

Appui au SCHAPI 2013 – Module 1 - Identification du rôle potentiel du karst dans les crues sur le territoire du SPC Méditerranée-Est

Rapport final
BRGM/RP-62888-FR
décembre 2013

Appui au SCHAPI 2013 – Module 1 - Identification du rôle potentiel du karst dans les crues sur le territoire du SPC Méditerranée-Est

Rapport final

BRGM/RP-62888-FR
décembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2013 13RISI01

J.-B. Charlier, H. Chapuis, J.-F. Desprats

Vérificateur :

Nom : J.-C. Maréchal

Date : 15/11/2013

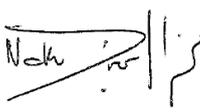
Signature : 

Signature :

Approbateur :

Nom : N. Dörfliger

Date : 17/01/2014

Signature : 

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.

Mots clés : Crue, Hydrologie, Karst, Prévion, Vigilance

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

J.-B. Charlier, H Chapuis, J.-F. Desprats. 2013 - Appui au SCHAPI 2013 – Module 1 -Identification du rôle potentiel du karst dans les crues sur le territoire du SPC Méditerranée-Est - Rapport final. Rapport BRGM/RP-62888-FR.

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM

Synthèse

Dans le cadre de la convention entre le BRGM et la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) pour le compte du SCHAPI (Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations), deux axes de travail ont été définis pour l'année 2013 :

- l'application de l'Indicateur Karst (IK) sur quatre bassins du territoire du SPC Méditerranée-Est sélectionnés par le SCHAPI sur proposition du SPC ;
- l'étude de l'évaluation de la prévision et l'élaboration d'une méthode d'analyse de risque de crue sur les bassins à remontée de nappe, pour le compte du SPC Artois – Picardie.

Ce programme de travail est financé à 80% par la DGPR, et à 20% par le BRGM dans le cadre de ses actions de Service Public.

Le présent rapport fait état du premier axe de travail sur l'Indicateur Karst (IK). Prédire les crues sur les bassins karstiques demeure une question complexe car le karst est un hydrosystème hétérogène dans lequel l'infiltration joue d'abord un rôle important avant que des échanges souterrain-surface ne deviennent prédominants lors des crues une fois que le karst est saturé. Une meilleure prédiction dans ce contexte nécessite une approche hydrogéologique spécifique qui prend en compte les caractéristiques du karst et la dynamique des écoulements souterrains en milieu hétérogène.

Suite à la demande du SPC Méditerranée-Est, le SCHAPI a sélectionné quatre bassins où le karst est susceptible de jouer un rôle dans la genèse des crues sur des tronçons réglementaires : les bassins du Gapeau à Solliès-Pont, du Caramy à Vins-sur-Caramy, de l'Huveaune à Aubagne, et de l'Estéron à Le Broc. L'application de la méthodologie de l'IK nécessite une identification préalable du rôle du karst dans les crues éclair et l'analyse de chroniques de données piézométriques ou débitométriques de sources karstiques. Cependant, sur les quatre bassins sélectionnés, seules deux sources sont instrumentées par la DREAL (sources Saint-Pons et Caramy), et aucune donnée piézométrique n'est disponible à ce jour sur les secteurs d'étude. Ainsi, l'étude 2013 se situe en amont de la mise en place de la méthode IK. Son objectif global est de mieux comprendre le rôle potentiel du karst dans les crues, ses contributions et ses zones d'influences privilégiées en vue de proposer une instrumentation de sites karstiques stratégiques qui pourraient servir d'indicateur karst dans le futur.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont :

- d'identifier les unités karstiques susceptibles d'influencer les crues à partir de la combinaison de deux indices cartographiques sol et karst ;
- de déterminer les facteurs influençant la réponse hydrologique en comparant plusieurs indicateurs de l'état hydrique initial (indicateurs d'humidité du sol, du débit de base du cours d'eau et des deux sources karstiques) ;
- de caractériser les contributions du karst aux crues en étudiant les échanges latéraux sur un tronçon de rivière (entre deux stations hydrométriques) par une approche de modélisation appliquée sur les bassins de l'Huveaune et de l'Estéron qui comportent plusieurs stations en région karstique ;
- d'identifier pour l'ensemble des bassins les points d'eau d'intérêt à suivre pour initier l'acquisition de chroniques de données sur les eaux souterraines.

Les résultats montrent que :

- l'influence des zones karstiques sur les crues est faible pour le bassin de l'Estéron, et forte sur les bassins de l'Huveaune, du Caramy, et du Gapeau ;
- l'influence de l'état de saturation du karst sur l'ampleur de la réponse hydrologique varie selon les bassins. Elle semble être significative pour les bassins du Caramy et de l'Huveaune au contraire de l'Estéron. Concernant le Gapeau, les indicateurs à disposition ne semblent pas être pertinents pour bien caractériser cette réponse hydrologique dans le cas d'états hydriques intermédiaires entre sec et saturé ;
- le karst joue un rôle prédominant dans les crues de l'Huveaune sur la partie amont qui génère également l'essentiel de la crue à Aubagne par propagation de l'onde de crue. Sur l'Estéron, au contraire, aucune évidence de l'importance de contributions de systèmes karstiques n'a pu être mise en évidence à partir des données disponibles.

Sur la base de ces résultats, un ensemble de points d'eau (sources principalement) karstiques susceptibles de servir d'indicateur karst pour les différents bassins a été proposé. En concertation avec le SCHAPI et le SPC MED EST, le bassin du Gapeau a été sélectionné pour l'instrumentation en octobre-novembre 2013 de trois sites pour un suivi pluriannuel. Nous recommandons l'instrumentation des bassins de l'Huveaune et du Caramy dans le cadre d'autres projets ou financements.

Remerciements :

Les auteurs tiennent à remercier vivement Bruno Arfib de l'Université d'Aix-Marseille, pour ses conseils avisés sur l'hydrogéologie du massif de la Sainte-Baume et pour avoir partagé ses connaissances de terrain sur les bassins du Gapeau et de l'Huveaune. Sont également remerciés les clubs de spéléologie du Comité départemental de spéléologie des Alpes d'Azur (CDS 06) pour la mise à disposition des données cavité et traçage sur le bassin de l'Estéron, et de l'association Spélé-H₂O par l'intermédiaire de Thierry Lamarque pour l'instrumentation de la grotte de Truébis.

Sommaire

1. Introduction.....	13
2. Présentation des sites et des données disponibles.....	15
2.1. SITES D'ETUDE	15
2.1.1. Situation régionale	15
2.1.2. Les bassins versants sélectionnés.....	18
2.1.3. Discussion sur les bassins hydrogéologiques	27
2.2. DONNEES SPATIALES	30
2.3. DONNEES TEMPORELLES	31
2.3.1. Données de pluie.....	31
2.3.2. Données de débit.....	31
2.3.3. Données d'Humidité du sol	31
3. Identification des surfaces karstiques influençant les crues	33
3.1. DE LA NECESSITE DE COMBINER DES INDICES GEOMORPHOLOGIQUES, PEDOLOGIQUES ET GEOLOGIQUES	33
3.2. INDICE SOL	34
3.3. INDICE PENTE.....	36
3.4. UN INDICE KARST.....	37
3.4.1. Comment intégrer le potentiel de karstification dans un indice cartographique ?.....	37
3.4.2. Construction d'un indice KARST	39
3.5. ZONAGE DE L'INFLUENCE POTENTIELLE DU KARST AUX CRUES.....	41
3.5.1. Bassin de l'Huveaune	43
3.5.2. Bassin du Gapeau	44
3.5.3. Bassin du Caramy.....	45
3.5.4. Bassin de l'Estéron	46
4. Comparaison des indicateurs de l'état hydrique du bassin dans les relations Pluie-Débit.....	47
4.1. METHODE PLUIE-DEBIT	47
4.1.1. Problématique et objectifs.....	47
4.1.2. Sélection des épisodes de crue	47
4.1.3. Indicateurs de l'état hydrique initial	48
4.2. ANALYSES PLUIE-DEBIT	49

4.3. COMPARAISON DES INDICATEURS.....	50
5. Contribution du karst au cours de la crue	53
5.1. APPROCHE PAR MODELISATION.....	53
5.1.1. Problématique et objectifs.....	53
5.1.2. Modélisation des échanges latéraux.....	54
5.1.3. Stratégie de calibration	56
5.2. ECHANGES LATERAUX SUR LE BASSIN DE L'HUVEAUNE	56
5.2.1. Exemple d'analyse sur une crue monopie.....	58
5.2.2. Analyse sur les fortes crues	60
5.2.3. Synthèse.....	61
5.3. ECHANGES LATERAUX SUR LE BASSIN DE L'ESTERON.....	64
5.4. SYNTHESE	66
6. Instrumentation de sites karstiques : propositions & choix des sites.....	67
6.1. IDENTIFICATION DES SITES KARSTIQUES D'INTERET POUR L'INSTRUMENTATION.....	67
6.1.1. Bassin de l'Huveaune	67
6.1.2. Bassin du Gapeau	70
6.1.3. Bassin du Caramy	73
6.1.4. Bassin de l'Estéron	74
6.2. CHOIX DES SITES POUR L'INSTRUMENTATION	76
6.3. SITES INSTRUMENTES	76
6.3.1. Grotte de Truebis à Cuers	76
6.3.2. Source de la Font du Thon à Solliès-Toucas	77
6.3.3. Source du Rieu Fré à Montrieux le Vieux, Meounes les Montrieux	78
7. Conclusion	79
8. Bibliographie.....	81

Liste des illustrations

Illustration 1. Localisation des 4 bassins d'étude : le Caramy à Vins, le Gapeau à Solliès-Pont, l'Huveaune à Aubagne, et l'Estéron à Le Broc.....	15
Illustration 2. Carte structurale de la Basse Provence et du domaine subalpin méridional. Situation des principales sources karstiques (Guieu et Rousset, 1980, modifié in Roux, 2006).	16
Illustration 3. Aquifères de Provence et réseau régional (Valencia, 2000 in Roux, 2006).....	17

Illustration 4. Lithologie et hydrogéologie des terrains Mésozoïque de la région Marseillaise (Cavalera, 2007).....	18
Illustration 5. Carte topographique (IGN) du bassin versant de l’Huveaune à Aubagne présentant les sous-bassins de Roquevaire et de Saint-Zacharie.....	19
Illustration 6. Carte géologique (Brgm 1/1 000 000) du bassin versant de l’Huveaune à Aubagne ; avec les formations triasiques en violet, jurassiques en bleu, crétacé en vert, et tertiaires en jaune.....	20
Illustration 7. Occupation du sol (Corine Land Cover) du bassin versant de l’Huveaune à Aubagne ; (couvert végétal naturel en vert et urbanisation en rouge).....	20
Illustration 8. Carte topographique (IGN) du bassin versant du Gapeau à Solliès-Pont.....	21
Illustration 9. Carte géologique (Brgm 1/1 000 000) du bassin versant du Gapeau à Solliès-Pont ; avec les formations triasiques en violet, jurassiques en bleu, crétacé en vert, et tertiaires en jaune.....	22
Illustration 10. Occupation du sol (Corine Land Cover) du bassin versant du Gapeau à Solliès-Pont ; (couvert végétal naturel en vert et urbanisation en rouge).....	22
Illustration 11. Carte topographique (IGN) du bassin versant du Caramy à Vins-sur-Caramy.....	23
Illustration 12. Carte géologique (Brgm 1/1 000 000) du bassin versant du Caramy à Vins-sur-Caramy ; avec les formations triasiques en violet, jurassiques en bleu, crétacés en vert, et tertiaires en jaune.....	24
Illustration 13. Occupation du sol (Corine Land Cover) du bassin versant du Caramy à Vins-sur-Caramy ; (couvert végétal naturel en vert et urbanisation en rouge).....	24
Illustration 14. Carte topographique (IGN) du bassin versant de l’Estéron à Le Broc.....	25
Illustration 15. Carte géologique (Brgm 1/1 000 000) du bassin versant de l’Estéron à Le Broc ; avec les formations triasiques en violet, jurassiques en bleu, crétacé en vert, et tertiaires en jaune.....	26
Illustration 16. Occupation du sol (Corine Land Cover) du bassin versant de l’Estéron à Le Broc ; (couvert végétal naturel en vert et urbanisation en rouge).....	26
Illustration 17. Synthèse des données de traçage en périphérie du massif de la Sainte-Baume (d’après Cavalera, 2007 ; SAFEGE, 2011 ; Fournillon, 2012).....	28
Illustration 18. Synthèse des données de traçage sur le bassin de l’Estéron (données du Comité de Spéléologie 06).....	28
Illustration 19. Seuil hydrométrique de la source Saint-Pons à Gémenos.....	29
Illustration 20. Seuil hydrométrique de la source Caramy à Mazaugues.....	30
Illustration 21. Stations hydrométriques sélectionnées avec en blanc les stations mesurant le débit des cours d’eau et en grisé celles mesurant le débit des sources (source: Banque Hydro).....	31
Illustration 22. Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique (source : Bakalowicz, 1999, SDAGE Rhône - Méditerranée – Corse).....	33
Illustration 23. Carte des sols (BD Sols 1/250 000) du bassin versant de l’Huveaune à Aubagne.....	35
Illustration 24. Tableau de détermination des classes de Piérosité.....	35
Illustration 25. Tableau de détermination des classes de l’indice SOL.....	35
Illustration 26. Indice SOL sur le bassin versant de l’Huveaune à Aubagne.....	36
Illustration 27. Tableau de détermination des classes de l’indice PENTE.....	36
Illustration 28. Indice PENTE sur le bassin versant de l’Huveaune à Aubagne.....	37

Illustration 29. Pourcentage des cavités et sources par unité lithologique ; la surface représentative de chacune des unités est également indiquée en pourcentage.....	38
Illustration 30. Potentiel de karstification par lithologie	39
Illustration 31. Carte lithologique (d'après BRGM 1/50 000) et carte des cavités (BDCAVITE) du bassin versant de l'Huveaune à Aubagne	40
Illustration 32. Tableau de détermination des classes de l'indice KARST.....	40
Illustration 33. Indice KARST sur le bassin de l'Huveaune.....	41
Illustration 34. Indice ruissellement / Infiltration comme indicateur de contribution du karst aux crues, en combinant un indice SOL (infiltration diffuse), un indice PENTE, et un indice KARST (infiltration localisée)	42
Illustration 35. Tableau de détermination des classes de l'indice Ruissellement / Infiltration.	42
Illustration 36. Zonage Ruissellement / Infiltration sur le bassin de l'Huveaune.....	43
Illustration 37. Zonage Ruissellement / Infiltration sur le bassin du Gapeau	44
Illustration 38. Zonage Ruissellement / Infiltration sur le bassin du Caramy	45
Illustration 39. Zonage Ruissellement / Infiltration sur le bassin de l'Estéron.....	46
Illustration 40. Exemple de séparation des hydrogrammes de crue au pas de temps horaire pour deux épisodes de crue sélectionnés dans un premier temps sur la base de chroniques journalières ; la figure du bas représente le débit en échelle log qui permet de localiser le point d'inflexion sur la décrue pour séparer le volume de crue et le volume de base.....	48
Illustration 41. Relations Pluie-Débit pour le bassin du Caramy à Vins-sur-Caramy. Chaque diagramme binaire présente 4 classes pour un indicateur hydrique initial différent : avec de haut en bas et de gauche à droite le SWI, le débit de base du cours d'eau, le débit de base de la source Caramy, et le débit de base de la source St-Pons ; les ajustement des crues pour chaque classe sont réalisés dans ce cas avec une loi puissance.....	49
Illustration 42. Comparaison des ajustements réalisés sur les relations pluie-débit en fonction des quatre classes d'états hydriques initiaux sec, intermédiaire 1, intermédiaire 2, et humide pour les quatre indicateurs SWI, Débit de base du cours d'eau (Qbase), débit de base de la source Caramy (Sce Caramy), et débit de base de la source St Pons (Sce St Pons) ; le coefficient d'ajustement présenté est la racine carré de l'erreur quadratique moyenne (root-mean-square error, RMSE) qui est à minimiser pour optimiser l'ajustement.....	51
Illustration 43. Schématisation des processus latéraux dominants lors des crues selon différents états hydriques initiaux sur un tronçon entre deux stations hydrométriques amont I (inflows) et aval O (outflows).....	54
Illustration 44. Propagation de l'onde de crue entre I (inflows) et O (outflows) avec apports ou pertes répartis de manière uniforme sur la longueur du cours d'eau (d'après Moussa, 1996).	55
Illustration 45. Episodes de crue pour des pluies > 80 mm sur le bassin de l'Huveaune à Aubagne ; avec P la pluie totale moyenne sur le bassin, P _{max} l'intensité maximale sur 1 heure, Q _{ini} le débit initial, Q _{max} le pic de crue, CR le coefficient de ruissellement (en retranchant le débit de base). Les hydrogrammes des crues surlignées en vert clair sont présentés dans l'illustration 48 ; les autres hydrogrammes sont présentés en Annexe 3.....	57
Illustration 46. Exemple de crue de l'Huveaune et du découpage de l'hydrogramme des échanges latéraux en phases de pic et de décrue(s) ; sont représentés les écoulements sur le tronçon Saint-Zacharie – Roquevaire.	58
Illustration 47. Exemple de crue de l'Huveaune et du découpage de l'hydrogramme des échanges latéraux en phases de pic et de décrue(s) ; sont représentés les écoulements sur le tronçon Roquevaire – Aubagne.....	60

Illustration 48. Crues du 14/12/2008, du 24/12/2009, et du 05/11/2011 (du haut en bas) sur l’Huveaune sur les deux tronçons Saint-Zacharie – Roquevaire (à gauche), et Roquevaire – Aubagne (à droite) ; avec représentés dans chaque cas les pluviogrammes amont et aval, les hydrogrammes mesurés amont et aval de l’Huveaune, l’hydrogramme calculé des échanges latéraux, et les hydrogrammes mesurés aux deux sources Saint-Pons et Caramy.....	63
Illustration 49. Episodes de crue pour des pluies > 80 mm sur le bassin de l’Estéron à Le Broc ; avec P la pluie totale moyenne sur le bassin, P _{max} l’intensité maximale sur 1 heure, Q _{ini} le débit initial, Q _{max} le pic de crue, CR le coefficient de ruissellement (en retranchant le débit de base). Les hydrogrammes des crues surlignées en vert clair sont présentés dans l’Illustration 50 ; les autres hydrogrammes sont présentés en Annexe 3.....	64
Illustration 50. Crues du 05/11/2011 (en haut) et du 31/10/2010 (en bas) sur l’Estéron sur le tronçon Sigale – Le Broc ; avec représentés dans chaque cas les pluviogrammes amont et aval, les hydrogrammes mesurés amont et aval de l’Estéron, et l’hydrogramme calculé des échanges latéraux	65
Illustration 51. Carte des émergences des Encanaux (Coulier, 1985).....	68
Illustration 52. Photos des arrivées d’eau localisées sur l’Illustration 51 « source inférieure » à gauche et « Faille-émergence » à droite.....	69
Illustration 53. Photos de la source Lazare montrant une des arrivées d’eau (à gauche) au sein de la zone humide (à droite)	69
Illustration 54. Photos du canal drainant la Foux de St Zacharie jusqu’à l’Huveaune	70
Illustration 55. Source de Montrieux le Vieux à Meounes les Montrieux	71
Illustration 56. Lavoir de la Font du Thon à Solliès-Toucas	72
Illustration 57. Grotte des Tuves (source des Rampins) (Source : Fichier des cavités du Var sur http://www.fichier topo.fr).....	72
Illustration 58. Source temporaire de Truëbis avec détail de la grotte (Source : Fichier des cavités du Var sur http://www.fichier topo.fr).....	73
Illustration 59. Clue du Riolan sur le bassin de l’Estéron	74
Illustration 60. Source captée du Vegay (source sup.), bassin de l’Estéron.....	75
Illustration 61. Source de la Bouisse, bassin de l’Estéron	76
Illustration 62. Lac souterrain (salle du Lac) au niveau du siphon de la grotte de Truebis, et emplacement de la sonde de niveau d’eau.....	77
Illustration 63. Instrumentation du réservoir de collecte de la source de la Font du Thon.....	77
Illustration 64. Instrumentation de la source du Rieu Fré à Montrieux le Vieux.....	78
Illustration 65. Synthèse des traçages artificiels effectués dans l’Unité du Beausset (Fournillon, 2012)	85
Illustration 66. Résultats du traçage d’avril-juin 2011 sur le versant nord de la Sainte-Baume (SAFEGE, 2011a)	85
Illustration 67. Carte hydrogéologique de l’unité karstique du Beausset Externe (Cavalera, 2007).....	86
Illustration 68. Carte hydrogéologique du massif karstique de l’Agnis (Cavalera, 2007).....	86
Illustration 69. Carte hydrogéologique des massifs karstiques de la Lare et de l’Aurélien (Cavalera, 2007).....	87
Illustration 70. Carte hydrogéologique du massif karstique de la Sainte Baume (Cavalera, 2007).....	87

Illustration 71. Simulation du ruissellement de surface à la station de Mazaugues à partir d'un taux de ruissellement égal à 20% de la pluie ; 3 valeurs de Célérité (C) sont proposées.....	91
Illustration 72. Simulation du ruissellement de surface à la station de Mazaugues à partir d'un taux de ruissellement égal à 50% de la pluie ; 3 valeurs de Célérité (C) sont proposées.....	91
Illustration 73. Simulation du ruissellement de surface à la station de Mazaugues à partir d'un taux de ruissellement égal à 100% de la pluie ; 3 valeurs de Célérité (C) sont proposées.....	91
Illustration 74. Crues du 07/09/1998 et du 20/09/1999 sur l'Huveaune sur les deux tronçons Saint-Zacharie – Roquevaire (à gauche), et Roquevaire – Aubagne (à droite).....	95
Illustration 75. Crues du 02/12/2003 et du 28/01/2006 sur l'Huveaune sur les deux tronçons Saint-Zacharie – Roquevaire (à gauche), et Roquevaire – Aubagne (à droite).....	96
Illustration 76. Crues du 21/10/2010, du 25/10/2011, et du 19/05/2012 (du haut en bas) sur l'Huveaune sur les deux tronçons Saint-Zacharie – Roquevaire (à gauche), et Roquevaire – Aubagne (à droite).....	97
Illustration 77. Crues du 14/12/2008 et 25/09/2006 (du haut en bas) sur l'Estéron le tronçon Sigale – Le Broc.	98
Illustration 78. Crues du 24/11/2007 et 12/01/2008 (du haut en bas) sur l'Estéron le tronçon Sigale – Le Broc.	99
Illustration 79. Chroniques de hauteur d'eau (noir), température (orange), et conductivité électrique (vert) pour les sources de l'unité du Beausset suivies dans le cadre de la thèse de Fournillon (2012) ; Les sources concernées par cette étude sont celles localisées dans le bassin du Gapeau : la source Werotte, du Gapeau, de la Font du Thon, et de la Font d'Ouvin.	103

Liste des annexes

Annexe 1 Données bibliographiques des traçages artificiels.....	83
Annexe 2 Evaluation de l'importance de ruissellement de surface sur les mesures de débit de la source Caramy à la station hydrométrique de Mazaugues.....	89
Annexe 3 Crues de l'Huveaune et de l'Estéron : modélisation des échanges latéraux	93
Annexe 4 Chroniques de mesure sur les sources rive droite du Gapeau (Fournillon, 2012)	101

1. Introduction

Certaines des crues récentes parmi les plus dévastatrices comme celles de Nîmes (Gard, sept. 2002 & Sept. 2005) ou de la Nartuby (Var, Juin 2010) se produisent sur des bassins majoritairement carbonatés où se développent en partie des aquifères karstiques. Prédire les crues sur les bassins karstiques demeure une question complexe car le karst est un hydrosystème hétérogène dans lequel l'infiltration joue d'abord un rôle important avant que des échanges souterrain-surface ne deviennent prédominants lors des crues une fois que le karst est saturé. Comme les modèles utilisés par les prévisionnistes ne tiennent généralement pas compte des écoulements souterrains, il existe souvent de très fortes incertitudes sur l'estimation des crues des bassins karstiques. Une meilleure prédiction dans ce contexte karstique nécessite une approche hydrogéologique spécifique qui prenne en compte les caractéristiques du karst et la dynamique des écoulements souterrains en milieu hétérogène.

Les développements méthodologiques dans le cadre de la convention SCHAPI-BRGM sur les crues de bassins karstiques ont abouti à la mise en place d'un Indicateur Karst défini sur le karst Nîmois (Fleury et al., 2010) basé sur l'évolution de la piézométrie qui renseigne sur l'état de saturation de l'aquifère, puis mis en œuvre sur les bassins du Lez et de la Tardoire (Fleury et al., 2011), ainsi que sur le bassin du Tarn à Millau (Charlier et al., 2012).

Le BRGM a proposé une fiche de synthèse explicative pour la mise en place de l'indicateur à l'attention des prévisionnistes des SPC (Service de Prévision des Crues), détaillant la problématique karstique dans la prévision des crues, ainsi que les données requises (données hydrologiques, hydrogéologiques, ..). Suite à la demande du SPC Méditerranée-Est, le SCHAPI a sélectionné quatre bassins où le karst est susceptible de jouer un rôle dans la genèse des crues sur des tronçons réglementaires : les bassins du Gapeau à Solliès-Pont, du Caramy à Vins-sur-Caramy, de l'Huveaune à Aubagne, et de l'Estéron à Le Broc. Les trois premiers bassins drainent chacun une partie du massif karstique de la Sainte-Baume entre Var et Bouches-du-Rhône et le dernier bassin est un affluent du fleuve Var dans les Alpes Maritimes.

L'application de la méthodologie de l'IK nécessite une identification préalable du rôle du karst dans les crues éclair et l'analyse de chroniques de données piézométriques ou débitométriques de sources karstiques. Cependant, sur les quatre bassins sélectionnés, seules deux sources au cœur du massif de la Sainte-Baume sont instrumentées par la DREAL (sources Saint-Pons et Caramy), et aucune donnée piézométrique n'est disponible à ce jour sur les secteurs d'étude. Ainsi, l'étude 2013 se situe en amont de la mise en place de la méthode IK. Son objectif global est de mieux comprendre le rôle potentiel du karst aux crues, ses contributions et ses zones d'influences privilégiées en vue de proposer une instrumentation de sites karstiques stratégiques qui pourraient servir d'indicateur karst dans le futur.

Le premier objectif de cette étude est tout d'abord d'identifier les unités karstiques concernées à l'aide d'un zonage des surfaces influençant les crues. Dans cette partie, un indicateur cartographique a été construit à partir des données géologiques, pédologiques, et géomorphologiques qui donne le potentiel de ruissellement/infiltration en combinant deux indices sol et karst.

Le deuxième objectif est de déterminer les facteurs influençant la réponse hydrologique en comparant plusieurs indicateurs de l'état hydrique initial au niveau du sol ou des aquifères, et notamment des aquifères karstiques. Ceci a été réalisé à partir d'une analyse Pluie-Débit sur des épisodes de crues, en comparant la pertinence des différents indicateurs selon quatre classes d'état hydrique (des états sec à saturé).

Le troisième objectif est de caractériser les contributions du karst aux crues en étudiant les échanges latéraux sur un tronçon de rivière. L'approche utilisée est une modélisation de la propagation de l'onde de crue qui tient compte des échanges latéraux. Cette méthode a été appliquée sur les bassins de l'Huveaune et de l'Estéron qui comportent tous deux plusieurs stations hydrométriques entre lesquels il est possible de comparer les écoulements issus des versants avec ceux des sources karstiques instrumentées sur la Sainte-Baume.

Enfin, le dernier objectif est d'identifier pour l'ensemble des bassins les points d'eau d'intérêt à suivre pour initier l'acquisition de chroniques de données sur les eaux souterraines. Ceci a été réalisé en compilant les résultats des trois approches précédentes et a abouti à des propositions de sites pour chaque bassin.

2. Présentation des sites et des données disponibles

2.1. SITES D'ETUDE

2.1.1. Situation régionale

Géographie

Les 4 sites d'études se situent en région Provence-Alpes-Côte-D'azur (Illustration 1) dans les départements des Bouches-du-Rhône et du Var pour le bassin versant de l'Huveaune, dans celui du Var pour les bassins versants du Caramy et du Gapeau, et dans les départements des Alpes-Maritimes et des Hautes-Alpes pour le bassin versant de l'Estéron.

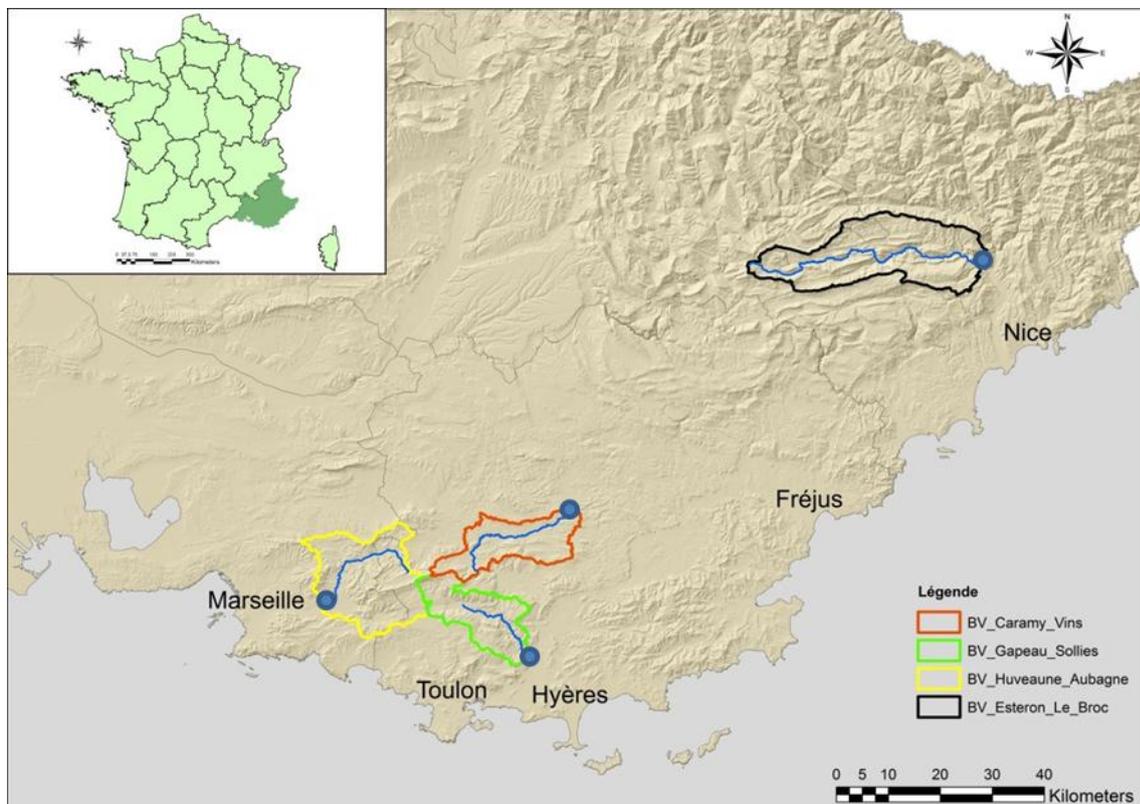


Illustration 1. Localisation des 4 bassins d'étude : le Caramy à Vins, le Gapeau à Solliès-Pont, l'Huveaune à Aubagne, et l'Estéron à Le Broc

Climat

Les bassins de l'Huveaune, du Gapeau, du Caramy et de l'Estéron sont des bassins côtiers du Sud de la France, et bénéficient en conséquence d'un climat de type méditerranéen. Celui-ci se caractérise par une sécheresse estivale (pluie mensuelle moyenne < 30 mm) et par des épisodes de pluie intenses (plus de 100 mm en quelques heures) lors des mois d'automne et d'hiver. La Basse Provence étant montagneuse, certains secteurs en altitude bénéficient d'un

climat à tendance montagnard avec des chutes de neige en hiver, notamment sur l'Estéron qui culmine à plus de 1700 m.

Géologie

La Provence se divise en plusieurs unités structurales principales : Alpilles, Lubéron, Beausset, l'Arc et Castellane, etc. (Illustration 2). Celles-ci se chevauchent du Sud au Nord (sauf pour l'unité du Lubéron), donnant naissance à différents massifs armés des carbonates du Jurassiques et du Crétacé comme ceux de la Sainte-Baume au nord de Toulon situé au cœur des 3 bassins de l'Huveaune, du Gapeau, et du Caramy. Ce sont aussi ces chevauchements qui ont fait apparaître les formations du Trias en plein cœur des formations du Jurassique.

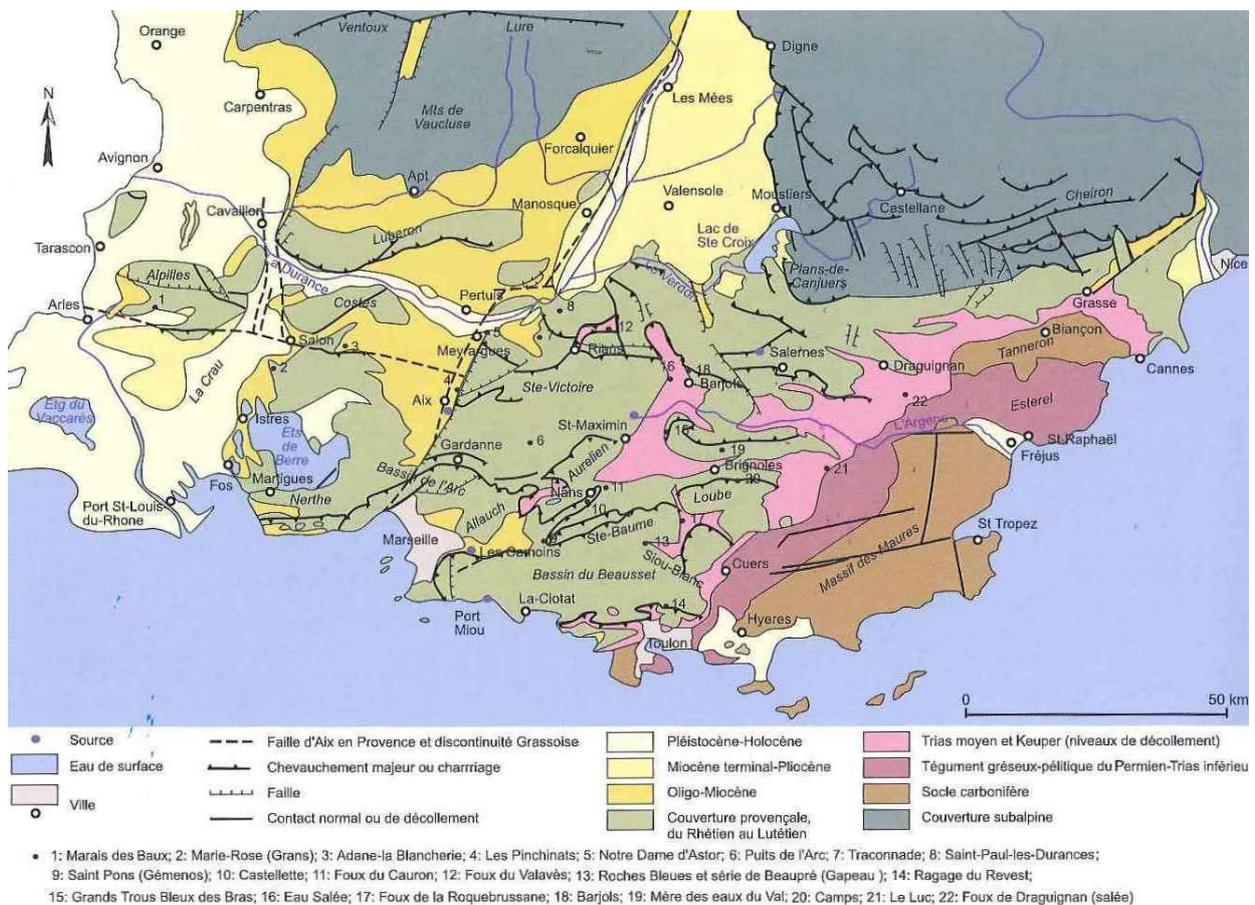


Illustration 2. Carte structurale de la Basse Provence et du domaine subalpin méridional. Situation des principales sources karstiques (Guieu et Rousset, 1980, modifié in Roux, 2006).

