



Essais de modélisation Pluie-Débit de l'Huveaune avec le logiciel KarstMod

Marisol Arias Vanegas, Cécile Lucquin, Bruno Arfib

► To cite this version:

Marisol Arias Vanegas, Cécile Lucquin, Bruno Arfib. Essais de modélisation Pluie-Débit de l'Huveaune avec le logiciel KarstMod. [Rapport de recherche] Aix-Marseille Université. 2021. hal-03468637

HAL Id: hal-03468637

<https://hal.science/hal-03468637>

Submitted on 7 Dec 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Projet de recherche Karst-Huveaune (2018-2022)

Essais de modélisation Pluie-Débit de l'Huveaune avec le logiciel KarstMod

ARIAS VANEGAS Marisol, LUCQUIN Cécile, ARFIB Bruno

19/11/2021

Université Aix-Marseille

Master Sciences de l'Eau, Gestion de l'Environnement



Préambule

Le projet de recherche multipartenarial Karst-Huveaune, dirigé par l'université Aix-Marseille (AMU), porte sur la caractérisation de la ressource en eau souterraine en contexte carbonaté karstique, appliquée au bassin de l'Huveaune. Ce projet se déroule de 2018 à 2022. Il intègre des données multiples (géologie, karstologie, hydrogéologie, tests en forages, hydrochimie) pour une meilleure compréhension du fonctionnement actuel et futur des hydrosystèmes souterrains entre la Sainte-Baume et la mer. La zone d'étude inclut le bassin versant de l'Huveaune en amont d'Aubagne, qui recoupe le bassin versant plus large d'alimentation des sources sous-marines de Cassis (Port-Miou et Bestouan). Le projet est principalement réalisé dans le cadre de la thèse de doctorat de Thibaut Garin (bourse doctorale Région PACA et BRGM), co-encadrée par l'université Aix-Marseille et le BRGM Montpellier. En complément, des travaux d'étudiants de Master sont menés dans le cadre des unités d'enseignement de projets et de stages. Ce rapport est le résultat d'un travail de groupe des étudiants de Master 1 Sciences de l'Eau (AMU – Master Gestion de l'Environnement), poursuivi en stage durant l'été 2021. Les résultats qui sont présentés ont pour objectif de montrer un exemple de modélisation Pluie-Débit sur un cours d'eau en contexte karstique. L'attention du lecteur est attirée sur le caractère exploratoire de ces résultats et sur les limites du travail réalisé : il a été choisi de n'utiliser que la plateforme de modélisation KarstMod, avec des lois d'écoulement linéaire, pour des précipitations non spatialisées. L'étude complète du débit de l'Huveaune nécessiterait la mise en œuvre de nombreux autres scénarios et méthodes, qui vont au-delà des objectifs d'un stage de Master et du projet Karst-Huveaune.

Le projet Karst-Huveaune est financée par l'Agence de l'Eau, le Conseil Départemental 13, la Métropole Aix-Marseille-Provence, l'Université Aix-Marseille. La thèse de doctorat de Thibaut Garin est financée par la Région Sud-PACA et le BRGM (contrat doctoral). Le projet est inscrit dans le Contrat de rivière Huveaune porté par le Syndicat du Bassin Versant de l'Huveaune (fiche action C1.1 dans l'enjeu C, État des ressources en eau, 2015-2018 et 2019-2022).

Intitulé du projet de recherche Karst-Huveaune : Karst et ressource stratégique en eau souterraine du bassin de l'Huveaune : caractérisation par approches hydrodynamique, géologique et hydrochimique.

Remerciements à Météo-France (pour la mise à disposition des données de pluie et d'ETP dans le cadre de la convention de recherche avec l'université), Thibaut Garin (doctorant), et le Service National d'Observation KARST (sokarst.org).

Pour citer ce rapport : Arias Vanegas M., Lucquin C., Arfib B. (2021) Essais de modélisation Pluie-Débit de l'Huveaune avec le logiciel KarstMod. Master GE Sciences de l'Eau. Université Aix-Marseille. Projet de recherche Karst-Huveaune. 19/11/2021.

Contact :

Bruno Arfib : arfib@cerege.fr,

Université Aix-Marseille, Laboratoire CEREGE, 3 place V. Hugo, 13003 Marseille

Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, Coll France, CEREGE, Aix-en-Provence, France

www.karsteau.fr

Table des matières

1. Introduction	4
2. Présentation générale du fonctionnement hydrologique de l’Huveaune et des hydrosystèmes associés	7
2.1 Présentation générale du bassin versant de l’Huveaune.....	7
2.1.1 Les limites du bassin versant de l’Huveaune et l’occupation du sol	7
2.1.2 Le contexte géologique	8
2.1.3 L’Huveaune et ses affluents	9
2.2 Les stations de mesure sur le bassin versant de l’Huveaune (météo et débit)	10
2.3 Caractéristiques climatiques et hydrologiques de l’hydrosystème	12
2.3.1 Données disponibles	12
2.3.2 Evapotranspiration	13
2.3.3 Précipitations.....	13
2.3.4 Débit de l’Huveaune	14
2.4 Relations entre le bassin versant topographique de l’Huveaune et le bassin versant hydrogéologique de Port Miou (Cassis)	15
3. Méthode : la modélisation pluie-débit avec KarstMod	16
4. Schéma conceptuel de fonctionnement de l’hydrosystème	20
4.1 Les pluies sur le bassin versant	20
4.2 Étude des relations pluie-débit sur l’Huveaune	22
4.2.1 Un écoulement divisé en deux composantes.....	22
4.2.2 Capacité de rétention du système lors des premières pluies d’automne	23
4.3 Étude des composantes d’écoulement	24
4.3.1 Démarche méthodologique (loi de Maillet)	24
4.3.2 Résultats du calage manuel des coefficients de récession (Roquevaire, Le Charrel)	25
5. Résultats des modèles Pluie-Débit KarstMod	26
5.1 Scénarios testés.....	26
5.2 L’impact de la station de pluie choisie sur la taille du bassin versant des modèles	29
5.3 Roquevaire	30
5.3.1 Comparaison des scénarios testés	30
5.3.2 Le meilleur modèle et ses limites.....	36
5.4 Le Charrel.....	37
5.4.1 Comparaison des scénarios testés	37
5.4.2 Le meilleur modèle et ses limites	42
6. Discussion et conclusion.....	43
7. Bibliographie	45

Résumé

L'Huveaune est un fleuve qui prend sa source dans le massif de la Sainte-Baume et s'écoule jusqu'à Marseille. Le débit du cours d'eau est influencé par l'occupation du sol, le régime des précipitations méditerranéennes et la nature géologique de son bassin versant. L'environnement géologique est carbonaté sur l'ensemble des massifs montagneux du bassin versant de l'Huveaune. De nombreuses formes karstiques marquent le paysage, et le karst s'est aussi développé en profondeur. Cette zone d'étude est particulièrement intéressante pour deux caractéristiques naturelles majeures : (1) le bassin versant topographique de l'Huveaune n'alimente pas uniquement le cours d'eau de surface, et une partie de l'eau qui s'infiltre part vers l'écoulement souterrain régional des sources sous-marines de Cassis, (2) l'Huveaune est un cours d'eau aux fortes variations de débit, en lien direct avec les eaux souterraines karstiques, qui l'alimentent en partie à l'étiage, et qui viennent augmenter l'effet de crues éclair durant les événements pluvieux méditerranéens par transfert rapide dans le karst. L'objectif de ce travail est d'étudier la relation pluie-débit de l'Huveaune aux stations hydrométriques de Roquevaire et d'Aubagne, à l'aide d'un modèle à réservoirs adapté aux hydrosystèmes karstiques. Bien qu'il soit développé initialement pour les sources karstiques, le logiciel KarstMod est utilisé dans cette étude pour réaliser la simulation du débit du cours d'eau de l'Huveaune au pas de temps journalier. Il est ainsi possible de tester si un modèle spécifique pour les sources karstiques permet la modélisation du débit d'une rivière en contexte karstique. KarstMod présente également l'avantage d'avoir un module de calage de la taille optimale du bassin versant, ce qui permet de comparer la taille du bassin versant « réel » simulé, à la taille du bassin versant topographique. Sept structures de modèles ont été testées. La structure la plus adaptée utilise deux composantes d'écoulements lents et une composante d'écoulement rapide. Les simulations sont satisfaisantes, mais certains pics de crues sont mal simulés en périodes de basses-eaux et lors de crues extrêmes. Les bilans hydriques sont toutefois équilibrés et permettent de calculer qu'environ 50% de la surface du bassin versant topographique ne contribue pas au débit de l'Huveaune. Ces résultats restent sensibles à la pluie utilisée et à la capacité de stockage du sol et de l'épikarst.

