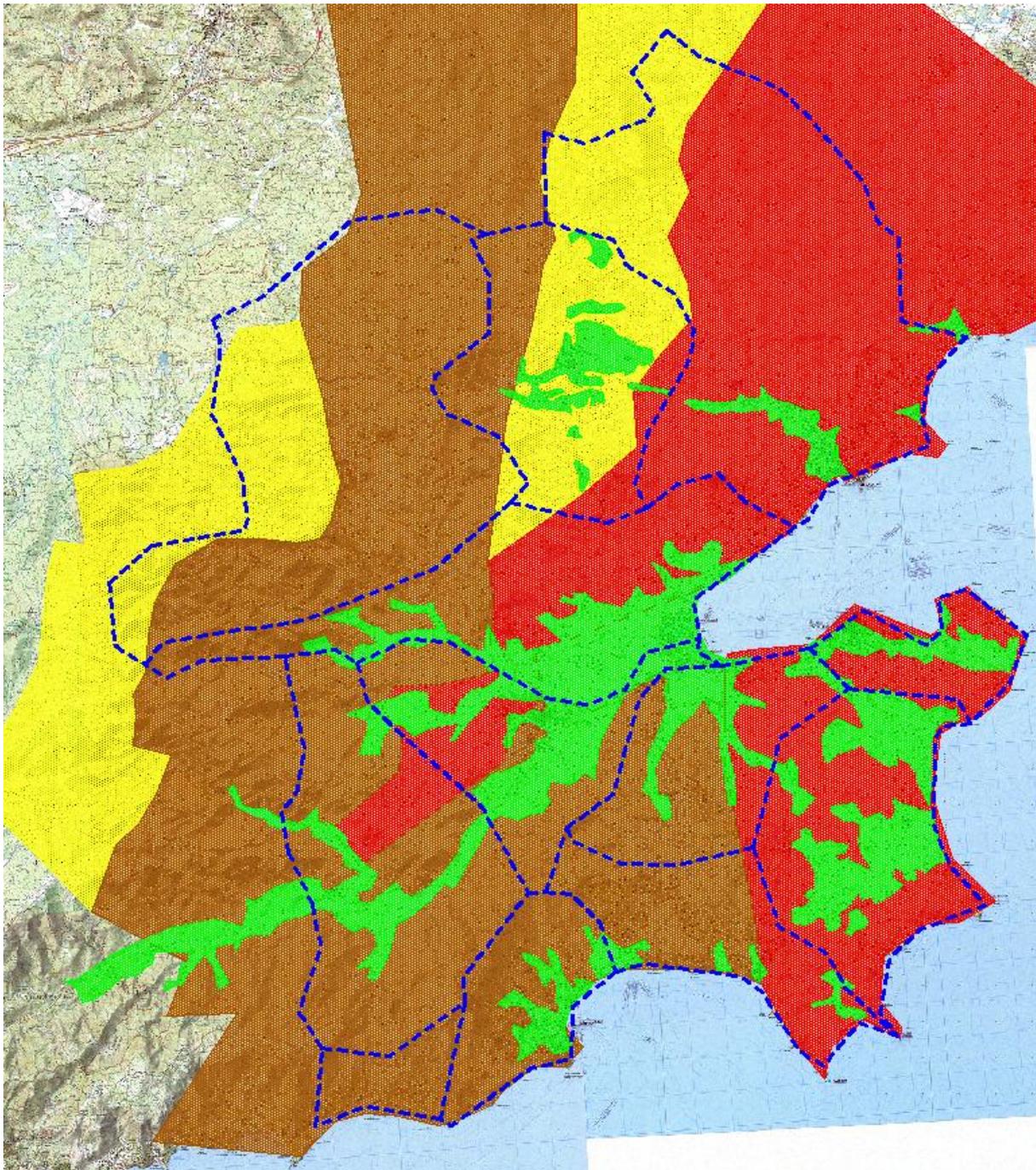
La détermination de ces caractéristiques du ruissellement doit se faire en utilisant divers documents dont des cartes ou images sous SIG (carte topographique de l'IGN, MNT, photo aériennes ou satellitaires...) ainsi que des investigations de terrain, particulièrement pour qualifier l'occupation et l'usage des sols, au moins en identifiant des aspects représentatifs à l'échelle d'un quartier ou d'un espace agricole ou naturel ; de telles visites de terrain sont aussi nécessaire en général pour qualifier la densité du réseau de drainage.

Il est à noter que l'influence de la nature géologique joue pour des bassins versants naturels ou agricoles et peu pour des bassins versants en zone urbaine ; en outre, les principales caractéristiques pédologiques et géologiques sur le territoire de la CCGST sont déjà prise en compte dans l'outil d'analyse hydrologique, et déduites automatiquement de la localisation du site étudié : il est néanmoins nécessaire de vérifier que ce site ne représente pas une anomalie locale par rapport aux grands ensembles pré-identifiés.