Sur la bordure nord-est de la Provence, la couverture sédimentaire subalpine vient chevaucher du nord au sud les formations jurassiques provençales (Illustration 2). Ainsi, on retrouve sur le massif du Cheiron au sud du bassin de l'Estéron des formations Jurassique à Crétacé mais de lithologie légèrement différenciée (globalement plus marneuse qu'en Basse-Provence).

Hydrogéologie

La région provençale comprend 5 grands types d'aquifères (Illustration 3), qu'ils soient alluvionnaires, du domaine alpin, provençal, karstiques ou de socle. Les quatre bassins

versants étudiés se positionnent majoritairement sur les zones à aquifères karstiques en bleu-vert et à aquifères complexes du domaine provençal en blanc crème. La partie nord du bassin de l'Estéron se situe également dans les aquifères complexes du domaine alpin.

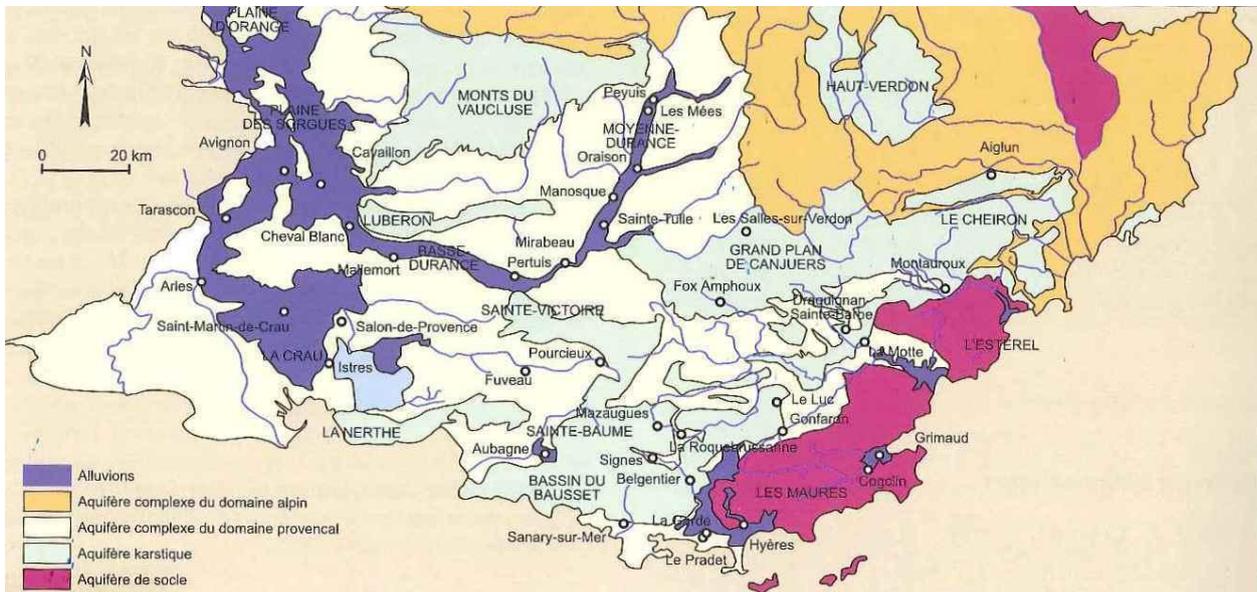


Illustration 3. Aquifères de Provence et réseau régional (Valencia, 2000 in Roux, 2006).

Parmi eux les aquifères karstiques se situent principalement dans les formations carbonatées peu argilisées comme celles du Trias, du Lias, du Jurassique supérieur et Crétacé inférieur, et celles du Crétacé supérieur (Illustration 4) :

- **l'aquifère du Muschelkalk** (Trias moyen), constitué par des calcaires dolomités affleurant de manière importante dans le centre du département du Var. Le mur de cet aquifère est constitué de dépôts conglomératiques et de grès arkosiques (Trias inférieur), son toit est représenté par des terrains gypseux du Keuper (Trias supérieur) ;
- **l'aquifère du Lias**, constitué de calcaires et de dolomies dont la puissance peut atteindre 500 m. Le toit correspond aux terrains marno-calcaires du Dogger ;
- **l'aquifère du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur**, constitué de calcaires et dolomies d'une puissance de plus de 1000 m, dont le toit est constitué des marnes aptiennes. Cet aquifère est le réservoir le plus épais de la série ;
- **l'aquifère du Turonien**, constitué de calcaires et calcaires marneux sous les séries conglomératiques du Crétacé supérieur.

Ere	Système	Série	Terrain/Etage	Symbole	Lithologie (1)	Hydrogéologie (2)		
Mésozoïque	Crétacé	Supérieur	Sénonien	Béguvien (Maastrichtien)	c ⁹	Conglomérats à galets calcaires		
				Valdo-fuvélien	c ⁸	Série fluvio-lacustre de calcaires noirs		
				Santonien-Coniacien	c ⁷	Série de conglomérats grès marnes et calcaires détritiques	imperméable	
				Poudingue de la Ciotat	c ^{6b,c}	Formation deltaïque gréseuse	imperméable	
			Turonien sup. saumâtre	c ^{6a}	Grès et calcaires sableux	karstifiable		
			Turonien inf. marneux	c ^{6a}	Marnes bleus et calcaires marneux			
			Cénomaniensup.	c ⁵	Calcaire à rudistes	+/-imperméable		
		Cénomaniensup.	c ⁴	Marno-gréseux				
		Inférieur	Aptien	Gargasien	c _I	Marno-gréseux	+/-imperméable	
				Bédoulien	c _{II}	Calcaires marneux et siliceux		
			Nécomien	Bauxite (Barrémien - Cénomaniensup.)		B	Dépôt soulignant le biseau d'érosion albien	
				Barrémien (Urgonien)	c _{III}	Calcaire biodétritique à gros bancs	karstifiable	
				Hauterivien	c _{IV}	Marno-calcaire		
				Valanginien	c _V	Calcaires à faciès variés localement dolomités (c _V ^D)		
	Dolomies indifférenciées			j ^d	Dolomies néojur ou valanginienne ?			
	Portlandien		j ^s	Calcaires blancs localement dolomités (j ^{SD})				
	Jurassique	Supérieur (Malm)	Dolomies néojurassiques		j ^{7,SD}	Dolomies massives (60 à 120m)	karstifiable	
			Lusitanien		j ⁴	Calcaire stratifié à grains fins		
			Callovien		j ¹			
			Bathonien sup.		j _{III}			
		Moyen (Dogger)	Bathonien inf.		j _{III}	Ensemble Marno-calcaire	Relativement perméable	
			Bajocien		j _{III-IV}			
			Aalénien					
		Inférieur (Lias)	Toarcien			Calcaire roux à silex	karstifiable	
			Pliensbachien sup. (Domérien)		i ^{5,3}	Calcaire roux à chailles		
			Pliensbachien inf. (Carixien)			Calcaire gris bleuté		
			Hettangien		i ¹	Calcaire dolomitique		
Trias		Supérieur	Rhétien		i ₁	Calcaires à faciès variés	+/-imperméable	
			Keuper		t ³⁻¹	Formation gypseuse (~ épaisseurs) souvent rabotée		
	Moyen	Muschelkalk		t _{II}	Calcaires dolomités	karstifiable		
	Inférieur	Grès bigarré		t _{III}	Dépôts conglomératiques et grès arkosiques	imperméable		

Illustration 4. Lithologie et hydrogéologie des terrains Mésozoïque de la région Marseillaise (Cavalera, 2007).

2.1.2. Les bassins versants sélectionnés

Bassin de l’Huveaune à Aubagne

L’Huveaune (Illustration 5) prend naissance sur le versant ouest du massif de la Sainte-Baume qui culmine à 1148 m d’altitude. Son bassin versant à la station hydrométrique d’Aubagne (Le Charrel) est de 332 km². Les surfaces des sous-bassins de Saint-Zacharie et de Roquevaire sont respectivement de 56 et 165 km². Le fleuve Huveaune parcourt jusqu’à Aubagne une distance de 31,1 km.

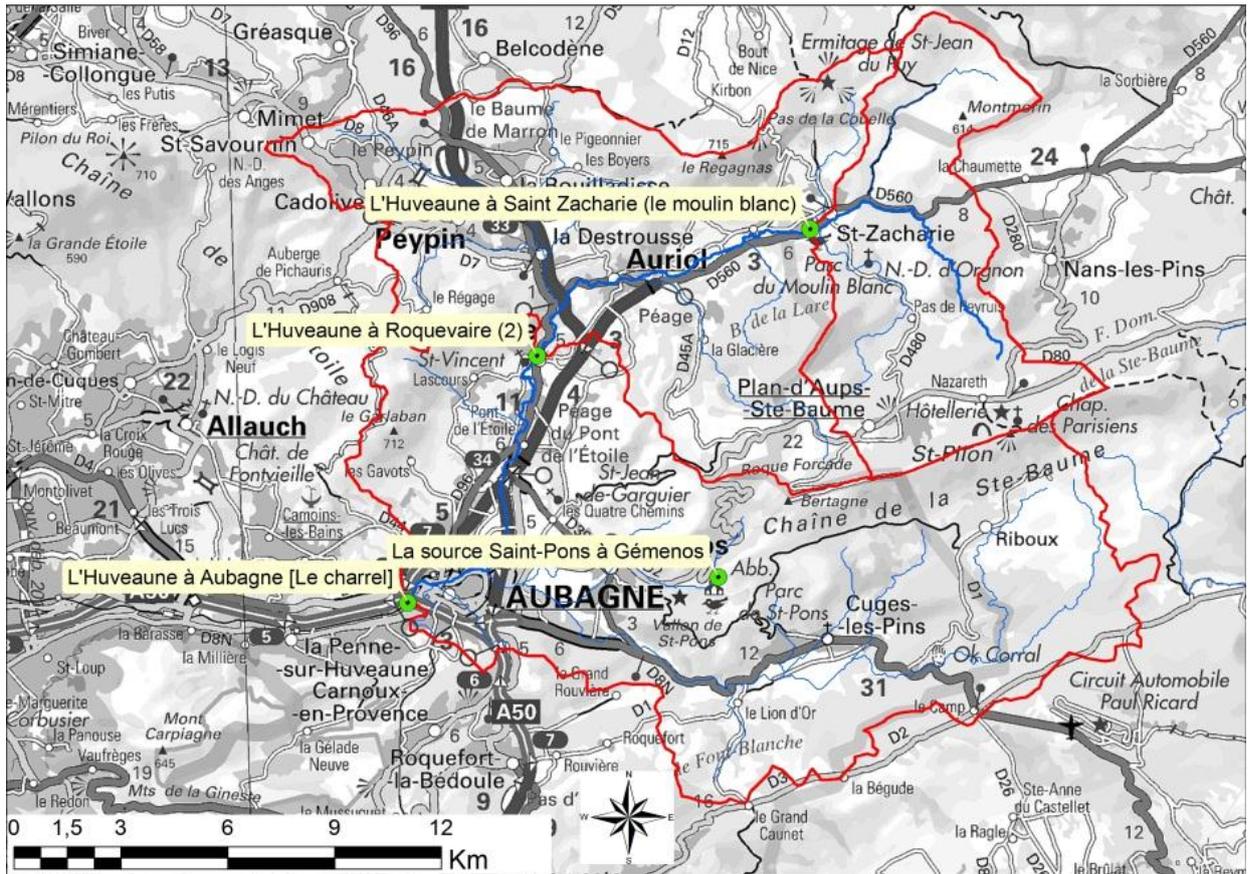


Illustration 5. Carte topographique (IGN) du bassin versant de l'Huveaune à Aubagne présentant les sous-bassins de Roquevaire et de Saint-Zacharie.

Le bassin versant de l'Huveaune entourant l'Ouest et le Sud de la chaîne de la Sainte Baume est formé de terrains du Trias jusqu'au Quaternaire (Illustration 6). Les versants du Jurassiques et du Crétacé de la sainte-Baume et du massif de Lare-Aurélien sont très tectonisés par de grandes failles orientées Ouest-Est. La nappe alluviale sur laquelle repose la ville d'Aubagne représente environ 20 km², ce qui place la station hydrométrique du Charrel dans un contexte fortement influencé par le fond de vallée.

L'occupation du sol du bassin de l'Huveaune est présentée Illustration 7. Celle-ci est largement dominée par le couvert forestier à plus de 65% qui se situe essentiellement sur les zones montagneuses. L'imperméabilisation du sol causée par l'urbanisation est loin d'être négligeable puisqu'elle représente 8% de la surface totale du bassin de l'Huveaune, et qu'elle se situe à proximité des différentes stations hydrométriques, rendant son impact potentiel plus important sur les débits mesurés.

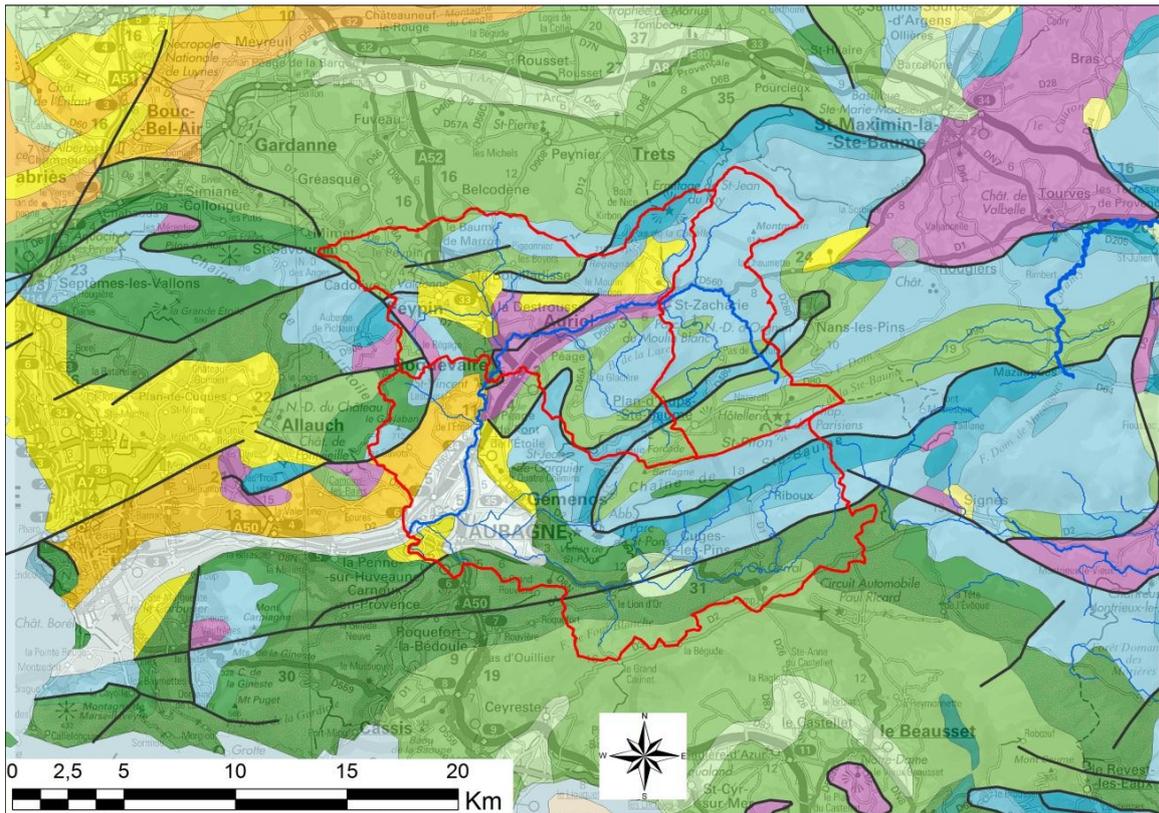


Illustration 6. Carte géologique (Brgm 1/1 000 000) du bassin versant de l'Huveaune à Aubagne ; avec les formations triasiques en violet, jurassiques en bleu, crétacé en vert, et tertiaires en jaune

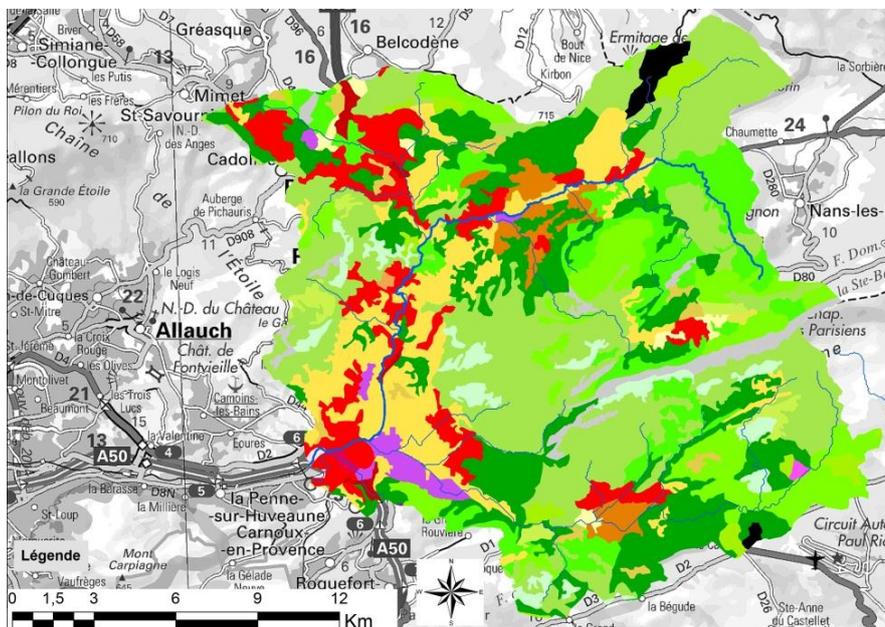


Illustration 7. Occupation du sol (Corine Land Cover) du bassin versant de l'Huveaune à Aubagne ; (couvert végétal naturel en vert et urbanisation en rouge).

Bassin du Gapeau à Solliès-Pont

Le bassin versant du Gapeau se situe au Sud-Est du massif de la Sainte-Baume. Les formations carbonatées potentiellement karstiques se situent sur sa partie amont, ce qui nous a conduit à nous focaliser sur le bassin en amont de Solliès-Pont. Plus en aval vers Hyères, le cours d'eau est influencé par les différentes nappes alluviales et par les apports de l'affluent Le Réal Martin. Le bassin topographique du Gapeau est allongé dans un axe Nord-Ouest – Sud-Est (Illustration 8). De sa source jusqu'à la station hydrométrique de Solliès-Pont, ce cours d'eau parcourt une distance de 22 km. La surface du bassin versant est de 190 km². Les versants nord et sud culminent rarement au-dessus de 800 m d'altitude, alors que la partie amont sur la Sainte Baume atteint 1148 m d'altitude.

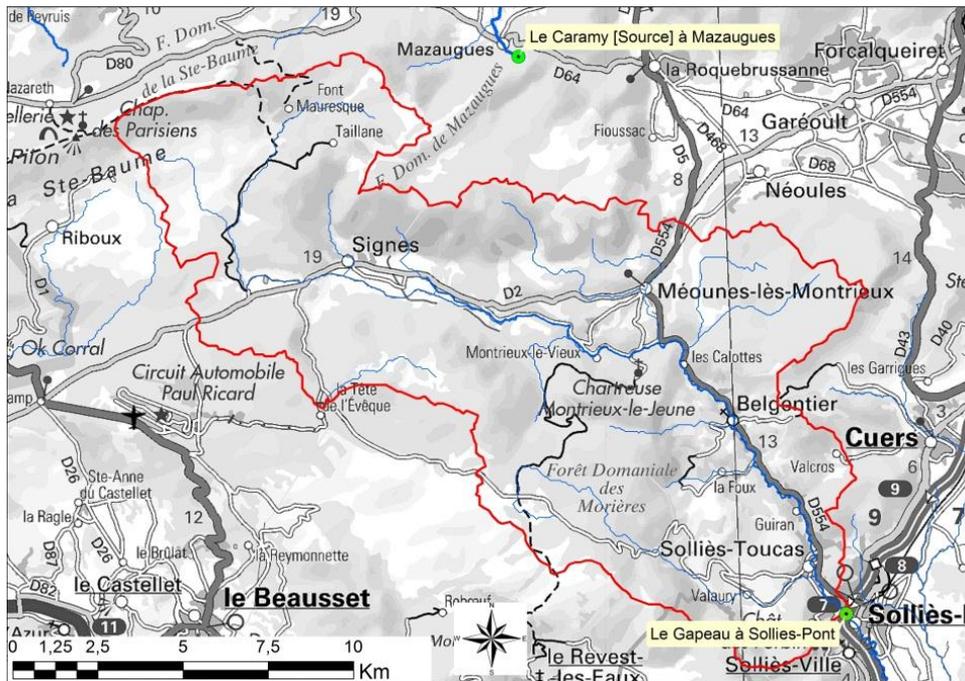


Illustration 8. Carte topographique (IGN) du bassin versant du Gapeau à Solliès-Pont

L'impluvium du Gapeau est situé principalement sur des terrains carbonatés du Jurassique ainsi que sur du Crétacé sur la crête ouest du massif du Siou-Blanc (Illustration 9). Le Trias affleure au cœur du bassin en amont de Belgentier. Les formations karstiques de ce bassin se situent donc principalement sur les formations dolomitiques du Jurassique supérieur et Crétacé inférieur.

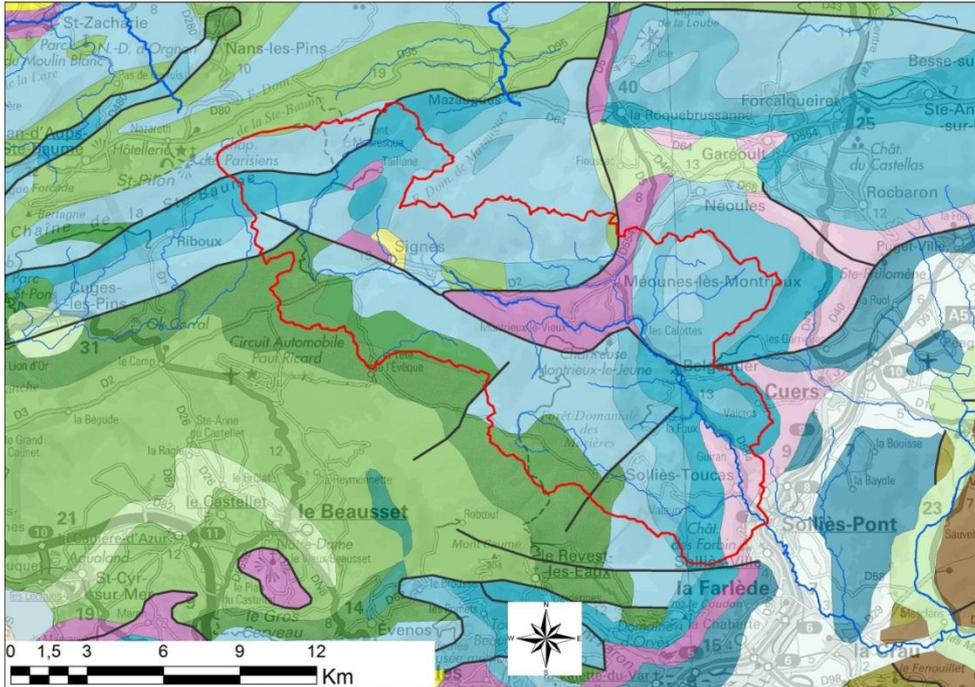


Illustration 9. Carte géologique (Brgm 1/1 000 000) du bassin versant du Gapeau à Solliès-Pont ; avec les formations triasiques en violet, jurassiques en bleu, crétacé en vert, et tertiaires en jaune

Le bassin du Gapeau à Solliès-Pont est très largement dominé par le couvert forestier à hauteur de 83% (Illustration 10). L'influence urbaine reste limitée à environ 3% de la surface, principalement à Belgentier et Solliès à proximité de l'exutoire.

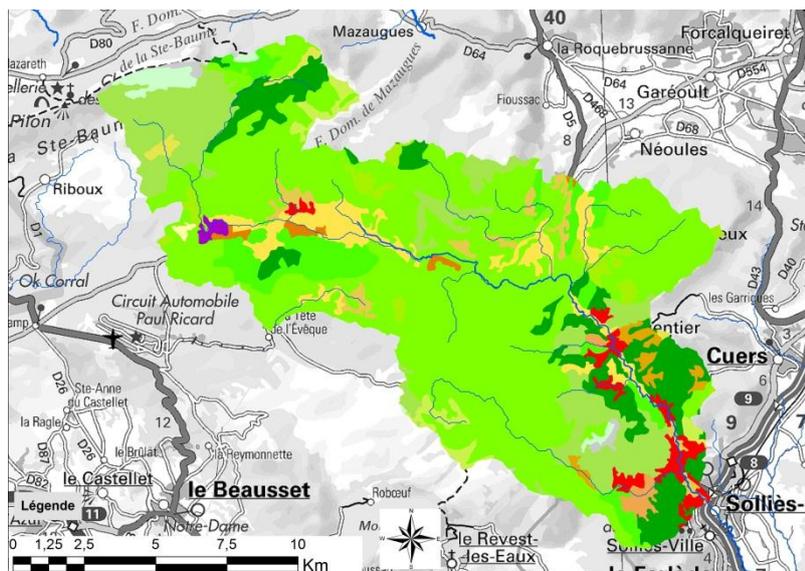


Illustration 10. Occupation du sol (Corine Land Cover) du bassin versant du Gapeau à Solliès-Pont ; (couvert végétal naturel en vert et urbanisation en rouge).

Bassin du Caramy à Vins

La partie amont du bassin versant du Caramy est rattachée au massif de la Sainte-Baume et à celui de l'Agnis. En se focalisant sur le bassin du Caramy à Vins sur Caramy, nous nous affranchissons des apports de l'Issole avant sa confluence avec l'Argens. Le bassin versant est allongé dans un axe Sud-Ouest – Nord-Est (Illustration 11). La distance parcourue par le Caramy entre sa source et la station de Vins est de 36 km et la surface du bassin est 201 km².

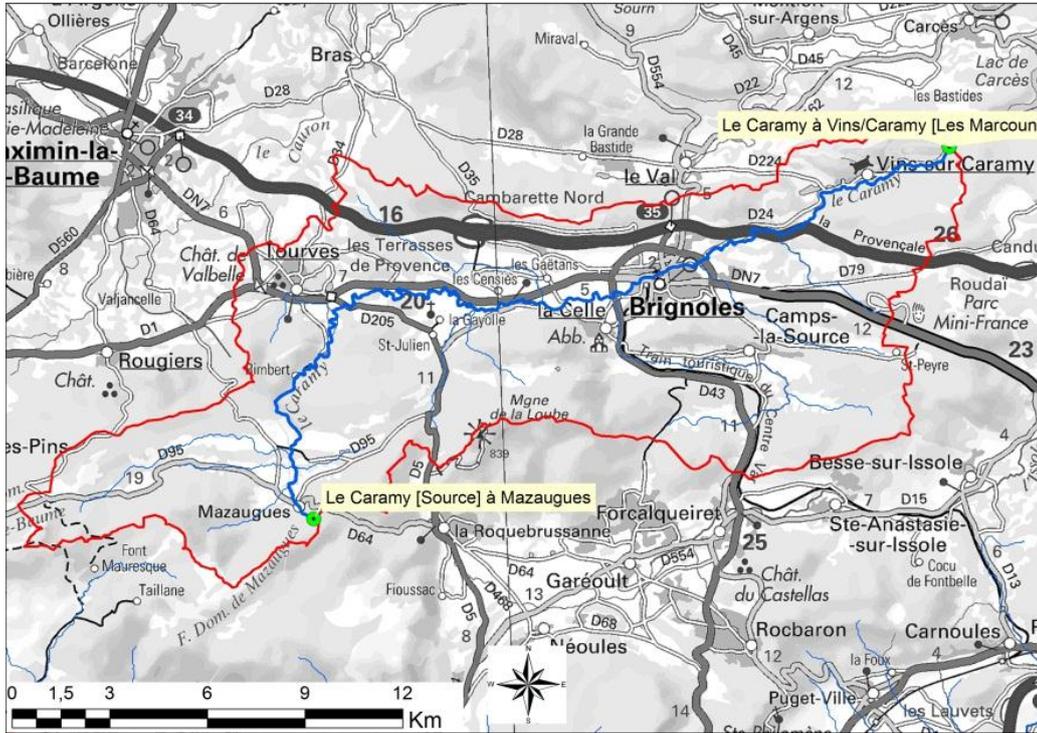


Illustration 11. Carte topographique (IGN) du bassin versant du Caramy à Vins-sur-Caramy

La géologie couvrant le bassin du Caramy est représentée majoritairement par les formations du Jurassique et du Crétacé (Illustration 12). Les formations triasiques affleurent dans la partie nord par le jeu de failles Est-Ouest. Les formations karstiques de ce bassin se situent donc principalement sur les formations dolomitiques du Jurassique supérieur et Crétacé inférieur, ainsi que sur les formations calcaires du Crétacé qui dessinent la crête de la Sainte Baume au sud.

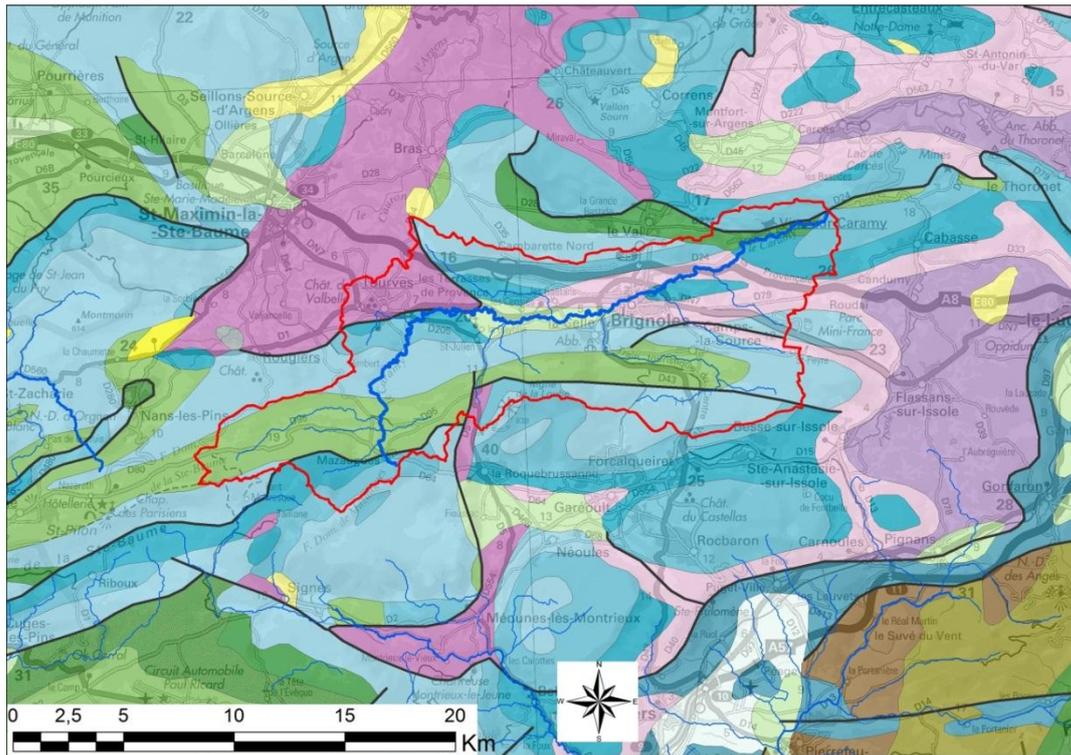


Illustration 12. Carte géologique (Brgm 1/1 000 000) du bassin versant du Caramy à Vins-sur-Caramy ; avec les formations triasiques en violet, jurassiques en bleu, crétacés en vert, et tertiaires en jaune

Plus des deux tiers du bassin versant du Caramy sont occupés par le couvert forestier, et ¼ par des zones agricoles (Illustration 13). L'urbanisation représente 7% de la surface du bassin au niveau de Brignoles et Tourves.

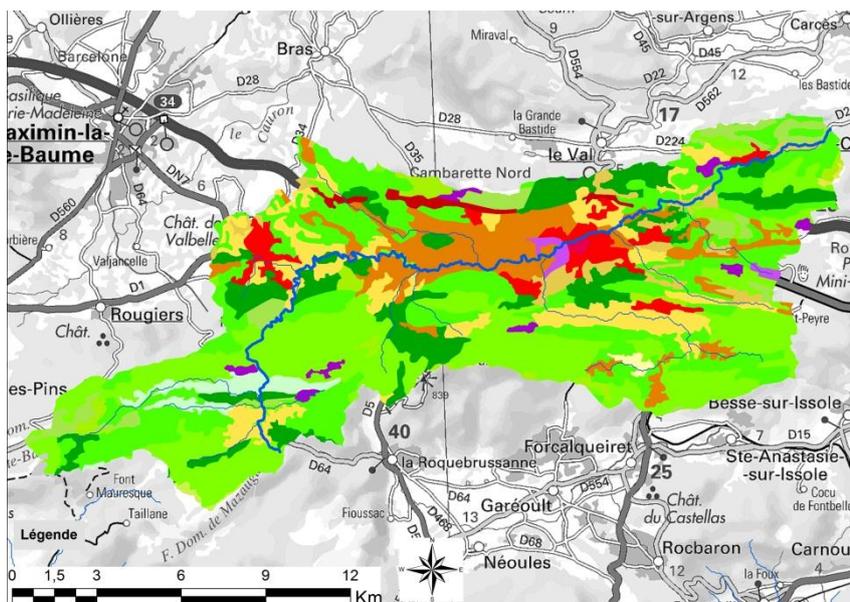


Illustration 13. Occupation du sol (Corine Land Cover) du bassin versant du Caramy à Vins-sur-Caramy ; (couvert végétal naturel en vert et urbanisation en rouge).