1. Introduction

L'Huveaune est un fleuve d'environ 50 km de longueur en région PACA, s'écoulant au sud-ouest du département du Var jusqu'à Marseille dans les Bouches-du-Rhône. Il prend sa source dans le massif de la Sainte-Baume et se jette dans la mer Méditerranée au niveau de la plage du Prado à Marseille. Son bassin versant topographique représente 513 km², culminant à 1148 mètres d'altitude. L'environnement géologique est carbonaté sur l'ensemble des massifs montagneux (terrains du Trias au Crétacé supérieur), tandis que dans les plaines (Auriol-Saint Zacharie, La Bouilladisse, Aubagne) les dépôts sont mixtes entre des sédiments lacustres et des alluvions (d'âge Oligocène et Quaternaire). Les terrains carbonatés, majoritaires dans la région, sont fortement karstifiés. Cet environnement carbonaté karstique favorise des écoulements souterrains dans des directions indépendantes des bassins versants topographiques (Coulier 1985, Cavalera 2007, Arfib et Charlier 2016). Le bassin versant topographique de l'Huveaune se trouve ainsi superposé avec le bassin versant hydrogéologique des sources sous-marines de Cassis (Port-Miou et Bestouan). Cette caractéristique a deux conséquences : (1) le bassin versant topographique de l'Huveaune n'alimente donc pas uniquement le cours d'eau de surface, et une partie de l'eau qui s'infiltre part vers l'écoulement souterrain régional de Cassis, (2) l'Huveaune est alimentée par

des sources karstiques (directement ou via des affluents) qui confèrent au cours d'eau une dynamique karstique.

Les aquifères karstiques présents sur le territoire constituent une part très importante des réserves en eau souterraine de la région, et ont été classés ressource en eau stratégique au SDAGE. L'écoulement de l'eau souterraine dans les formations carbonatées est classiquement lié à deux composantes : un écoulement lent dans la porosité intragranulaire et la microfracturation, et rapide dans les conduits karstiques ou les zones de fractures ouvertes. En surface, les formes karstiques sont également présentes, par exemple des zones de gorges ou des zones d'infiltration rapide dans les lapiaz et ponors des poljés et dolines. Ce contexte karstique favorise l'infiltration de l'eau de pluie, qui est ensuite restituée en pied de versants autour de la Sainte-Baume au niveau de sources. Certaines de ces sources sont pérennes, comme la source Saint-Pons à Gémenos ou la source des Encanaux inférieurs à Auriol, alors que la plupart des autres sont temporaires, à sec durant la période estivale (par exemple la source de l'Huveaune dans le Vallon de la Castelette). Toutes ces sources sont connues pour avoir de fortes variations de débit, qui amplifient les crues dans l'Huveaune lors des précipitations. De plus, les fortes pentes sur les versants des collines favorisent le ruissellement sur de courtes périodes durant les pluies intenses. Enfin, la vallée de l'Huveaune est l'axe urbanisé majeur de la partie Est de la métropole Aix-Marseille-Provence, qui relie Marseille aux villes avoisinantes (Aubagne, Roquevaire, Auriol, La Bouilladisse...), formant une bande continue où l'occupation anthropique a fortement imperméabilisé les sols. L'Huveaune est ainsi le cours d'eau récepteur de l'ensemble du réseau d'évacuation des eaux de ruissellement urbain (à la rare exception des zones d'infiltration souterraine temporaires du sud de la plaine d'Aubagne).

Le climat Méditerranéen est un climat tempéré, caractérisé par des hivers doux et des étés chauds, avec une saison sèche estivale particulièrement longue. La pluie moyenne interannuelle est de l'ordre de 600mm/an en plaine, avec moins de 60 jours de pluie par an (Météo-France, 2021). Les précipitations sont hétérogènes, à l'échelle saisonnière comme pluriannuelle. Les précipitations sont maximales à l'automne et au printemps. Des périodes de sécheresse peuvent s'étaler sur plusieurs années civiles lorsque l'automne reste sec. La particularité majeure des précipitations est leur intensité qui peut dépasser 100 mm/jour au cours d'événements pluvieux méditerranéens.

Le débit des cours d'eau du bassin de l'Huveaune est donc directement influencé par ces contextes géologiques et climatiques. En dehors des périodes de pluie, l'alimentation en eau de l'Huveaune est assurée par les eaux souterraines (sources karstiques, nappes alluviales locales). Les périodes de sécheresse climatique génèrent de forts étiages, avec des zones d'assecs sur l'Huveaune et ses affluents (par exemple entre la source de l'Huveaune dans le vallon de la Castelette et l'amont de Saint-Zacharie, ou sur le Merlançon de la Bouilladisse). Tandis que durant les événements pluvieux méditerranéens, le débit augmente soudainement dans les cours d'eau, du fait de l'intensité forte des pluies qui génère du ruissellement et une forte recharge des karsts. Toutefois, la réaction de la rivière n'est pas linéaire, certains épisodes pluvieux de fin d'été sont majoritairement stockés sur le bassin versant, comme c'est observé sur de nombreux hydrosystèmes en contexte karstique (par exemple les sources du Las à Toulon (Baudement et al. 2018), la source du Lez à Montpellier). En zone urbaine, les événements pluvieux intenses peuvent produire des crues rapides intenses et courtes, alors que le reste du bassin versant karstique ne réagit pas (exemple du Las, Dufresne et al. 2020 ; ou l'Huveaune à Aubagne, Fabrègue et Raymond, 2014). Le débit de l'Huveaune dans sa partie en amont d'Aubagne est connu grâce à 3 stations hydrométriques entretenues par la DREAL. Les données de ces stations sont accessibles gratuitement sur la banque hydro, au pas de temps horaire et journalier. Deux stations météorologiques, à Aubagne et au Plan d'Aups, donnent accès aux précipitations et à

divers paramètres climatiques. Toutes ces données permettent ainsi d'étudier le fonctionnement hydrologique du cours d'eau, en recherchant la relation pluie-débit de l'hydrosystème.

Différents outils et méthodes existent pour faire une modélisation pluie-débit sur un cours d'eau (Mouelhi, 2003), à différents pas de temps (pluriannuel, annuel, mensuel, journalier voire horaire) et des niveaux variés de discrétisation spatiale (globaux, semi-distribués ou distribués). Les modèles globaux ont l'avantage de proposer une transformation du signal de pluie en débit à l'aide de peu de paramètres de calage. La modélisation pluie-débit permet d'une part de procéder à l'exploration de scénarios de prévisions du débit, et d'autre part de tester des modèles conceptuels censés représenter le fonctionnement du système. La modélisation est donc un outil pour tester des hypothèses, et valider le degré de compréhension du fonctionnement de l'hydrosystème. Enfin, la modélisation apporte une quantification de certains paramètres qui peuvent être associés à des grandeurs physiques réelles, comme par exemple l'évapotranspiration réelle, la capacité de rétention du sol ou la surface de la zone de recharge. La modélisation pluie-débit, classiquement appliquée pour les cours d'eau, est également appliquée pour la simulation du débit des sources karstiques (Fleury, 2007, Tritz 2011, Hartmann et al. 2012). Le Service National d'Observation (SNO) KARST (Jourde et al. 2019) a développé un outil de modélisation spécifiquement adapté aux aquifères karstiques, basé sur le transfert de l'eau à travers des réservoirs (ou compartiments) emboîtés ou en parallèles, représentant des écoulements lents et rapides. Les lois d'écoulement peuvent être linéaire ou non linéaire. Ce logiciel, KarstMod (Mazzilli et al. 2019), a été utilisé avec succès pour simuler diverses sources karstiques (Mazzilli et al. 2019, Baudement et al. 2017).

Le bassin versant de l'Huveaune a pour caractéristique majeure d'être un bassin versant karstique. Dans ce contexte, la dynamique du cours d'eau est fortement influencée par la dynamique des aquifères karstiques. L'objectif de ce travail est d'étudier la relation pluie-débit de l'Huveaune aux stations hydrométriques de Roquevaire et d'Aubagne, à l'aide d'un modèle à réservoirs adapté aux hydrosystèmes karstiques. La modélisation ne vise pas ici à simuler la propagation des ondes de crues entre les deux stations, comme l'avait proposé Charlier et al. (2013). Il ne s'agit pas non plus d'étudier uniquement les crues, ni de prévoir les crues extrêmes en fonction de périodes de retour des précipitations, comme proposé dans l'étude EGIS (Fabrègue et Raymond 2014). Dans cette nouvelle étude, le débit de l'Huveaune au pas de temps journalier est simulé sur une période de plus de dix ans (de 2008 à 2020). Bien qu'il soit développé initialement pour les sources karstiques, le logiciel KarstMod est utilisé ici pour réaliser la simulation du débit du cours d'eau. Il sera ainsi possible de tester si un modèle spécifique pour les sources karstiques permet la modélisation du débit d'une rivière en contexte karstique. KarstMod présente également l'avantage d'avoir un module de calage de la taille optimale du bassin versant, ce qui permettra de comparer la taille du bassin versant « réel » simulé, à la taille du bassin versant topographique. Les différences attendues sont liées à la superposition des bassins versants topographiques de l'Huveaune et du bassin versant hydrogéologique des sources de Cassis (Port-Miou). Cette modélisation de l'Huveaune vient donc apporter des éléments de connaissance sur le bassin versant de l'Huveaune et sur le bassin versant régional des écoulements souterrains.

2. Présentation générale du fonctionnement hydrologique de l'Huveaune et des hydrosystèmes associés

2.1 Présentation générale du bassin versant de l'Huveaune

2.1.1 Les limites du bassin versant de l'Huveaune et l'occupation du sol

L'appellation « bassin versant de l'Huveaune » correspond au bassin versant topographique de l'Huveaune. Celui-ci s'étend vers l'Est jusqu'au versant nord du massif de la Sainte-Baume, au nord sur le massif de l'Etoile et d'Allauch-Garlaban, au nord-est sur le flanc sud du Regagnas et du Mont Olympe, et au sud sur le massif des Calanques. L'ensemble de ce territoire couvre une surface de 513 km². Ce contour topographique est légèrement différent du bassin versant administratif inclus dans le périmètre de gestion du Syndicat mixte du bassin versant de l'Huveaune (SMBVH). Ce dernier s'étend au sud-est sur la commune de Cuges jusqu'à Riboux, et inclut donc la zone endoréique de la plaine de Cuges (appelée polje de Cuges, en référence à sa forme karstique particulière).