A extraire :

- **Couverture des sols, en identifiant le type de couverture végétale ou le type d'urbanisation, mais de manière assez précise selon une catégorisation précisée dans l'outil d'analyse hydrologique**
- **Usages des sols ou pratiques locales : enherbement ou non des cultures, défrichage ou non des boisements, revêtement ou non des jardins... selon une catégorisation précisée dans l'outil d'analyse hydrologique**
- **Pente du bassin versant (égale par défaut à celle de l'axe de drainage principal)**
- **Densité du réseau de drainage**
- **Nature géologique et pédologique (indiquée par la carte jointe à l'outil d'analyse hydrologique et ci-après)**

Figure 25 : Carte géologique simplifiée du territoire de la CCGST



Légende :



Grès



Granite arénisé, avec assez forte production de sable



Grès sur micaschistes avec passées schisteuses



Alluvions de plaine et fond de vallée, dominées par des sables et des limons

4.3.6 Caractérisation des conditions de ruissellement à l'état futur

L'état futur à prendre en compte résulte de deux évolutions probables :

- L'évolution de la parcelle sur laquelle s'inscrit le projet, en général un projet d'urbanisation. L'incidence à prendre en compte est une évolution des conditions locales de ruissellement et éventuellement de canalisation et d'écoulement des eaux ;
- L'évolution du bassin versant intercepté par ce projet : cette évolution résulte de la mise en œuvre du PLU de la commune. La prise en compte de cette évolution du bassin versant doit être faite de manière au moins qualitative dans le projet en considérant par exemple qu'une urbanisation aura pour effet de modifier et de canaliser les ruissellements en amont du site du projet.

Dans un premier temps, il s'agit alors de caractériser l'impact du projet sur les conditions de ruissellement : l'impact de l'imperméabilisation d'une parcelle ou d'un quartier (lors de son urbanisation par exemple) est généralement :

- Une augmentation de sa surface active et de son coefficient de ruissellement,
- Une diminution de son temps de réponse, du fait d'un écoulement plus rapide sur surface imperméable ou en collecter de surface ou souterrain,
- Une augmentation de la fréquence des rejets à un niveau correspondant au débit autorisé vers le réseau en aval : par exemple, si l'on dimensionne un ouvrage de régulation pour limiter le débit rejeté au débit de fréquence biennale calculé pour l'état initial du site, ce débit sera effectivement rejeté plusieurs fois par an et plus seulement une fois tous les deux ans en moyenne, les volumes de ruissellement étant majorés par le projet et activant assez fréquemment l'ouvrage de régulation de débit !

Dans un second temps, il s'agit de tenir compte des futures évolutions du bassin versant en amont : non réglementée, cette prise en compte doit être faite « par bon sens » en prenant en compte en particulier les critères suivants :

- Si la parcelle du projet est traversée par un talweg, c'est-à-dire un axe topographique naturel recevant les ruissellements de l'amont, les constructions doivent se faire hors de cet axe d'écoulement.
- Si elle est longée par un fossé ou un cours d'eau, il est nécessaire de laisser une bande non construite de 5 mètres de large le long de cet axe pour permettre d'éventuels futurs travaux d'entretien ou de busage, ainsi que pour tenir compte d'un risque de débordement avec écoulement à forte vitesse le long de cet axe hydraulique.
- Si les terrains en contrehaut sont susceptibles d'urbanisation ou de défrichement, le risque de coulée de boue en cas de fortes pluies durant les travaux doit être pris en compte, avec notamment la création d'un fossé ou d'un muret ou d'un merlon interceptant cette éventuelle coulée boueuse.

L'outil d'analyse hydrologique assure le calcul des paramètres de calcul à partir de la description du projet, en particulier la distribution de surface du bassin versant selon une catégorisation prédéfinie (toiture, allées, terrasses, jardin ...), mais aussi le type de système de collecte et d'évacuation des eaux pluviales sur la parcelle (écoulement diffus ou canalisation en surface ou souterraine).

A extraire :

- **Caractéristiques de l'état futur en termes de pente générale et de surfaces imperméabilisées selon une catégorisation précisée dans l'outil d'analyse hydrologique**
- **Nature, longueur et pente moyenne de l'axe hydraulique (fossé, caniveau, collecteur...) de collecte des eaux pluviales de la parcelle... selon une catégorisation précisée dans l'outil d'analyse hydrologique**
- **Prise en compte de l'évolution du bassin versant amont**

Remarque : dans le cas où l'outil d'analyse hydrologique n'est utilisé que pour estimer des débits à l'état actuel d'un site, sans analyse d'impact hydrologique d'un projet d'aménagement, ces paramètres sont facultatifs.