Bassin de l'Estéron à Le Broc

Le bassin versant de l'Estéron se situe à environ 15 km au Nord-Ouest de la ville de Nice. Celui-ci comprend deux stations hydrométriques à Sigale et Le Broc qui est l'exutoire du bassin situé 1 km en amont de sa confluence avec le Var (Illustration 14). Le bassin est allongé dans un axe Ouest-Est et possède un relief très marqué avec des gorges profondes et de fortes pentes. Les surfaces du sous-bassin à la station Sigale et du bassin à la station Le Broc sont respectivement de 262 et 441 km². Le cours d'eau de l'Estéron parcourt une longueur totale de 63 km.

Sa situation géographique dans les Pré-Alpes du Sud donne à l'Estéron une influence de climat de montagne avec notamment des hivers neigeux sur les reliefs.

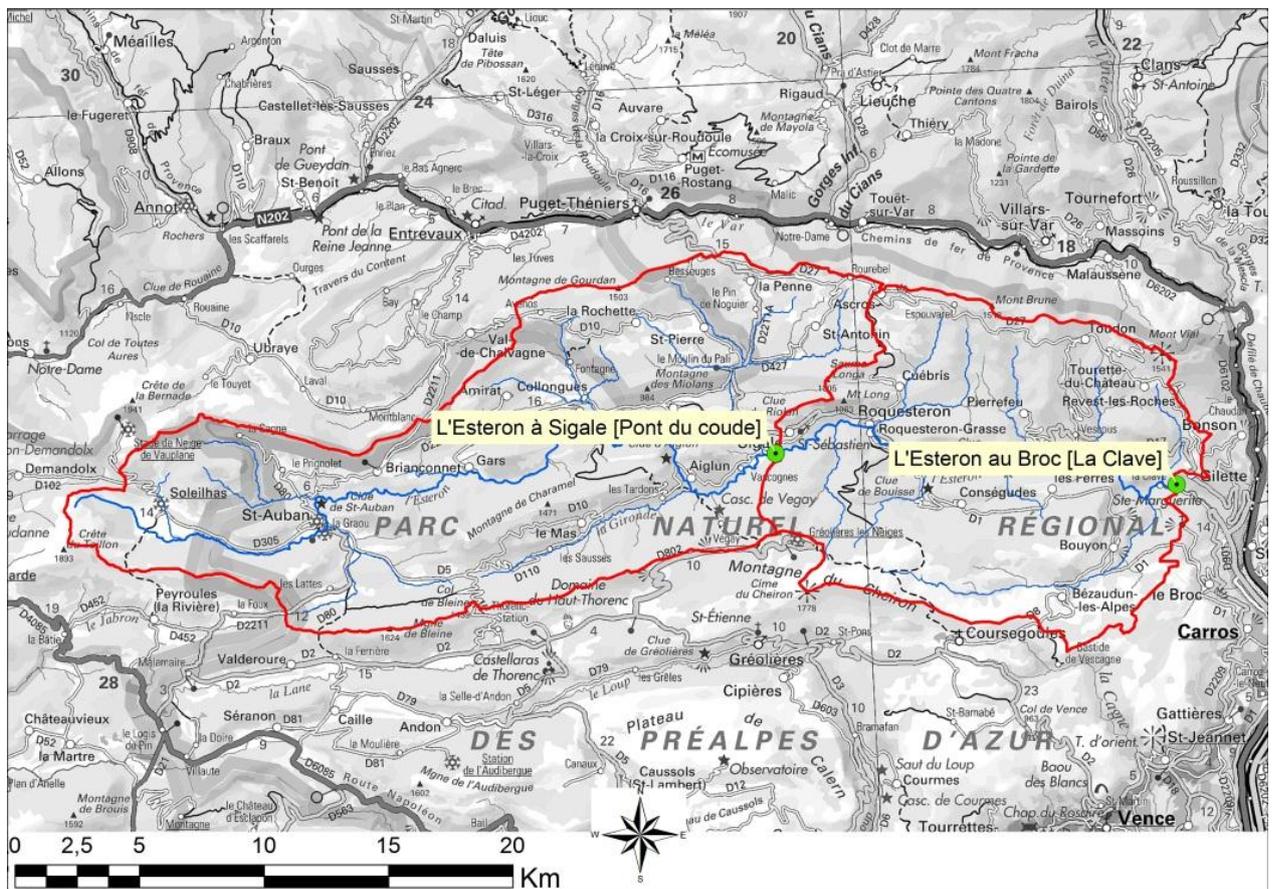


Illustration 14. Carte topographique (IGN) du bassin versant de l'Estéron à Le Broc

D'un point de vue géologique, l'Estéron appartient à la couverture subalpine qui comprend l'ensemble des formations du Trias jusqu'au Miocène (Illustration 15). Les formations karstiques se situent essentiellement dans le Jurassique supérieur (bleu clair) et Crétacé inférieur (vert foncé) sur une majorité de terrains de la partie méridionale.

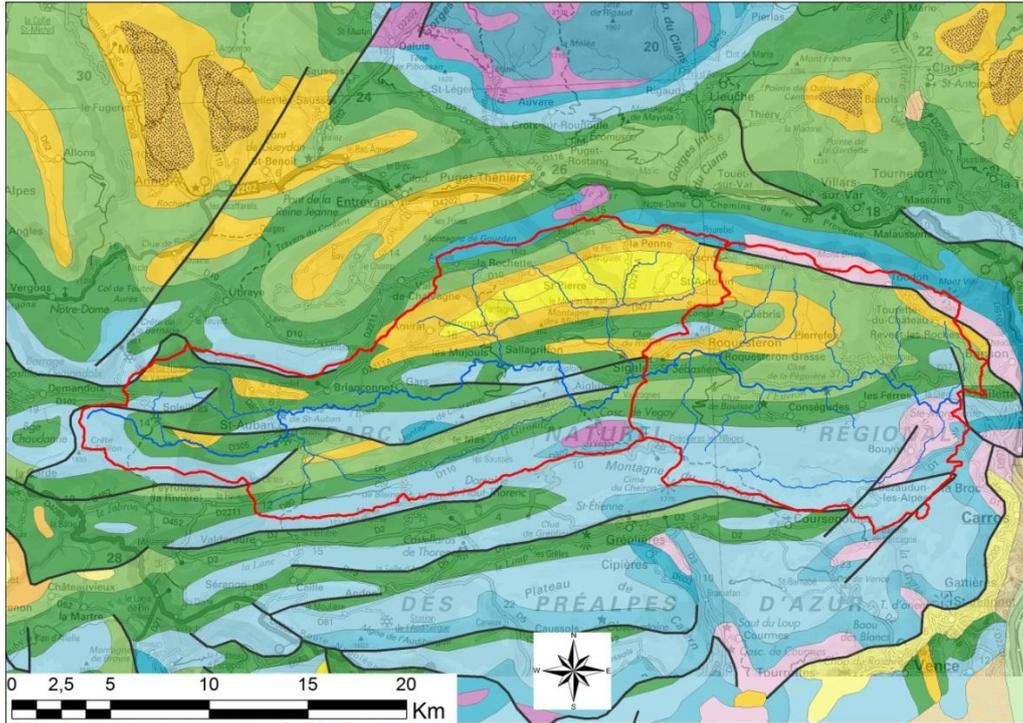


Illustration 15. Carte géologique (BRGM 1/1 000 000) du bassin versant de l'Estéron à Le Broc ; avec les formations triasiques en violet, jurassiques en bleu, crétacé en vert, et tertiaires en jaune

Près de 70% de la surface du bassin est couverte de forêt, et l'urbanisation représente une surface négligeable à l'échelle de ce bassin qui ne comprend pas d'agglomération ou de ville d'importance (Illustration 16).

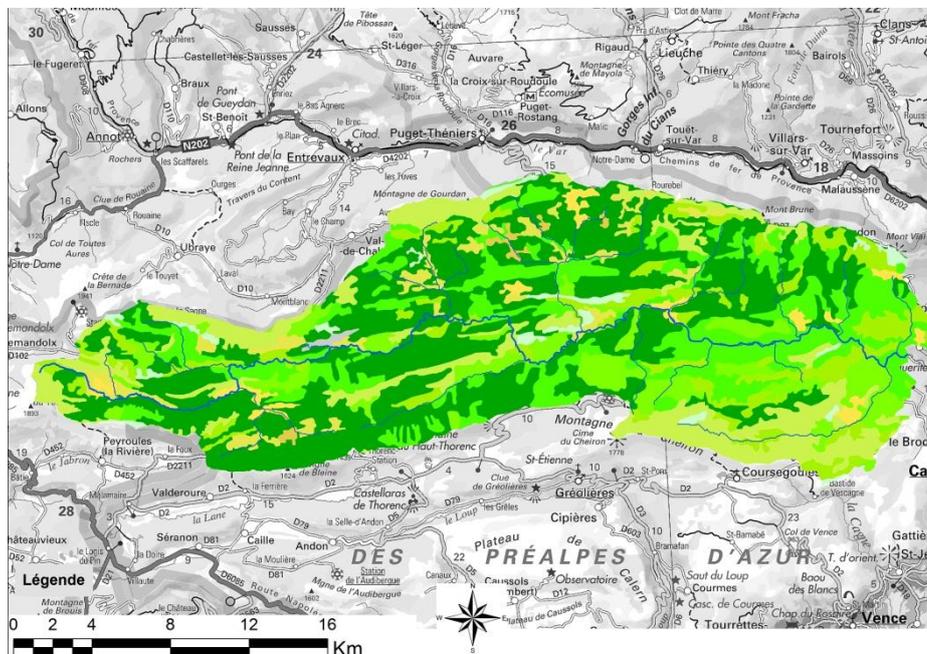


Illustration 16. Occupation du sol (Corine Land Cover) du bassin versant de l'Estéron à Le Broc ; (couvert végétal naturel en vert et urbanisation en rouge).

2.1.3. Discussion sur les bassins hydrogéologiques

Données de traçages artificiels

Les traçages inventoriés et répertoriés en Annexe 1 ne permettent pas de dessiner de manière précise l'ensemble des contours des bassins hydrogéologiques de l'Huveaune, du Gapeau et du Caramy (Illustration 17), ou de l'Estéron (Illustration 18). Il est tout de même intéressant d'évaluer les écarts de superposition des bassins versants et des bassins hydrogéologiques au niveau des traçages réalisés :

- sur le Caramy, les traçages au niveau de la Sainte-Baume se situent au sein du bassin topographique ;
- sur le Gapeau : le massif de Siou Blanc est scindé en plusieurs compartiments drainés vers le sud (source Dardennes par ex.), ou vers les sources de la rive droite du Gapeau. Les traçages sur le massif de l'Agnis ressortent sur les sources du pourtour du massif. Ainsi, le bassin hydrogéologique du Gapeau n'inclut pas une frange fine de la bordure Crétacé au sud, mais inclut une zone légèrement plus grande du massif de l'Agnis au nord ;
- sur l'Huveaune, une imprécision existe au sud de la Sainte-Baume. D'après les résultats de traçage réalisés dans le cadre du projet KarstEAU (Arfib et Lamarque, 2011), les eaux d'infiltration du poljé de Cuges-les-Pins ne participent pas aux écoulements de l'Huveaune (le traceur n'est pas ressorti dans les points suivis au niveau continental), et l'hypothèse principale est une connexion vers la source sous-marine de Port-Miou (travaux de l'Université d'Aix-Marseille) ;
- sur l'Estéron : les traçages sur la bordure sud, au niveau du massif du Cheiron montrent une étendue légèrement plus grande du bassin hydrogéologique.

Mis à part le poljé de Cuges les Pins sur l'Huveaune, ces différences entre bassins topographique et hydrogéologique ne sont pas fondamentales pour notre étude. Ceci pour deux raisons : i) nous n'avons pas assez d'informations spatiales pour découper de manière fine les bassins hydrogéologiques, et ii) les terrains pentus ainsi que la forte présence de terrains marno-calcaires font que les composantes de ruissellement de surface ne peuvent pas être négligées.

Au final, pour des raisons de cohérence avec l'approche du SPC dont le zonage par bassin est réalisé de manière topographique, nous avons retenu cette approche par bassin versant. La seule erreur notable induite serait celle d'une sous-estimation des débits spécifiques de l'Huveaune à Aubagne qui inclut le poljé de Cuges les Pins. Mais ces données ne sont pas utilisées dans cette étude.

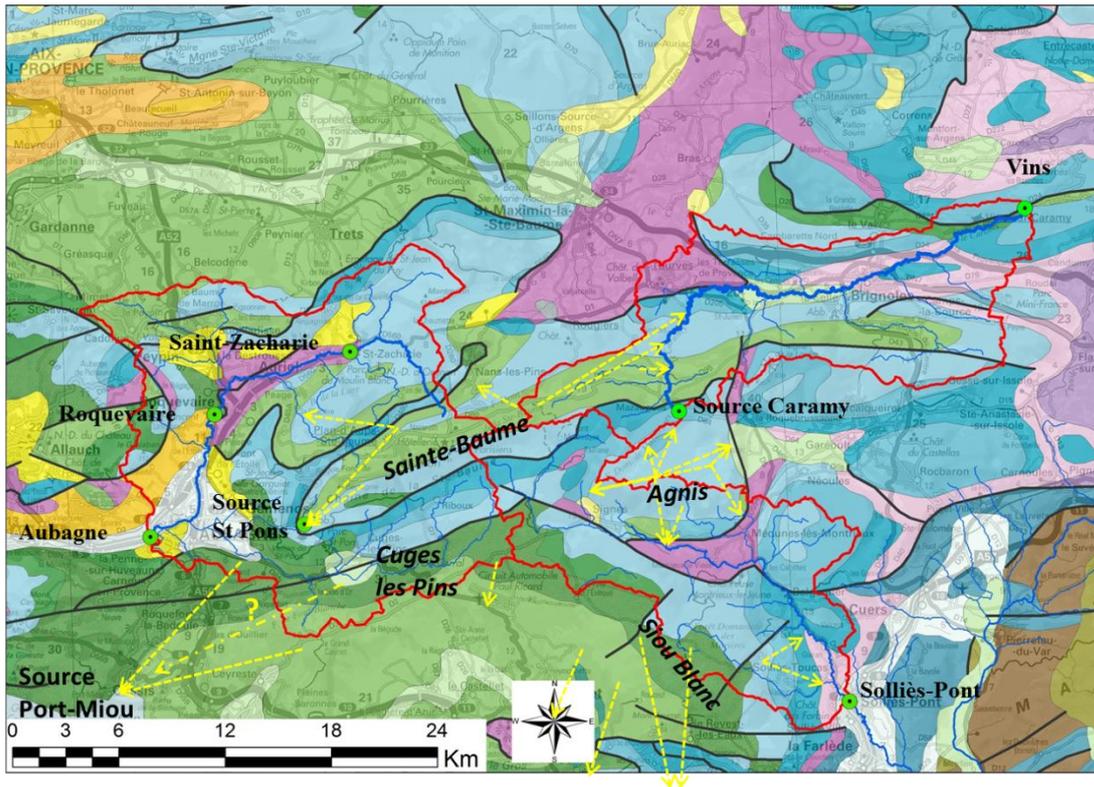


Illustration 17. Synthèse des données de traçage en périphérie du massif de la Sainte-Baume (d'après Cavalera, 2007 ; SAFEGE, 2011 ; Fournillon, 2012)

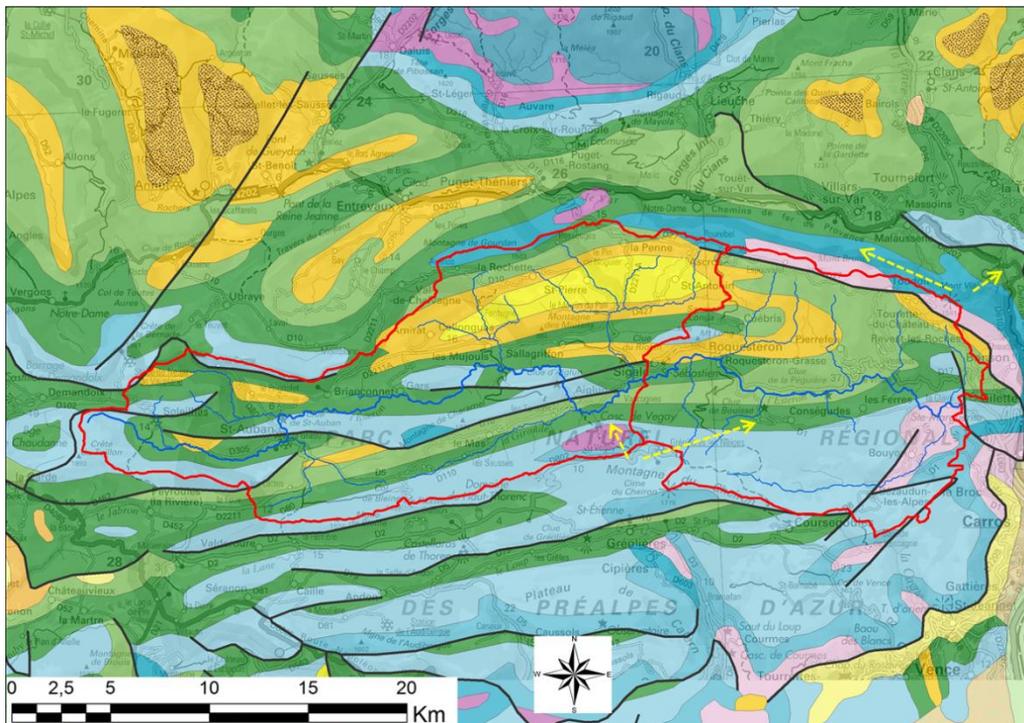


Illustration 18. Synthèse des données de traçage sur le bassin de l'Estéron (données du Comité de Spéléologie 06)

La source Saint-Pons à Gémenos

Sur le bassin de l'Huveaune, la source karstique de Saint-Pons à Gémenos (Illustration 19) est suivie en continu par la DREAL. Son bassin hydrogéologique a été estimé à 10 km² à partir des chroniques annuelles de pluie et débit. Son impluvium est représenté par les formations dolomitiques du Crétacé sur la bordure sud-ouest de la crête du massif de la Sainte Baume.



Illustration 19. Seuil hydrométrique de la source Saint-Pons à Gémenos

La source Caramy à Mazaugues

La rivière Caramy prend sa source à Mazaugues où une station hydrométrique (Illustration 20) permet un suivi continu des débits. La zone drainée par le seuil hydrométrique de la DREAL est en réalité un système de sources étagées au cœur d'un vallon relativement pentu. Les débits mesurés en crue sont donc un mélange d'eaux souterraines et d'eaux de surface issues du ruissellement sur le bassin topographique du vallon (environ 0.5 km²). Les émergences sont issues de la bordure liasique du nord-ouest du massif karstique de l'Agnis. La zone d'infiltration est représentée par des dolomies et des formations calcaires sur un impluvium de 4.3 km². Ce calcul est fait d'après un bilan hydrologique réalisé à partir des chroniques annuelles de pluie et débit, si l'on considère que les débits mesurés sont uniquement une composante souterraine de la source du Caramy. Sa zone de recharge réelle pourrait être plus petite du fait d'une faible composante de ruissellement de surface incluse dans les mesures de débit. Leur contribution potentielle est discutée ci-dessous.



Illustration 20. Seuil hydrométrique de la source Caramy à Mazaugues

Pour évaluer l'influence des eaux de ruissellement de surface sur l'hydrogramme de crue mesuré à la station hydrométrique de Mazaugues, nous avons réalisé des simulations du ruissellement de surface à partir d'un modèle de transfert (Moussa et Bocquillon, 1996) présenté en section 5.1.2. Ce modèle permet de propager le volume ruisselé estimé à partir de la pluie brute à l'exutoire du vallon (la version du modèle utilisée est celle sans apports latéraux). Les simulations présentées en Annexe 2 montrent que sur l'événement de novembre 2011 (plus de 300 mm de pluie), la part de ruissellement de surface atteindrait 4.5 à 11% du volume mesuré si 20 à 50% de la pluie ruisselait sur le bassin versant du vallon. La fourchette haute de ce ruissellement se situe à 23% du volume mesuré si l'on considère que toute la pluie ruisselle sur le vallon. De plus, les dynamiques de crue à partir de paramétrisation basée sur des valeurs communes dans la littérature (Célérité de l'onde de crue d'environ 1.5 m/s) montrent que la dynamique inertielle des hydrogrammes mesurés ne peut être reproduite à partir du seul ruissellement de surface (écoulement rapide). En conséquence, s'il est inévitable que du ruissellement de surface soit mesuré par la station de la DREAL, sa contribution reste a priori faible (de quelques pourcents) et ne semble pas être en mesure de poser un problème quant à l'interprétation des chroniques hydrogéologiques – et notamment les courbes de récession - de la source à Mazaugues.

2.2. DONNEES SPATIALES

L'acquisition des données spatiales de base a porté sur :

- la topographie : IGN 1/25000 ;
- la géologie : carte géologique BRGM 1/1 000 000 et 1/50 000 ;
- le sol : BD Sols (1/250.000, Société du Canal de Provence) ;
- l'occupation du sol : Corine Land Cover ;
- le réseau hydrographique : BD CARTHAGE ;
- les émergences : portail ADES ;

- les cavités : portail BDCavité, données du Comité départemental de spéléologie des Alpes d'Azur (CDS 06) pour le bassin de l'Estéron ;

- les traçages artificiels : thèses de Cavalera (2007) et Fournillon (2012), étude SAFEGE (2011a), données du CDS 06.

2.3. DONNEES TEMPORELLES

2.3.1. Données de pluie

La pluie utilisée pour l'étude est fournie par Météo France et le SPC MED EST et correspond à une pluie moyenne sur le bassin (ou sous bassin). Elle est calculée à partir de la lame d'eau COMEPHORE entre 1997 et 2006, et à partir de la lame d'eau ANTILOPE à compter de 2006.

2.3.2. Données de débit

Les données de débits sont issues des stations hydrométriques suivies par la DREAL PACA et mises à disposition sur le serveur Banque Hydro. Les caractéristiques des stations sont données dans l'illustration 21.

Bassin	Nom (localisation)	Code Banque Hydro	Coordonnées & Altitude		
			X (Lambert 93)	Y (Lambert 93)	Z (m NGF)
GAPEAU	Le Gapeau à Solliès-Pont	Y4604020	947058	6237355	75
HUVEAUNE	L'Huveaune à Saint Zacharie (le moulin blanc)	Y4414015	918849	6257219	245
	L'Huveaune à Roquevaire (1)	Y4414020	911393	6253854	
	L'Huveaune à Roquevaire (2)	Y4414030	911198	6253653	150
	L'Huveaune à Aubagne [DDE]	Y4424050	908078	6247266	98
	L'Huveaune à Aubagne [Le charrel]	Y4424040	907572	6246691	92
	La source Saint-Pons à Gémenos	Y4425010	916269	6247416	350
CARAMY	Le Caramy à Vins-sur-Caramy [Les Marcounious]	Y5105010	956961	6265376	172
	Le Caramy [Source] à Mazaugues	Y5105040	937168	6253987	420
ESTERON	L'Estéron à Sigale [Pont du Coude]	Y6434005	1017949	6315290	371
	L'Estéron au Broc [La Clave]	Y6434010	1034115	6314049	127

Illustration 21. Stations hydrométriques sélectionnées avec en blanc les stations mesurant le débit des cours d'eau et en grisé celles mesurant le débit des sources (source: Banque Hydro).

2.3.3. Données d'Humidité du sol

L'indice SWI (Soil Wetness Index) est un suivi de l'humidité du sol. Il permet d'avoir une estimation de l'état de réserve en eau contenue dans le sol en rapport avec sa réserve utile. Cet outil hydrométrique est issu de la chaîne de calcul SIM (SAFRAN-ISBA-MODCOU), outil hydrométéorologique utilisé pour estimer les bilans de surface spatialisés sur une France discrétisée en mailles régulières de 8 km de côté. Le SWI est fourni par METEO France à un pas de temps journalier. Cet indice se définit par cette formule :

$$SWI = \frac{(W - W_{wilt})}{(W_{fc} - W_{wilt})} \quad (\text{sans unité})$$

avec W le contenu en eau du sol ; W_{wilt} le contenu en eau du sol au point de flétrissement (seuil à partir duquel la plante ne peut plus capter l'eau du sol, trop rare) ; et W_{fc} le contenu en eau du sol à la capacité au champ (seuil au-dessus duquel il n'y a plus de drainage gravitationnel dans le sol, mais ruissellement)

C'est un moyen d'évaluer l'état de la réserve en eau d'un sol, par rapport à sa réserve optimale (réserve utile). Lorsque le SWI est voisin de 1, voire supérieur à 1, le sol est humide, tend vers la saturation. Lorsque le SWI tend vers 0, voire passe en dessous de 0, le sol est en état de stress hydrique, voire très sec. En première approche, les gammes d'états hydriques suivants sont considérées :

- $SWI < 0.6$: état très sec ;
- $0.6 < SWI < 0.8$: état sec ;
- $0.8 < SWI < 1.2$: état humide ;
- $SWI > 1.2$: état très humide.

3. Identification des surfaces karstiques influençant les crues

3.1. DE LA NECESSITE DE COMBINER DES INDICES GEOMORPHOLOGIQUES, PEDOLOGIQUES ET GEOLOGIQUES

La problématique est celle de bassins « mosaïques » composés de formations géologiques variées, en partie carbonatées et karstifiables. Les formations carbonatées ne sont pas toutes karstifiées, et celles qui le sont présentent des degrés de karstification qui varient selon la lithologie, l'altération, la tectonique, etc. Sur les formations non karstiques, les écoulements de crue sont dominés par les composantes de ruissellement de surface et subsurface, et l'on considère que la partie infiltrée qui recharge les aquifères n'y participe pas. Par contre, sur les formations karstiques, le partage ruissellement/infiltration se complique avec le niveau de karstification car deux types d'infiltration existent : i) une infiltration dite diffuse à travers le sol et l'épikarst fissuré, et ii) une infiltration localisée via les dolines, pertes, avens, qui concentrent les écoulements ruisselants directement dans le réseau de drainage souterrain (Illustration 22). Dans ces bassins, les deux types d'infiltration diffuse et localisée vont in fine participer aux écoulements à la résurgence et donc aux crues des cours d'eau qui drainent ces systèmes. La question se pose de savoir comment caractériser les zones de bassin potentiellement influencées par le fonctionnement du karst à l'aide d'un indicateur cartographique.

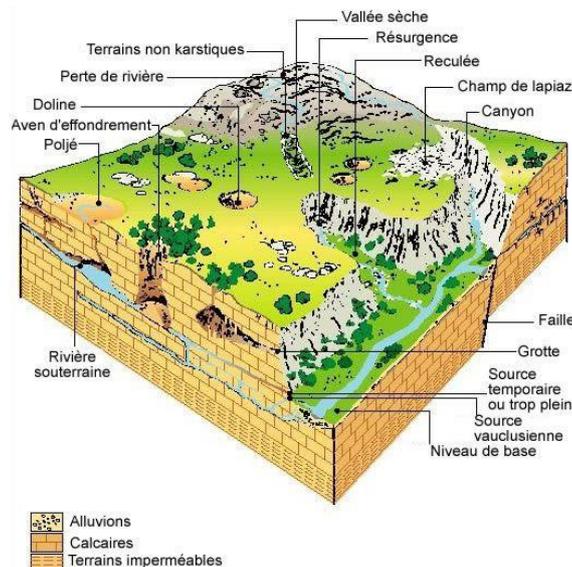


Illustration 22. Bloc diagramme représentant un paysage karstique synthétique (source : Bakalowicz, 1999, SDAGE Rhône - Méditerranée – Corse)

Sur les zones d'infiltration diffuse, les paramètres à prendre en compte sont (i) les propriétés d'infiltration du sol qui contrôlent le partage ruissellement / infiltration, et (ii) la pente qui favorise - quel que soit le sol - la production de ruissellement ainsi que la vitesse de transfert en surface. L'eau infiltrée de manière diffuse percole jusqu'au réseau souterrain karstique avec une cinétique plus lente que l'eau infiltrée localement. Sur les zones d'infiltration localisée, les paramètres à prendre en compte sont des paramètres géologiques et géomorphologiques. Toute l'eau qui s'infiltré met en charge directement le réseau karstique souterrain et est transférée rapidement à l'exutoire (sources karstiques) et donc au réseau hydrographique.

Dans cette configuration, identifier les zones karstiques sur lesquelles les processus dominants vont être soit ruisselants, soit filtrants doit alors faire appel à une approche innovante qui couple les indicateurs de partage ruissellement/infiltration en surface pour caractériser l'infiltration diffuse, et un indicateur de l'infiltration localisée spécifique au karst. Dans cette étude, nous présentons une approche combinée d'un indice SOL à partir de données pédologiques, d'un indice PENTE à partir des données topographiques, et d'un indice KARST à partir de données géologiques et géomorphologiques. L'illustration des différentes étapes est donnée pour le bassin de l'Huveaune, et le résultat final pour les 4 bassins étudiés.

3.2. INDICE SOL

On s'attache ici à caractériser le potentiel d'infiltration diffuse, c'est-à-dire le partage ruissellement/infiltration à la surface du sol. L'indice SOL se base sur l'approche développée pour le Critère S (couverture pédologique et géologique) dans la méthode PaPRIKa qui est une méthode de cartographie de la vulnérabilité de la ressource en eau en domaine karstique (Dörfliger et Plagnes, 2009). En l'absence de données pédologiques sur la texture des sols ou sur leurs propriétés hydrodynamiques, nous appliquons une approche simplifiée en ne considérant que l'épaisseur du sol et la piérosité. La formule pour calculer l'indice SOL pour une zone donnée a été définie ainsi :

$$\text{Indice SOL} = \sum \text{Unité}_{\text{sol}} \times \left(\frac{\text{Epaisseur}_{\text{unité}}}{\max(\text{Epaisseur}_{\text{bassin}})} \times \frac{1}{\text{Piérosité}} \right)$$

avec les 3 paramètres suivants :

- **unité_{sol} [%]** : représentativité de l'unité sol (Illustration 23) sur une zone cartographique donnée issue de la BD Sols ;
- **épaisseur [%]** : épaisseur moyenne du sol ; nous avons considéré que plus le sol était épais, et plus il était susceptible de favoriser le ruissellement. Cet aspect est cohérent en domaine karstique car là où les sols sont en général peu épais, voire inexistants, le ruissellement peut être négligé. Dans la formule, l'épaisseur à l'échelle de l'unité est normalisée sur l'épaisseur maximale du bassin ;
- **piérosité [classes]** : les 5 classes de piérosité dans la BD Sols traduisent un taux de piérosité qui est croissant avec l'augmentation de la valeur des classes : plus le sol est pierreux, plus l'infiltration est favorisée (Illustration 24).

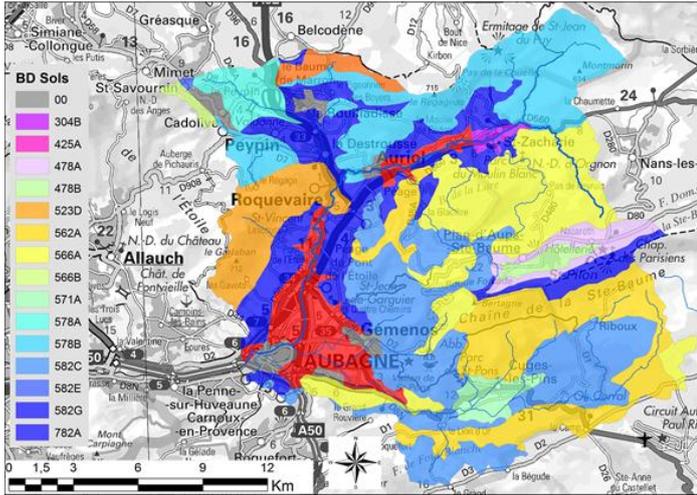


Illustration 23. Carte des sols (BD Sols 1/250 000) du bassin versant de l'Huveaune à Aubagne

Pierosité (%)	Classes de Pierosité (BD Sols)	Partage Ruissellement / Infiltration
0	1	Ruissellement dominant
0 à 10	2	
10 à 25	3	
25 à 50	4	
> 50	5	Infiltration diffuse dominante

Illustration 24. Tableau de détermination des classes de Pierosité

L'indice SOL varie de 0 à 1, avec l'infiltration favorisée pour un indice qui tend vers 0. Il a été découpé en 4 classes pour exprimer les processus dominants dans l'illustration 25 :

Valeurs indice SOL	Classes indice SOL	Partage Ruissellement / Infiltration
> 0.4	1	Ruissellement dominant
0.2 à 0.4	2	
0.1 à 0.2	3	
0 à 0.1	4	Infiltration diffuse dominante

Illustration 25. Tableau de détermination des classes de l'indice SOL.

L'illustration 26 présente le résultat du zonage de l'indice SOL sur le bassin de l'Huveaune. Cette carte fait ressortir en vert les zones où le ruissellement est favorisé comme les fonds de vallée et la plaine d'Aubagne dominées par les alluvions. Les massifs karstiques sont en jaune et rouge et donc caractérisés par des sols peu épais et ou très filtrants.