L'occupation du sol est illustrée sur la Figure 1 et se répartit en trois grandes catégories : les zones urbanisées, les zones agricoles et les zones naturelles (végétation de garrigue ou forêt). Les zones agricoles représentent une très faible superficie, de quelques %, principalement situées dans les plaines. A aval d'Aubagne, le tissu urbain est continu dans toute la vallée de l'Huveaune puis s'étale sur la ville de Marseille. En amont d'Aubagne, le tissu urbain est discontinu, principalement situé le long de l'Huveaune (Aubagne, Roquevaire, Auriol, Saint Zacharie) et de ses affluents le Fauge (Gémenos) et le Merlançon de la Bouilladisse (La Destrousse et la Bouilladisse). Le bassin versant en amont d'Aubagne est majoritairement naturel, occupé par les garrigues et les forêts sur terrain calcaire.

Bassin versant de l'Huveaune

Occupation des sols

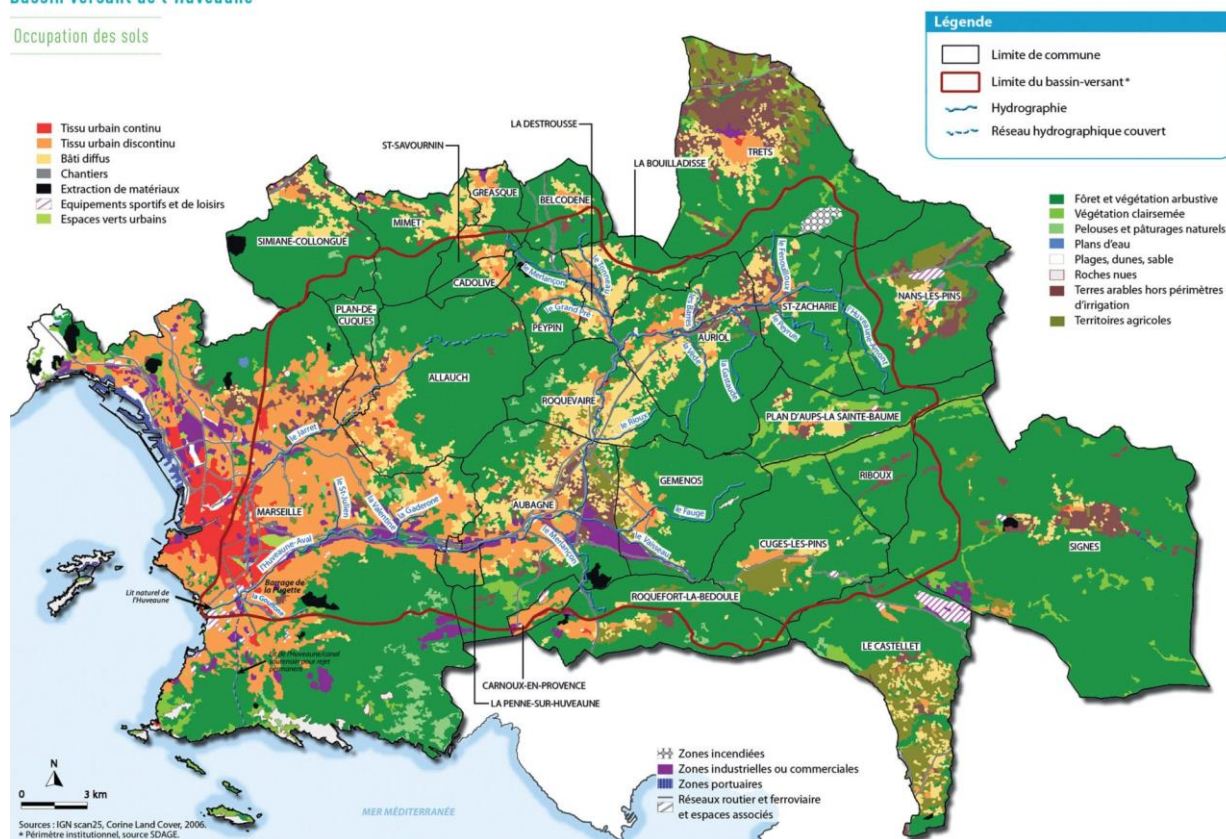


Figure 1 : L'occupation du sol sur les communes du bassin versant de l'Huveaune (extrait du Contrat de rivière Huveaune, 2015)

2.1.2 Le contexte géologique

La géologie de la région a été décrite dans de nombreuses publications, thèses et récemment dans la révision de la carte géologique 1/50.000^{ème} d'Aubagne-Marseille (3^{ème} édition, Villeneuve et al. 2018). Dans ce rapport, le détail du contexte géologique n'est pas donné. L'objectif de cette courte partie sur le contexte géologique est de montrer que le bassin versant de l'Huveaune se développe en contexte carbonaté karstique.

La carte géologique au 1/250.000 permet d'identifier quatre grandes unités structurales (Figure 2) :

- L'Unité du Beausset au sud, formant une unité synclinale au flanc nord quasiment monoclinale à pendage sud jusqu'à la mer. Les roches sont exclusivement carbonatées, d'âge Jurassique supérieur à Crétacé supérieur à l'affleurement.
- Le Massif de la Sainte-Baume et les massifs carbonatés alentours (Régagnas, Agnis, Allauch-Etoile) sont caractérisés par leurs complexités structurales, liées aux grands chevauchements provençaux du sud vers le nord. Les roches sont carbonatées, d'âge Trias à Crétacé supérieur, avec quelques niveaux à gypse dans le Trias.
- Le bassin oligocène de Marseille-Aubagne est une vaste structure géologique en subsidence, de direction Est-Ouest, d'âge Oligocène. Les dépôts oligocènes remontent au nord dans les zones en dépression topographique jusqu'à La Bouilladisse et Auriol-St Zacharie. Les terrains sont mixtes : carbonates, grès, argile, alluvions anciennes.
- Localement le long de l'Huveaune et dans la plaine d'Aubagne, des dépôts quaternaires recouvrent les terrains plus anciens sous-jacents.

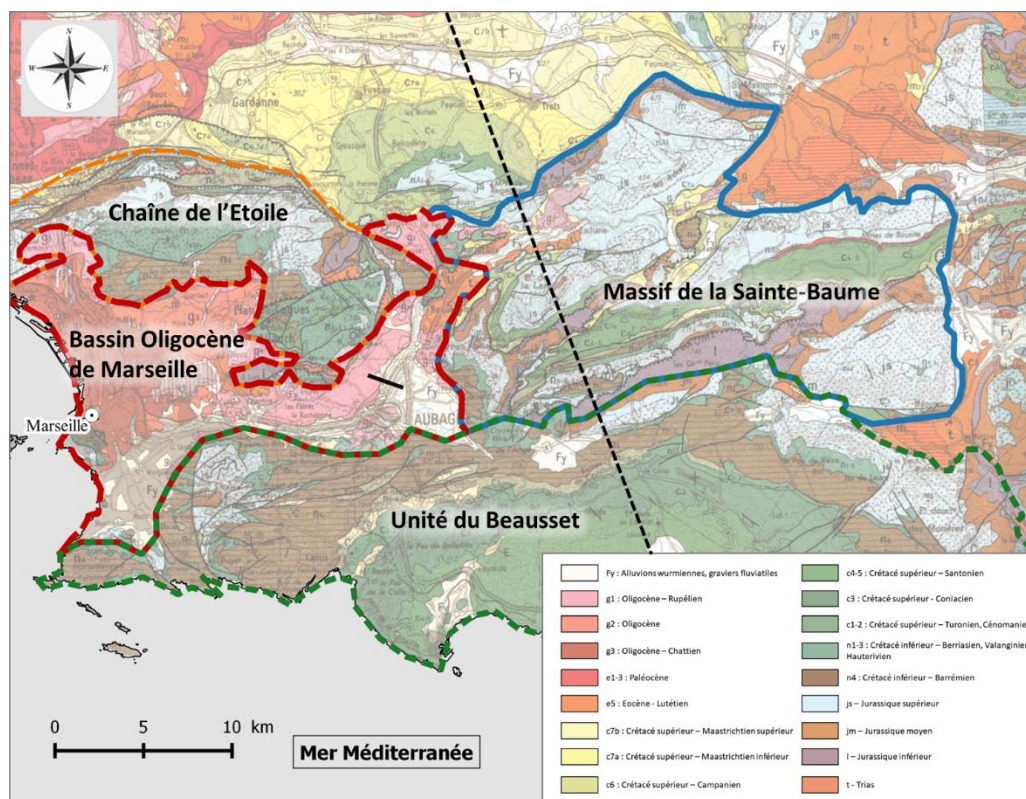


Figure 2 : Carte géologique au 1/250 000 (source : Infoterre). Les limites approximatives des unités structurales sont tracées : l'Unité du Beausset en vert foncé, le bassin Oligocène de Marseille-Aubagne en rouge, le massif de la Sainte-Baume étendu aux

Monts Régagnas-Olympe- Aurélien et de l'Agnis en bleu et le massif de l'Etoile en orange. L'emplacement d'une récente coupe géologique faite à l'échelle de la Provence est représenté en trait pointillé noir (Bestani et al., 2016). [carte réalisée par T. Garin, 2019]

La coupe géologique de Bestani et al. (2016) présentée en Figure 3 met en évidence la complexité des structures géologiques et l'impact de la compression pyrénéo-provençale sur la région, avec de grands chevauchements du sud vers le nord et des structures plissées. Un point à remarquer est la présence de terrains triasiques salifères qui ont servi de couche de décollement aux terrains jurassiques et crétacés pour la mise en place des chevauchements.