4.3.7 Caractérisation du milieu récepteur en aval

Le milieu récepteur en aval doit être analysé pour estimer sa capacité résiduelle et donc le débit qu'il pourra recevoir sans augmenter le risque d'inondation sur des sites vulnérables. C'est en fonction de cette capacité résiduelle que doit être fixé le débit maximal pouvant y être rejeté. En pratique, deux cas de figure peuvent se rencontrer :

- Soit la commune a fixé, au travers de la réglementation associée à son zonage d'assainissement pluvial (document annexé au PLU est opposable au tiers), les valeurs forfaitaires de débit maximal autorisé, en général exprimé sous forme d'un débit spécifique (en litre par seconde par m² urbanisé ou par m² de surface active) ;
- Soit aucune valeur n'est fixée par les documents d'urbanisme de la commune : dans ce cas, il est nécessaire d'obtenir un avis de la part des services techniques. A défaut, la règle spécifiée par la MISEN du Var (applicable aux projets soumis à déclaration ou autorisation au titre de la Loi sur l'Eau) consiste à considérer comme débit maximal admissible le débit atteint en fréquence biennale (une fois tous les deux ans en moyenne) à l'état initial du site. Il paraît néanmoins nécessaire de vérifier la capacité du réseau en aval, au moins en fournissant une description en termes de dimensions, nature et capacité hydraulique de la tête du réseau dans lequel est prévu le rejet.

Remarque : ces éléments ne sont utilisés que pour le dimensionnement d'un bassin de rétention et sont alors facultatifs si l'analyse hydrologique ne vise pas à déterminer des mesures compensatoires à l'imperméabilisation des sols par un projet d'aménagement.

A extraire :

- **Valeur spécifique de rejet autorisé par le PLU si elle existe**
- **Analyse éventuelle de capacité résiduelle du milieu récepteur et indication du débit maximal de rejet proposé**

4.3.8 Dispositif à créer de rétention ou de régulation des débits

En fonction des règles d'urbanisme, des prescriptions de conception et de dimensionnement de dispositifs de rétention ou de régulation doivent être appliquées.

En pratique, la démarche suivante doit être appliquée :

- Si la commune a fixé, au travers de la réglementation associée à son zonage d'assainissement pluvial (document annexé au PLU est opposable au tiers), les conditions d'intégration d'un dispositif de rétention (individuel ou semi-collectif) dans tout projet, le pétitionnaire doit appliquer cette réglementation en présentant le type de dispositif et les résultats de son calcul de dimensionnement effectué au moyen de l'outil d'analyse hydrologique ;
- Si le dossier est soumis à déclaration ou autorisation au titre de la Loi sur l'Eau, il doit prendre en compte les prescriptions fixées par la MISEN du Var en termes de dimensionnement de dispositifs de rétention.
- Si le dossier n'est pas soumis à déclaration ni autorisation au titre de la Loi sur l'Eau et si la commune n'a pas fixé de règles relatives aux dispositifs de rétention, le pétitionnaire doit recueillir l'avis des services techniques de la commune et proposer un dispositif de rétention d'un type et d'un dimensionnement conforme aux éléments fournis par l'outil d'analyse hydrologique.

Il est à noter que pour les projets concernés à la fois par la Loi sur l'Eau et des prescriptions spécifiques à la commune, ce sont les règles conduisant au dimensionnement le plus sécuritaire qui doivent être retenues.

L'outil d'analyse hydrologique intègre un calcul de dimensionnement de dispositifs compensatoires à l'imperméabilisation des sols fondé sur la méthode des pluies et un calcul effectué en application de la règle recommandée par la MISEN du Var : **ces paramètres sont facultatifs en cas d'analyse hydrologique d'un bassin versant à l'état actuel, sans étude de l'impact hydrologique d'un projet d'aménagement.**

A extraire :

- **Valeurs spécifiques éventuelles de dimensionnement de dispositif de rétention issue du règlement communal (débit de fuite et capacité volumique)**
- **Type de dispositif proposé**

4.4 Cas particulier : bassin ou zone d'accumulation des eaux existant sur le bassin versant

La présence éventuelle de dispositifs de rétention (par exemple un bassin de rétention) ou de zone naturelle d'accumulation des eaux sur le bassin versant est de nature à modifier son fonctionnement hydrologique. Il peut s'agir par exemple de plans d'eau implantés sur un parcours de golf ou encore de bassin de rétention créé lors de l'aménagement d'un lotissement.

Il n'existe pas d'inventaire exhaustif de ces points d'accumulation des eaux et qui ont pour effet de réguler les débits de ruissellement.

Il est donc nécessaire, lors de l'étude hydrologique de tout projet, de mener des investigations spécifiques pour identifier et caractériser de tels points d'accumulation selon la méthodologie suivante :

- Enquête auprès des services techniques et/ou du service d'urbanisme de la commune pour savoir s'il existe un bassin de rétention sur le bassin versant intercepté par le projet. Le cas échéant, le débit de fuite et la période de retour d'insuffisance de cet ouvrage doit être relevé.
- Investigations de terrain et analyse de la topographie du bassin versant pour identifier et caractériser une éventuelle zone de dépression ou d'accumulation des eaux de ruissellement : s'il existe une telle zone, il est nécessaire d'estimer sa capacité de rétention et d'identifier précisément le bassin versant qu'il intercepte.