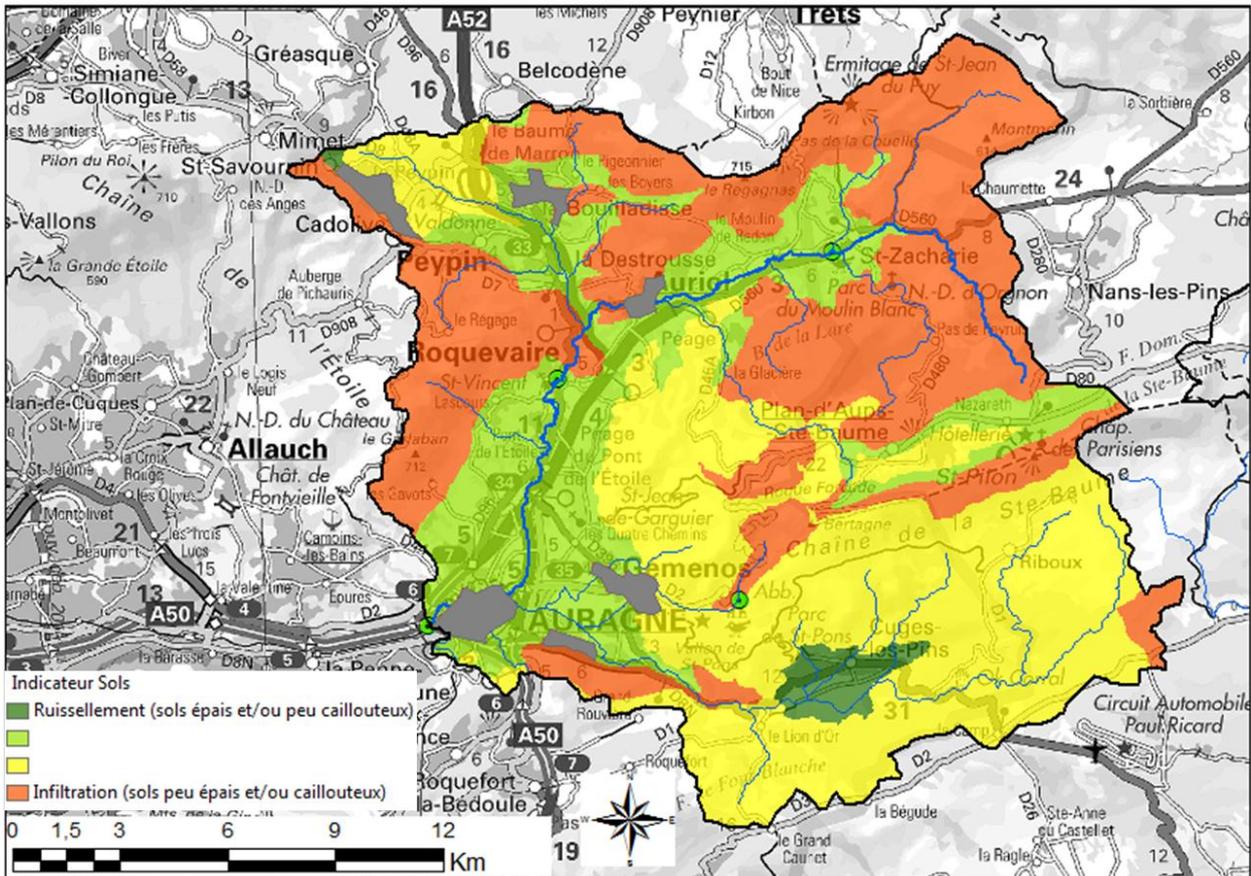


Illustration 26. Indice SOL sur le bassin versant de l’Huveaune à Aubagne

3.3. INDICE PENTE

L’indice pente permet de tenir compte du contrôle de la topographie dans le partage ruissellement / infiltration car la pente favorise le ruissellement. Ce paramètre est sensible au vu des contrastes de pente existants sur nos bassins d’études montagneux, et notamment sur l’Estéron. La pente est calculée à partir du MNTIGN, et quatre classes ont été retenues (Illustration 27) sachant que les valeurs de classes diminuent avec une augmentation de la pente et donc d’une favorisation du ruissellement.

Pente (%)	Classes indice PENTE	Partage Ruissellement / Infiltration
> 20	1	Ruissellement favorisé
10 à 20	2	
5 à 10	3	
0 à 5	4	Ruissellement non favorisé

Illustration 27. Tableau de détermination des classes de l’indice PENTE.

L’Illustration 28 présente le résultat du zonage de l’indice PENTE sur le bassin de l’Huveaune.

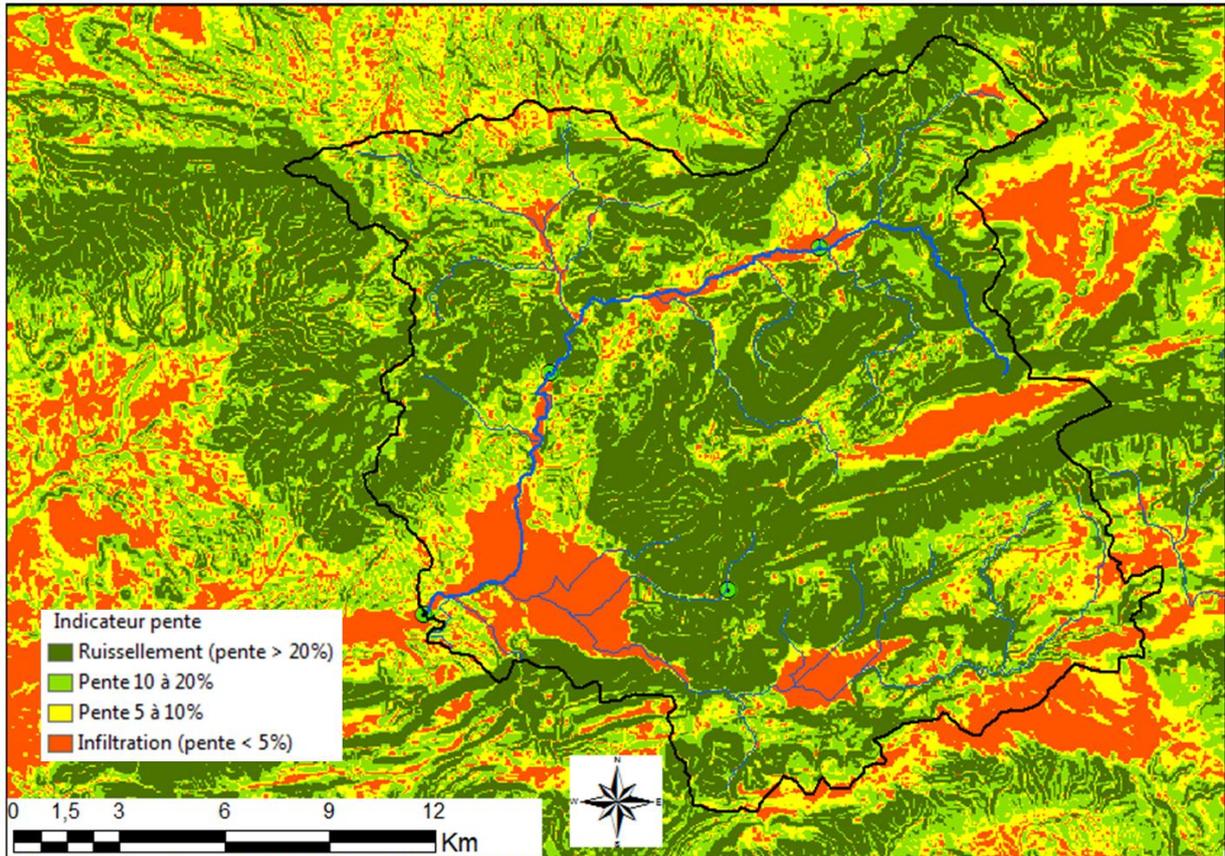


Illustration 28. Indice PENTE sur le bassin versant de l'Huveaune à Aubagne

3.4. UN INDICE KARST

3.4.1. Comment intégrer le potentiel de karstification dans un indice cartographique ?

La karstification des formations carbonatées est un phénomène difficile à caractériser d'un point de vue cartographique car elle engendre des figures géomorphologiques très diverses. En surface, le modelé des paysages karstiques typiques comprend des champs de lapiaz, des dolines, des poljés, des avens, des canyons, des reculées, des reliefs ruiniformes, des émergences karstiques, etc. synthétisés sur l'illustration 22. Ces figures karstiques ne sont en général pas renseignées dans les bases de données géologiques ou topographiques, donc il est nécessaire de développer une approche adaptée pour caractériser le potentiel de karstification des unités lithologiques à grande échelle (c'est-à-dire à l'échelle de grands bassins où il n'est pas envisageable de réaliser une prospection terrain exhaustive du modelé karstique).

Pour une approche cartographique, deux types de figures karstiques sont relativement bien renseignées dans les bases de données :

- les cavités sur la base de données BDCAVITE et des données spéléologiques. Dans notre cas, nous avons retenu les cavités dites naturelles, les grottes, les pertes, les avens ;
- les sources (émergences karstiques) sur le portail ADES.

L'illustration 29 présente la répartition des cavités et des sources par famille lithologique, ainsi que les surfaces représentatives de ces mêmes familles sur les quatre bassins d'étude. On voit clairement que indépendamment de la surface des dolomies et calcaires, ce sont ces deux formations qui comptabilisent le plus de cavités, indiquant le fort potentiel de karstification de ces formations comparé aux autres formations carbonatées plus marneuses. Concernant les sources, elles se répartissent globalement entre la famille 'dolomies et calcaires' et la famille 'calcaires marneux', montrant i) d'une part que les calcaires marneux ne sont pas des formations que l'on doit considérer comme imperméables où exemptes de karstification, et ii) d'autre part que la densité de sources par famille lithologique est un indicateur imprécis du niveau de karstification.

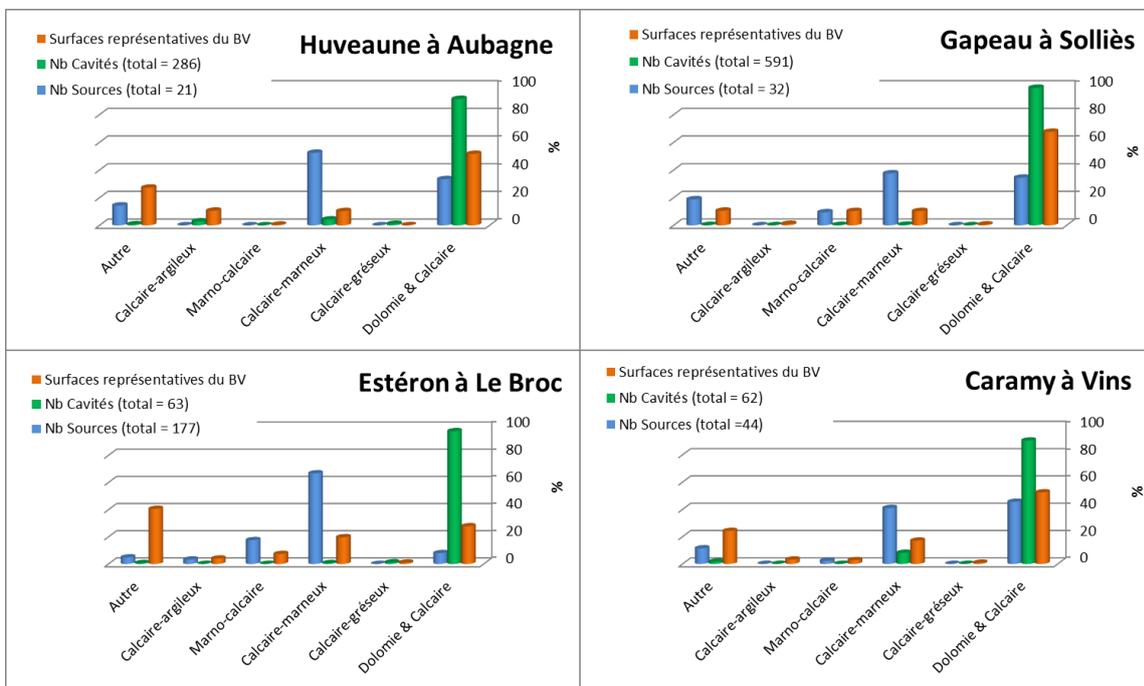


Illustration 29. Pourcentage des cavités et sources par unité lithologique ; la surface représentative de chacune des unités est également indiquée en pourcentage

En effet, concernant les sources, nous nous heurtons à un problème de représentation du niveau de karstification dans le sens où une karstification avancée des carbonates va favoriser un réseau de drainage développé, une bonne connexion entre les drains et donc favoriser in fine le développement d'un exutoire unique drainant un impluvium important. Ainsi, la densité de sources ne peut être un bon indicateur du potentiel de karstification que si elle est associée à la valeur de son débit spécifique qui est une donnée en général non connue. Ainsi, le nombre de sources par lithologie n'est pas un paramètre que nous avons retenu dans la construction de l'indice KARST.

Pour compléter l'indice KARST et le nombre de cavités recensées, nous avons construit un indice 'dépression' issu du MNT25. Cet indice recense les cuvettes topographiques qui correspondent aux dolines dans un paysage karstique. L'approche à partir du MNT25 nous a obligé à réaliser un filtre des cuvettes localisées par un artefact au niveau des méandres du réseau hydrographique dans les zones peu pentues.

3.4.2. Construction d'un indice KARST

On s'attache ici à caractériser le potentiel d'infiltration localisée qui se produit au travers d'avens, de dolines, de pertes, etc. L'indice KARST combine un potentiel de karstification à partir d'un critère lithologique amplifié par la présence de dépressions qui sont synonymes d'une concentration des eaux de ruissellement pour les infiltrer de manière locale dans le karst. Il est également accentué par la présence de cavités interprétées comme un indice de réseau karstique bien développé. L'indice KARST est défini comme suit :

$$\text{Indice KARST} = \text{Lithologie} \cdot e^{(\text{Dépression} + \text{Cavités})}$$

avec les 3 paramètres suivants :

- **lithologie [%]** : ce paramètre représente le potentiel de karstification d'un point de vue purement lithologique suivant des valeurs de potentiel définies par l'illustration 30 ;
- **dépression [%]** : représentativité en termes de surface des dépressions karstiques (cuvettes topographiques) pour une unité lithologique ;
- **cavité [%]** : densité de cavités par unité lithologique (Illustration 31).

Lithologie	Valeurs de potentiel de karstification attribuées (%)
Formation non carbonatée	1
Calcaire-argileux	30
Marno-calcaire	30
Calcaire-marneux	60
Calcaire-gréseux	60
Dolomie & Calcaire	100

Illustration 30. Potentiel de karstification par lithologie

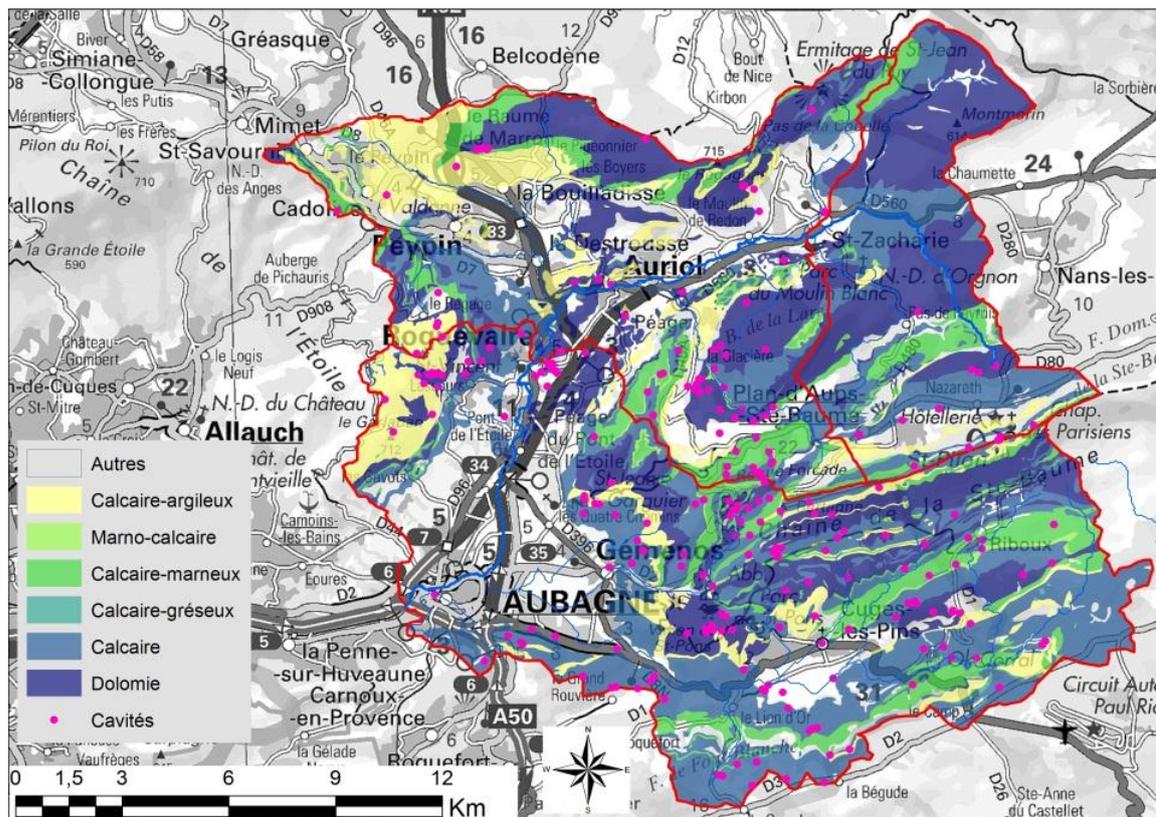


Illustration 31. Carte lithologique (d'après BRGM 1/50 000) et carte des cavités (BDCAVITE) du bassin versant de l'Huveaune à Aubagne

L'indice KARST varie de 0 à $+\infty$ et a été découpé en 5 classes pour exprimer les processus dominants dans l'illustration 32 :

Valeurs indice KARST	Classes indice KARST	Infiltration localisée
1 à 30	1	Pas d'infiltration localisée
30 à 60	2	
60 à 100	3	
100 à 150	4	
150 à $+\infty$	5	Forte infiltration localisée

Illustration 32. Tableau de détermination des classes de l'indice KARST.

L'illustration 33 présente l'application de l'indice KARST sur le bassin de l'Huveaune.

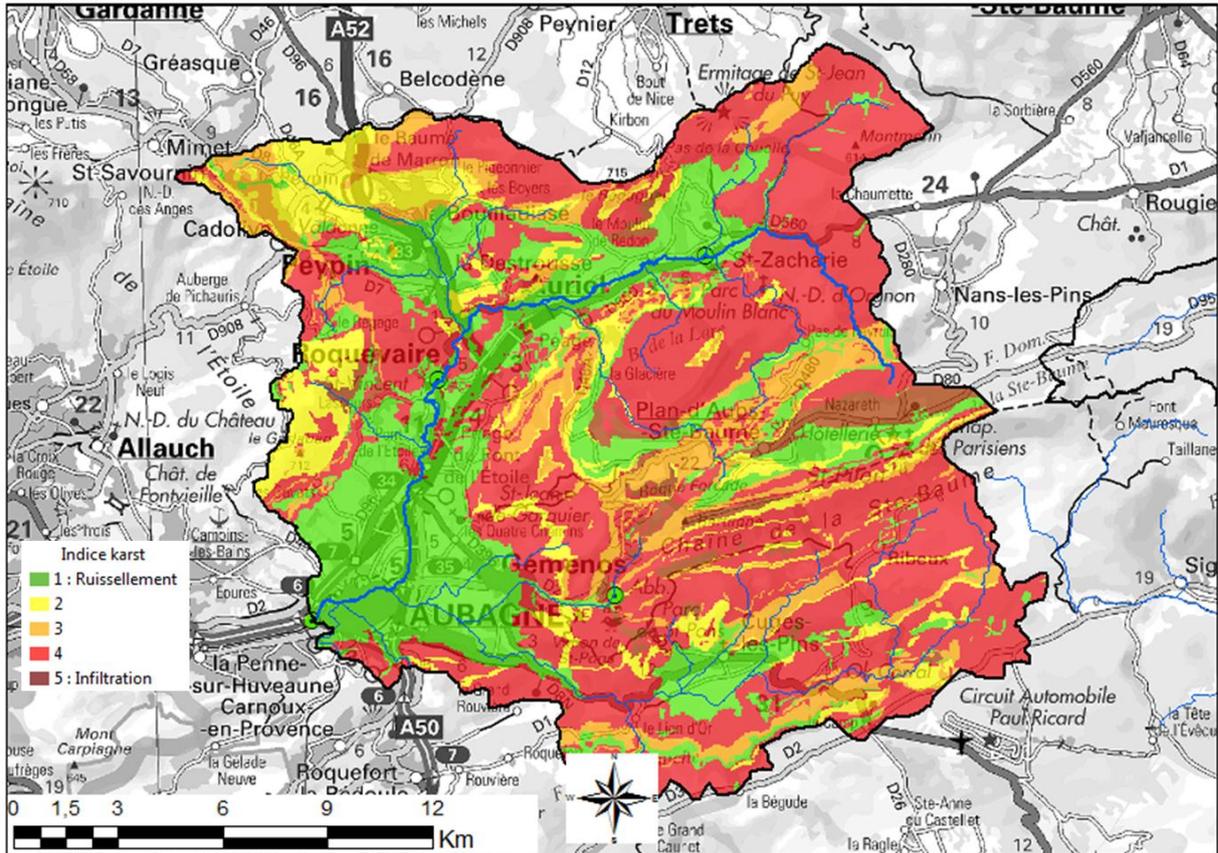


Illustration 33. Indice KARST sur le bassin de l'Huveaune

3.5. ZONAGE DE L'INFLUENCE POTENTIELLE DU KARST AUX CRUES

Les trois indices SOL, PENTE, et KARST sont additionnés, et leur combinaison en 5 classes représente en un même indicateur le potentiel d'influence du karst aux crues (Illustration 34 et Illustration 35). Plus les terrains seront ruisselants (en vert), et plus le potentiel d'influence du karst sera faible. Plus les terrains seront infiltrants (en rouge) – de manière diffuse et/ou localisée – et plus le potentiel d'influence du karst sera grand. Nous parlons ici de potentiel d'influence du karst aux crues et non d'amplification ou d'atténuation car l'indicateur ne permet pas de déterminer les conditions hydrologiques qui vont contrôler les échanges surface/souterrain.

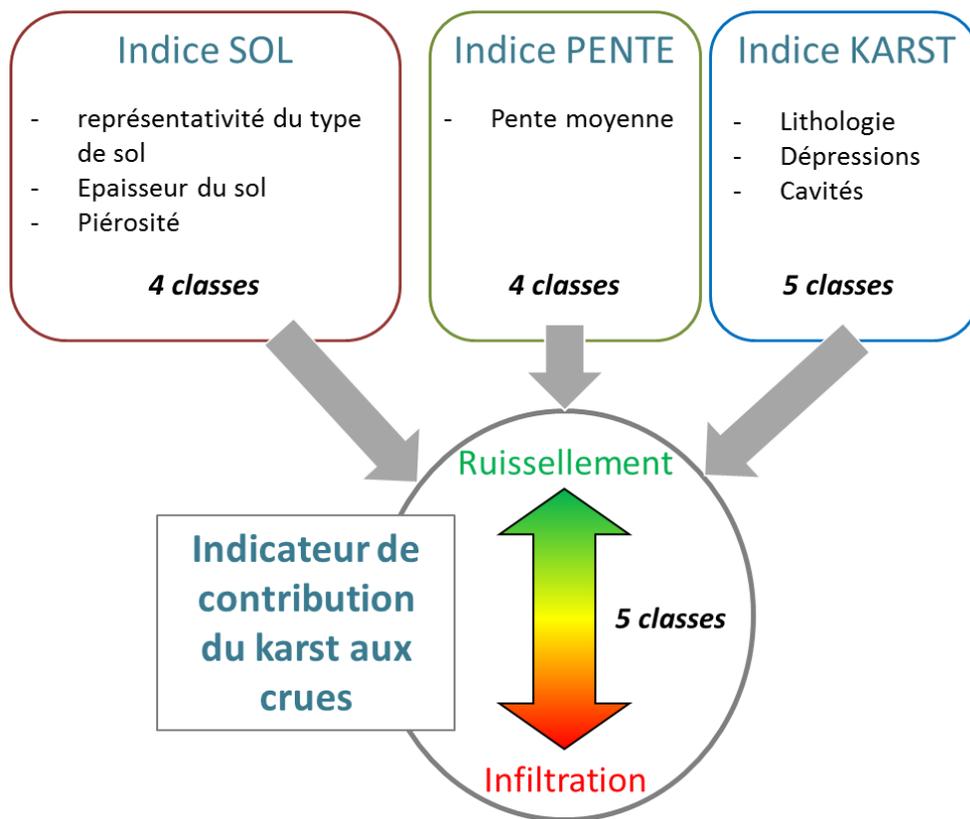


Illustration 34. Indice ruissellement / Infiltration comme indicateur de contribution du karst aux crues, en combinant un indice SOL (infiltration diffuse), un indice PENTE, et un indice KARST (infiltration localisée)

L'indice Ruissellement / Infiltration comporte 5 classes (Illustration 35)

Combinaison des indices SOL + PENTE + KARST	Classes indicateur Ruissellement / Infiltration	Influence du karst aux crues
3 & 4	1	nulle
5 & 6	2	
7 & 8	3	
9 & 10	4	
11, 12 & 13	5	Forte

Illustration 35. Tableau de détermination des classes de l'indice Ruissellement / Infiltration.

3.5.1. Bassin de l'Huveaune

Les zones pour lesquelles le karst est le moins influent sur le bassin de l'Huveaune sont les fonds de vallée (plaines d'Aubagne et de Géménos) et les zones où affleurent le Trias et le Tertiaire. Celles pour lesquelles le karst est le plus influent sont le cœur du massif de la Sainte-Baume (crête) à l'est, les massifs de la Lare et Aurélien, ainsi que la partie méridionale vers l'unité du Beausset.

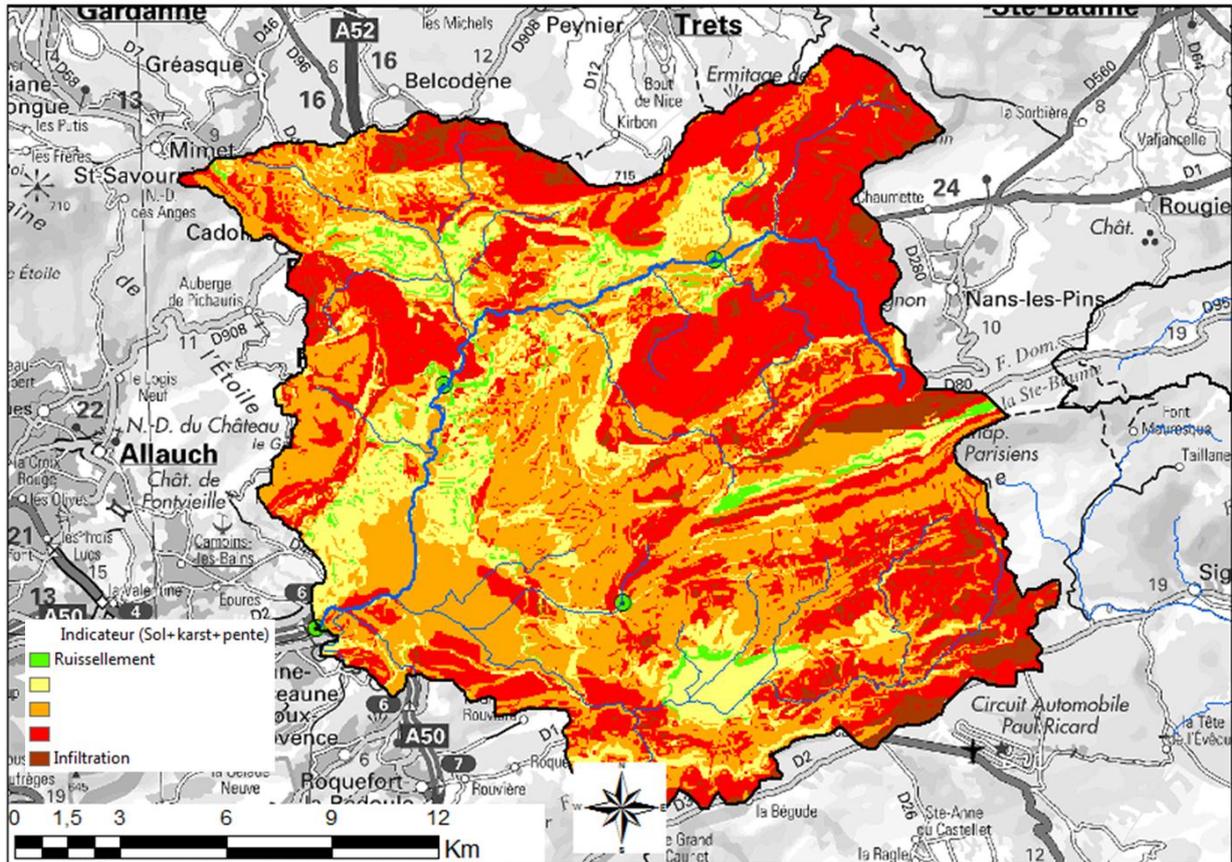


Illustration 36. Zonage Ruissellement / Infiltration sur le bassin de l'Huveaune

3.5.2. Bassin du Gapeau

Les zones pour lesquelles le karst est le moins influant sont les fonds de vallée du Gapeau, et la zone d’affleurement du Trias. Celles pour lesquelles le karst est le plus influant sont la bordure ouest avec le massif du Siou Blanc et de la Sainte Baume au nord-ouest,

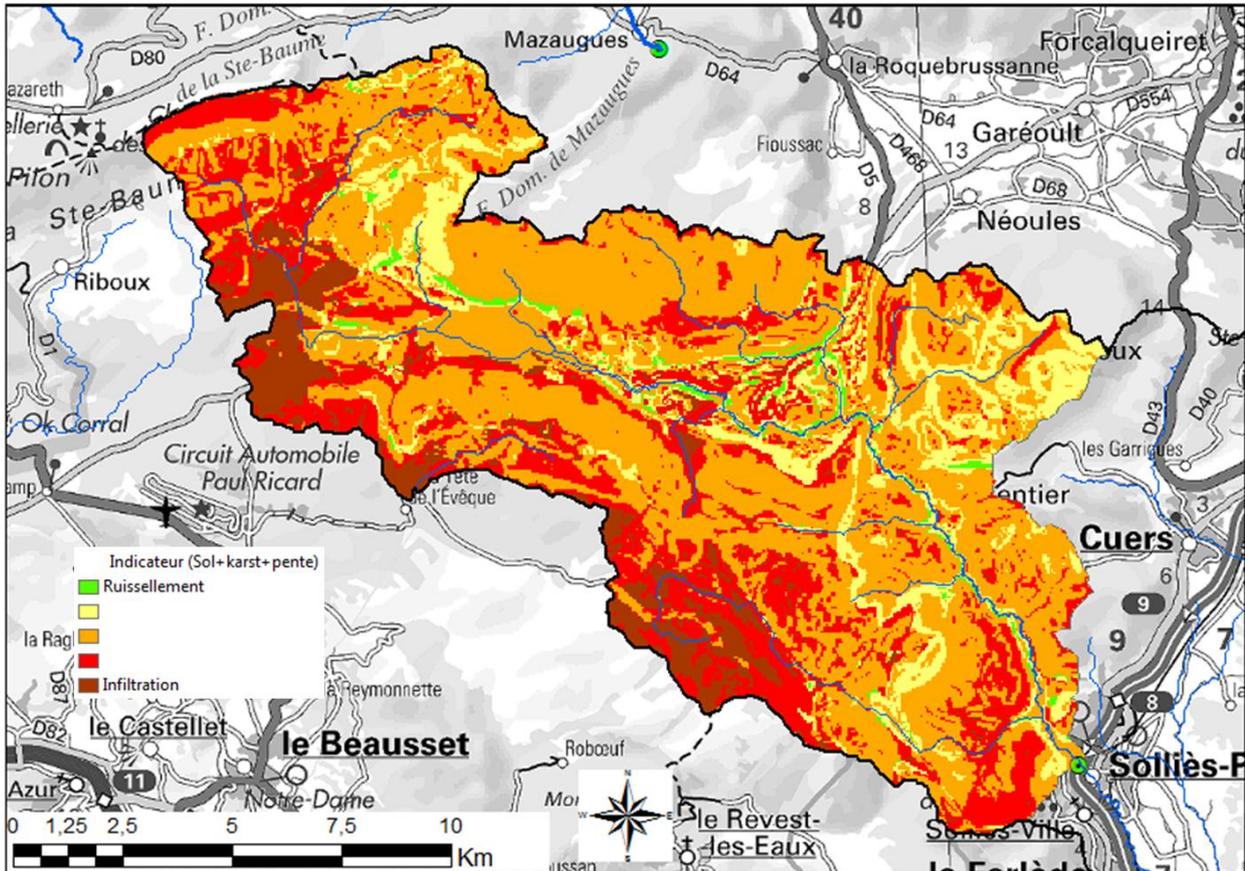


Illustration 37. Zonage Ruissellement / Infiltration sur le bassin du Gapeau

3.5.3. Bassin du Caramy

Les zones pour lesquelles le karst est le moins influant sont les plaines de Tourves et Brignoles, ainsi que la partie marneuse et conglomératique des formations du Crétacé (au sud-ouest). Celles pour lesquelles le karst est le plus influant sont les formations jurassiques du nord de la Sainte-Baume à l'ouest du bassin.