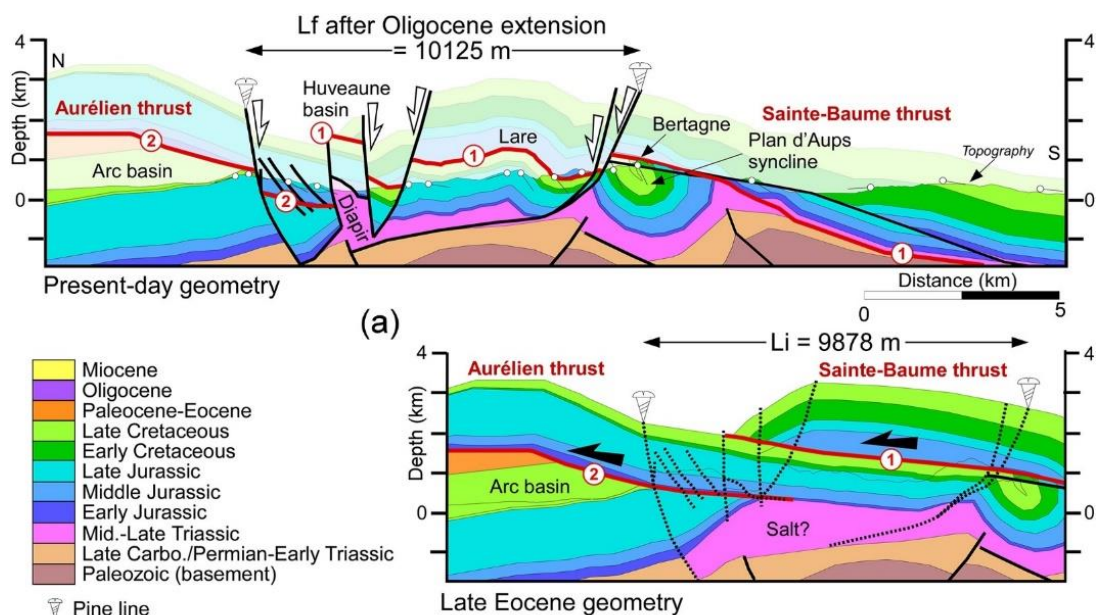


Figure 3 : Exemples de restauration du chevauchement pyrénéo-provençal (trait rouge). Les chevauchements de la Sainte-Baume (1) et de l'Aurélien (2) sont déformés par un ensemble de failles normales à fort pendage et comprennent des remontées de sel du Trias notamment au niveau du bassin de l'Huveaune (d'après Bestani et al., 2016).

2.1.3 L'Huveaune et ses affluents

L'Huveaune est un cours d'eau peu ramifié avec uniquement quelques affluents pérennes (Le Fauge à Gémenos, la Vède à Auriol, le Peyruis à Saint Zacharie). Durant la période hivernale, l'extrême amont de l'Huveaune se trouve dans le vallon de la Castelette, au niveau des sources de l'Huveaune, et le Merlançon de la Bouilladisse (affluent rive droite) coule également pendant quelques mois (suivant les années). Les autres affluents (La Gastaude, Vallon de Fenouilloux, ruisseau des Barres) coulent généralement durant moins longtemps. Tous ces cours d'eau ont un débit très variable durant les épisodes pluvieux méditerranéens, où transitent des crues rapides liées au ruissellement, localement amplifiées par les apports d'eau souterraine karstique. Les différentes masses d'eau souterraine identifiées au SDAGE sont représentées sur la Figure 4.

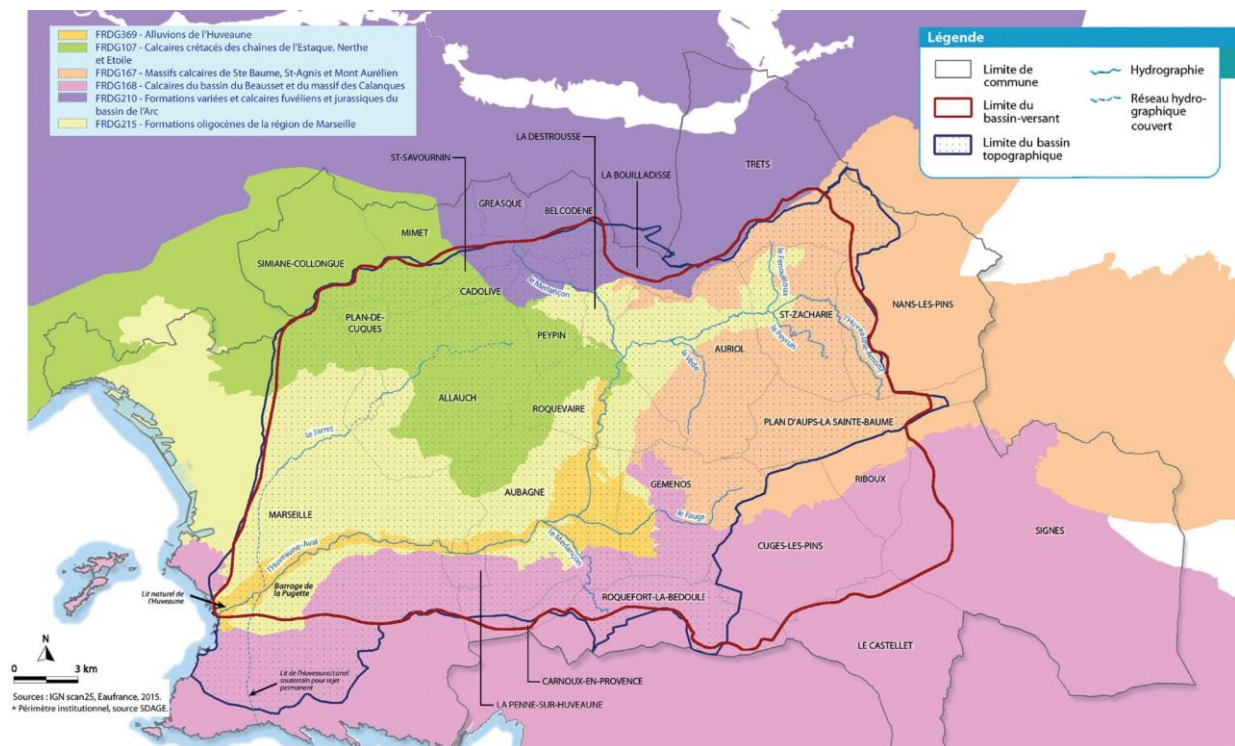


Figure 4 : Localisation des masses d'eau souterraines sur le bassin versant de l'Huveaune, et des cours d'eau affluents de l'Huveaune. Le tracé rouge du bassin versant est le bassin versant administratif du SMBVH. Le tracé noir correspond aux limites du bassin versant topographique. Carte extraite du Contrat de rivière 2015, [mise à jour en 2019](#).

2.2 Les stations de mesure sur le bassin versant de l'Huveaune (météo et débit)

L'étude du comportement hydrologique du bassin versant de l'Huveaune en amont d'Aubagne par modélisation pluie-débit nécessite des données de débit, de précipitations et d'évapotranspiration. Les stations météorologiques Météo-France du Castellet aérodrome, du Plan d'Aups et d'Aubagne ont été sélectionnées (Figure 5, Tableau 1) car elles permettent d'apprécier globalement la variabilité temporelle et spatiale à l'échelle du bassin versant. D'autres stations pluviométriques existent mais elles n'étaient pas disponibles dans le cadre de cette étude.

Les trois stations hydrométriques DREAL de mesure du débit de l'Huveaune se trouvent à Saint Zacharie (Le Moulin Blanc), Roquevaire et Aubagne-Le Charrel (Tableau 4). Seules deux stations pouvaient être étudiées dans le temps imparti par cette étude. La station la plus en amont, Saint Zacharie, n'a pas été sélectionnée car elle présente le débit le plus faible et le bassin versant topographique d'environ 55 km². Les deux autres stations (Tableau 2, Tableau 3) correspondent à des sous-bassins topographiques de versants de l'Huveaune compris entre 165 et 245 km² (Tableau 5). La délimitation des bassins versants topographiques associés à chaque station a été faite avec le MNT et l'outil ArcSwat de ArcGis (Figure 5). La taille des sous-bassins versants calculée par ArcGIS diffère légèrement des tailles données par la DREAL sur la banque hydro. La différence est faible et sera négligeable pour cette étude. L'information cartographique du MNT a été également utilisée pour déterminer l'altitude médiane de chaque bassin versant (Tableau 5).