Une fois identifiés, localisés et caractérisés de tels points d'accumulation des eaux et de régulation des débits, la prise en compte doit être faite dans le projet selon la démarche suivante :

1. Délimitation du sous-bassin versant intercepté par ce point d'accumulation ou bassin de rétention, selon la méthode décrite précédemment pour le bassin versant associé au projet ;
2. Détermination et caractérisation de l'axe de drainage principal de ce sous-bassin versant selon la méthode décrite précédemment pour le bassin versant associé au projet ;
3. Caractérisation des conditions de ruissellement sur ce sous-bassin versant selon la méthode décrite précédemment pour le bassin versant associé au projet ;
4. Prise en compte dans l'outil d'analyse hydrologique en soustrayant la superficie du sous-bassin versant associé au point d'accumulation de la superficie totale du bassin versant intercepté par le projet et intégration dans le modèle hydrologique sous forme d'un sous-bassin associé à un réservoir, comme présenté plus haut.

Les éléments à extraire sont donc ceux qui caractérisent le sous-bassin versant associé au point d'accumulation, la capacité de ce point d'accumulation et son débit de fuite s'il s'agit d'un bassin de rétention.

A extraire :

- **Tous paramètres descriptifs du sous-bassin versant intercepté (superficie, axe de drainage et conditions de ruissellement), comme présenté dans les trois premiers points plus haut**
- **Capacité maximale de la zone d'accumulation ou du bassin de rétention existant**
- **Débit de fuite en cas de bassin de rétention existant**

4.5 Utilisation de l'outil d'analyse hydrologique

4.5.1 Présentation générale

L'outil d'analyse hydrologique d'application du référentiel hydrologique de la CCGST associe deux outils spécifiques :

- Un classeur sous tableur EXCEL qui regroupe :
 - l'écran de saisie des données du projet préparées conformément aux indications données plus haut, avec des grilles d'aide cette saisie ;
 - une feuille;
 - une feuille de définition des paramètres à injecter dans le modèle hydrologique sous HEC-HMS ; en pratique, ce sont des fourchettes de valeurs qui sont proposées, accompagnées de conseils pour choix des valeurs à retenir ;
 - Une feuille de dimensionnement d'un éventuel bassin de rétention, établi en compensation à l'imperméabilisation des sols généra par un projet d'aménagement ou d'urbanisation ;
 - Une série de feuilles de calcul automatique des paramètres hydrologiques ;
 - Un rappel des pluies du référentiel hydrologiques de la CCGST.
- Un modèle hydrologique établi sous HEC-HMS, pour lequel les paramètres sont calculés automatiquement dans la feuille sous tableur.

Une présentation du logiciel HEC-HMS est donnée plus haut. L'utilisateur doit renseigner le modèle hydrologique en y reportant les valeurs calculées par l'outil de préparation des données sous EXCEL.

4.5.2 Classeur de préparation des paramètres de modélisation

Le choix a été fait d'un développement exclusivement à l'aide de formules de calcul et de tests à l'exception de macro-commandes pour assurer sa portabilité. Le classeur contient ainsi de nombreuses formules de calcul automatique, pour la plupart regroupées dans des feuilles placées en fin et qui ne doivent pas être modifiées : une protection est activée à cet effet.

4.5.2.1 Feuille « Guide »

Cette première feuille est destinée à rappeler les objectifs du classeur et donne des recommandations pour son utilisation.

4.5.2.2 Feuille « Site et projet » de saisie des paramètres du projet

4.5.2.2.1 Type d'écrans et protection de cellules

Cette feuille est formatée pour recevoir les paramètres définis plus haut et nécessaires aux calculs hydrologiques. S'agissant d'une feuille munie de listes déroulantes de choix pour aider à la saisie, les listes déroulantes associées ne doivent pas être modifiées.

L'emplacement des paramètres à saisir est encadré en rouge, alors que les paramètres issus d'un choix apparaissent dans des listes déroulantes avec indication à sélectionner (encadrés en bleu).

Les indications sont des cases non modifiables (la feuille étant sécurisée).

4.5.2.2 Contenu de la feuille et mode de renseignement

Cette feuille comporte tout d'abord une demande de renseignements (facultatifs) sur le projet : commune, maître d'ouvrage, objet et localisation du projet...

Est ensuite demandé une description du projet en termes de plan de masse, et plus particulièrement une indication de la répartition de la surface selon diverses classes prédéfinie (toiture, vie revêtue, pelouse...) : ces éléments sont utilisés pour estimer la surface active du projet, considérant que cette donnée peut conduire à quantifier l'impact hydrologique du projet et à préciser le volume et le débit de fuite d'un éventuel dispositif de rétention et de régulation des débits : ces paramètres seront a priori précisés dans les PLU des communes de la CCGST.

Le reste de la feuille est surtout destiné à fournir les informations nécessaires pour estimer les débits et les volumes de crues d'un groupe de 1 à 5 bassins versants concernant le projet d'aménagement : ces informations sont des paramètres descriptifs facilement identifiables et pas des paramètres hydrologiques, conformément à la typologie retenue dans le référentiel. Chacun de ces cinq bassins versants doit correspondre à des entités relativement homogènes au plan de l'occupation de sols.

Il est proposé en outre de décomposer l'axe hydraulique principal de chacun de ces bassins versants (ou sous-bassins versants) en 1 à 6 biefs relativement homogènes du point de vue de leur pente.