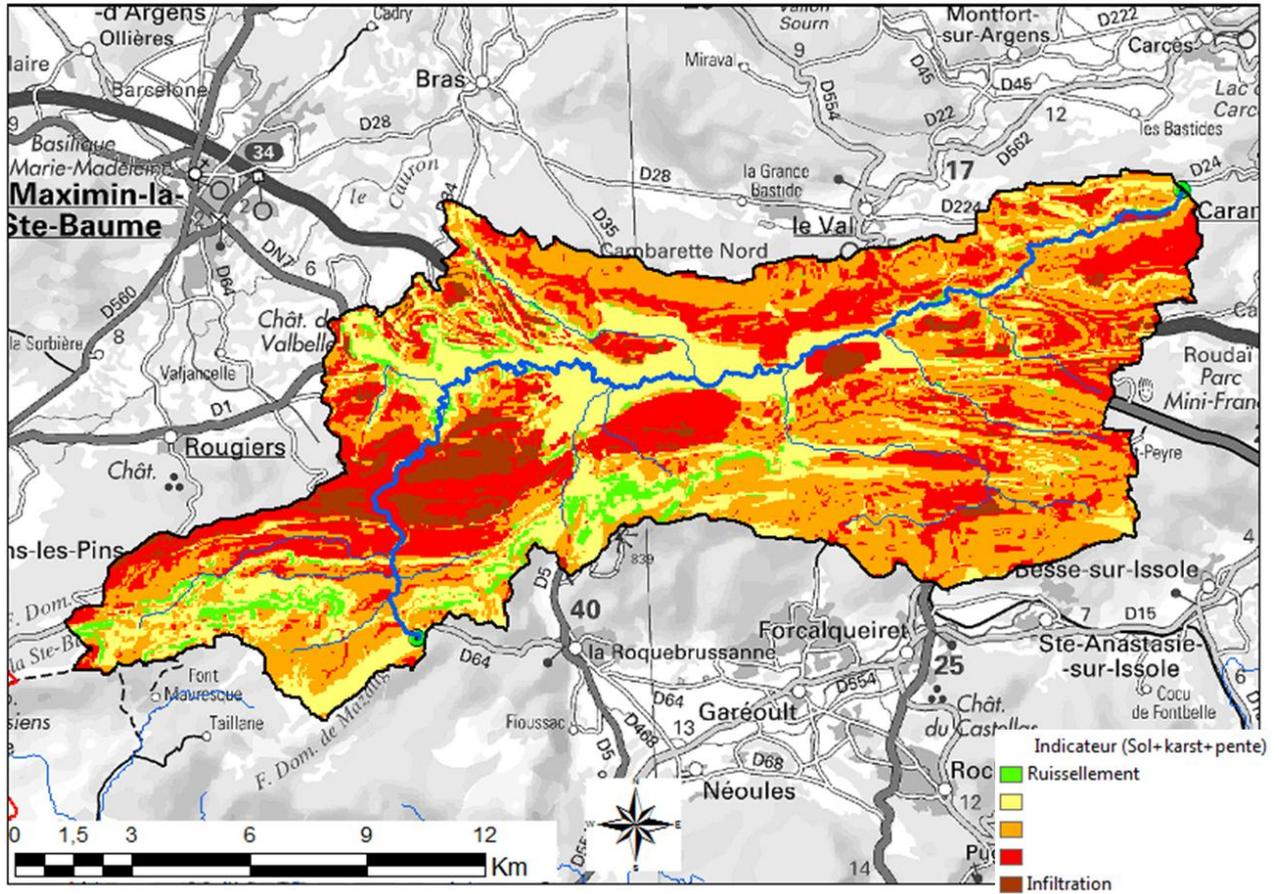


Illustration 38. Zonage Ruissellement / Infiltration sur le bassin du Caramy

3.5.4. Bassin de l'Estéron

Les zones pour lesquelles le karst est le moins influant sont les formations du Tertiaire dans la moitié nord du bassin et les formations marneuses du Crétacé. Celles pour lesquelles le karst est le plus influant sont les formations jurassiques du massif du Cheiron sur la bordure sud.

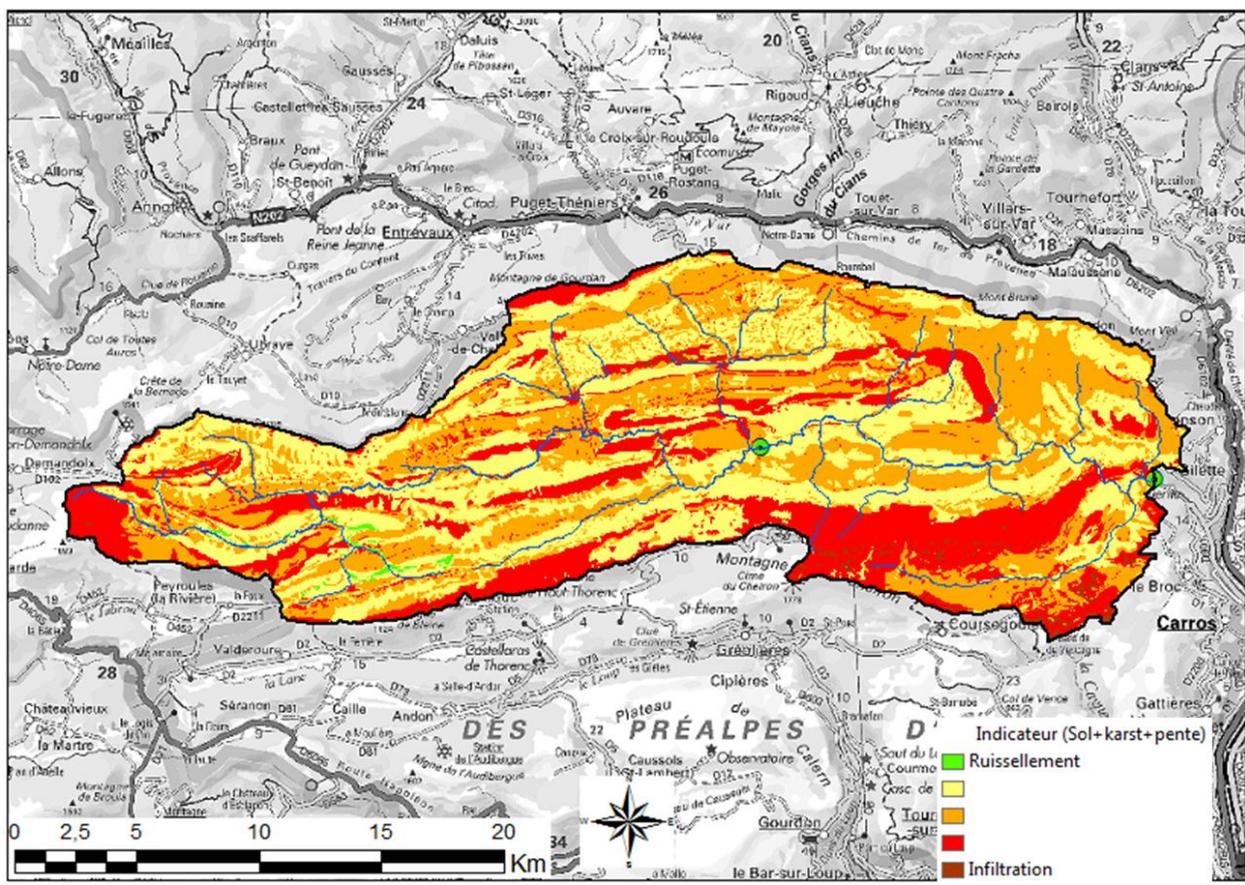


Illustration 39. Zonage Ruissellement / Infiltration sur le bassin de l'Estéron

4. Comparaison des indicateurs de l'état hydrique du bassin dans les relations Pluie-Débit

4.1. METHODE PLUIE-DEBIT

4.1.1. Problématique et objectifs

La réponse hydrologique d'un bassin est contrôlée principalement par la pluie (intensité, répartition spatiale, etc.) et par l'état hydrique initial du bassin. En général, cet état hydrique initial est lié au niveau de saturation des sols qui contrôlent le partage ruissellement/infiltration.

Cependant, dans le cas de bassins karstiques caractérisés par une forte infiltration ainsi qu'un transfert rapide en souterrain de ces eaux infiltrées, la capacité de rétention du bassin peut alors être fortement contrôlé par le niveau d'eau de l'aquifère karstique. Dans ces bassins karstiques où des zones de sols épais en plaine ou sur formations marneuses alternent avec des formations karstiques à l'affleurement, comment choisir l'indicateur de l'état hydrique initial pour prédire au mieux la réponse hydrologique ?

L'objectif de ce chapitre est de déterminer les facteurs influençant la réponse hydrologique en comparant plusieurs indicateurs de l'état hydrique initial au niveau du sol ou des aquifères, et notamment des aquifères karstiques.

Nous nous basons sur l'analyse Pluie-débit sur des épisodes de crues simples, en grande majorité « monopic » pour lesquels la réponse hydrologique du bassin est facilement corrélée à la pluie.

4.1.2. Sélection des épisodes de crue

A partir des données pluie et débit journalières, une sélection d'évènements a été effectuée en s'appuyant sur la vérification d'au moins un des deux critères suivants :

- pluie journalière moyenne sur le bassin supérieure à 40 mm ;
- cumul sur 3 jours de cette pluie journalière moyenne supérieur à 100 mm.

Ces critères ont été choisis afin de sélectionner tous les épisodes de pluie importants qu'ils donnent lieu à une crue ou non. Cette procédure a permis d'isoler pour chaque bassin une trentaine d'épisodes pluie-débit sur la période 1997-2013 sur la base de données journalières.

A partir de ces événements sélectionnés au pas de temps journalier, les données horaires ont ensuite été collectées. Une analyse plus fine des épisodes de pluie et des dynamiques de crue a permis d'isoler entre 68 et 84 épisodes par station (avec un exemple sur l'illustration 40). Ces événements sont généralement caractérisés par des crues monopic ou par un couple Pluie-Débit de morphologie simple pour lequel la réponse hydrologique apparaît comme évidente.

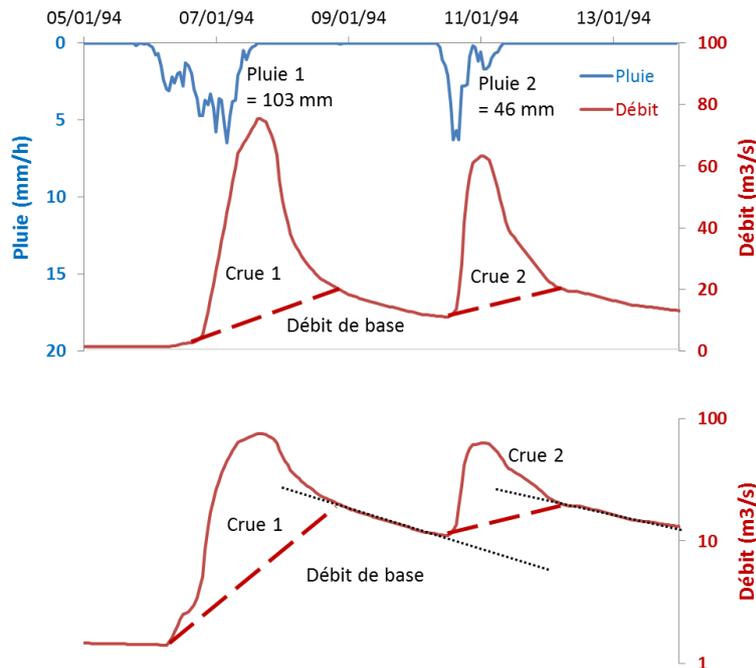


Illustration 40. Exemple de séparation des hydrogrammes de crue au pas de temps horaire pour deux épisodes de crue sélectionnés dans un premier temps sur la base de chroniques journalières ; la figure du bas représente le débit en échelle log qui permet de localiser le point d'inflexion sur la décrue pour séparer le volume de crue et le volume de base.

Pour chaque épisode est calculé la pluie totale en mm ainsi que le volume de crue écoulé exprimé en mm (Volume écoulé / Surface du bassin). Ce volume de crue correspond à l'écoulement total auquel est retranché le débit de base. Ce dernier est défini lors de la crue par une droite qui relie le début de crue et le point d'inflexion observé sur la décrue lorsque le débit devient linéaire en échelle log (Illustration 40), correspondant à une décroissance exponentielle en échelle linéaire.

4.1.3. Indicateurs de l'état hydrique initial

Pour chaque épisode de crue, nous avons sélectionné quatre indices de l'état hydrique initial :

- indice de l'état de saturation du sol : le SWI défini à la section 2.3.3 ;
- indice de l'état de saturation des nappes sur l'ensemble du bassin : le débit de base du cours d'eau à l'exutoire ;
- indices de l'état de saturation du système karstique du Caramy : le débit de base de la source Caramy à Mazaugues ;
- indices de l'état de saturation du système karstique de St Pons : le débit de base de la source Saint-Pons à Gémenos.

Etant donné que les deux sources Saint-Pons (bassin de l'Huveaune) et du Caramy (bassin du Caramy) sont situées dans le Massif karstique de la Sainte-Baume, elles sont toutes deux testées comme indicateur karst pour les 3 bassins entourant le massif : l'Huveaune, le Gapeau et le Caramy, mais pas pour celui de l'Estéron, trop éloigné du secteur.

4.2. ANALYSES PLUIE-DEBIT

L'analyse Pluie-Débit utilisée dans cette étude consiste à tester différents indicateurs de l'état hydrique initial pour expliquer au mieux les variations de la réponse hydrologique après un épisode pluvieux. Nous nous focalisons sur des diagrammes binaires pluie-débit comprenant le débit de crue (ou volume de crue exprimé en mm de lame d'eau) en fonction du cumul de pluie de l'épisode (en mm). Dans le nuage de point qui indique un volume de crue variable selon une pluie donnée, nous définissons des classes pour chacun des indicateurs sélectionnés. Au vu du nombre d'épisode par bassin (entre 60 et 80 épisodes), nous avons testé 3 puis 4 classes et notre choix s'est porté sur le découpage en 4 classes qui permet de différencier de manière plus fine la réponse hydrologique pour des états hydriques initiaux intermédiaires entre les états extrêmes sec et humide.

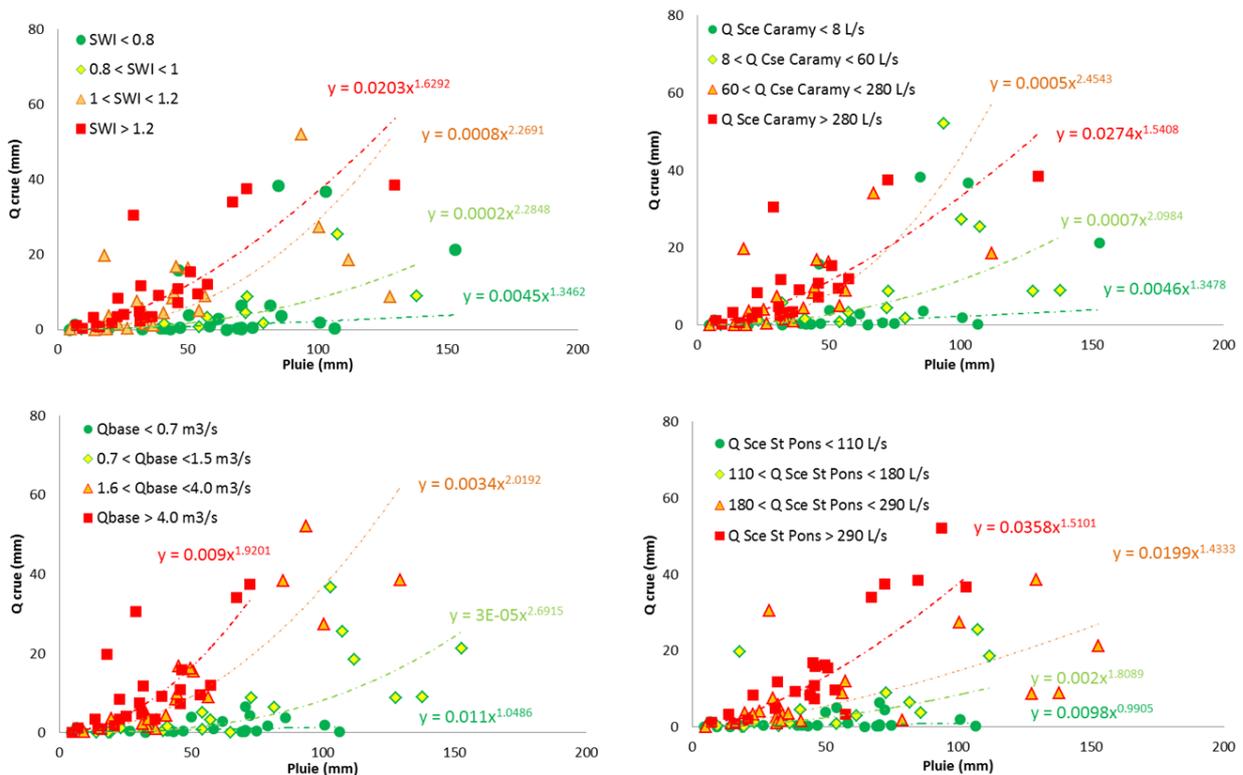


Illustration 41. Relations Pluie-Débit pour le bassin du Caramy à Vins-sur-Caramy. Chaque diagramme binaire présente 4 classes pour un indicateur hydrique initial différent : avec de haut en bas et de gauche à droite le SWI, le débit de base du cours d'eau, le débit de base de la source Caramy, et le débit de base de la source St-Pons ; les ajustement des crues pour chaque classe sont réalisés dans ce cas avec une loi puissance.

L'illustration 41 présente les analyses réalisées pour le bassin du Caramy. Les quatre graphiques présentés reprennent les mêmes couples Pluie-Débit classés selon les quatre classes d'états hydriques initiaux sélectionnés : le SWI, le débit de base du cours d'eau, le débit de base de la source Caramy, et le débit de base de la source Saint Pons. Les quatre classes sec, intermédiaire 1, intermédiaire 2, et humide suivent un code couleur toujours identique du vert foncé au rouge.

Globalement, pour n'importe quel indicateur, on observe bien pour une même pluie une augmentation de la réponse hydrologique avec une augmentation de la saturation du bassin. Cependant, on observe des différences, notamment pour les pluies les plus fortes, et certaines crues sont considérées comme dans un état initial sec si l'on regarde le SWI mais dans un état initial humide si l'on regarde la source St Pons par exemple. Ces variations traduisent des ajustements différents pour chaque classe selon l'indicateur choisi comme en témoigne les variations de coefficients des fonctions puissance selon les indicateurs.

4.3. COMPARAISON DES INDICATEURS

A partir de ce constat, nous avons cherché à comparer les ajustements des quatre classes d'état hydrique pour identifier les meilleurs indicateurs de l'état hydrique initial du bassin. Cette comparaison va nous permettre de nous guider pour discuter de la pertinence ou non de définir un indicateur karst sur chaque bassin.

Le coefficient d'ajustement retenu est la racine carré de l'erreur quadratique moyenne (RMSE – Root-Mean-Square Error) qui varie de 0 à l'infini, et qui est à minimiser pour optimiser l'ajustement. Ce coefficient est une mesure de la variance résiduelle normalisée par la racine carré. L'illustration 42 présente les valeurs de RMSE pour chaque ajustement d'état hydrique initial pour les 4 indicateurs sélectionnés. Comme la RMSE donne un résultat en absolu (i.e. en mm dans notre cas), il est possible de comparer les différents ajustements pour un même bassin. La comparaison inter-bassin n'est alors pas possible pour cette même raison. La description des graphiques est donnée ci-dessous :

Bassin du Caramy : les meilleurs ajustements sont obtenus pour l'indicateur de débit de base du cours d'eau et la source Saint-Pons. Le SWI donne de bons résultats en état sec et humide mais n'apparaît pas comme un bon indicateur lors des états hydriques intermédiaires proches de la sécheresse (« inter 1 »). La source Caramy apparaît comme un moins bon indicateur en état hydrique non saturé. On en déduit que l'état hydrique du sol et des aquifères contrôlent bien la réponse hydrologique pour les extrêmes sec et humide, mais que seule la saturation des aquifères est un bon indicateur des états hydriques intermédiaires.

Bassin du Gapeau : le SWI, le débit de base du cours d'eau, et la source Caramy sont des indicateurs équivalents pour les quatre classes d'état hydrique. La source St Pons apparaît comme un moins bon indicateur quand la saturation du bassin augmente. Il est intéressant de remarquer les fortes valeurs de RMSE pour l'état hydrique « inter 1 » comparé aux autres classes, ce qui montre qu'aucun des indicateurs sélectionnés ne permet de bien caractériser la réponse hydrologique lorsque le bassin n'est pas saturé.

Bassin de l'Estéron : les deux indicateurs SWI et débit de base du cours d'eau sont équivalents quel que soit l'état hydrique. Cette absence de différence entre indicateurs du sol et de l'aquifère ne met pas en évidence un rôle spécifique des aquifères karstiques (qui représentent la majorité des aquifères du bassin) dans le contrôle de la réponse hydrologique.

Bassin de l'Huveaune : à Roquevaire, le débit de base du cours d'eau semble être un meilleur indicateur des états hydriques non saturé, alors que ce sont les indicateurs des deux sources et le SWI qui semblent être les meilleurs indicateurs à saturation. A Aubagne, ce sont le débit de base et la source Caramy qui sont les meilleurs indicateurs des états hydriques, car le SWI apparaît comme un moins bon indicateur de l'état humide. La source St Pons est l'indicateur le plus mauvais. Ces résultats montrent que l'état de saturation des aquifères est un facteur important de la réponse hydrologique pour ce bassin.

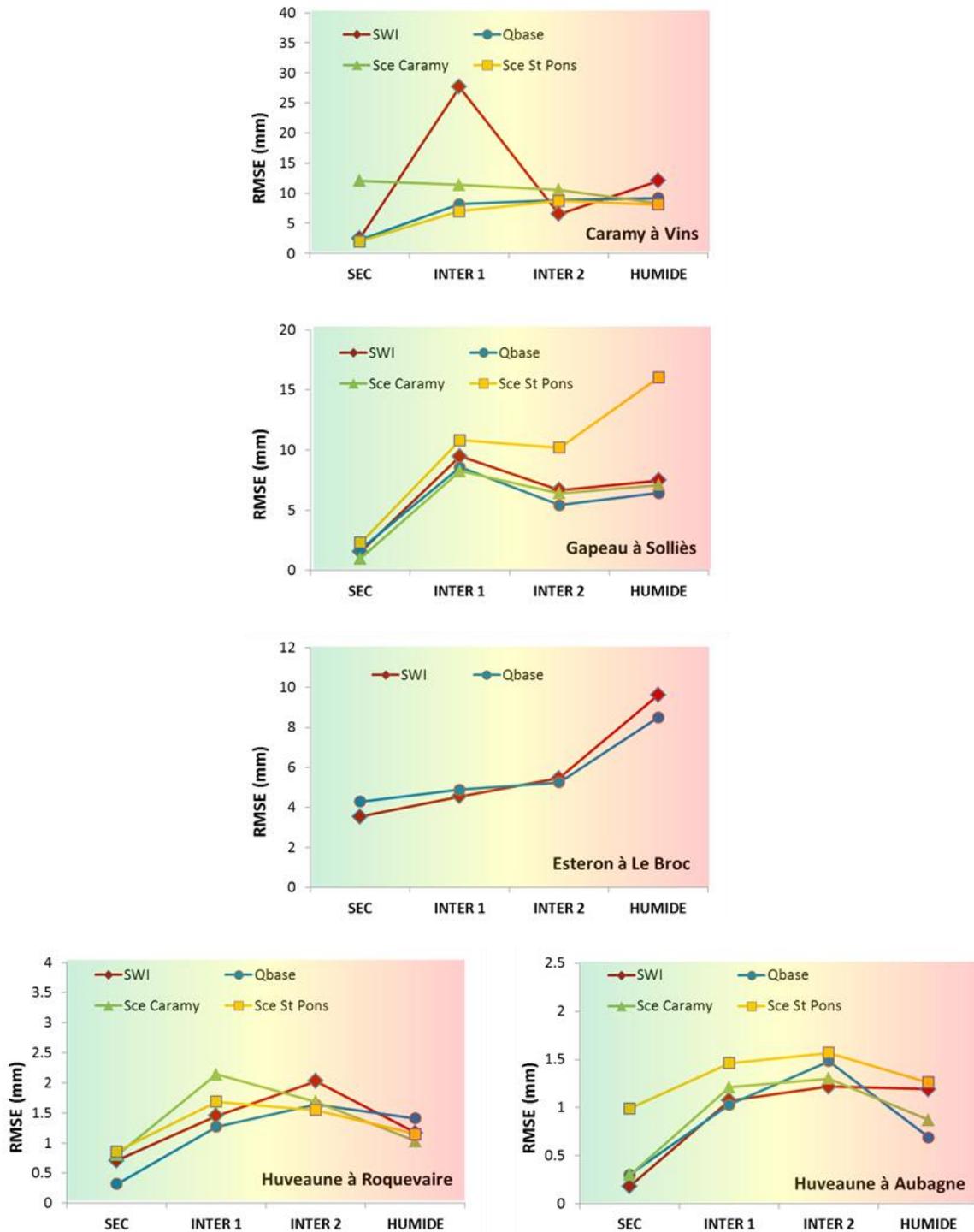


Illustration 42. Comparaison des ajustements réalisés sur les relations pluie-débit en fonction des quatre classes d'états hydriques initiaux sec, intermédiaire 1, intermédiaire 2, et humide pour les quatre indicateurs SWI, Débit de base du cours d'eau (Qbase), débit de base de la source Caramy (Sce Caramy), et débit de base de la source St Pons (Sce St Pons) ; le coefficient d'ajustement présenté est la racine carré de l'erreur quadratique moyenne (root-mean-square error, RMSE) qui est à minimiser pour optimiser l'ajustement.

En conclusion, on voit que pour les bassins du Caramy et de l'Huveaune, il y a une amélioration de l'estimation de la réponse hydrologique en intégrant des indicateurs de l'état de saturation des aquifères - que ce soit le débit de base du cours d'eau ou celui d'un système karstique. Comme ces bassins sont fortement karstiques, ce résultat montre l'influence de l'état de saturation du karst sur l'ampleur de la réponse hydrologique de bassin.

Le cas du Gapeau est plus difficile à interpréter dans le sens où aucun des indicateurs sélectionnés ne semble bien caractériser la réponse hydrologique dans le cas d'états hydriques intermédiaires. Sur ce bassin 100% carbonaté, ceci met en évidence une influence de facteurs non représentés par les quatre indicateurs sélectionnés, comme par exemple le cas de systèmes karstiques peu contributeurs au débit de base du Gapeau, mais qui contribuent de manière significative aux crues.

Le cas de l'Estéron montre que l'on n'améliore pas l'estimation de la réponse hydrologique en intégrant un indicateur de l'état de saturation des aquifères. Ceci milite en faveur d'une faible influence sur les crues du karst présent principalement sur la bordure sud du bassin.

5. Contribution du karst au cours de la crue

5.1. APPROCHE PAR MODELISATION

5.1.1. Problématique et objectifs

Lors des crues, les échanges surface/souterrain s'ajoutent aux processus de ruissellement de surface sur les versants. En région karstique, ces échanges peuvent être prédominants du fait des propriétés des karsts qui peuvent restituer de manière rapide une grande part des eaux infiltrées. Bien sûr, ces échanges dépendent des états hydriques initiaux et des intensités de pluie.

Pour caractériser les contributions du karst aux crues, nous nous plaçons à l'échelle d'un tronçon de rivière entre deux stations hydrométriques. A partir des hydrogrammes mesurés à la station amont et à la station aval, il est possible d'identifier la forme de l'hydrogramme du bassin intermédiaire, qui caractérise les échanges latéraux entre le cours d'eau et les versants situés entre les deux stations. De manière théorique, l'illustration 43 synthétise 3 cas de crues types à l'échelle d'un tronçon de rivière en région karstique :

- cas 1 : un état hydrique initial saturé qui engendre une prédominance de ruissellement de surface associé à un drainage de l'aquifère. Dans ce cas, les échanges surface/souterrains latéraux sont des apports issus des versants, ce qui engendre une augmentation du débit du cours d'eau de l'amont à l'aval ;
- cas 2 : un état hydrique initial sec qui favorise l'infiltration limitant alors le ruissellement en surface, et engendrant des pertes au niveau du cours d'eau qui alimente l'aquifère situé à une cote inférieure. Dans ce cas, les échanges surface/souterrains latéraux sont des pertes vers les versants, ce qui engendre une diminution du débit du cours d'eau de l'amont à l'aval ;
- cas 3 : l'état hydrique initial du bassin passe d'un niveau sec à un niveau saturé au cours de l'épisode pluvieux, engendrant un mixte des deux cas précédents. Des pertes en début de crue font la place à des apports lorsque le bassin est saturé.

Dans ce contexte, l'objectif de cette partie est de caractériser les contributions du karst aux crues en étudiant les échanges latéraux sur un tronçon de rivière. L'approche utilisée est une modélisation de la propagation de l'onde de crue qui tient compte des échanges latéraux. En calculant l'hydrogramme de ces échanges latéraux, il est possible d'identifier les processus dominants et notamment l'influence du karst en le comparant à celui de sources karstiques.

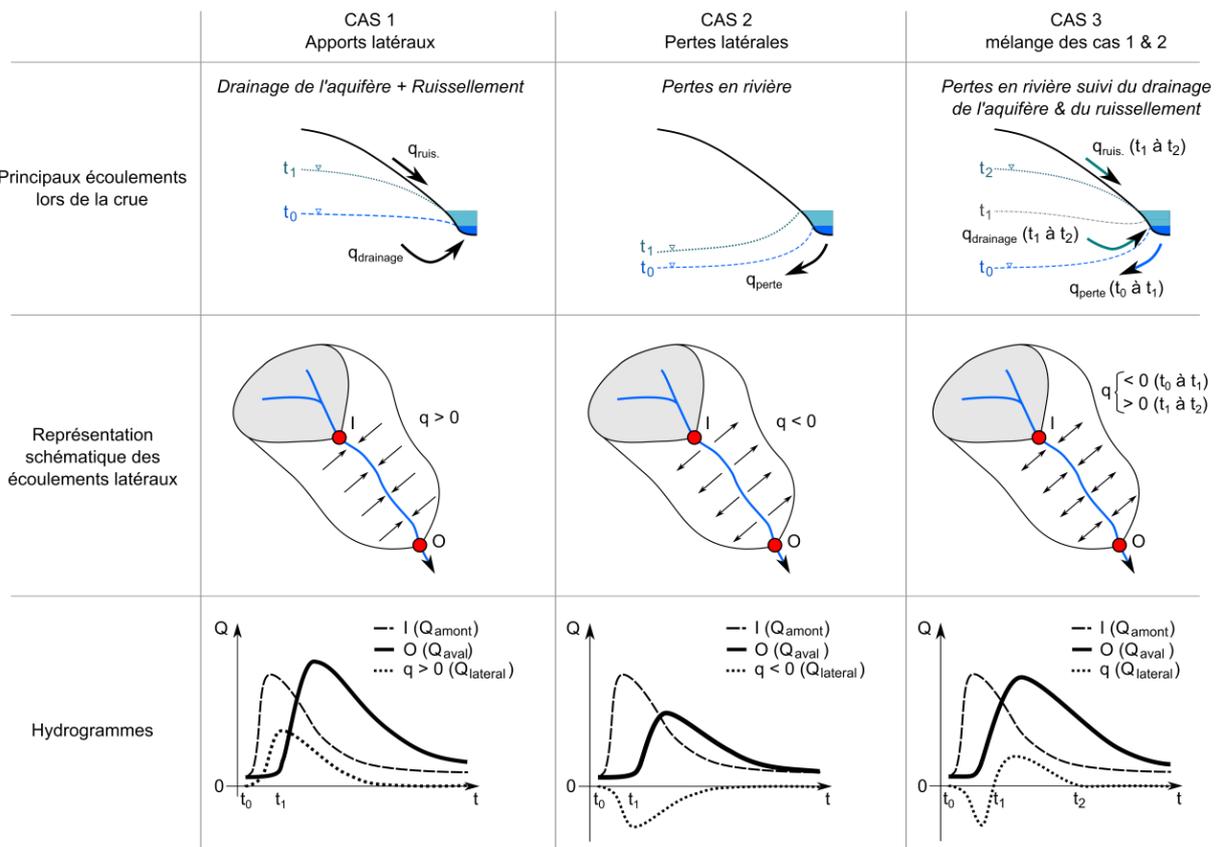


Illustration 43. Schématisation des processus latéraux dominants lors des crues selon différents états hydriques initiaux sur un tronçon entre deux stations hydrométriques amont I (inflows) et aval O (outflows).

5.1.2. Modélisation des échanges latéraux

Le modèle de base simule à partir d'une station amont la propagation de l'onde de crue à l'aval en tenant compte d'apports ou de pertes uniformément réparties sur le tronçon. Pour caractériser ces échanges latéraux, nous utilisons dans cette étude le modèle inverse qui simule l'hydrogramme des échanges à partir des données mesurées des stations amont et aval.

a) **Modèle de transfert dans le réseau hydrographique en tenant compte des échanges latéraux**

Un modèle linéaire d'hydrogramme unitaire, basé sur la méthode du noyau d'Hayami (1951) qui est une résolution de l'équation de l'onde diffusante, a été choisi pour simuler le transfert dans le réseau hydrographique (Moussa et Bocquillon, 1996). Pour tenir compte des contributions latérales au débit dans la rivière, nous utilisons la résolution de l'équation de l'onde diffusante qui tient compte d'apports ou de pertes latéraux uniformément répartis sur la longueur du tronçon (Moussa, 1996). Le principe est présenté dans l'illustration 44.

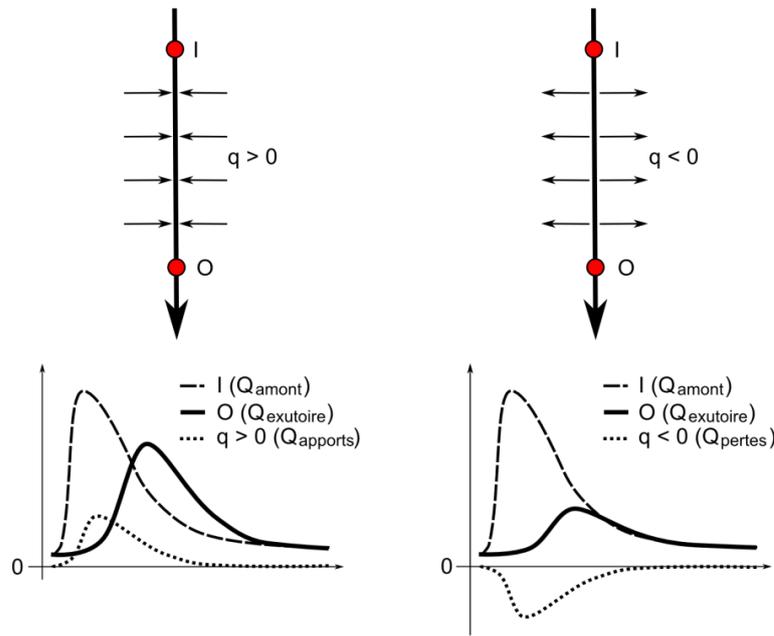


Illustration 44. Propagation de l'onde de crue entre I (inflows) et O (outflows) avec apports ou pertes répartis de manière uniforme sur la longueur du cours d'eau (d'après Moussa, 1996).

Les deux paramètres sont la célérité C [$L T^{-1}$] et la diffusivité D [$L^2 T^{-1}$] qui représentent respectivement la vitesse de propagation de l'onde et son étalement.

L'équation de l'onde diffusante dépend des conditions initiales à $t = 0$ et aux limites amont et aval, des caractéristiques géométriques et hydrauliques de la rivière (profil en travers, pente et rugosité) exprimées à travers les relations $C(Q)$ et $D(Q)$, et de la fonction $q(t)$ d'apports ou pertes latéraux selon que $q(t)$ est positif ou négatif. Le terme $q(t)$ [$L^2.T^{-1}$] représente la distribution latérale des échanges par unité de longueur.