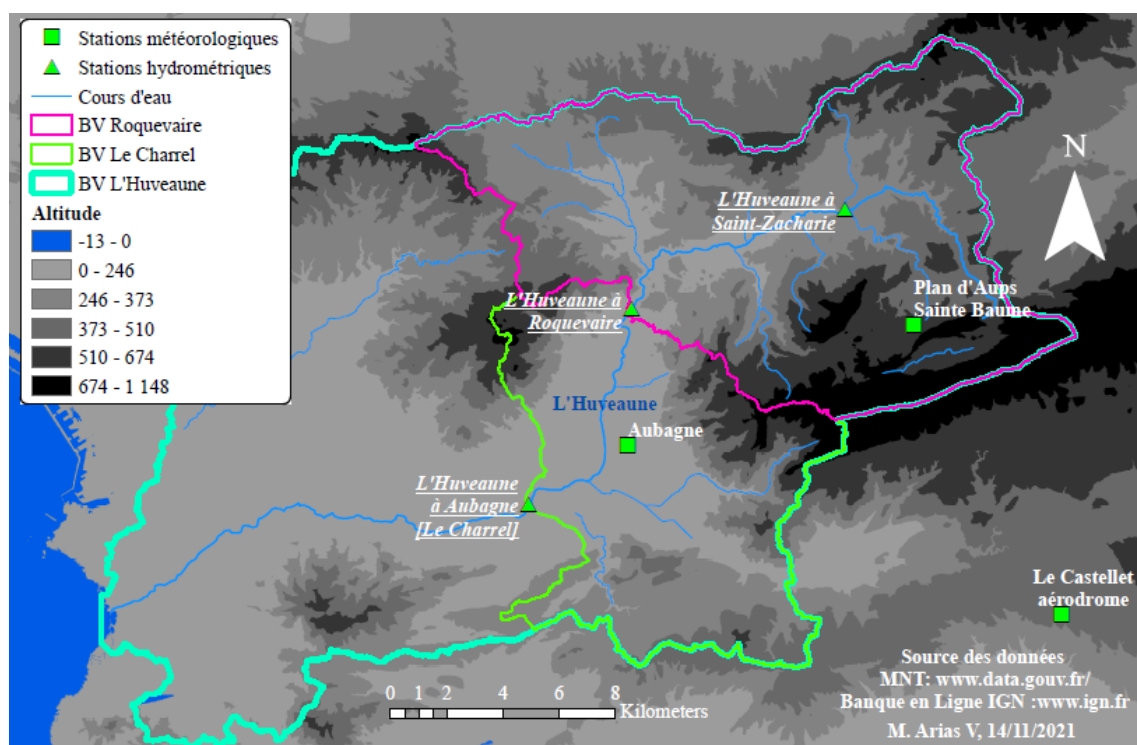


Figure 5 : Stations météorologiques et hydrométriques utilisées pour cette étude

Tableau 1 : Période des données disponibles de Pluie et ETP.

Station	Longitude	Latitude	Altitude (mètre NGF)	Données depuis :	Jusqu'à :
Plan d'Aups	5.7282	43.3427	605	01/09/2007	16/02/2021
Le Castellet	5.785	43.2514	417	01/01/2004	14/02/2021
Aubagne	5.601	43.3074	128	01/01/2001	31/12/2020

Tableau 2 : Présentation de la station hydrométrique Roquevaire (<http://www.hydro.eaufrance.fr/stations/Y4414030>)

Description	Données hydrologiques
Département: Bouches-du-Rhône (13) Code Station : Y4414030 Commune : Roquevaire Cours d'eau : L'Huveaune Mise en service : 12/12/1900 Type : station à une échelle Statut: station avec signification hydrologique Régime influencé : pas ou faiblement Altitude : 151 m Bassin-versant topographique : 165 km ²	Finalité : Hydrométrie générale Année hydrologique : Septembre-Août Loi utilisée pour le module : Galton Année d'étiage : Janvier-Décembre Loi utilisée pour les étiages : Galton Loi utilisée pour les crues : Gumbel Qualité globale des mesures : en basses eaux : bonne en moyennes eaux : bonne en hautes eaux : bonne

Tableau 3 : Présentation de la station hydrométrique Le Charrel (<http://www.hydro.eaufrance.fr/stations/Y4424040>)

Description	Données hydrologiques
Département: Bouches-du-Rhône (13)	Finalité : Hydrométrie générale et annonce de crue

Description	Données hydrologiques
Code Station : Y4424040 Commune : Aubagne Cours d'eau : L'Huveaune Mise en service : 01/01/1997 Type : station à une échelle Statut : station avec signification hydrologique Régime influencé : fortement en étiage Altitude : 92 m Bassin-versant topographique : 245 km ²	Année hydrologique : Septembre-Août Loi utilisée pour le module : Galton Année d'étiage : Janvier-Décembre Loi utilisée pour les étiages : Galton Loi utilisée pour les crues : Gumbel Qualité globale des mesures : en basses eaux : bonne en moyennes eaux : bonne en hautes eaux : bonne

Tableau 4 : Période des données de débit de l'Huveaune disponibles pour cette étude.

Station	Données depuis :	Jusqu'à :
Le Moulin Blanc (Saint Zacharie)	02/01/2006	01/11/2020
Roquevaire	29/09/1994	01/11/2020
Le Charrel	01/01/1999	01/11/2020

Tableau 5 : Caractéristiques des bassins versants

Station	Surface (en km ²)		Altitude Médiane (mètres)
	ArcGis	DREAL	
Le Moulin Blanc Saint Zacharie	56	55	545
Roquevaire	167	165	439
Le Charrel	280	245	388

2.3 Caractéristiques climatiques et hydrologiques de l'hydrosystème

2.3.1 Données disponibles

La période étudiée s'étale du 2007 à 2020. Avant 2007, la station météorologique du Plan d'Aups n'existait pas, ce qui complexifie la détermination d'une pluie et ETP de référence dans la partie amont du bassin versant. Il a donc été décidé de travailler sur la modélisation de l'hydrosystème qu'à partir de 2007.

Quelques rares données d'évapotranspiration sont manquantes pour la station du Plan d'Aups : du 08/10/2008 au 14/10/2008, le 26/11/2010, 29/11/2010, et 08/06/2011. Dans ce cas, grâce à la faible variabilité régionale de l'ETP, les données manquantes ont été complétées par celles enregistrées à ces mêmes dates au Castellet.

Pour les débits (stations DREAL), il y a peu de données manquantes à partir de 2008 : Roquevaire du 30/05/2018 au 09/06/2018, Le Charrel le 30/12/2008. Les jours sans données de débit ont été laissés vides.

2.3.2 Evapotranspiration

Les graphiques ci-dessous (Figure 6) montrent la moyenne interannuelle de l'évapotranspiration journalière pour Le Castellet (2004-2020) et le Plan d'Aups (2008-2020). Les deux stations ont la même allure : l'ETP est maximale en été et minimale en hiver. L'écart entre les deux stations est faible, l'ETP est un paramètre de faible variabilité régionale.

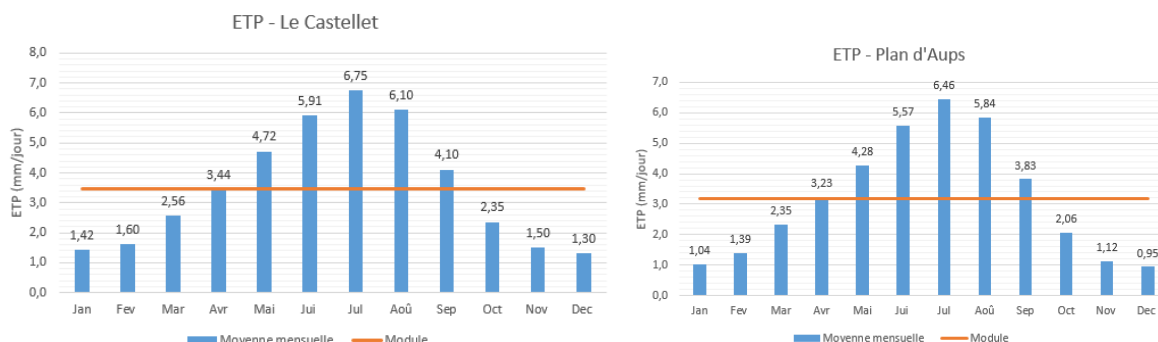


Figure 6 : Représentation graphique de l'ETP journalière moyenne par mois (données pluriannuelles) aux stations météorologiques du Castellet et du Plan d'Aups.

2.3.3 Précipitations

Les données de pluie moyenne mensuelle des trois stations montrent un comportement saisonnier très similaire : un maximum de pluie moyenne entre octobre et décembre et une période sèche entre juin et août (moins de 20 mm en moyenne en juillet et en août quelle que soit la localisation de la station).

L'effet orographique sur la pluie est évident, avec des précipitations les plus fortes au Plan d'Aups (605m d'altitude). La différence entre les cumuls de pluie au Castellet (417 m, sud Sainte-Baume) et à Aubagne (130 m) est beaucoup moins marquée. Cette tendance est visible sur les données moyennes mensuelles (Figure 7) et sur les données moyennes annuelles (Figure 8). Les données annuelles entre 2008 et 2020 illustrent également la variabilité temporelle des précipitations : le cumul annuel varie du simple au double entre les années sèches et les années pluvieuses. L'année 2017 se démarque comme une année très peu pluvieuse (380mm à Aubagne, 466mm au Castellet, 655mm au Plan d'Aups), ainsi que l'année 2020 ; tandis que les années 2014 et 2018 sont les plus arrosées (en 2018 : 919mm au Castellet, 1077 mm à Aubagne, 1305 mm au Plan d'Aups).