Sont alors demandées successivement les informations suivantes :

Pour chaque bassin versant :

- La description de chaque bief :
 - Longueur
 - Pente moyenne
 - Nature (à sélectionner dans une liste de choix)
 - Ces éléments sont utilisés pour calculer la pente moyenne pondérée du bassin versant
- La couverture des sols :
 - Type, selon une liste de choix (zone urbaine, champ, vigne...)
 - Usages, selon une liste de choix en rapport avec le type d'occupation de sols (par exemple, type d'habitat pour les zones urbaines, degré d'enherbement pour les zones agricoles ou degré de défrichement pour les zones naturelles)
- La densité du réseau de drainage, selon une liste de choix

- La nature géologique et pédologique du bassin versant, selon une liste de choix prédéfinis
- Un bilan sur le débit admissible par le milieu récepteur en aval :
 - Soit un débit spécifique maximal de rejet est fixé par le PLU
 - Soit une étude a permis de fixer ce débit
- Les caractéristiques d'un éventuel bassin de rétention ou point d'accumulation des eaux qui serait présent sur un des bassins versants : les paramètres demandés sont simplement le type (selon une liste), le débit de fuite éventuel, la capacité maximale et l'état de remplissage courant (selon une liste de choix)

Bien qu'elles ne soient pas utilisées dans la version actuelle, les données relatives au projet pourront à terme conduire à prévoir une feuille de calcul de l'impact hydrologique d'un projet et au dimensionnement d'un éventuel dispositif de compensation ou de régulation des débits.

4.5.2.3 Feuille « Paramètres modèle » de synthèse des paramètres de modélisation

Cette feuille regroupe tous les paramètres descriptifs des bassins versants à modéliser au moyen du modèle du référentiel établi sous HEC-HMS, considérant que ce modèle est formaté (en termes d'options de calcul à utiliser) et surtout regroupe les quantiles de pluies identifiés pour le territoire de la CCGST.

Cette feuille donne en particulier, pour chaque bassin versant :

- Sa superficie, à intégrer dans le fichier « Subbasin area » du modèle (en km²),
- Ses valeurs d'interception initiale, de CN et de taux d'imperméabilisation pour renseigner le fichier « Loss » du modèle,
- Sa valeur de temps de réponse (« Lagtime ») pour renseigner le fichier « Transform » du modèle,
- Les noms et valeurs des paramètres à utiliser pour renseigner le fichier « Baseflow » du modèle,
- La règle simple de calcul des temps de propagation le long d'éventuels biefs qui seraient modélisés, et ainsi renseigner le fichier « Routing » du modèle.

Ces valeurs sont estimées à partir des seuls renseignements fournis par l'utilisateur conformément à la typologie qui a été arrêtée pour le référentiel hydrologique de la CCGST.

4.5.2.4 Feuille « Compensation » de dimensionnement d'un bassin de rétention

La feuille nommée « Compensation » est automatiquement actualisée en fonction des informations données par l'utilisateur dans la feuille de saisie des données (« Site et projet ») ; les calculs et le graphique sont établis automatiquement, sans intervention de l'utilisateur.

Sur cette feuille sont tout d'abord résumés les paramètres descriptifs du projet et du site (surfaces actives, débit de fuite maximal autorisé ...), puis un calcul de la capacité de

rétenion nécessaire est effectués par la méthode des pluies, sachant qu'une majoration de 10% est appliqué au volume maximal à retenir pour estimer la capacité volumique du futur bassin de rétenion.

Le calcul est présenté, à titre indicatif, pour un événement de fréquence trentennale, mais c'est par défaut la capacité pour un événement de fréquence centennale qui est retenue à l'issue de l'application de cette méthode.

Cette valeur est ensuite comparée à celle que fournit l'application d'une éventuelle règle locale inscrite dans le PLU de la commune (en général, une capacité estimée à partir d'un ratio par hectare de surface active à l'état projet, selon la doctrine de la MISEN du Var) et la valeur retenue est la plus fort des deux.

4.5.2.5 Feuilles d'estimation des paramètres hydrologiques

Quatre feuilles d'estimation des paramètres Interception initiale I_a , coefficient CN, taux d'imperméabilisation et temps de réponse des bassins versants ont été intégrées dans le classeur, mais ne sont ni accessibles ni à utiliser pour une utilisation courante du classeur.

Classiquement, ces paramètres peuvent être approchés en appliquant des grilles ou des tableaux donnant des ordres de grandeur. Afin d'éviter à l'utilisateur la manipulation de ces tableaux, qui induisent en outre une assez forte « suggestivité » et donc une certaine hétérogénéité des analyses hydrologiques, des formules de calcul automatique ont été mises au point, tant pour proposer une valeur que pour fournir une fourchette.