Dans le cas général où la célérité C et la diffusivité D sont constants sur un tronçon de rivière de longueur L , l'équation de l'onde diffusante admet une solution analytique exacte (Moussa, 1996) :

$$(1) \quad O(t) = \Phi(t) + (I(t) - \Phi(t)) * K(t)$$

$$(2) \quad \text{avec} \quad \Phi(t) = \frac{C}{L} \int_0^t [Q_A(\lambda) - Q_A(0)] d\lambda$$

Le symbole (*) représente le produit de convolution. $I(t)$ et $O(t)$ sont respectivement l'hydrogramme d'entrée et l'hydrogramme de sortie.

$K(t)$ est la fonction « noyau d'Hayami » :

$$(3) \quad K(t) = \frac{L}{2(\pi D)^{1/2}} \frac{\exp\left(\frac{CL}{4D} \left(2 - \frac{L}{Ct} - \frac{Ct}{L}\right)\right)}{t^{3/2}}$$

$Q_A(t)$ est l'hydrogramme résultant de la composante latérale uniformément répartie par unité de longueur $q(x,t)$ [$L^2.T^{-1}$] :

$$(4) \quad Q_A(t) = \int_0^L q(x,t) dx$$

Selon les conditions hydrologiques, la composante latérale $q(x, t)$ peut être négative ou positive s'il y a respectivement une dominante d'apports ou de pertes dans le réseau.

b) Modèle inverse : identification des échanges latéraux

Le problème inverse concerne l'identification des échanges latéraux entre deux stations sur la base de la connaissance des hydrogrammes à ces deux stations amont et aval. Dans ce cas, les deux fonctions $I(t)$ et $O(t)$ sont connues et le problème est d'identifier $Q_A(t)$. D'après Moussa (1996), de l'équation (1) on obtient:

$$(5) \quad A(t) = O(t) - I(t) * K(t)$$

$$(6) \quad \text{avec} \quad \Phi(t) - \Phi(t) * K(t) = A(t)$$

La résolution des Eq.(5) et (6) nécessite tout d'abord d'identifier le noyau d'Hayami $K(t)$, puis de calculer $A(t)$ en utilisant l'Eq. (5), ensuite de résoudre l'Eq. 6 afin de calculer la fonction $\Phi(t)$. Le calcul de $Q_A(t)$ se fait alors ainsi :

$$(7) \quad Q_A(t) = Q_A(0) + \frac{L}{C} \frac{d\Phi}{dt}$$

5.1.3. Stratégie de calibration

Le modèle nécessite un calage des paramètres C et D, sachant que l'onde diffusante est plus sensible à la célérité C qu'à la diffusivité D.

Le calage de C a été réalisé manuellement en utilisant le modèle de propagation sans échanges sur le débit amont. L'objectif est de mettre en phase le pic de crue amont propagé avec le pic aval observé. La valeur de calage est utilisée ensuite dans le modèle inverse.

Le paramètre D est très peu sensible et a été fixé à $1000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ qui est l'ordre de grandeur pour ce type de cours d'eau.

5.2. ECHANGES LATERAUX SUR LE BASSIN DE L'HUVEAUNE

Le bassin de l'Huveaune à Aubagne comprend 3 stations hydrométriques sur son cours d'eau principal, ce qui nous permet d'étudier les échanges latéraux sur les deux tronçons Saint Zacharie – Roquevaire à l'amont, et Roquevaire – Aubagne à l'aval. Pour cette étude, nous nous sommes focalisés sur les épisodes de pluie les plus importants et avons sélectionné les 10 crues pour lesquelles le cumul pluviométrique sur le bassin d'Aubagne dépassait 80 mm (Illustration 45). Les valeurs de calage des paramètres C et D sont respectivement 1.2 m s^{-1} et $1000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ pour les deux tronçons.

Date crue	Saint Zacharie					Roquevaire					Aubagne				
	P (mm)	P _{max} (mm/h)	Q _{ini} (m3/s)	Q _{max} (m3/s)	CR	P (mm)	P _{max} (mm/h)	Q _{ini} (m3/s)	Q _{max} (m3/s)	CR	P (mm)	P _{max} (mm/h)	Q _{ini} (m3/s)	Q _{max} (m3/s)	CR
07/09/1998	92.1	28.0	0.08	1.19	1%	94.5	29.3	0.09	14.70	2%	93.9	23.8	0.07	21.30	2%
20/09/1999	124.6	28.7	0.03	2.50	3%	125.3	31.4	0.10	30.40	8%	127.4	32.1	0.24	49.20	6%
19/05/2012	89.3	8.9	0.08	6.65	13%	88.1	9.8	0.39	16.80	15%	92.8	10.4	0.64	25.20	9%
28/01/2006	125.6	8.9	0.03	n.a	n.a	114.1	8.5	0.28	14.50	14%	105.0	10.0	0.52	18.56	10%
14/12/2008	191.9	11.9	0.26	17.60	33%	191.2	12.4	0.50	53.50	30%	192.8	13.4	1.04	61.00	18%
24/12/2009	161.4	12.7	0.00	17.00	24%	140.7	11.6	0.28	25.50	19%	131.0	10.7	0.96	30.00	12%
31/10/2010	90.8	6.9	0.19	1.73	3%	78.6	7.1	0.20	6.09	5%	80.9	7.5	0.69	9.68	4%
25/10/2011	106.8	16.4	0.02	2.40	2%	94.2	13.8	0.18	9.36	3%	93.8	12.9	0.39	17.14	3%
02/12/2003	52.6	9.9	0.01	n.a	n.a	97.6	10.9	0.39	22.10	12%	95.3	10.7	0.96	28.20	9%
05/11/2011	272.6	15.5	0.17	10.40	22%	231.1	12.4	0.32	17.10	17%	211.1	12.2	0.67	20.00	11%

Illustration 45. Episodes de crue pour des pluies > 80 mm sur le bassin de l'Huveaune à Aubagne ; avec P la pluie totale moyenne sur le bassin, P_{max} l'intensité maximale sur 1 heure, Q_{ini} le débit initial, Q_{max} le pic de crue, CR le coefficient de ruissellement (en retranchant le débit de base). Les hydrogrammes des crues surlignées en vert clair sont présentés dans l'illustration 48 ; les autres hydrogrammes sont présentés en Annexe 3.

5.2.1. Exemple d'analyse sur une crue monopic

a) Tronçon Saint-Zacharie – Roquevaire

Dans un premier temps, nous détaillons la méthode d'analyse des hydrogrammes sur une crue simple présentée sur l'illustration 46. Pour le tronçon amont de Saint Zacharie – Roquevaire, la tête de bassin en amont de Saint Zacharie donne le débit d'entrée (en vert), la station de Roquevaire le débit aval (en bleu) et le modèle inverse est utilisé pour calculer l'hydrogramme latéral (en rouge). Pour information, nous représentons également le débit amont propagé selon l'onde diffusante (tiretés verts). Sont également affichés les débits des sources Saint-Pons à Géménos et Caramy à Mazaugues avec un coefficient multiplicateur (indiqué dans la légende) dans le but de comparer leurs dynamiques avec l'hydrogramme des échanges latéraux.

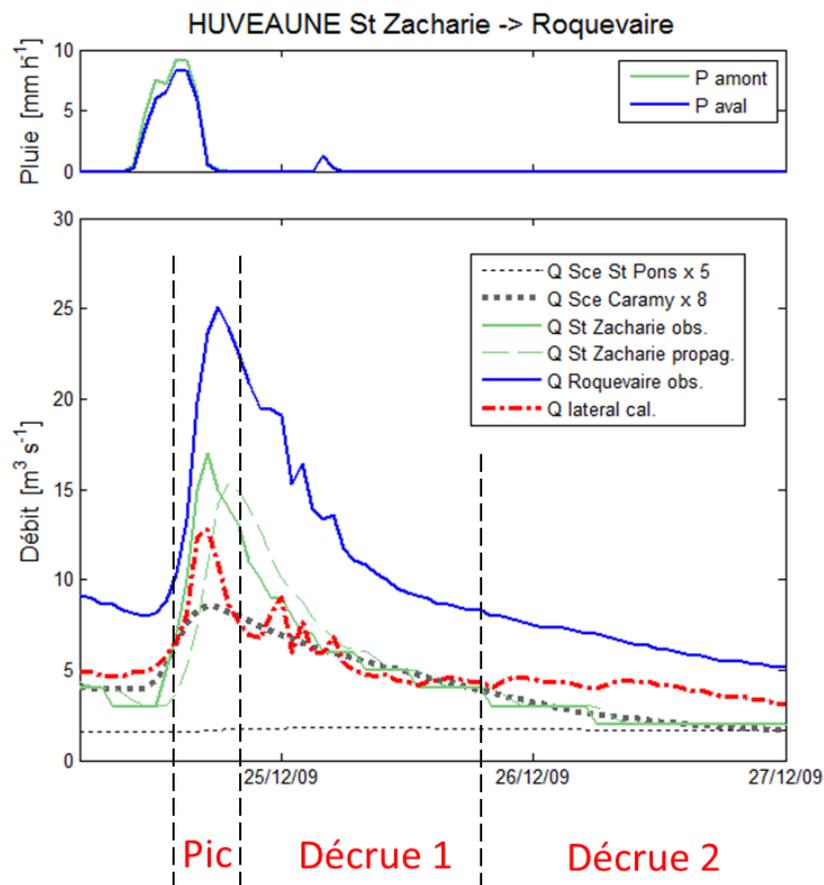


Illustration 46. Exemple de crue de l'Huveaune et du découpage de l'hydrogramme des échanges latéraux en phases de pic et de décrue(s) ; sont représentés les écoulements sur le tronçon Saint-Zacharie – Roquevaire.

Concernant les sources, le premier constat est que la source Saint-Pons a une dynamique très inertielle qui ne permet pas d'expliquer les fluctuations de l'hydrogramme calculé des échanges latéraux. Au contraire, la source Caramy qui est un système qui réagit beaucoup plus rapidement semble être plus pertinente. Sur l'illustration 46, le débit de la source Caramy a été

ajusté pour caler au mieux la première phase de décrue de l'hydrogramme des échanges latéraux (phase notée 'décrue 1'). Nous ne discuterons pas de la valeur du coefficient de cet ajustement car la source Caramy ne se situe pas sur le bassin versant de l'Huveaune et car son impluvium représente une étendue de seulement quelques km² qui n'est pas extrapolable de manière linéaire à l'ensemble des formations karstiques de l'Huveaune. C'est sur l'aspect indicateur que nous discutons de la comparaison entre les hydrogrammes des échanges latéraux et de la source karstique du Caramy.

Globalement, sur ce tronçon amont, l'analyse des hydrogrammes sur l'illustration 46 montre que les échanges latéraux (en rouge) ont une dynamique très semblable à la réponse de la source Caramy (tiretés noirs). Mais les deux hydrogrammes diffèrent au niveau du pic de crue (phase notée 'pic'), ainsi que sur la seconde partie de la décrue (phase notée 'décrue 2'). L'interprétation sur les 3 phases de crue est donc :

- phase de pic de crue : la pointe de crue est dessinée par une autre composante que le karst, limitée dans le temps. C'est vraisemblablement une composante de ruissellement de surface qui représente moins d'1/3 de la valeur au pic de crue ;
- phase de décrue 1 : les deux hydrogrammes des échanges et de la source Caramy se superposent, montrant la prédominance d'apports karstiques sur cette période ;
- phase de décrue 2 : contrairement à la source Caramy, on observe une rupture dans la décrue de l'hydrogramme des échanges, qui est synonyme de l'apparition d'écoulements retardés. Ces apports retardés peuvent être issus de systèmes karstiques plus inertiels que la source Caramy.

Notons que l'hydrogramme amont de la tête de bassin à Saint-Zacharie (en vert) a une morphologie très semblable à celui des échanges latéraux. Sa décrue se superpose également très bien avec celle de la source Caramy. Comme cet impluvium est uniquement composé de formations carbonatées, cela confirme une forte influence du karst dans les crues de Saint-Zacharie. Le pic de crue sur ce sous bassin semble par contre être partagé équitablement entre composante karstique et composante de ruissellement de surface.

b) Tronçon Roquevaire - Aubagne

Pour le tronçon aval de Roquevaire - Aubagne, la tête de bassin en amont de Roquevaire donne le débit d'entrée (en bleu), la station d'Aubagne le débit aval (en noir) et le modèle inverse est utilisé pour calculer l'hydrogramme latéral (en rouge). Les deux sources Saint-Pons et Caramy sont représentées avec un coefficient multiplicateur (indiqué dans la légende).

Sur ce tronçon aval, le même constat est fait pour les sources, avec une source Saint-Pons trop inertielle pour être un bon indicateur du karst sur le bassin.

Au contraire du tronçon amont, l'analyse des hydrogrammes sur l'illustration 47 montre que les échanges latéraux (en rouge) ont une dynamique différente de la source Caramy (tiretés noirs) sur la phase de crue et la première phase de décrue. L'interprétation sur les 3 phases de crue est alors :

- phase de pic de crue : la pointe de crue est majoritairement contrôlée par une composante ruissellement de surface, qui pourrait intégrer du ruissellement urbain sur la zone d'Aubagne ;
- phase de décrue 1 : ceci est une période où le débit de base de l'hydrogramme latéral augmente montrant des apports retardés qui peuvent être d'origine souterraine ;

- phase de décrue 2 : les deux hydrogrammes des échanges et de la source Caramy se superposent, ce qui est cohérent avec la prédominance d'apports karstiques sur cette période.

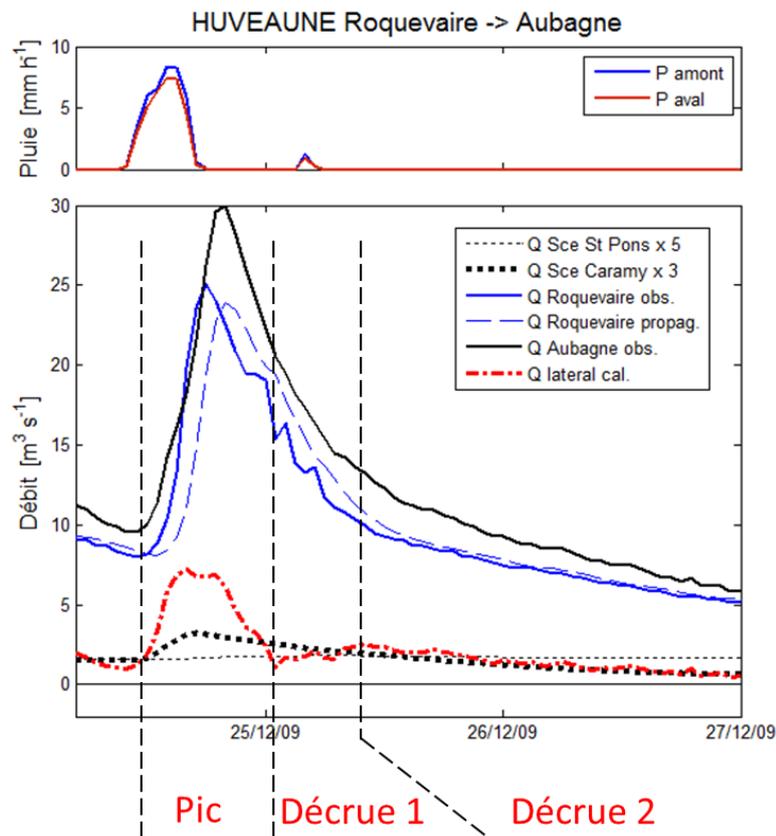


Illustration 47. Exemple de crue de l'Huveaune et du découpage de l'hydrogramme des échanges latéraux en phases de pic et de décrue(s) ; sont représentés les écoulements sur le tronçon Roquevaire – Aubagne.

5.2.2. Analyse sur les fortes crues

L'analyse sur les fortes crues multiples synthétisées dans l'illustration 45 permet d'estimer la répétitivité des phases identifiées sur les hydrogrammes latéraux et permet également d'évaluer les contributions du karst aux crues selon les états hydriques initiaux secs (premier épisode de pluie) et saturés (deuxième ou troisième épisode).

Illustration 48 présente trois crues importantes sur l'Huveaune pour les deux tronçons amont et aval respectivement en amont de Roquevaire et Aubagne. Les autres crues sont présentées en Annexe 3.

Concernant le premier tronçon Saint-Zacharie - Roquevaire, les débits de pointe augmentent jusqu'à plus de dix fois entre la station amont et la station aval montrant la prédominance

d'apports latéraux sur la partie amont de l'Huveaune. Les coefficients de ruissellement atteignent 30% pour la crue du 14/12/2008.

On retrouve globalement sur les trois crues les processus mis en jeu et décrits précédemment sur l'exemple de crue monopic :

- une bonne superposition des hydrogrammes latéraux et de la source Caramy, ce qui montre que le karst semble fortement contribuer aux crues les plus fortes ;
- les pointes de crue sont dessinées en majorité par des apports d'origine karstique auquel s'ajoute le ruissellement de surface ;
- les décrues sont contrôlées par le karst avec des apports retardés de systèmes plus inertiels que la source Caramy.

Il est intéressant de noter que la bonne superposition des hydrogrammes sur l'ensemble des chroniques qui caractérisent différents états hydriques secs comme saturés montre que le karst joue un rôle prépondérant quel que soient les conditions hydrologiques initiales. Ceci est cohérent avec la forte étendue des formations karstiques sur ce tronçon amont.

Concernant le second tronçon Roquevaire - Aubagne, les débits de pointe augmentent faiblement jusqu'à moins de deux fois entre la station amont et la station aval montrant la prédominance d'apports amont comparés aux apports latéraux de la partie aval de l'Huveaune. Les coefficients de ruissellement atteignent 18% pour la crue du 14/12/2008.

De la même manière, on retrouve globalement sur les trois crues les processus mis en jeu et décrits précédemment sur l'exemple de crue monopic :

- une superposition des hydrogrammes latéraux et de la source Caramy uniquement sur la seconde partie de la décrue, ce qui montre que le karst sur les versants latéraux semble contribuer de manière mineure aux crues les plus fortes. Le rôle du karst semble être un soutien du débit de base ;
- les pointes de crue sont dessinées en majorité par du ruissellement de surface. Les premiers pics très resserrés font penser à du ruissellement sur zones urbanisées à l'image du premier pic de la crue du 05/11/2011 ;
- sur chaque première crue (état hydrique sec) des crues multipics présentées, on observe une absence de débit de base (de décrue) sur l'hydrogramme des échanges latéraux ;
- sur la majorité des deuxième et troisième crues (état hydrique en voie de saturation ou saturé) des épisodes multipics, la décrue se superpose à l'hydrogramme de la source Caramy, ce qui montre que les apports issus du karst sont fortement retardés sur ce tronçon.

Le fait que l'influence du karst n'apparaisse qu'en période de décrue pour les conditions hydrologiques proches de la saturation montre que le rôle du karst sur les versants de ce tronçon reste mineur dans la genèse des crues de reprise en début de saison pluvieuse, tout en ayant un rôle de soutien de haut débit lors des décrues lorsque les aquifères sont saturés.

5.2.3. Synthèse

En synthèse, l'analyse des contributions du karst aux crues sur le tronçon amont Saint-Zacharie – Roquevaire a montré que le karst joue un rôle prédominant dans les crues à Roquevaire, quel que soit l'état hydrique initial, en soutenant les débits de décrue et en contribuant aux 2/3 du pic de crue. Les massifs de la Sainte-Baume en rive gauche et de l'Aurélien au nord sont de forts contributeurs potentiels.

Bien que le karst joue un rôle mineur sur les versants du tronçon Roquevaire – Aubagne, l'essentiel de la crue à Aubagne qui est constitué principalement par l'onde de crue issue de l'amont (sous bassin de Roquevaire) est tout de même influencé par les apports karstiques. Cependant, la zone sud de la Sainte-Baume qui s'ouvre sur Gémenos ne semble pas contribuer aux crues à Aubagne.

Contrairement à la source Saint-Pons, la source Caramy apparaît comme un bon indicateur de ces contributions karstiques sur la zone amont, même si une composante de ruissellement de surface est à intégrer dans la prévision, ainsi qu'une composante souterraine retardée visible lors des fins de décrues.

Ce résultat apporte un éclairage intéressant sur les contributions du karst aux crues, qui est complémentaire de l'approche cartographique présentée auparavant. Au contraire des zones du nord de la Sainte-Baume qui contribuent fortement aux crues à Roquevaire, les zones karstiques au sud du massif identifiées comme ayant un fort potentiel de contribution aux crues par l'approche cartographique, ne semblent pas réellement influencer les crues à Aubagne d'après cette analyse des données. Au-delà de l'incertitude liée aux indicateurs cartographiques, ce résultat met en évidence la complexité des échanges surface/souterrains sur des bassins où l'on ne connaît pas précisément les limites des bassins topographiques et hydrogéologiques. En effet, d'après l'illustration 17 l'infiltration sur la zone sud de la Sainte-Baume est susceptible d'être drainée vers d'autres systèmes plus au sud comme les exutoires de Port-Miou et Bestouan (Cavalera, 2007).

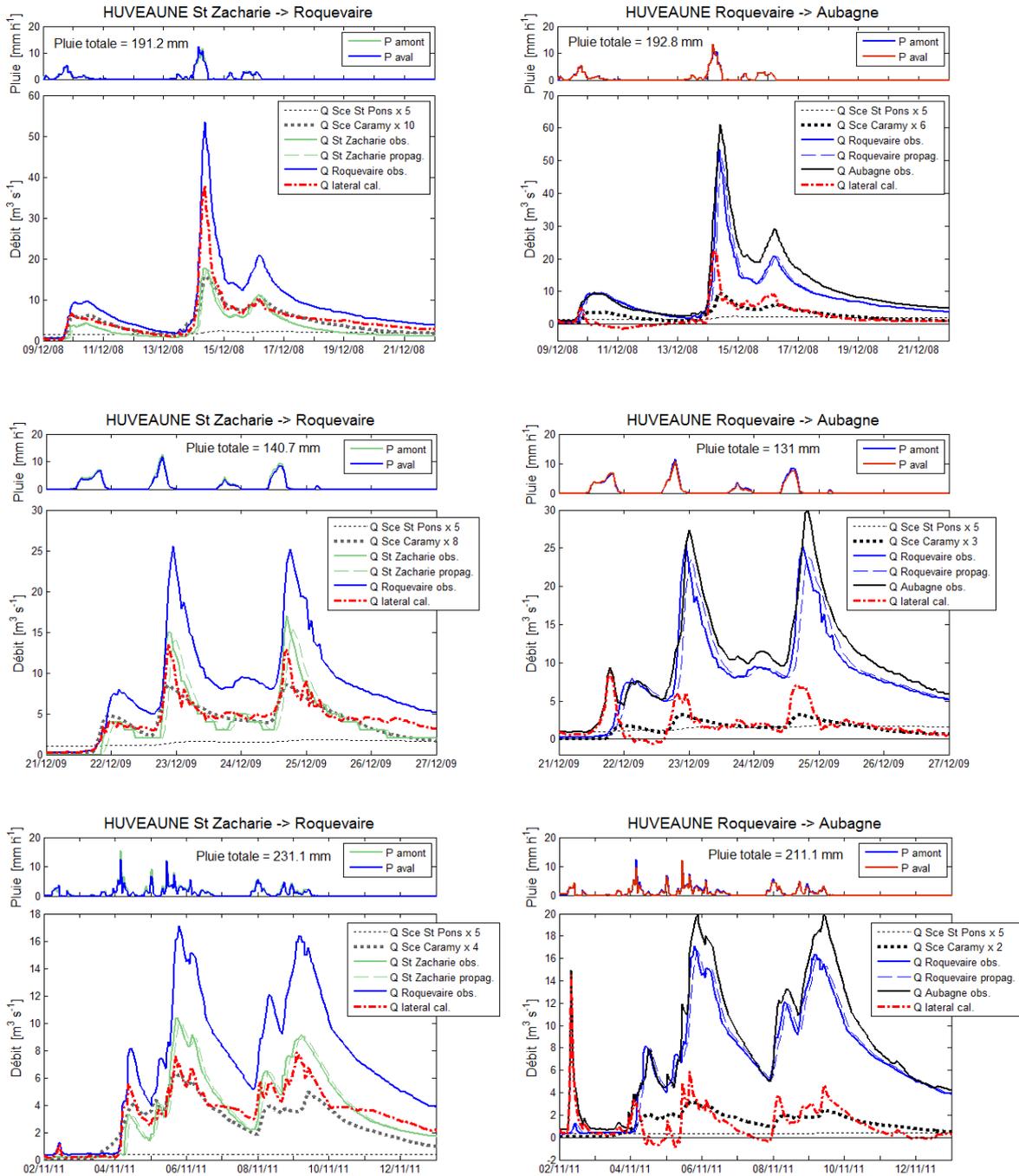


Illustration 48. Crues du 14/12/2008, du 24/12/2009, et du 05/11/2011 (du haut en bas) sur l’Huveaune sur les deux tronçons Saint-Zacharie – Roquevaire (à gauche), et Roquevaire – Aubagne (à droite) ; avec représentés dans chaque cas les pluviogrammes amont et aval, les hydrogrammes mesurés amont et aval de l’Huveaune, l’hydrogramme calculé des échanges latéraux, et les hydrogrammes mesurés aux deux sources Saint-Pons et Caramy.

5.3. ECHANGES LATERAUX SUR LE BASSIN DE L'ESTERON

Le bassin de l'Estéron comprend 2 stations hydrométriques sur son cours d'eau principal, ce qui nous permet d'étudier les échanges latéraux sur la moitié aval sur le tronçon Sigale – Le Broc. Pour cette étude, nous nous sommes focalisés sur les épisodes de pluie supérieurs à 80 mm (Illustration 49). Les valeurs de calage des paramètres C et D du modèle de transfert utilisé pour calculer les échanges latéraux sont respectivement 2.5 m s^{-1} et $1000 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Notons que cette forte célérité C est en cohérence avec les fortes pentes observées sur le bassin de l'Estéron.

Date crue	Sigale					Le Broc				
	P (mm)	Pmax (mm/h)	Qini (m3/s)	Qmax (m3/s)	CR	P (mm)	Pmax (mm/h)	Qini (m3/s)	Qmax (m3/s)	CR
25/09/2006	121.5	13.2	2.77	100.00	18%	109.0	11.4	1.83	86.70	10%
23/11/2007	123.2	4.4	2.58	12.30	6%	111.3	4.0	0.94	11.60	4%
12/01/2008	87.4	5.8	6.75	94.10	25%	84.1	6.0	5.51	132.00	25%
31/10/2010	129.2	10.2	0.76	73.30	29%	128.3	10.8	2.25	119.00	31%
05/11/2011	342.5	15.5	1.05	164.00	41%	305.8	12.8	2.05	250.00	33%
14/12/2008	107.9	6.6	12.56	69.56	23%	110.2	6.0	21.22	110.56	24%

Illustration 49. Episodes de crue pour des pluies > 80 mm sur le bassin de l'Estéron à Le Broc ; avec P la pluie totale moyenne sur le bassin, P_{max} l'intensité maximale sur 1 heure, Q_{ini} le débit initial, Q_{max} le pic de crue, CR le coefficient de ruissellement (en retranchant le débit de base). Les hydrogrammes des crues surlignées en vert clair sont présentés dans l'illustration 50 ; les autres hydrogrammes sont présentés en Annexe 3.

A partir de 2006, date de début d'acquisition des données à la Sigale, 6 épisodes de crue importants se sont produits. Sur le tronçon Sigale – Le Broc, les débits de pointe augmentent jusqu'à 1.5 fois entre la station amont et la station aval montrant de relativement faibles apports latéraux sur cette partie aval de l'Estéron, comparé aux apports de la tête de bassin en amont de Sigale où les coefficients de ruissellement atteignent 41% pour la crue du 05/11/2011. L'illustration 50 présente deux crues qui recensent les différents types d'hydrogrammes observables sur ces 6 crues. Les autres crues sont présentées en Annexe 3.

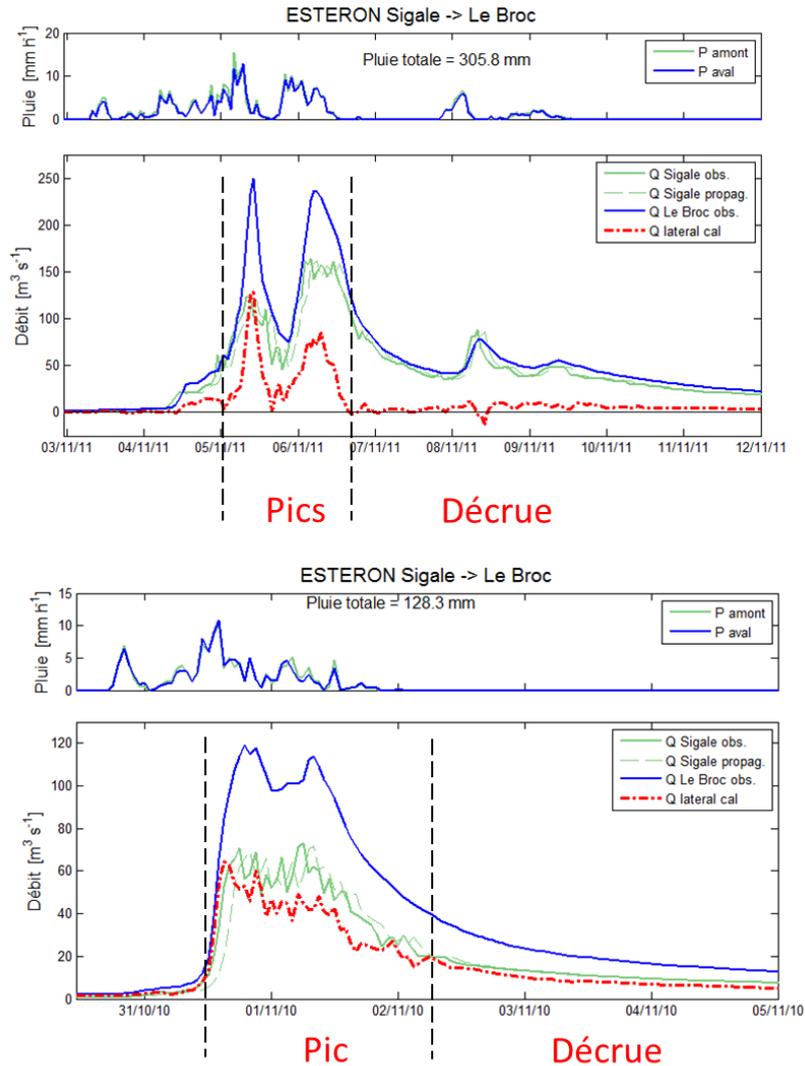


Illustration 50. Crues du 05/11/2011 (en haut) et du 31/10/2010 (en bas) sur l'Estéron sur le tronçon Sigale – Le Broc ; avec représentés dans chaque cas les pluviogrammes amont et aval, les hydrogrammes mesurés amont et aval de l'Estéron, et l'hydrogramme calculé des échanges latéraux

Globalement, en se focalisant sur les hydrogrammes des échanges latéraux des deux crues de l'illustration 50, on observe deux périodes de pic et de décrue, mais avec deux morphologies de décrue différentes. Les processus mis en jeu sont les suivants :

- les pointes de crue sont formées par des écoulements rapides et de durée limitée, typiques de ruissellement de surface ;
- la période de décrue peut être caractérisée par une absence totale d'écoulements latéraux (cas de la crue du 05/11/2011 où l'hydrogramme est à 0) ;
- cette même période peut être caractérisée par des apports retardés typiques d'écoulements souterrains (cas de la crue du 31/10/2010).

Etant donné que les conditions hydrologiques (niveau des débits de base et intensités des pluies) sont similaires sur ces deux épisodes, il est difficile d'expliquer en l'état les causes d'absence ou d'occurrence d'apports latéraux sur ce tronçon aval de l'Estéron lors des décrues.

Cependant, au-delà de ce phénomène, les crues disponibles ne montrent pas l'évidence de rôle du karst ou d'écoulements souterrains en général pendant les phases de pic de crue.

5.4. SYNTHÈSE

En conclusion, sur le tronçon Sigale – Le Broc, si le karst joue un rôle dans les crues de l'Estéron, c'est a priori de manière épisodique lors de la période de décrue. En effet, l'essentiel des écoulements de crue semble provenir d'écoulements de surface, qui seraient fortement favorisés sur cette partie du bassin par la présence de fortes pentes et de formations marno-calcaires et de calcaires marneux. La zone est du massif karstique du Cheiron au sud du bassin ne semble alors pas influencer les crues de l'Estéron.

Les crues à Le Broc sont donc en majorité créées par l'onde de crue issue du bassin amont à la station Sigale, et malheureusement notre analyse ne peut juger de l'importance de l'influence du karst sur cette zone. Cependant, nous pouvons noter la présence d'un débit non négligeable lors des décrues qui montre que les écoulements souterrains contribuent de manière significative lors de ces périodes de décrue sur la moitié amont du bassin. Pour expliquer ces processus souterrains, il faut alors se référer à la forte proportion de formations non carbonatées (formations détritiques et volcaniques de l'Eocène – Oligocène au nord) comparé aux formations karstiques sur ce bassin amont.

Ainsi, cette analyse ne met pas en évidence de fortes influences du karst sur les crues du bassin de l'Estéron.

.

6. Instrumentation de sites karstiques : propositions & choix des sites

6.1. IDENTIFICATION DES SITES KARSTIQUES D'INTERET POUR L'INSTRUMENTATION

Les zones d'intérêt pour l'instrumentation de sites karstiques sont définies en compilant l'ensemble des résultats obtenus selon les 3 approches présentées dans cette étude : l'approche cartographique qui permet de localiser les zones d'influence potentielles, l'approche pluie-débit qui permet d'évaluer de la pertinence des indicateurs aquifères pour déterminer l'état hydrique initial du bassin, et l'approche de modélisation qui a permis de préciser les contributions du karst aux crues de l'Huveaune et de l'Estéron.

6.1.1. Bassin de l'Huveaune

a) Zones d'intérêt

Deux grandes zones karstiques sont d'intérêt sur le bassin de l'Huveaune : i) la haute Huveaune en amont de Roquevaire qui draine la partie occidentale de la Sainte-Baume, le Massif de La Lare et le Massif de l'Aurélien, ii) et la partie orientale du bassin de l'Huveaune au niveau du sud du Massif de la Sainte-Baume. Dans cette partie orientale, la source St Pons à Gémenos n'apparaît pas comme un bon indicateur karstique du fait d'une inertie trop importante du système, et les contributions du karst aux crues à Aubagne semblent être de faible importance. De ce fait, nous ne nous focaliserons que sur les systèmes karstiques de la partie amont de l'Huveaune en amont de la station de Roquevaire.

b) Sites proposés

Les émergences des Encanaux : c'est un système karstique étagé au sein du ravin des Encanaux (Illustration 51) qui draine une partie de la Lare et de l'unité de Roqueforcade et dont la liaison avec l'unité de Sainte Baume septentrionale est avérée (d'après Coulier, 1985). La résurgence inférieure des Encanaux est pérenne et sort des dolomies saccharoïdes portlandiennes. Son débit moyen a été jaugé au cours des cycles 1983-86 à plus de 30 L/s (Coulier, 1985). Le système supérieur est un ensemble de « griffons impénétrables » se mettant en charge lors des crues. Le griffon principal, la source du Genêt, est une exsurgence pérenne située à l'altitude 290 m NGF. Le débit moyen de la source des Encanaux supérieurs a été estimé au cours des cycles 1982-87 à 74 L/s grâce à un limnigraphe (Martin, 1991).