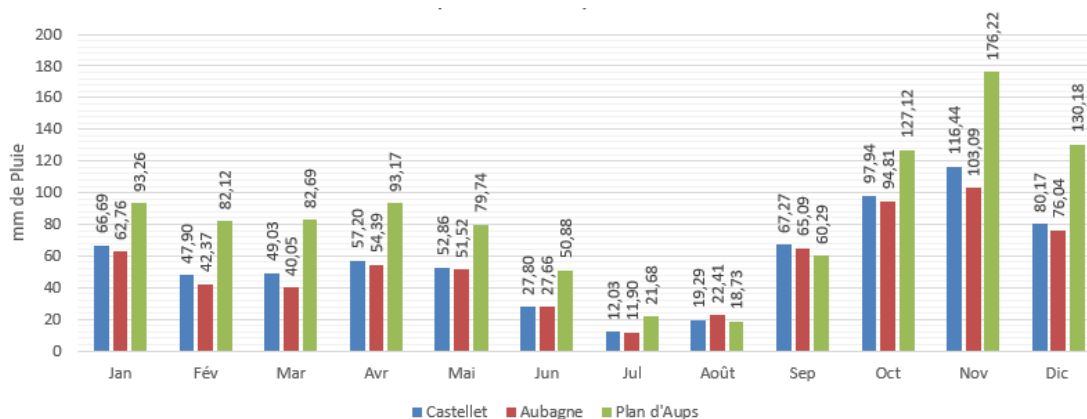


Figure 7 : Représentation graphique des précipitations mensuelles interannuelles des différentes stations météorologiques (Aubagne 2001-2020, Le Castellet aéroport 2000-2020, Plan d'Aups 2008-2020).

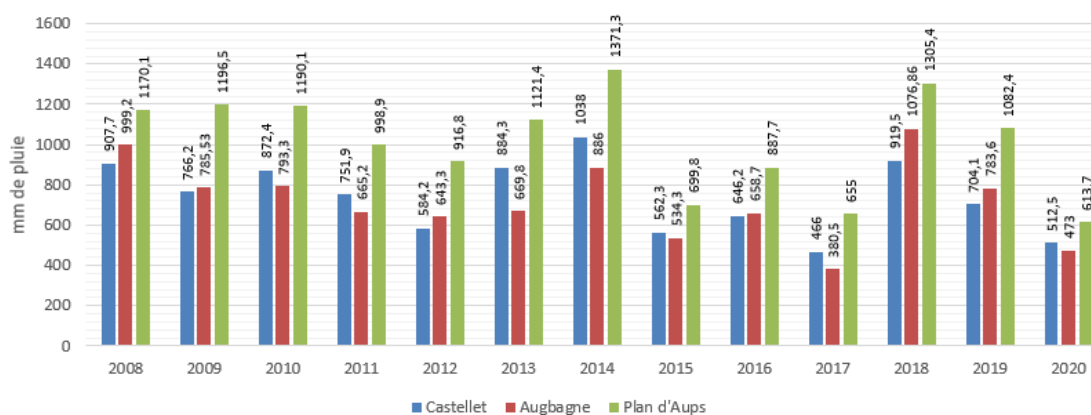


Figure 8 : Pluie annuelle mesurée sur les stations météorologiques du Castellet aéroport, Aubagne et Plan d'Aups Sainte-Baume (données Météo-France).

2.3.4 Débit de l'Huveaune

Le débit moyen interannuel (ou module) des trois stations disponibles (Moulin Blanc à Saint Zacharie, Roquevaire, Le Charrel à Aubagne) est respectivement de 0,37 m³/s, 0,81 m³/s, 1,09 m³/s. Le débit moyen augmente de l'amont vers l'aval, mais la croissance n'est pas directement proportionnelle à la surface du bassin versant topographique. Un comportement saisonnier similaire est observé dans les trois stations, avec une valeur maximum de débit moyen mensuel pluriannuel en décembre ou janvier, une période de hautes eaux entre novembre et mai, et une période de basses eaux estivale. Les données journalières, non présentées ici, montrent que certaines années la période de basses eaux perdure dans un étiage automnal, voire hivernal. Toujours à l'échelle journalière, les crues extrêmes peuvent atteindre 50 m³/s à Aubagne mais elles n'ont pas lieu chaque année.

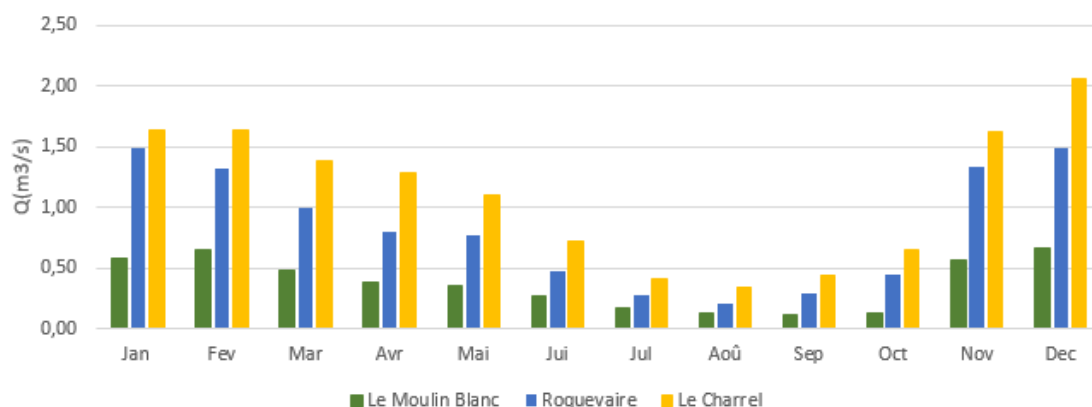


Figure 9 : Débit moyen mensuel pluriannuel des stations hydrométriques de l’Huveaune (de l’amont vers l’aval : Le Moulin Blanc à Zaint Zacharie, Roquevaire, Le Charrel à Aubagne).

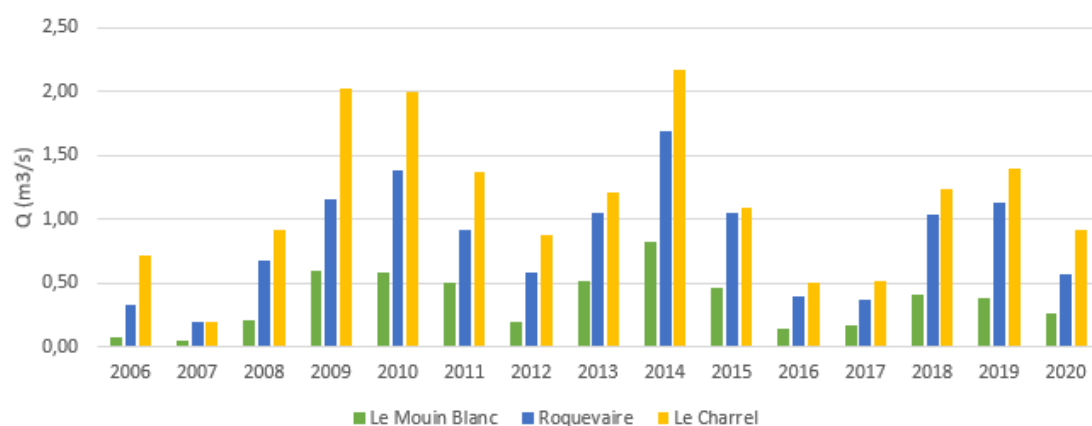


Figure 10 : Débit moyen annuel des différentes stations.

Le débit moyen annuel présenté dans la Figure 10 illustre les fortes variabilités interannuelles. Celles-ci sont en lien avec la variabilité interannuelle des précipitations. Toutefois, les données de débit ne sont pas complètes (données non disponibles sur la banque hydro), et les périodes de lacunes de données peuvent influencer les résultats présentés (par exemple en 2007 à la station du Charrel il manque les données de janvier à mai, durant la période habituellement ayant un débit élevé).

2.4 Relations entre le bassin versant topographique de l’Huveaune et le bassin versant hydrogéologique de Port Miou (Cassis)

Exposer les grandes caractéristiques du bassin versant de l’Huveaune nécessite de citer le bassin versant hydrogéologique des sources sous-marines de la baie de Cassis (Port-Miou et Bestouan). En effet, les sources de la baie de Cassis sont les exutoires régionaux de la basse-Provence calcaire, qui drainent un bassin versant qui se superpose à celui de l’Huveaune (Cavalera 2007, Arfib et Charlier 2016, Arfib 2018). Une surface de bassin versant de l’ordre de 400 km² a été proposée pour alimenter les sources de Cassis. Des travaux scientifiques sont toujours en cours pour déterminer les modalités de recharge de cet aquifère régional et les mélanges entre les différentes masses d’eau souterraine de la Sainte-Baume, de la plaine d’Aubagne et des Calanques (par exemple le projet Karst-Huveaune et la thèse de Thibaut Garin, 2018-2022). Toutefois, il est déjà admis que les précipitations infiltrées sur la Sainte-Baume peuvent en partie

transiter par la voie souterraine entre l'unité géologique de la Sainte-Baume et l'unité du Beausset-Calanques à travers les zones de chevauchements géologiques (Cavalera 2007). De plus, la nature carbonatée des roches, et l'histoire géologique de la région depuis le Crétacé, ont permis la mise en place d'écoulements karstiques dans des zones structurales ou lithologiques fragiles au sein de l'aquifère multicouches, et jusqu'à des profondeurs importantes sous le niveau de la mer actuelle (par exemple le karst de Port-Miou a été exploré jusqu'à -235 m de profondeur).