Les approches retenues sont les suivantes :

- Pour l'interception initiale I_a comme pour le coefficient CN, une valeur maximale (40 mm pour I_a et 100 pour CN) est pondérée par quatre indices compris entre 0 et 1, et dont la valeur dépend des paramètres occupation des sols, usages (ou pratiques), pente du bassin versant, densité du réseau de drainage et géologie : la valeur des indices affectés à chaque classe a fait l'objet d'ajustement itératif, les valeurs étant jugées satisfaisante quand le calcul donne des estimations conformes aux ordres de grandeur déjà établi sur le territoire de la CCGST. Dans le cas de CN, l'indice de Gravélius qui mesure la compacité du bassin versant, et permet donc de différencier les réseaux en peigne des réseaux en éventail, a aussi été pris en compte.
- Le taux d'imperméabilisation utilisé dans HEC-HMS n'est pas le rapport entre la surface urbanisée et la surface totale, mais seulement la partie du bassin versant qui ruisselle à 100% directement vers l'exutoire. Le caractère urbain d'un bassin versant est déjà pris en compte dans le choix des paramètres I_a et CN (et dans l'estimation du temps de réponse) : ce taux est donc estimé en prenant en compte seulement l'occupation des sols, avec une valeur très faible (1 ou 2% pour les zones agricoles et naturelle, et entre 5% et 20% pour les zones urbaines en fonction de la densité de l'habitat).
- Le temps de réponse est estimé comme étant égal à 65% du temps de concentration, lui-même estimé sous la forme du rapport entre la longueur de drain et la vitesse d'écoulement ($T = L/V$), ceci sur chacun des biefs qui composent le bassin versant. La longueur de chaque bief et sa pente moyenne sont fournies par l'utilisateur, ainsi que la nature de cet axe hydraulique : selon cette nature, un coefficient de rugosité moyen est affecté et la vitesse est estimée par application de la formule de Strickler en supposant un écoulement sur une lame d'eau de 5 cm de haut et 30 cm de large.

Les à noter que les estimations de l'interception initiale I_a , du coefficient CN et du temps de réponse sont complétés par une estimation pour chaque bassin versant d'une fourchette probable à respecter par l'utilisateur s'il souhaite modifier la valeur proposée.

Les valeurs minimales et maximales ont été estimées de la manière suivante :

- Pour l'interception initiale : le minimum est fixé à 5 mm en secteur urbain, 15 mm en secteur agricole et 20 mm en secteur naturel, tandis que le maximum est fixé à 10 mm en zone urbaine dense, 25 mm en secteur de villas sur grandes parcelles, à 30 mm en zone agricole et à 35 mm en zone naturelle ;
- Pour le coefficient CN : les valeurs minimales sont de 80 en zone urbaine dense, 50 en secteur de villas sur grandes parcelles, à 50 en zone agricole et à 40 en zone naturelle. Les maximaux sont de 90 en zone urbaine, 65 en zone agricole et 60 en zone naturelle.
- Pour le temps de réponse des bassins versants, l'estimation du minimum et du maximum a été faite en calculant le rapport entre la longueur de drain du bassin versant et des vitesses de 1,5 m/s et 0,25 m/s respectivement. Ces valeurs conduisent à des fourchettes larges, ce qui traduit le caractère essentiellement homogènes des vitesses d'écoulement sur un bassin versant lui-même hétérogène en termes de pente et de nature des axes d'écoulement ; les formules classiques d'estimation du temps de concentration donnent généralement un rapport de 1 à 2 ou 1 à 3 suivant la formule utilisée. Il est donc recommandé d'utiliser une valeur proche de celle qui est proposée, car elle est nécessairement plus précise que toutes les formules statistiques ou semi-empiriques, qui ne traduisent que des moyennes avec des très fortes distributions.

Remarque importante : les valeurs retenues pour les coefficients CN sont légèrement inférieures aux valeurs tabulées dans la littérature. Des travaux de recherche récents menés sur de petits bassins versant du pourtour méditerranéen, comme les études hydrologiques récentes sur la CCGST, indiquent que les valeurs pertinentes pour le cas de petits bassins versants sont un peu inférieures à celles données par les tableaux généraux.

4.5.2.6 Feuille des listes déroulantes

Cette feuille regroupe l'ensemble des listes de choix proposés à l'utilisateur lors du renseignement de la feuille des données du projet ; elles ne doivent bien sûr pas être modifiées, d'autant plus que les intitulés sont utilisés comme critères de tests dans les formules de calcul.

4.5.2.7 Feuille des pluies

La feuille « Pluies » regroupe les quantiles et paramètres de Montana des pluies infra-horaires et des pluies longues du référentiel, pour toutes les fréquences utiles et présentées dans ce rapport. Elle rappelle aussi les valeurs de pluies exceptionnelles pour diverses durées d'averse.

Ces valeurs sont utilisées automatiquement dans le classeur pour appliquer la méthode des pluies au calcul d'un bassin de rétention. Elles sont aussi rappelées à titre indicatifs pour aider l'utilisateur dans son analyse.