Deux arrivées d'eau sont aisément instrumentables pour des mesures de niveau d'eau : la source inférieure, et la faille-émergence ainsi nommées par Coulier (1985) sur l'illustration 51.

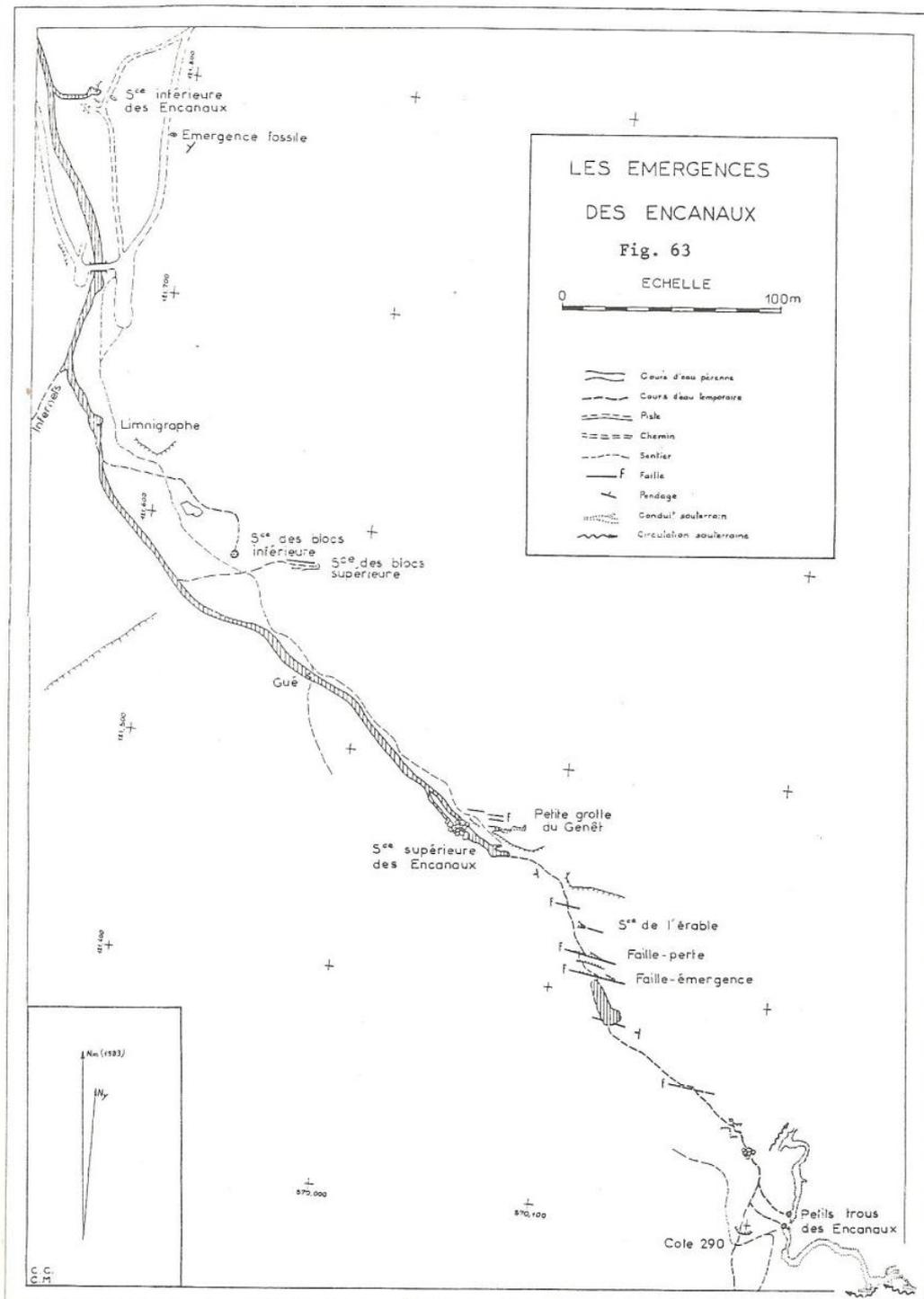


Illustration 51. Carte des émergences des Encanaux (Coulter, 1985)

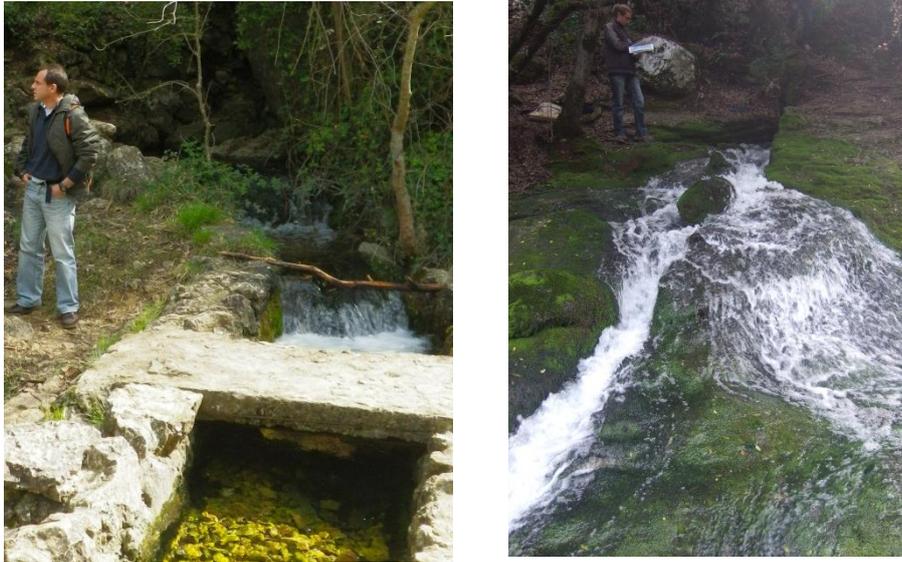


Illustration 52. Photos des arrivées d'eau localisées sur l'illustration 51 « source inférieure » à gauche et « Faille-émergence » à droite

La source Lazare : elle émerge dans le Jurassique sup. dans la zone broyée à la limite de la Lare et du flanc sud du massif de l'Aurélien. Le débit de cette source est difficilement mesurable du fait d'une zone d'émergence relativement étendue qui alimente directement le cours d'eau du vallon de l'Huveaune, lui-même alimenté par les émergences amont (émergences de la Castelette, source Taurelle). Lors des cycles particulièrement secs de 1981-83, le débit moyen obtenu, représentant alors un débit minimum, est de 27 L/s (Mazet, 1991, cité par Cavallera, 2007).



Illustration 53. Photos de la source Lazare montrant une des arrivées d'eau (à gauche) au sein de la zone humide (à droite)

La Foux de St Zacharie (277 m) : la source de la Foux de St Zacharie émerge au point bas du vallon de l'Espagnol. Le canal qui mène les eaux de la source vers l'Huveaune est facilement instrumentable (Illustration 54).



Illustration 54. Photos du canal drainant la Foux de St Zacharie jusqu'à l'Huveaune

6.1.2. Bassin du Gapeau

a) Zones d'intérêt

Dans la vallée du Gapeau, les zones karstiques se répartissent globalement sur l'ensemble du bassin : le massif dolomitique du Siou Blanc en rive droite, et les massifs de l'Agnis et de St Clément en rive gauche. Quatre sources en rive droite ont été instrumentées pendant 2 cycles hydrologiques lors de la thèse de Fournillon (2012) : la source du Gapeau, la Font d'Ouvin, la Font du Thon et la source Werotte, choisies parmi les plus importantes sources accessibles et / ou facilement instrumentables dans ce secteur. De l'analyse des chroniques présentées en Annexe 4, nous pouvons mettre en évidence les éléments suivants quant à leur potentiel de représentativité des massifs karstiques du bassin du Gapeau : la source du Gapeau est trop inertielle pour être un bon indicateur, et les 3 autres sources ont un potentiel de karstification suffisamment pertinent pour envisager une instrumentation.

D'autres sources comme les sources de Montrieux le Vieux et Montrieux le Jeune en amont de Belgentier sont d'intérêt pour notre étude car elles drainent le massif dolomitique du Siou Blanc.

En rive gauche, deux sources principales drainent des eaux souterraines qui circulent dans un réseau karstique reconnu par les spéléologues du Var : la source pérenne des Rampins et la source temporaire de Truebis sur le massif du St Clément.

b) Sites proposés

Source de Montrieux le Vieux : cette source localisée au sein du Domaine de Montrieux draine les dolomies du Jurassique supérieur du flanc est du Massif du Siou Blanc au contact chevauchant sur les marnes du Trias.



Illustration 55. Source de Montrieux le Vieux à Meounes les Montrieux

Font du Thon : La source de la Font du Thon sourd au contact entre les dolomies hettangiennes et les calcaires massifs du Rhétien. Elle est captée dans la commune de Solliès-Toucas pour l'alimentation en eau potable de la ville. L'eau y est pompée et le trop-plein part dans un lavoir via un réservoir souterrain. D'après Fournillon (2012), les mesures de hauteur d'eau sont influencées par le rabattement issu des pompages et par l'ouverture et la fermeture d'une martelière située dans le lavoir.



Illustration 56. Lavoir de la Font du Thon à Solliès-Toucas

Source des Rampins (grotte des Tuves) (250 m) : la source des Rampins est une source pérenne qui draine la rivière de Planesselve qui évolue dans le Bathonien calcaire et le Jurassique supérieur dolomitique du Massif de St Clément entre Belgentier et Néoules.

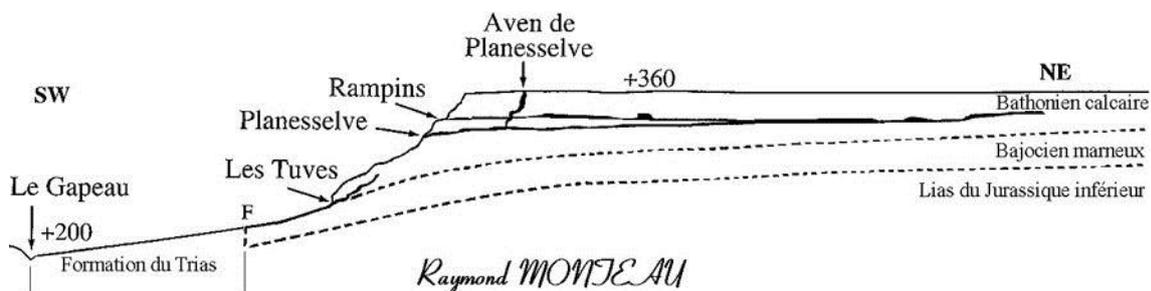


Illustration 57. Grotte des Tuves (source des Rampins) (Source : Fichier des cavités du Var sur <http://www.fichiertopo.fr>)

Source de Truébis (source des Trois Bœufs / grotte de Truby) (130 m): la source de Truébis est une source temporaire dont le réseau karstique a fait l'objet d'une exploration jusqu'à la zone noyée par les spéléologues varois (cf salle du lac sur l'illustration 58). La galerie est sub-horizontale sur près de 400 m avant de plonger au niveau du lac souterrain (siphon). Elle draine les formations du Jurassique inférieur sur le Massif de St Clément entre Cuers, Belgentier et Solliès-Toucas.

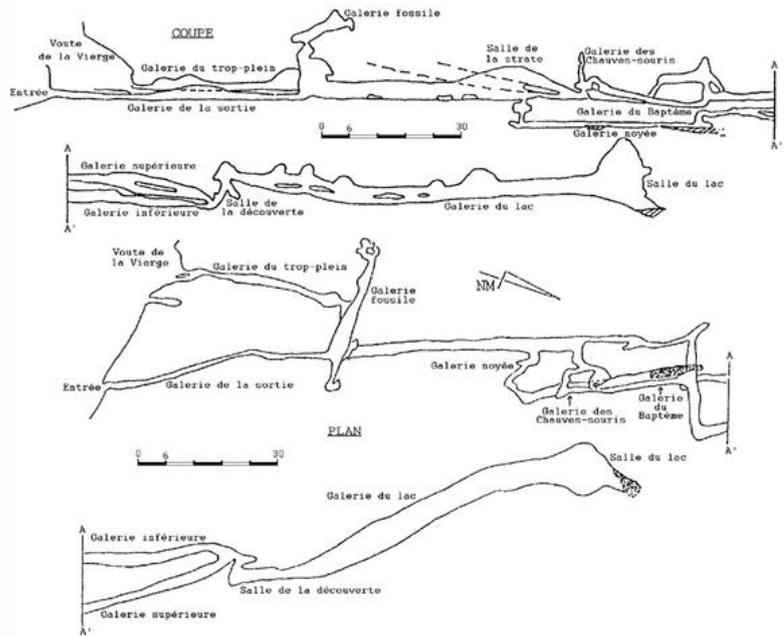


Illustration 58. Source temporaire de Truébis avec détail de la grotte (Source : Fichier des cavités du Var sur <http://www.fichiertopo.fr>)

6.1.3. Bassin du Caramy

a) Zones d'intérêt

Le bassin du Caramy est influencé sur sa partie médiane et aval par la zone urbaine de Brignole. La zone d'intérêt karstique de ce bassin se situe sur sa partie méridionale, sur la bordure nord du Massif de la Sainte-Baume dans les formations calcaires et dolomitiques du Jurassique et Crétacé inférieur. Sur le bassin proprement dit du Caramy, la source du Caramy à Mazaugues est un site privilégié et déjà instrumenté par la DREAL.

b) Sites proposés

Ouvrages miniers de Mazaugues : les formations Crétacé supérieur au nord de Mazaugues ont été le siège d'une exploitation de bauxite jusque dans les années 1980. Sur le site, il existe des puits qui étaient destinés à la ventilation des mines (puits d'aérage) ou au pompage de la nappe en vue de la rabattre pour permettre l'exploitation des niveaux bauxitiques ennoyés (puits d'exhaure) (Conseil-Général-Du-Var, 2006 ; SAFEGE, 2011b). S'il n'y a pas eu d'étude pour mettre en évidence une connexion de ces formations aquifères avec le Caramy, ce sont des sites privilégiés pour un suivi continu de la piézométrie.

Sources de la vallée haute du Caramy : le bassin hydrogéologique de ce secteur a été précisé lors de traçages artificiels (SAFEGE, 2011a) et montre que la zone sud-est du bassin topographique situé sur les contreforts de la Sainte-Baume est drainée par le cours d'eau du Caramy au sud de Tourves au niveau des sources des Lecques, de Lieutaud, et de la Figuière. Ces sources sont donc des témoins du niveau de remplissage des formations karstiques du Jurassique sup. et Crétacé inf.

6.1.4. Bassin de l'Estéron

a) Zones d'intérêt

Globalement, au vu des résultats de cette étude, l'intérêt de suivre les systèmes karstiques sur le bassin de l'Estéron s'avère a priori limité. En effet, les résultats de la modélisation des échanges latéraux ne montrent pas d'évidence de l'influence du karst dans la genèse des crues sur le cours d'eau principal, malgré la présence du massif karstique du Cheiron au sud. Ce résultat n'était pas attendu car les paysages spécifiques du karst y sont particulièrement visibles comme la Clue du Riolan par exemple (Illustration 59). Ainsi, on peut faire une première hypothèse sur des systèmes karstiques de l'Estéron qui appartiennent à de petites unités dont la somme des influences n'impacte pas le fonctionnement hydrologique global de l'Estéron. Une autre hypothèse est que l'influence des karsts est masquée sur ce bassin par le ruissellement sur les fortes pentes ou sur les formations marno-calcaires ou non karstiques (Tertiaire) présentes sur de grandes étendues.

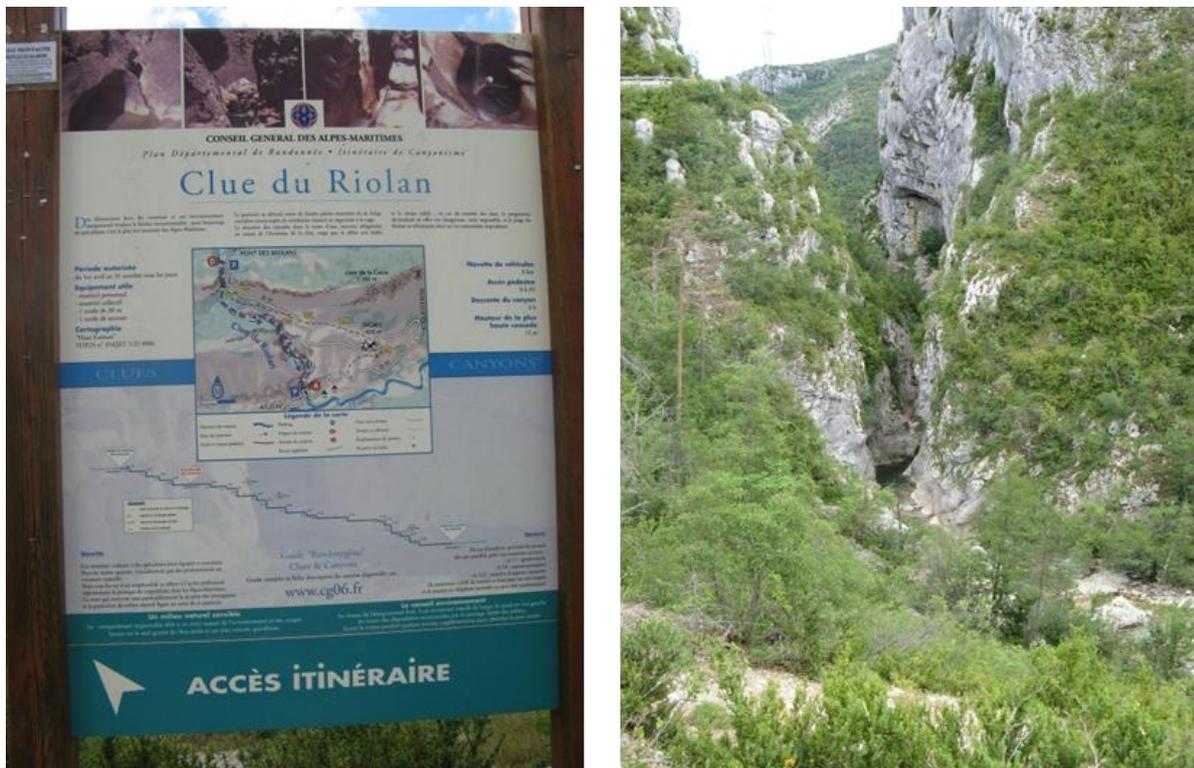


Illustration 59. Clue du Riolan sur le bassin de l'Estéron

La zone d'intérêt principale pour le bassin de l'Estéron est le Massif du Cheiron sur sa bordure méridionale situé dans les formations du Jurassique et Crétacé drainé notamment par les sources du Vegay et de la Bouisse.

b) Sites proposés

Les sources du Vegay (captage) : 3 émergences qui se réunissent dans la vasque du Vegay et qui drainent le Massif du Cheiron depuis Gréolières les Neiges (traçage figuré sur l'illustration 18). Les sources se situent dans un cœur Triasique au sein de l'anticlinal E-W formé par le Cheiron. Ces sources sont captées et envoyées à l'usine de Bouyon par un canal de 19 km de long. D'après le SIEVI (Syndicat Intercommunal de l'Estéron et du Var Inférieur), ces sources ont un débit très variable mais la moyenne des 10 dernières années fait ressortir un débit de 167 L/s (le débit d'étiage le plus faible mesuré a été de 83 L/s). Le SIEVI est le gestionnaire de cette ressource avec VEOLIA.



Illustration 60. Source captée du Vegay (source sup.), bassin de l'Estéron

Source de la Bouisse (384 m) : elle draine les formations jurassiques et crétacés du Massif du Cheiron depuis Gréolières-les-Neiges (traçage figuré sur l'illustration 18).



Illustration 61. Source de la Bouisse, bassin de l'Estéron

6.2. CHOIX DES SITES POUR L'INSTRUMENTATION

Cette étude prévoit l'instrumentation de 3 sites karstiques pilotes. Le choix définitif de ces sites a été réalisé lors de la réunion technique du 23/09/2013 au SPC d'Aix-en-Provence en concertation avec le SCHAPI et le SPC MED EST. Les critères de sélection étaient :

- se focaliser sur un seul bassin pour se donner les chances qu'au moins un des 3 sites puisse aboutir à un indicateur pertinent du karst pour la prévision des crues ;
- sélectionner le bassin parmi ceux où le karst semble jouer un rôle important : soit l'Huveaune, le Gapeau et le Caramy ; l'Estéron ayant été écarté sur la base des résultats de notre étude qui montrent que l'influence du karst sur ce bassin reste mineure ;
- sélectionner le bassin pour lequel les besoins de nouveaux indicateurs du karst sont prioritaires.

Le Gapeau a été retenu pour instrumenter 3 nouveaux sites karstiques pilotes car ce bassin ne dispose d'aucun suivi de sources karstiques à l'heure actuelle.

6.3. SITES INSTRUMENTES

6.3.1. Grotte de Truebis à Cuers

Comme la grotte de Truebis est une source temporaire, l'idée a été d'instrumenter directement le drain noyé au niveau du siphon pour pouvoir mesurer les fluctuations des niveaux d'eau toute l'année, même en période sèche. La salle du Lac dans la grotte de Truebis (cf plan de la grotte dans l'illustration 58) a été équipée le 04/10/2013 lors d'une mission spéléologique menée par l'association SpeleH20 (Thierry Lamarque).

L'illustration 62 montre le tube PVC de 4m de long fixé sub-verticalement aux parois dans lequel est insérée la sonde de niveau d'eau. Ce dispositif permet d'accéder à la sonde par le haut du tube.



Illustration 62. Lac souterrain (salle du Lac) au niveau du siphon de la grotte de Truebis, et emplacement de la sonde de niveau d'eau

6.3.2. Source de la Font du Thon à Solliès-Toucas

La Font du Thon à Solliès-Toucas est une source i) qui alimente d'une part le lavoir des lavandières (Illustration 56), ii) qui constitue d'autre part une réserve pour l'irrigation des terrains à proximité, et enfin iii) qui alimente le captage de Véolia pour l'alimentation en eau potable de la commune de Solliès-Toucas. Cette source est drainée au niveau d'un réservoir qui distribue l'eau vers le captage et l'eau vers le lavoir. D'après Fournillon (2012), les niveaux d'eau dans ce réservoir sont très faiblement perturbés par les pompages mais peuvent être plus influencés par l'ouverture des vannes ou d'une martelière qui règle le débit vers le lavoir encore utilisé par les lavandières et également pour l'irrigation. La martelière ayant été condamnée depuis quelques mois par la mairie, ce dernier artefact devrait être supprimé pour le suivi actuel. La source a été équipée pour des mesures des niveaux d'eau le 07/11/2013 (Illustration 63).



Illustration 63. Instrumentation du réservoir de collecte de la source de la Font du Thon

6.3.3. Source du Rieu Fré à Montrieux le Vieux, Meounes les Montrieux

La source du Rieu Fré est localisée dans le Domaine de Montrieux à Montrieux le Vieux sur la commune de Meounes les Montrieux. Cette source a été instrumentée pour des mesures des niveaux d'eau le 07/11/2013 (Illustration 64).



Illustration 64. Instrumentation de la source du Rieu Fré à Montrieux le Vieux

7. Conclusion

L'objectif de cette étude pour le compte du SPC Méditerranée-Est dans le cadre des actions scientifiques du SCHAPI était de mieux comprendre le rôle potentiel du karst dans les crues sur les quatre bassins du Gapeau, de l'Huveaune, du Caramy en Provence et de l'Estéron dans les Pré-Alpes. Les contributions et les zones d'influences privilégiées ont été caractérisées en vue de proposer une instrumentation de sites karstiques stratégiques qui pourraient servir d'indicateurs karst dans le futur.

Le développement et l'application d'un indice cartographique ruissellement/infiltration qui tienne compte d'une part du partage ruissellement/infiltration à la surface du sol, et d'autre part du potentiel infiltrant des systèmes karstiques a permis de mettre en évidence les zones karstiques susceptibles de plus influencer les crues à partir d'une hiérarchisation fine du niveau de karstification des unités. Globalement l'influence du karst aux crues est modérée pour le bassin de l'Estéron, et forte pour les bassins de l'Huveaune, du Caramy, et du Gapeau.

L'analyse pluie-débit sur les stations hydrométriques a permis de comparer les indicateurs de l'état hydrique initial qui contrôlent la réponse hydrologique. Quatre indicateurs (SWI, débit de base, source Caramy et source St Pons) sur quatre classes d'état hydriques secs à saturés étaient ainsi comparées. Les résultats montrent l'influence de l'état de saturation du karst sur l'ampleur de la réponse hydrologique des bassins du Caramy et de l'Huveaune. Sur le Gapeau aucun des indicateurs sélectionnés ne semblent bien caractériser la réponse hydrologique dans le cas d'états hydriques intermédiaires. Enfin, sur l'Estéron, l'utilisation du débit de base n'améliore pas l'estimation de la réponse hydrologique déterminée par le SWI ce qui est cohérent avec une faible influence du karst sur les crues de ce bassin.

L'analyse des contributions du karst aux crues par modélisation a montré que le karst joue un rôle prédominant dans les crues de l'Huveaune à Roquevaire, quel que soit l'état hydrique initial, en soutenant les débits de décrue et en contribuant aux 2/3 du pic de crue. Bien que le karst joue un rôle mineur sur les versants à l'aval de l'Huveaune, cette influence se propage jusqu'à Aubagne car l'essentiel de la crue de l'Huveaune y est constituée par l'onde de crue issue de Roquevaire. Sur l'Estéron, si le karst joue un rôle dans les crues, c'est a priori de manière épisodique car l'essentiel des écoulements de crue semble provenir d'écoulements de surface, qui seraient fortement favorisés par la présence de fortes pentes et de formations marno-calcaires.

Sur la base de ces résultats, nous avons proposé un ensemble de points d'eau (sources principalement) karstique, et susceptibles de servir d'indicateur karst pour les différents bassins. En concertation avec le SCHAPI et le SPC MED EST, le bassin du Gapeau a été sélectionné et une instrumentation en octobre-novembre 2013 de trois sites a été lancée pour un suivi pluri-annuel.

Nous recommandons l'instrumentation des bassins de l'Huveaune et du Caramy dans le cadre d'autres projets ou financements.

8. Bibliographie

- Arfib B., Lamarque T.** (2011) - Traçages artificiels KarstEAU 2011 - Rapport de synthèse des injections d'Acide Amino G, Sulforhodamine B et Fluorescéine à Cuges les Pins, Ceyreste et Signes. Université de Provence. 53 pages
- Bakalowicz M.** (1999) - Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Guide technique n°3, SDAGE Rhône - Méditerranée - Corse. Agence de l'Eau Rhône - Méditerranée - Corse, Lyon, 40 p.
- Cavalera, T.** (2007) - Etude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port-Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). APPROCHE MULTICRITERE. Université de Provence-Aix-Marseille I.
- Charlier, J.-B., Bailly-Comte, V., Desprats, J.-F.** (2012) - Appui au SCHAPI 2012 - Module 1: Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique: le bassin du Tarn à Millau. Rapport BRGM/RP-61816-FR, 88p
- Conseil-Général-Du-Var** (2006) - Travaux des potentialités de la ressource en eau des anciennes mines de Mazaugues. Rapport, Maison régionale de l'eau 104 p.
- Coulier C.** (1985) - Hydrogéologie karstique de la Sainte Baume occidentale (Bouches-du-Rhône - Var). Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille I, 400 p.
- Dörfliger N., Plagnes V.** (2009) - Cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères karstiques. Guide méthodologique de la méthode PaPRIKa. BRGM/RP-57527-FR, 105p.
- Fleury, P., Raymond, M., Ayral, P.A.** (2010) - Intégration de la composante "eaux souterraines karstiques" dans le système d'alerte crue de la Ville de Nîmes. Rapport "final". BRGM/RP-58286-FR.
- Fleury, P., Charlier, J.-B., Borrell, V., Coustau, M.** (2011) - Appui au SCHAPI 2011 - Module 1: Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique: les bassins versants du Lez et de la Tardoire. Rapport BRGM RP-60380-FR, 78p.
- Fournillon, A.** (2012) - Modélisation géologique 3D et hydrodynamique appliquées aux réservoirs carbonatés karstiques : caractérisation des ressources en eau souterraine de l'Unité du Beausset (Var et Bouches-du-Rhône, SE France). Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille, 425p.
- Guieu, G., Rousset, C.** (1980) - La Provence. C.R. 26e Congr. Géol. Internat., Paris, 65-80.
- Hayami, S.** (1951) - On the propagation of flood waves. Disaster Prevention Research Institute Bulletin 1-16.
- Martin P.** (1991) - Hydromorphologie des géosystèmes karstiques des versants nord et ouest de la Saint Baume (Bouches-du-Rhône, Var). Etude hydrologique, hydrochimique et de la vulnérabilité à la pollution. Thèse de Doctorat, Aix-Marseille II, Marseille: 502 p.
- Mazet J.** (1991) - Le karst du massif de la Sainte Baume (Bouches-du-Rhône, Var). Spéléopérations : 79,19-21.

Moussa, R. (1996) - Analytical Hayami solution for the diffusive wave flood routing problem with lateral inflow. *Hydrological Processes*:10, 1209–1227.

Moussa, R., Bocquillon, C. (1996) - Algorithms for solving the diffusive wave flood routing equation. *Hydrological Processes* :10, 105–123.

Rousset, C. (2006) - Chapitre: XI. Couloir Rhodanien Provence-Languedoc. 3. Provence, In: *Aquifères et Eaux souterraines en France*. In: Roux, J.C., (Ed.), AIH-IAH, BRGM Editions, Tome 2.

SAFEGE (2011a) - Ressource en eau des contreforts nord de la Sainte-Baume. Identification et caractérisation de la ressource majeure à préserver pour l'alimentation en eau potable - Compte rendu de fin de traçage, Rapport SAFEGE 11MEN003, nov. 2011, 97 p.

SAFEGE (2011b) - Ressource en eau des contreforts nord de la Sainte-Baume. Identification et caractérisation de la ressource majeure à préserver pour l'alimentation en eau potable – Synthèse et mise à jour des connaissances actuelles, Rapport SAFEGE 11MEN003 V2, nov. 2011, 63 p.

Valencia, G. (2000) - Eaux de surface et eaux souterraines en région PACA: une introduction. *Géologues* : 125-126, 61–62.