La Figure 11 donne un aperçu des contours des bassins versants de Port-Miou et de l'Huveaune.

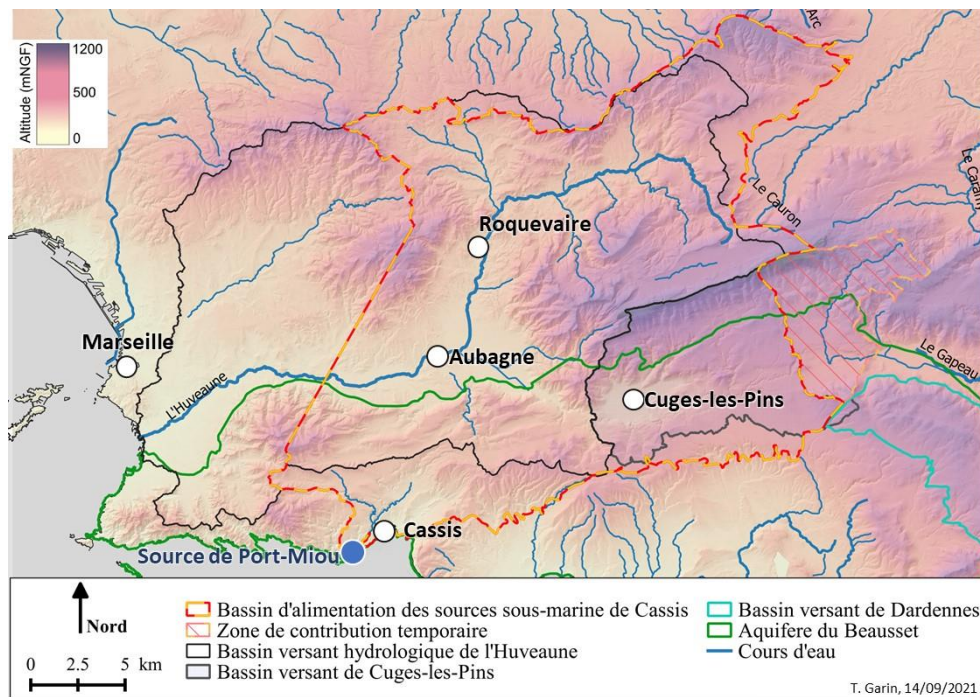


Figure 11 : Bassin versant hydrogéologique de Port Miou, proposé par Arfib, Garin et Jouves en 2021

3. Méthode : la modélisation pluie-débit avec KarstMod

La modélisation Pluie-Débit vise à simuler le débit d'un cours d'eau ou d'une source en fournissant au modèle la pluie tombée sur le bassin versant. Le modèle est une simplification de la réalité. Le développement du modèle repose généralement sur trois éléments (Perrin, 2000) : (1) La connaissance du système à partir de la mesure de ses caractéristiques et l'acquisition de données sur les flux, les stocks et les transformations de phase ; (2) l'objectif de modélisation ou les questions auxquelles le modèle cherche à répondre ; (3) la formulation de la réalité la plus satisfaisante relativement aux objectifs fixés en terme de généralité, de réalisme et de précision.

Dans ce travail, la modélisation Pluie-Débit est réalisée à l'aide d'un modèle global de type conceptuel à réservoirs. Le modèle est « global » car le bassin versant est pris comme une entité unique sur laquelle tombe une pluie caractéristique (et une ETP). Le modèle est conceptuel car le débit est expliqué comme la somme d'écoulements caractéristiques typiques d'un hydrosystème (Figure 12) : (1) précipitation sur le sol (et l'épikarst dans le cas d'un aquifère karstique) où l'eau de pluie va être temporairement retenue, puis va repartir par évapotranspiration et écoulements (2) des écoulements rapides par ruissellement sur le sol et par écoulement souterrain dans le réseau de conduits connectés du karst, (3) des écoulements lents à travers la zone peu transmissive de l'aquifère (milieu poreux et matrice microfracturée du karst).

Enfin le modèle est à réservoirs car le stockage de l'eau et son écoulement à travers l'hydrosystème sont représentés comme le remplissage et la vidange d'eau dans une série de réservoirs percés d'un orifice, interconnectés entre eux (en parallèle ou en série). Les lois d'écoulement à la sortie de chaque réservoir peuvent être linéaires ou non linéaires, et contraintes par des seuils d'activation.

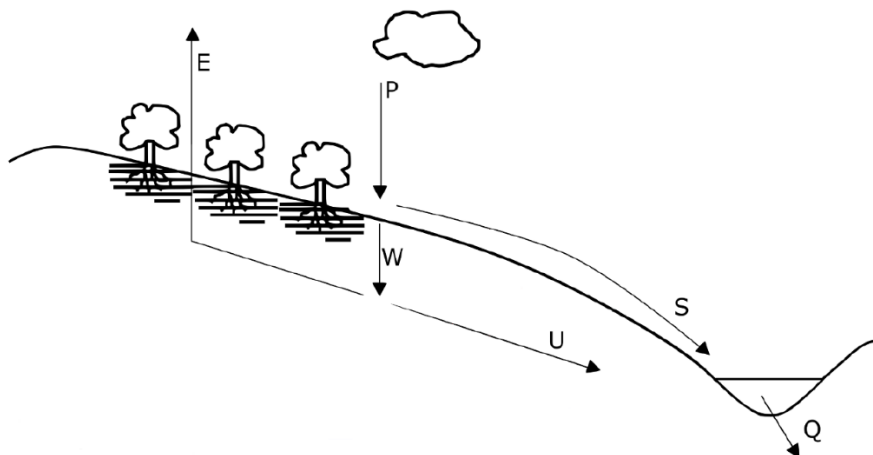


Figure 12 : Théorie de la division du bilan hydrique à l'échelle d'un bassin versant (schéma en coupe). Précipitations (P), Ruissellement ou écoulement de surface (S), Eau dans le sol (W), Écoulements souterrains (U), Évapotranspiration (E). L'addition de U et S donne le débit total du cours d'eau (Q). D'après Le Mesnil et al., 2020.

Les modèles Pluie-Débit conceptuels à réservoirs sont classiquement utilisés depuis les années 1960. Certains modèles ont pu avoir de nombreux paramètres de calage (exemple du modèle BEMER à 22 paramètres, Bezès 1976), mais il est préconisé d'éviter le sur-paramétrage ce qui donne alors des modèles parcimonieux à seulement quelques paramètres. Les modèles GR ont été largement appliqués à la simulation du débit des cours d'eau (Perrin et al. 2003), en particulier le modèle GR3J ou GR4J (modèles à 3 ou 4 paramètres, au pas de temps journalier). Toutefois les modèles GR utilisent par défaut la taille du bassin versant comme une donnée d'entrée fixée, et non pas comme un paramètre de calage. Il est donc proposé dans ce travail d'utiliser un autre modèle Pluie-Débit, qui soit spécifique au contexte karstique de l'hydrosystème étudié, et qui propose le calage de la taille du bassin versant. La plateforme de modélisation KarstMod (ou logiciel KarstMod) a donc été utilisée (version V.2.2.0.u). Elle reprend le schéma général d'écoulement et de stockage à travers des réservoirs. La Figure 13 illustre les différents types d'écoulement que l'utilisateur peut sélectionner sur KarstMod. Bien qu'elle ait été initialement développée pour la simulation du débit des sources karstiques, la plateforme KarstMod propose les mêmes types d'écoulements que ceux classiquement utilisés pour les rivières : sol, lent et rapide.

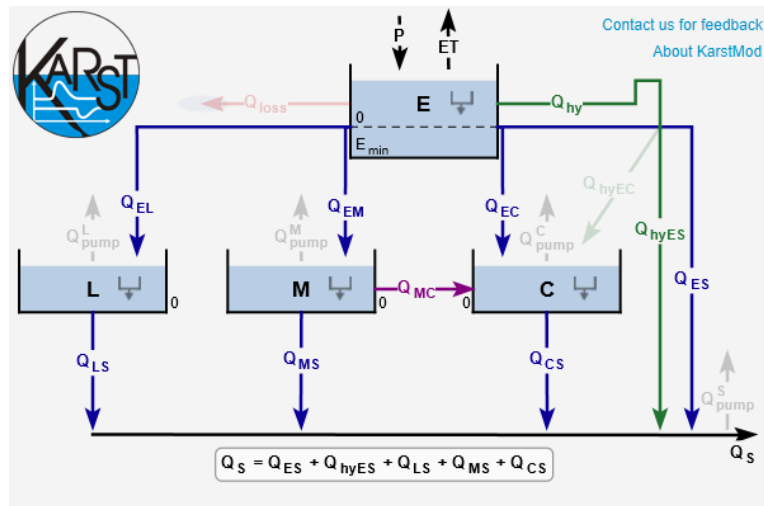


Figure 13 : Représentation simplifiée du fonctionnement d'un hydrosystème karstique : réservoir E représentant le sol et l'épikarst qui distribue vers cinq composantes d'écoulement souterrain en direction de la source (C : conduit, M : matrice, L : latéral, S : source, Q_{hyES} : écoulement direct avec seuil, Q_{ES} : écoulement direct). Extrait du logiciel KarstMod.