4.5.3 Adaptation du modèle hydrologique

L'adaptation du modèle hydrologique que doit faire l'utilisateur consiste à :

- Sauvegarder le modèle sous un répertoire et avec un nom correspondant à son projet ou son étude.
- Construire la topologie de son modèle, c'est-à-dire créer un modèle (onglet « Components », option « Basin Model Manager ») : il doit nommer son modèle puis placer les sous-bassins sur le fond en utilisant le bouton adapté ; le cas échéant, il peut créer un ou plusieurs biefs associés à ces bassins versants (après avoir changé de bouton).
- Connecter le cas échéant à ces biefs éventuels.
- Une fois terminée la topologie, l'utilisateur doit utiliser le menu « Parameters » pour fournir les paramètres associés aux divers bassins versants, par lecture des valeurs établies dans l'outil de préparation des données sous EXCEL.
- Dans le cas où l'utilisateur a intégré des biefs, il doit renseigner uniquement le temps de propagation des crues le long de chaque bief ; en première approche, il s'agit du rapport entre la vitesse (en m/s) et la longueur du bief (en m) : le temps ainsi calculé est en secondes et doit être divisé par 60 pour le fournir en minutes comme le demande le logiciel. Par défaut la vitesse de propagation peut être prise à 1,5 m/s.

Il n'est pas nécessaire que les bassins versants étudiés soient interconnectés : dans ce cas, un message (non bloquant) indique que les exutoires ne sont pas définis, mais le calcul s'effectue et donne les débits à l'exutoire de chaque bassin versant.

4.5.4 Lancement des simulations et analyse des résultats

Pour lancer les simulations, l'utilisateur doit indiquer ce qu'il veut simuler. Pour cela, il sélectionne « Create Simulation Run » dans l'onglet « Compute » du menu principal en indiquant :

- Le nom du calcul, en général la période de retour testée
- Le modèle à utiliser (celui que l'utilisateur vient de créer)
- Le modèle météorologique à utiliser : il s'agit de « Region 1 », « Region 2 » ou « Region 3 » suivant la localisation du bassin versant étudié par rapport aux trois régions pluviométriques définies plus haut ;
- Les spécifications de calcul, qui correspondent ici uniquement à la période de retour de l'événement à simuler (entre 2 ans et 100 ans ou événement exceptionnel).

Le lancement du calcul se fait alors soit en sélectionnant le nom du calcul à effectuer et en cliquant avec le bouton droit de la souris, soit au travers du menu « Compute ».

Remarque importante : les pluies de projet ont été préparées en intégrant une première averse sur une heure ayant pour effet de simuler une saturation des sols avant la pluie de projet. Pour chaque région pluviométrique, les huit pluies de projet sont enregistrées à des dates fictives (une par jour du 1^{er} janvier 2000 au 8 janvier 2000 inclus), avec un début de pluie de projet à 1h, l'averse « saturante » étant inscrite entre 0h et 1h. Par défaut, les

simulations commencent à 1h, considérant que les pluies de projet représentent des événements probables d'orages, pas nécessairement précédés de quelques minutes d'un épisode pluvieux important. Pour simuler l'effet saturant d'une pluie immédiatement avant l'orage, il est alors nécessaire de débiter les simulations à 0h et non à 1h : pour cela, il faut modifier l'heure de début de simulation dans le « Control Specification » utilisé. La prise en compte de cet effet de saturation immédiatement avant l'averse joue peu sur les zones urbaines, mais peut majorer les débits en zone mixte, agricole ou naturel de 20 à 30%.

4.5.5 Traitement et analyse des résultats, incertitudes

La consultation des résultats se fait dans l'onglet « Results » de l'écran de gauche et en sélectionnant le calcul à analyser (par clic à la souris). Pour chaque bassin versant est proposé un tableau de synthèse, mais aussi des tableaux et graphiques divers.

Dans le tableau de synthèse, le débit maximal est indiqué ainsi que le volume de crue : pour ce dernier, l'unité est par défaut le mm de pluie correspondant et il faut sélectionner l'unité 1000m³ pour voir ce volume exprimé en milliers de m³.

Parmi les graphiques utiles à l'analyse, « Cumulative Precipitation » montre l'évolution du cumul de pluie durant l'événement simulé et renseigne donc sur la pluie de projet ; le graphique « Graph » montre la comparaison entre le hyétogramme et l'hydrogramme généré à l'exutoire du bassin versant.

Afin de produire un document d'analyse hydrologique, les informations minimales à extraire de ces résultats de simulation sont alors :

- Le nom du bassin versant, en lien avec une carte de délimitation
- Sa superficie
- Son débit de pointe et son volume de crue pour le ou les événements simulés, à définir en termes de période de retour et de cumul de pluie
- Le cas échéant, le graphique montrant la comparaison entre le hyétogramme et l'hydrogramme, qui illustre le temps de réponse du bassin versant.

Il est attendu de l'utilisateur qu'il présente des résultats avec des chiffres significatifs, tenant compte de la précision des paramètres utilisés. Ainsi, afficher un débit de quelques m³/s avec deux chiffres après la virgule témoigne d'un manque de réflexion sur la signification des décimales. **D'une manière générale, il est recommandé de considérer toute estimation de débit comme ayant une précision de l'ordre de 15 à 20%.**

Pour toute utilisation des hydrogrammes calculés, il est possible de les exporter vers un tableur : le plus simple est d'afficher le tableau de valeurs calculées (via « Summary Table ») et de faire un simple copier-coller de la colonne de valeurs vers le tableur ; cette méthode permet par exemple de superposer les hydrogrammes de plusieurs bassins versants sur un même graphique ; ce genre de manipulation de résultats est aussi possible directement sous HEC DSSVue. Les graphiques tels que les pluviogrammes, hyétogrammes et hydrogrammes produits par HEC-HMS peuvent être intégrés dans un rapport en effectuant une simple copie d'écran.