Annexe 1

Données bibliographiques des traçages artificiels

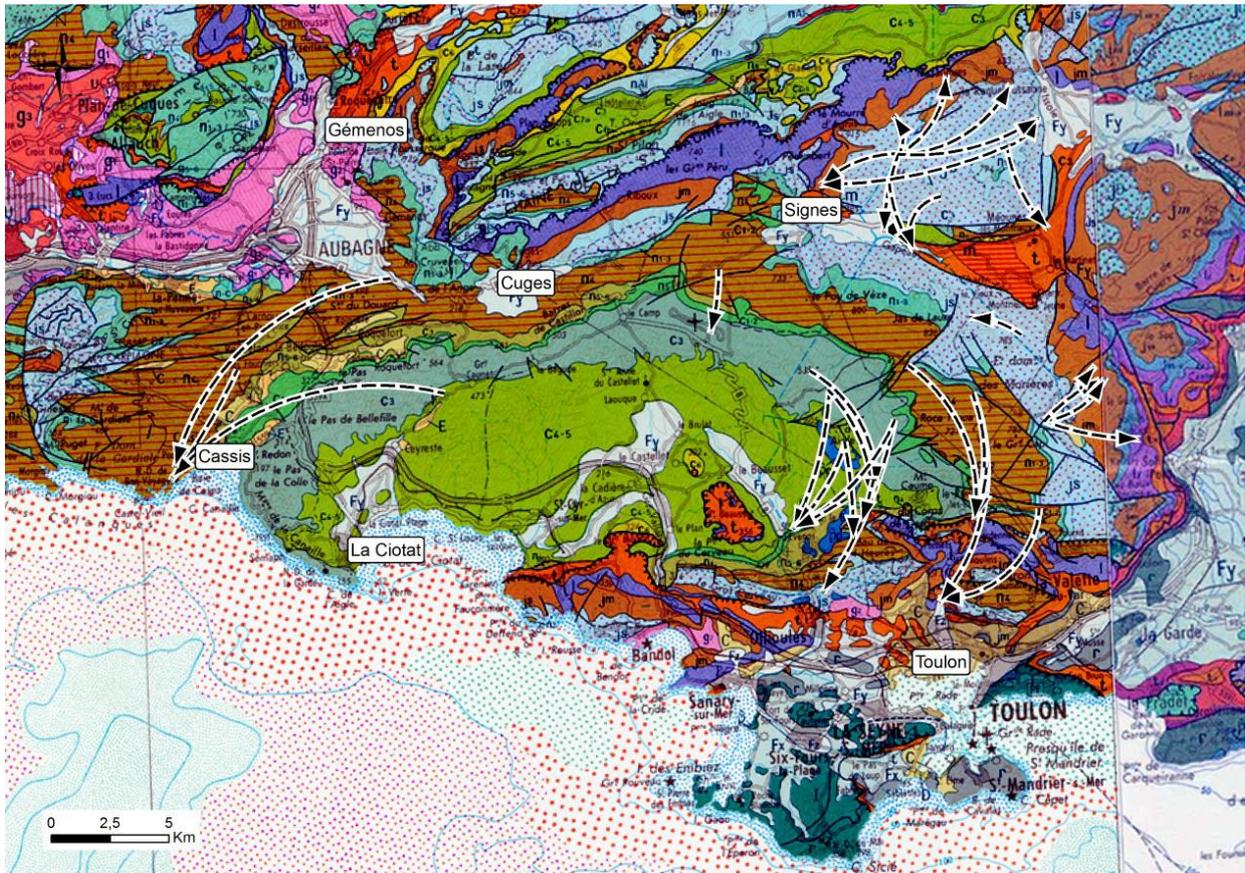


Illustration 65. Synthèse des traçages artificiels effectués dans l'Unité du Beausset (Fournillon, 2012)

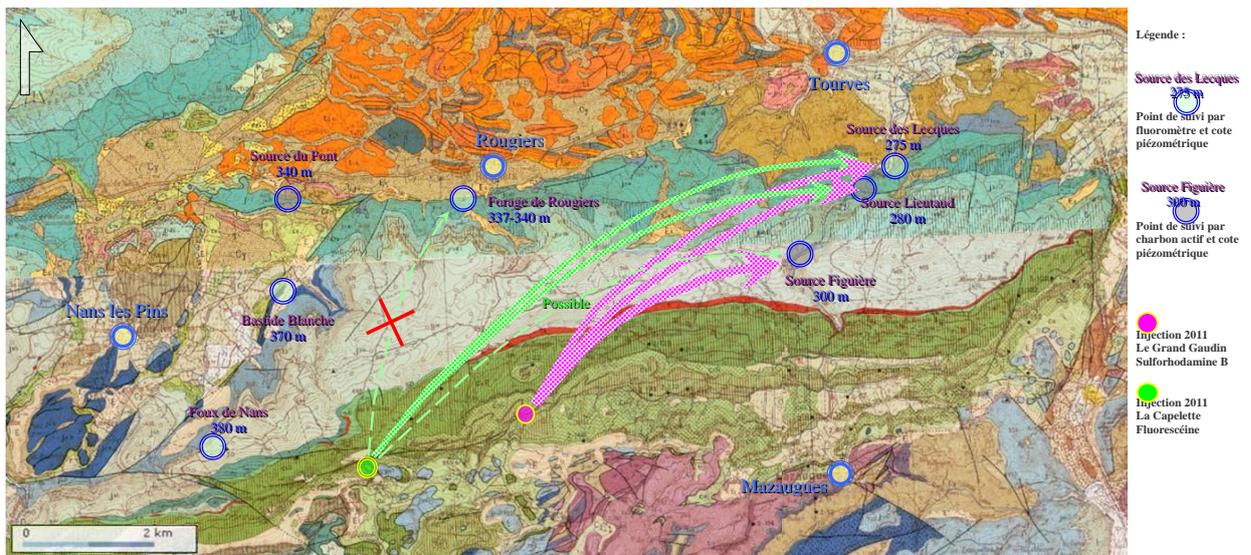


Illustration 66. Résultats du traçage d'avril-juin 2011 sur le versant nord de la Sainte-Baume (SAFEGE, 2011a)

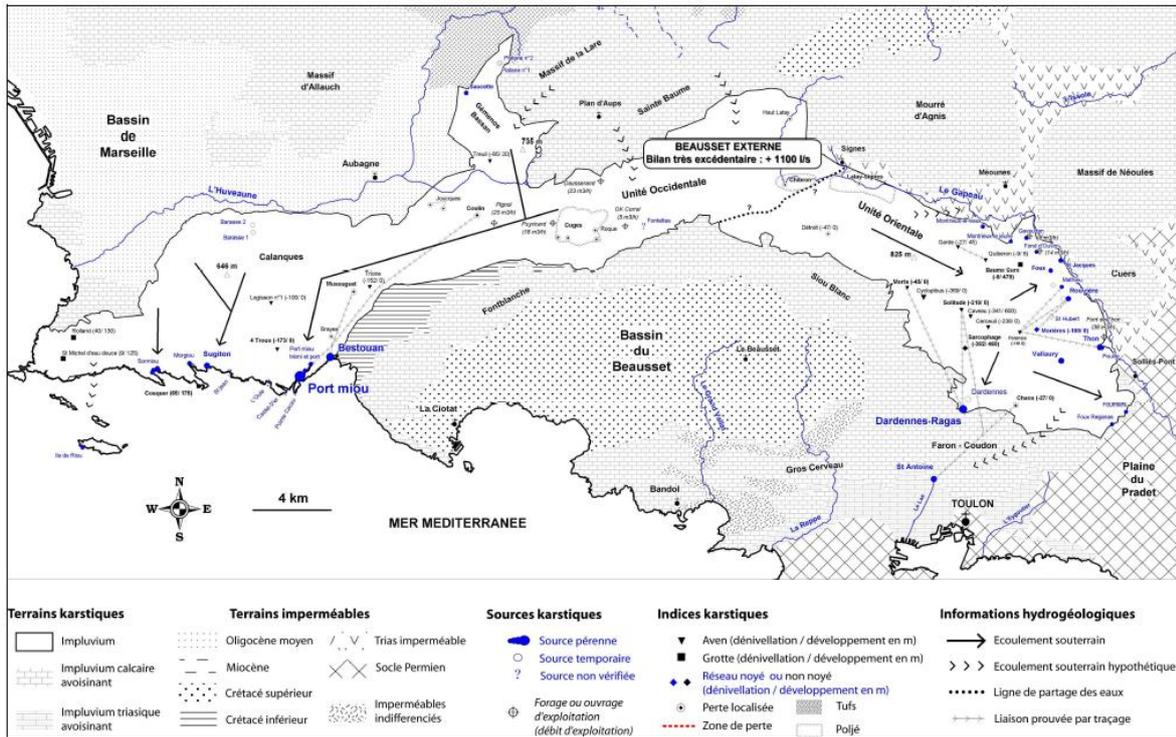


Illustration 67. Carte hydrogéologique de l'unité karstique du Beausset Externe (Cavalera, 2007)

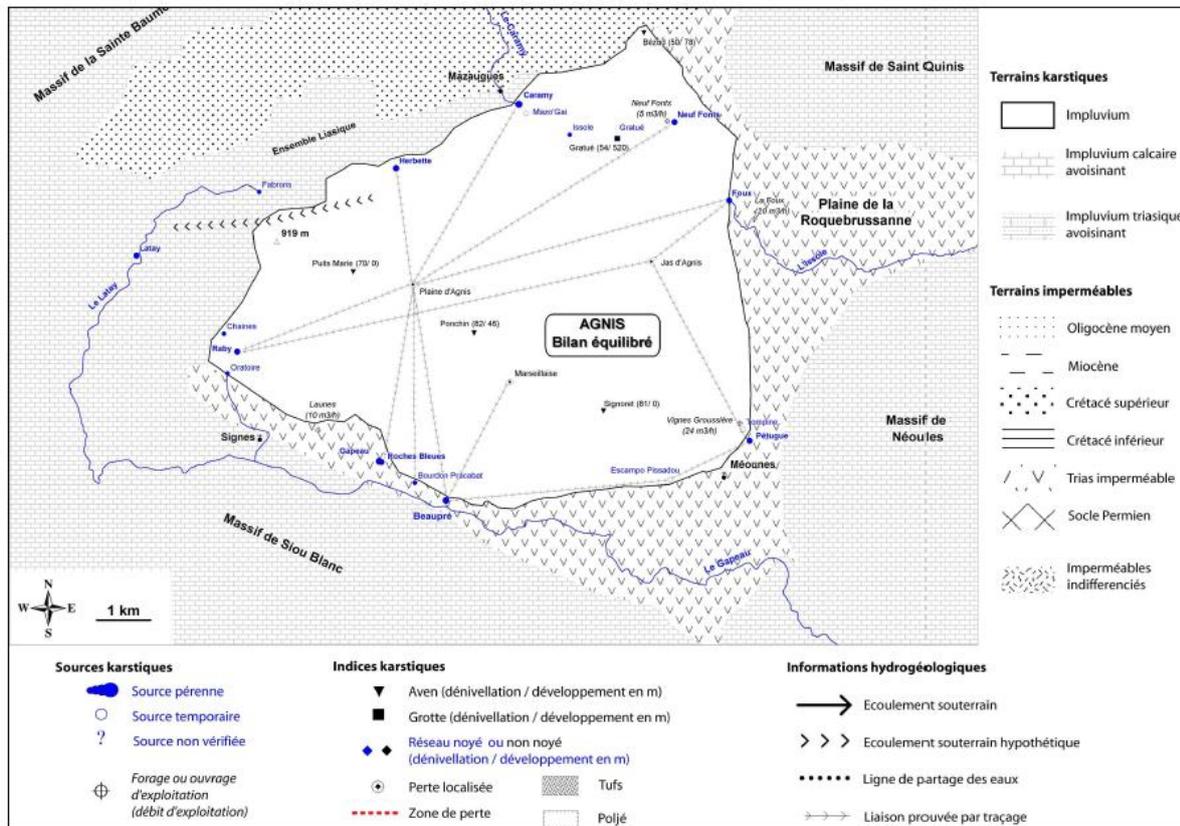


Illustration 68. Carte hydrogéologique du massif karstique de l'Agnis (Cavalera, 2007)

Annexe 2

Evaluation de l'importance de ruissellement de surface sur les mesures de débit de la source Caramy à la station hydrométrique de Mazaugues

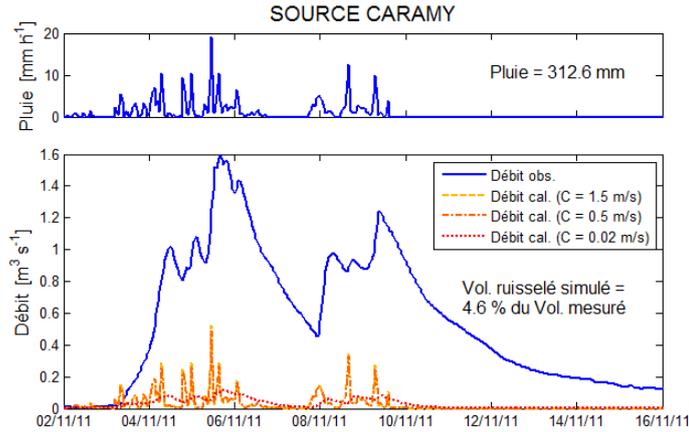


Illustration 71. Simulation du ruissellement de surface à la station de Mazaugues à partir d'un taux de ruissellement égal à 20% de la pluie ; 3 valeurs de Célérité (C) sont proposées.

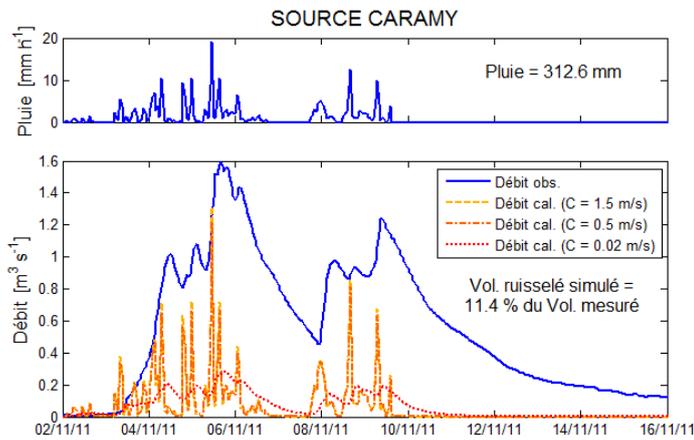


Illustration 72. Simulation du ruissellement de surface à la station de Mazaugues à partir d'un taux de ruissellement égal à 50% de la pluie ; 3 valeurs de Célérité (C) sont proposées.

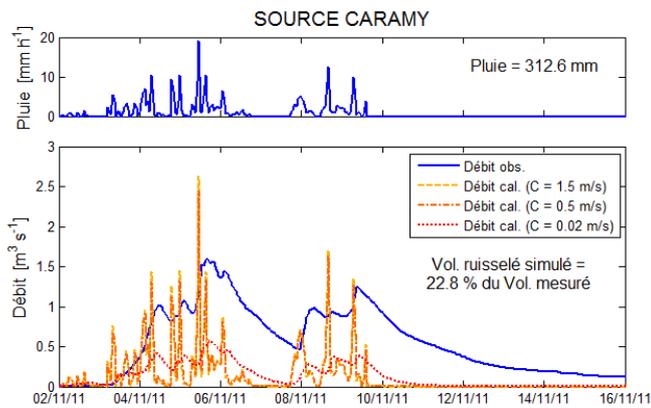


Illustration 73. Simulation du ruissellement de surface à la station de Mazaugues à partir d'un taux de ruissellement égal à 100% de la pluie ; 3 valeurs de Célérité (C) sont proposées.

Annexe 3

Crues de l'Huveaune et de l'Estéron : modélisation des échanges latéraux

Crues de l'Huveaune

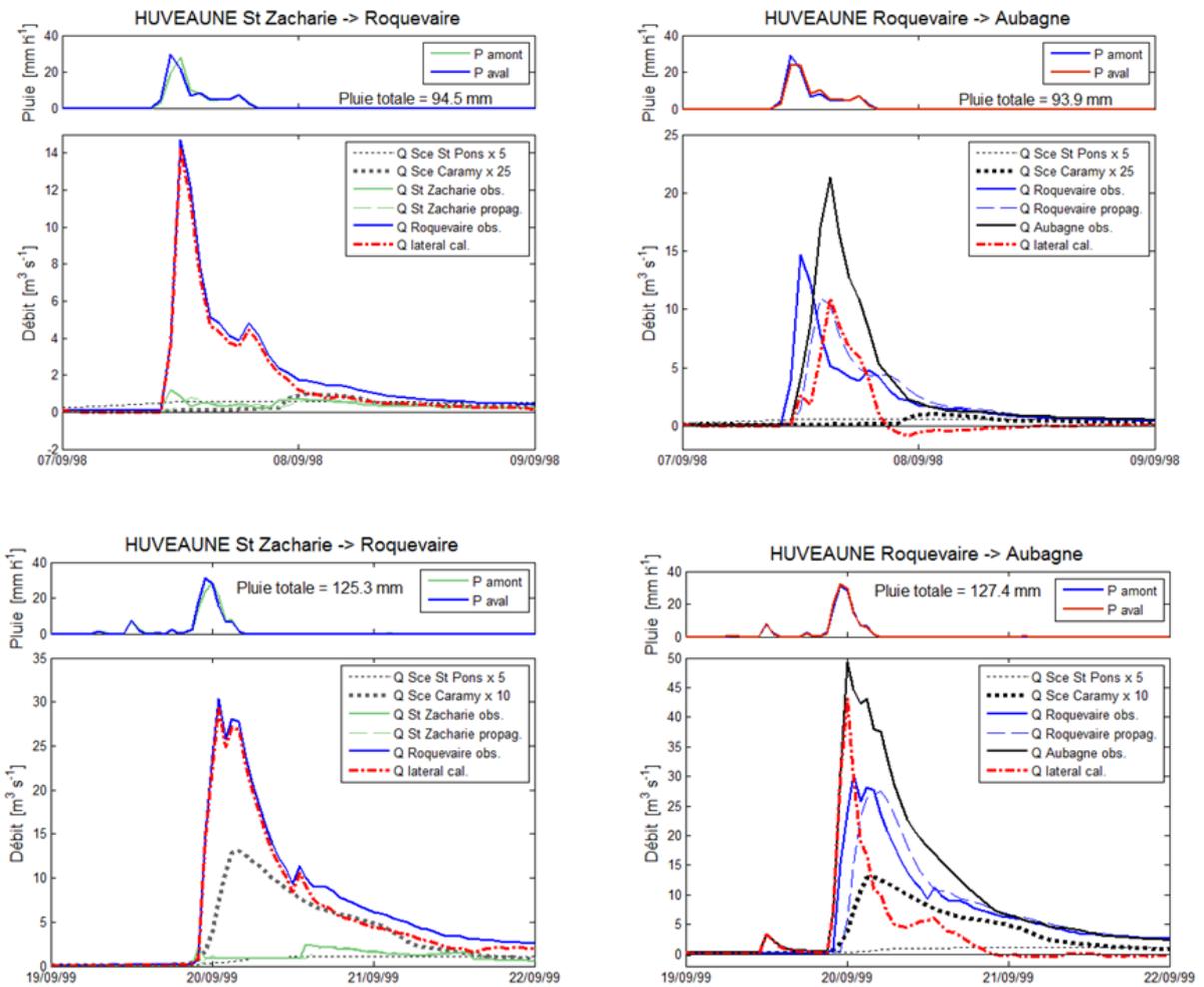


Illustration 74. Crues du 07/09/1998 et du 20/09/1999 sur l'Huveaune sur les deux tronçons Saint-Zacharie – Roquevaire (à gauche), et Roquevaire – Aubagne (à droite)

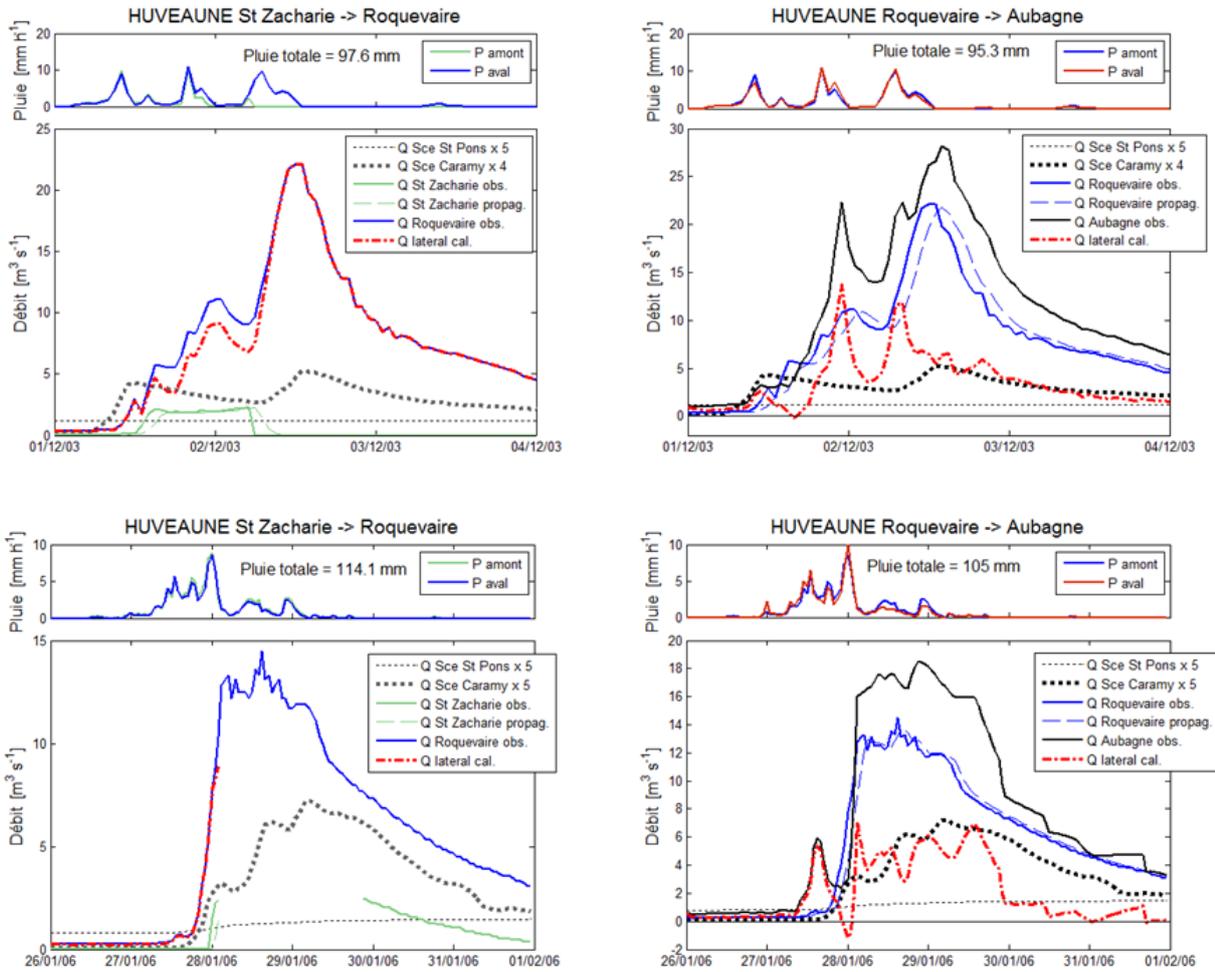


Illustration 75. Crues du 02/12/2003 et du 28/01/2006 sur l'Huveaune sur les deux tronçons Saint-Zacharie – Roquevaire (à gauche), et Roquevaire – Aubagne (à droite)

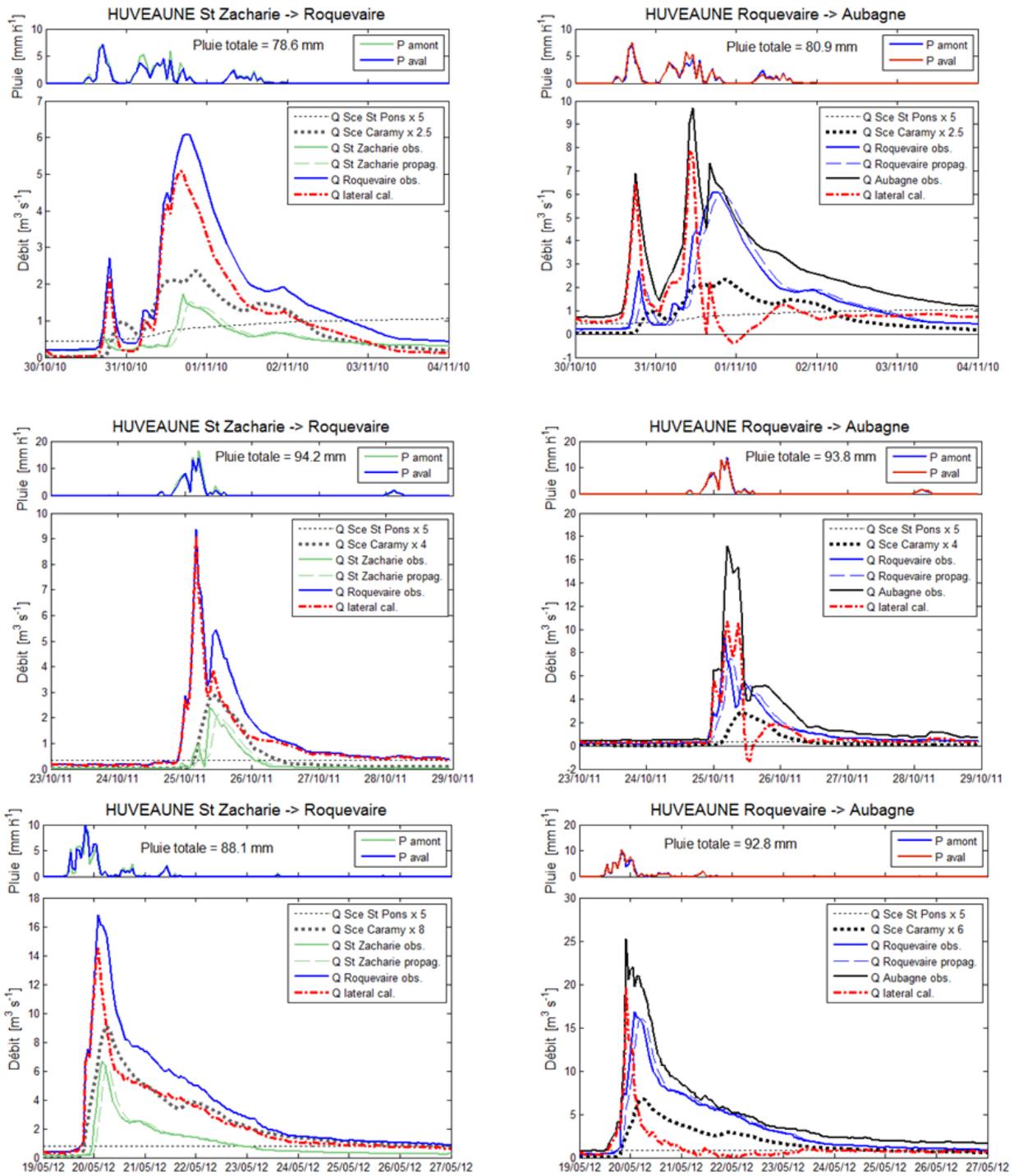


Illustration 76. Crues du 21/10/2010, du 25/10/2011, et du 19/05/2012 (du haut en bas) sur l'Huveaune sur les deux tronçons Saint-Zacharie – Roquevaire (à gauche), et Roquevaire – Aubagne (à droite)

Crues de l'Estéron

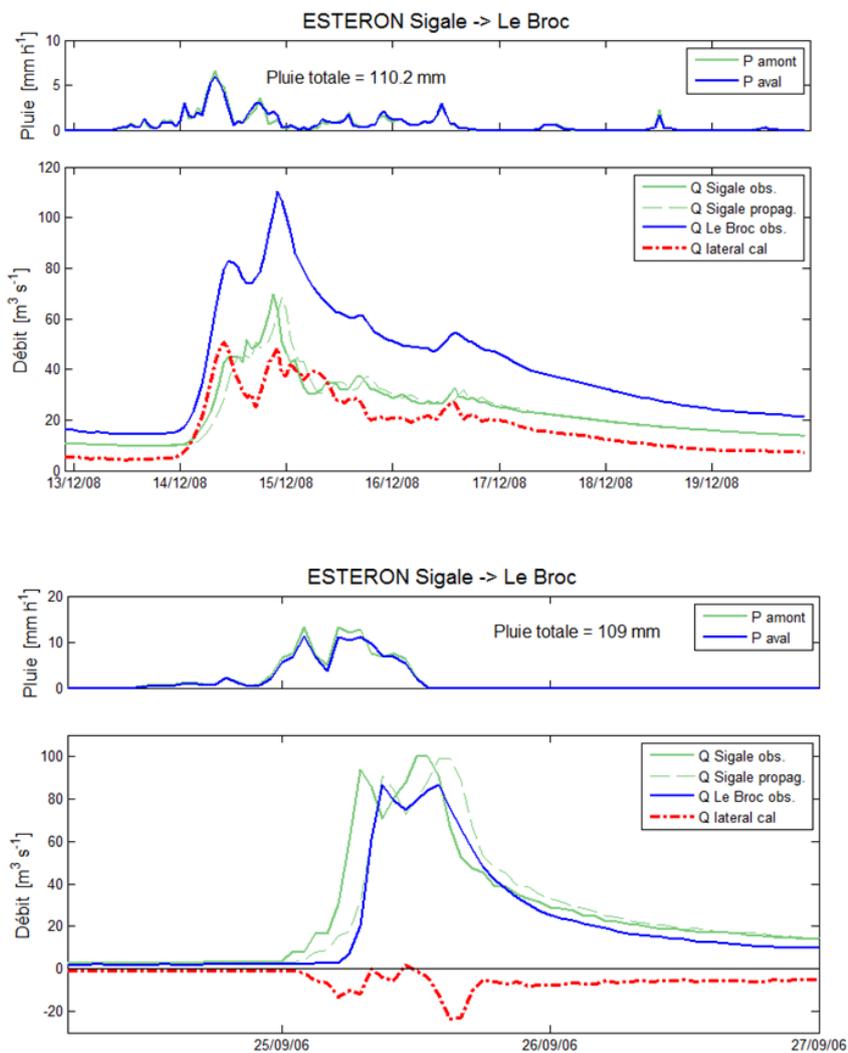


Illustration 77. Crues du 14/12/2008 et 25/09/2006 (du haut en bas) sur l'Estéron le tronçon Sigale – Le Broc.

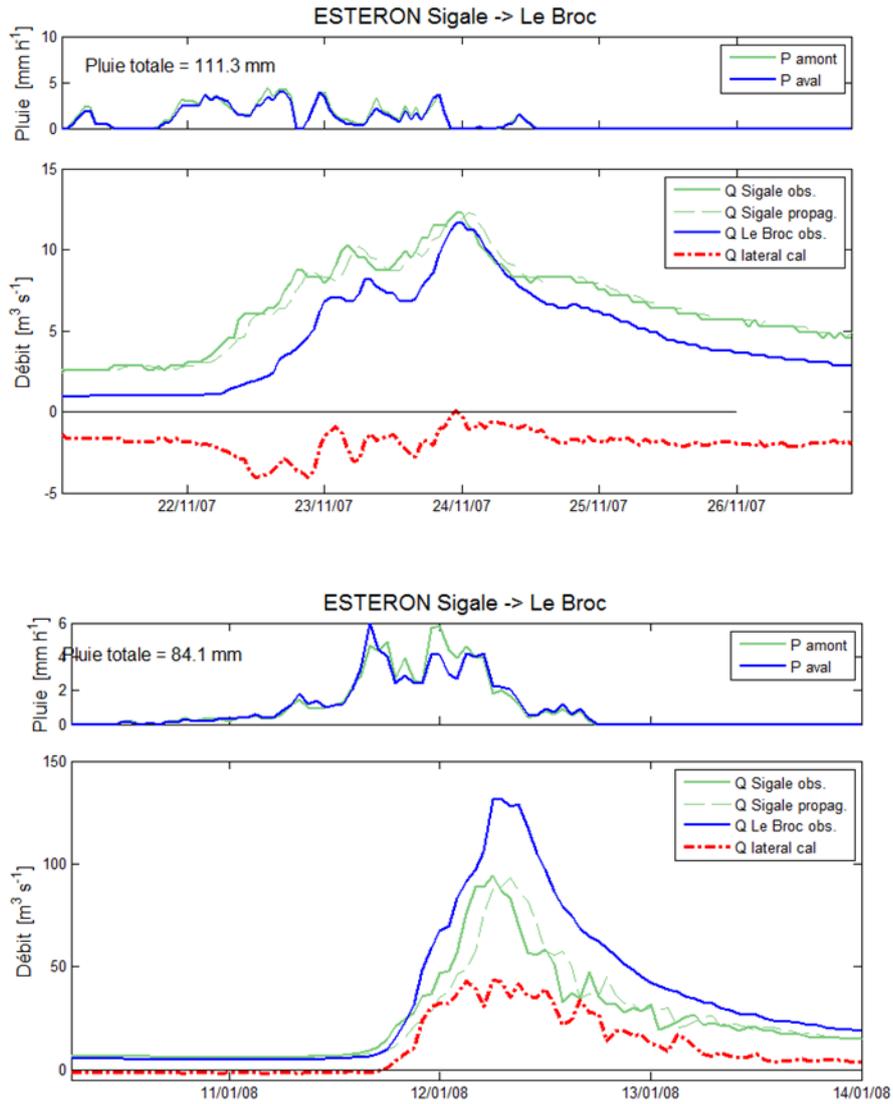


Illustration 78. Crues du 24/11/2007 et 12/01/2008 (du haut en bas) sur l'Estéron le tronçon Sigale – Le Broc.

Annexe 4

Chroniques de mesure sur les sources rive droite du Gapeau (Fournillon, 2012)

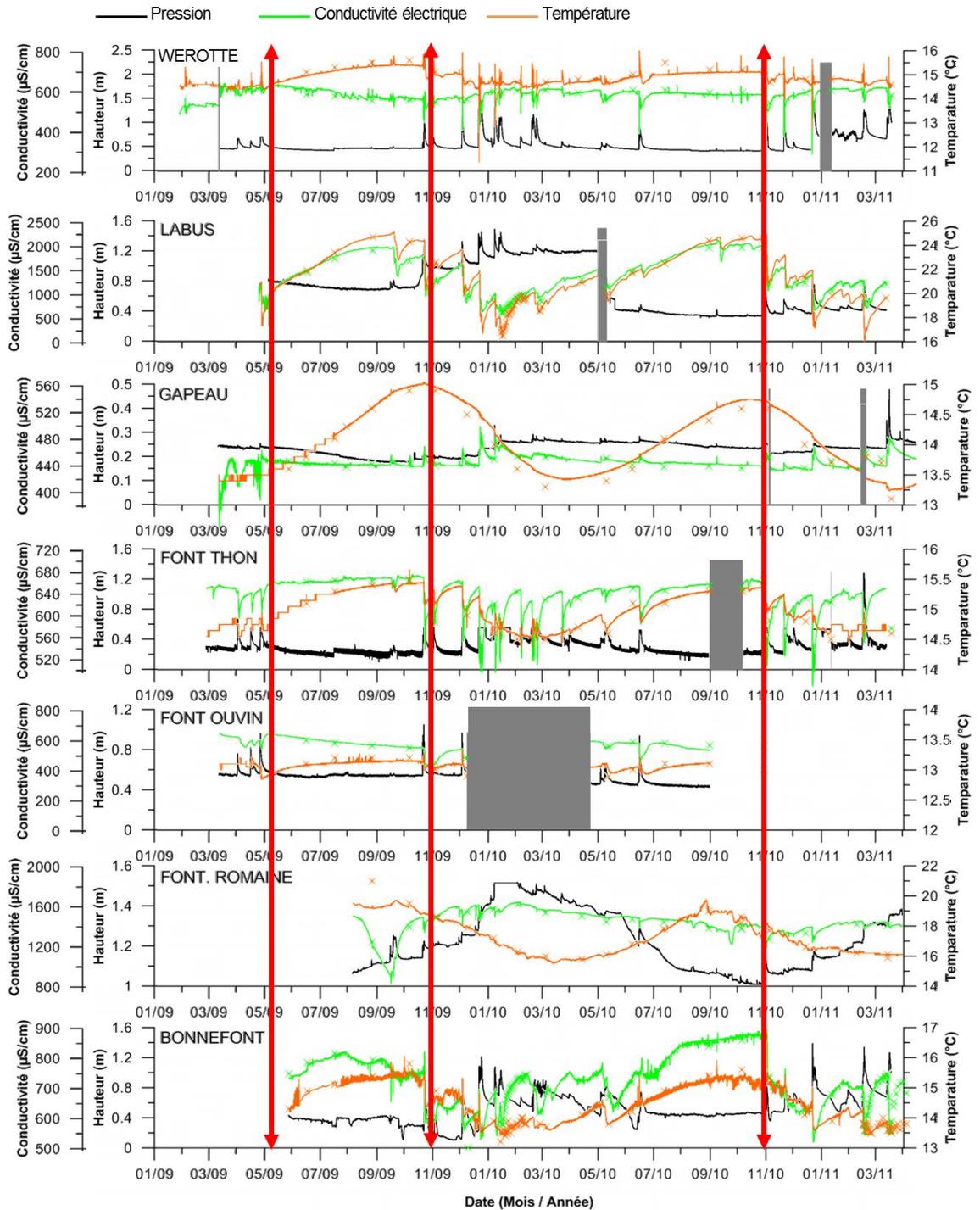


Illustration 79. Chroniques de hauteur d'eau (noir), température (orange), et conductivité électrique (vert) pour les sources de l'unité du Beausset suivies dans le cadre de la thèse de Fourmillon (2012) ; Les sources concernées par cette étude sont celles localisées dans le bassin du Gapeau : la source Werotte, du Gapeau, de la Font du Thon, et de la Font d'Ouvin.



Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional Languedoc-Roussillon
1039 rue de Pinville
34000 – Montpellier - France
Tél. : 04 67 15 79 80