4.5.6 Comparaison aux valeurs de référence

Il est délicat de considérer des débits comme des « valeurs de référence » dans la mesure où :

- La réponse hydrologique d'un bassin versant dépend de nombreux paramètres sans relation linéaire entre le débit maximal et la valeur de ces paramètres, rendant délicate toute comparaison entre bassins versants ;
- Pour un même bassin versant ses paramètres hydrologiques tels le taux de ruissellement ou le temps de réponse varient en fait d'un événement à l'autre du fait de facteurs extérieurs, rendant encore plus improbable toute estimation simple de débit maximal.

Néanmoins, il est utile de disposer, pour un territoire tel que celui de la CCGST sur lequel plusieurs paramètres sont assez peu variables (dont la géologie, les types d'urbanisation, les cultures et pratiques de gestion des espaces naturels), de valeurs de références en fonction d'un nombre réduit de paramètres. En pratique, il s'agit plutôt d'ordres de grandeur que de véritables valeurs de référence.

Les valeurs de référence, données ici à titre indicatif, dépendent des seuls paramètres suivants :

- Le type d'occupation des sols, à l'exclusion de toute prise en compte des pratiques de gestion de ces espaces, les valeurs données étant moyenne entre les configurations « extrêmes » (par exemple entre une zone agricole totalement enherbée et une zone agricole totalement désherbée) ;
- La superficie du bassin versant, considérant toutefois que le débit maximal n'est en général pas proportionnel à la surface mais plutôt d'une puissance (0,8 en moyenne) de cette surface : ce sont donc des débits pseudo-spécifiques et non spécifiques qui sont donnés. Pour une valeur de référence « d », un bassin versant de surface S aurait alors un débit maximal de l'ordre de $d \times S^{0,8}$ et non pas $d \times S$;
- La période de retour de l'événement analysé.

Les valeurs de référence sont alors déduites de l'utilisation de trois paramètres tabulés ci-après et dont les valeurs ont été ajustées après estimation de débits maximaux pour diverses périodes de retour et pour divers bassins versants du territoire, différents par leur gamme de superficie et par leur type d'occupation des sols.

Le débit maximal Q (en m³/s) à l'exutoire d'un bassin versant de surface S (en km²) du territoire de la CCGST peut alors être estimé, de manière très grossière, par application de la formule suivante :

$Q = A \times B \times C \times S^{0,8}$ <p>A dépend de la période de retour</p> <p>B dépend d type d'occupation des sols</p> <p>C dépend du mode de drainage du bassin versant</p>

Les tableaux suivants donnent des ordres de grandeur proposés pour ces trois paramètres A, B et C :

Valeur du paramètre A :

Période de retour	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans
A en zone agricole ou naturelle	0,5	0,7	1	1,4	1,7	2,0	2,4
A en zone urbaine	0,5	0,8	1	1,25	1,4	1,6	1,9

Le paramètre A dépend de la nature du bassin versant (en termes d'occupation des sols), ce qui s'explique par une évolution beaucoup plus forte du taux de ruissellement en zone agricole ou naturelle qu'en zone urbaine, où le rapport entre les débits est plus proche du rapport entre les pluies de diverses périodes de retour.

Valeur du paramètre B :

Type de bassin versant	Naturel à faible ruissellement	Naturel à fort ruissellement dense	Vignes ou verger	Urbain dense	Urbain pavillonnaire
Valeur de B	4	6	5	10	8

Un bassin versant naturel est à fort ruissellement s'il est très pentu, si la roche est à presque à nu, ou encore si les sols sont densément défriché ou pâturés. Une zone agricole quelconque est à rattacher soit à de la vigne ou un verger, soit à une zone naturelle à fort ruissellement.

Valeur du paramètre C :

Réseau hydraulique	Bassin naturel ou agricole			Bassin urbain	
	Réseau peu dense	Réseau moyennement dense	Réseau dense	Réseau souterrain partiel	Réseau souterrain complet
Valeur de C	0,8	1	1,2	1	1,3

L'utilisateur peut aussi utiliser divers formules ou abaques d'estimation de débit (Formule CRUPEDIX, formule SOCOSE, abaques SOGREAH...) ou encore la formule rationnelle et comparer ces estimations avec les valeurs issues des simulations : il convient de retenir que ces formules simplifiées ne sont que des estimations de moyennes établies au plan national qui ignorent toute spécificité d'un territoire, et plus encore d'un bassin versant.

En cas d'écart important entre les résultats de simulation et les valeurs estimées par ces formules, il convient de s'interroger sur le domaine de validité de ces formules et de considérer que les méthodes CRUPEDIX, SOCOSE et SOGREAH concernent des bassins versants naturels et tendent à sous-estimer les débits, alors que la formule rationnelle tend à surestimer les débits en cas de très petit bassin versant. En outre, ces formules n'estiment que le débit de fréquence décennale.