Le logiciel (ou plateforme) KarstMod est développé dans le cadre du SNO Karst (Mazzilli et al., 2019), accessible gratuitement sur <http://www.sokarst.org/>. KarstMod propose une série d'outil pour faciliter le calage des paramètres nécessaires aux simulations, et pour analyser leurs sensibilités. L'utilisateur peut choisir de laisser faire le logiciel de manière quasi-autonome (Figure 14), ou au contraire de contraindre la liberté de variation des paramètres de calage. Ce choix dépend du problème à traiter et de l'expérience de l'utilisateur. Les données d'entrée indispensables au modèle sont la pluie et l'ETP, ainsi qu'un ordre de grandeur de la surface du bassin versant. Le calage est fait en comparant le débit simulé au débit observé (la série peut être incomplète, ce qui est un atout majeur car il est rare d'avoir des chroniques de débit sans lacune). Par contre, les séries de pluie et d'ETP doivent être complètes, sans lacune. Le modèle accepte aussi des débits de pompage. Cette démarche de calage, classique en modélisation, utilise diverses fonctions objectif pour estimer la pertinence des résultats obtenus. La série de données est généralement scindée en trois parties : une première partie pour atteindre les niveaux initiaux du modèle, c'est la période de chauffe ou d'initialisation (warm-up en anglais), une seconde partie pour le calage des paramètres (calibration en anglais), et une dernière partie des données pour valider le modèle (validation en anglais). En mode automatique, KarstMod réalise un nombre important de tirages de solutions possibles pour obtenir le meilleur calage sur la période prédéfinie, dans une démarche du type Monte-Carlo. Au final, KarstMod délivre le débit simulé à l'exutoire (la source karstique ou la rivière), ainsi que les débits internes des réservoirs. Il est alors possible de calculer la pluie efficace modélisée dans le réservoir E. Il est aussi possible de suivre les niveaux internes des réservoirs pour vérifier que le modèle ne génère pas artificiellement un stockage ou un déstockage d'eau sur le long terme (biais de modélisation indépendant du fonctionnement réel de l'hydrosystème).

Ensuite, une fois le modèle calé, celui-ci peut être utilisé en mode « Run », c'est-à-dire que le modèle précédemment calé est appliqué pour simuler des scénarios. Dans ce cas, seules les données de pluie, d'ETP et éventuellement de pompage sont nécessaires ; le modèle simule alors le débit pour le scénario imposé par l'utilisateur. Cette fonctionnalité n'a pas été utilisée dans le cadre de cette étude du débit de l'Huveaune.

Dans une configuration classique, le flux d'eau entre les réservoirs est simulé suivant une loi du type : $Q_{AB} = k_{AB} * \left(\frac{A}{L_{ref}} \right)^{\alpha_{AB}}$

- Q_{AB} : Débit spécifique entre le réservoir A et B (mm/j)

- k_{AB} : Coefficient de récession de A vers B (mm/j). Un coefficient de récession est normalement en unité (j^{-1}) dans une loi classique de type Maillet ; ici il prend l'unité mm/j et se trouve corrigé par une longueur unitaire de référence L_{ref} . Cet artifice mathématique est imposé par la structure modulaire du logiciel KarstMod.
- L_{ref} : Longueur unitaire de référence (mm).
- A : Hauteur d'eau dans le réservoir A (mm)
- α_{AB} : Coefficient de non linéarité de l'écoulement de A vers B. Si $\alpha_{AB}=1$, l'écoulement est linéaire.

La présente étude visant à tester un nombre limité de configurations, il a été choisi d'appliquer uniquement des modèles linéaires ($\alpha_{AB} = 1$).

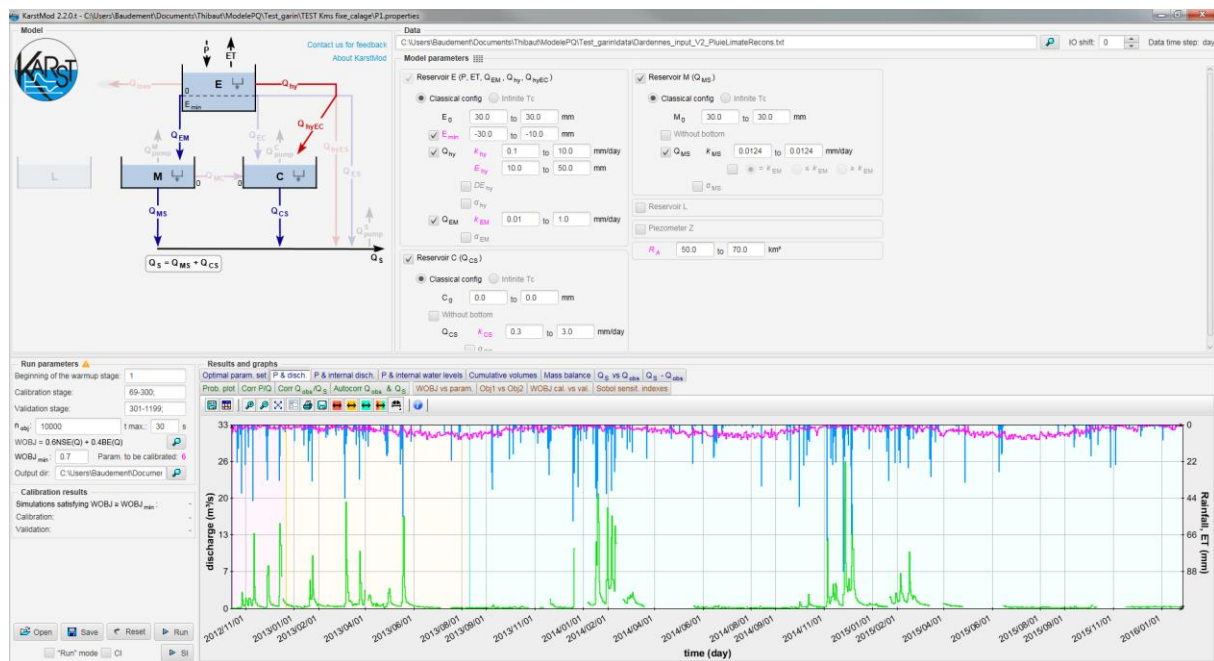


Figure 14 : Interface du logiciel KarstMod. Dans cet exemple, trois réservoirs sont utilisés : le réservoir E qui reçoit la pluie (P), laisse partir l'évapotranspiration (ET) et alimente les réservoirs M et C, le réservoir M représentant l'écoulement lent (ou M comme matrice) vers la source, le réservoir C représentant l'écoulement rapide (ou C comme Conduit) vers la source. Extrait de Garin et Arfib, 2018.

Les trois périodes associées à la modélisation : La phase d'initialisation (ou de chauffe) est une étape essentielle à la modélisation quand aucune valeur initiale dans le modèle n'est connue (les niveaux d'eau dans les réservoirs). Le logiciel teste des valeurs de niveau d'eau pour chaque réservoir, comprises dans une fourchette de valeurs entrées préalablement par le modélisateur, jusqu'à équilibrer le débit simulé avec le débit observé. Après la phase de chauffe, le biais induit par l'initialisation (par les paramètres initiaux sélectionnés aléatoirement) est jugé comme étant négligeable (Mazzilli & Bertin, 2019). Dans cette étude, une période de 1 an a été choisie pour cette **phase d'initialisation (du 02/09/2007 au 01/09/2008)**, étant donné que 13 ans de données étaient disponibles. Une fois cette étape effectuée, le calage va pouvoir débuter, afin de trouver l'ensemble de paramètres caractérisant le mieux le débit, dans les conditions renseignées (la taille du bassin versant, le nombre de réservoirs...). 3 ans ont été accordés à cette **phase de calage (du 02/09/2008 au 02/09/2011)**. Cela a permis la prise en compte de la variabilité interannuelle. La phase de validation consiste à comparer les résultats du modèle après calage avec le débit observé. C'est là que va être calculée la performance du modèle, sans modification des

paramètres sélectionnés à la fin de la phase de calage. La **phase de validation pour cette étude s'étend sur 9 ans, du 03/09/2011 au 01/11/2020.**

Dans cette étude, le critère de Nash-Sutcliffe (NSE) a été choisi comme fonction objectif. Dans un second temps, le volume cumulé simulé à l'exutoire a également été utilisé par le modélisateur pour vérifier que les modèles proposaient un bilan hydrique bien équilibré, mais celui-ci n'a pas été intégré dans la fonction objectif d'optimisation du calage.

4. Schéma conceptuel de fonctionnement de l'hydrosystème

4.1 Les pluies sur le bassin versant

Le bassin versant de l'Huveaune présente un fort dénivelé, entre le sommet de la Sainte-Baume (sommet à 1 148m d'altitude) et les stations de mesure du débit dans la plaine (Le Charrel à 151m d'altitude, Roquevaire à 192 m). La pluie moyenne sur le bassin versant ne peut pas être estimée uniquement à partir d'une station de mesure pluviométrique, d'une part car l'effet orographique influence les précipitations, et d'autre part car certains événements sont très localisés. Il est donc préférable, voire indispensable, d'utiliser une pluie calculée à partir des observations faites sur plusieurs postes pluviométriques de terrain. Ces données sont disponibles aux stations du Plan d'Aups et d'Aubagne. La distribution des altitudes sur chaque sous-bassin versant est illustrée en Figure 15 et Figure 16, et quantifiée dans le Tableau 6.

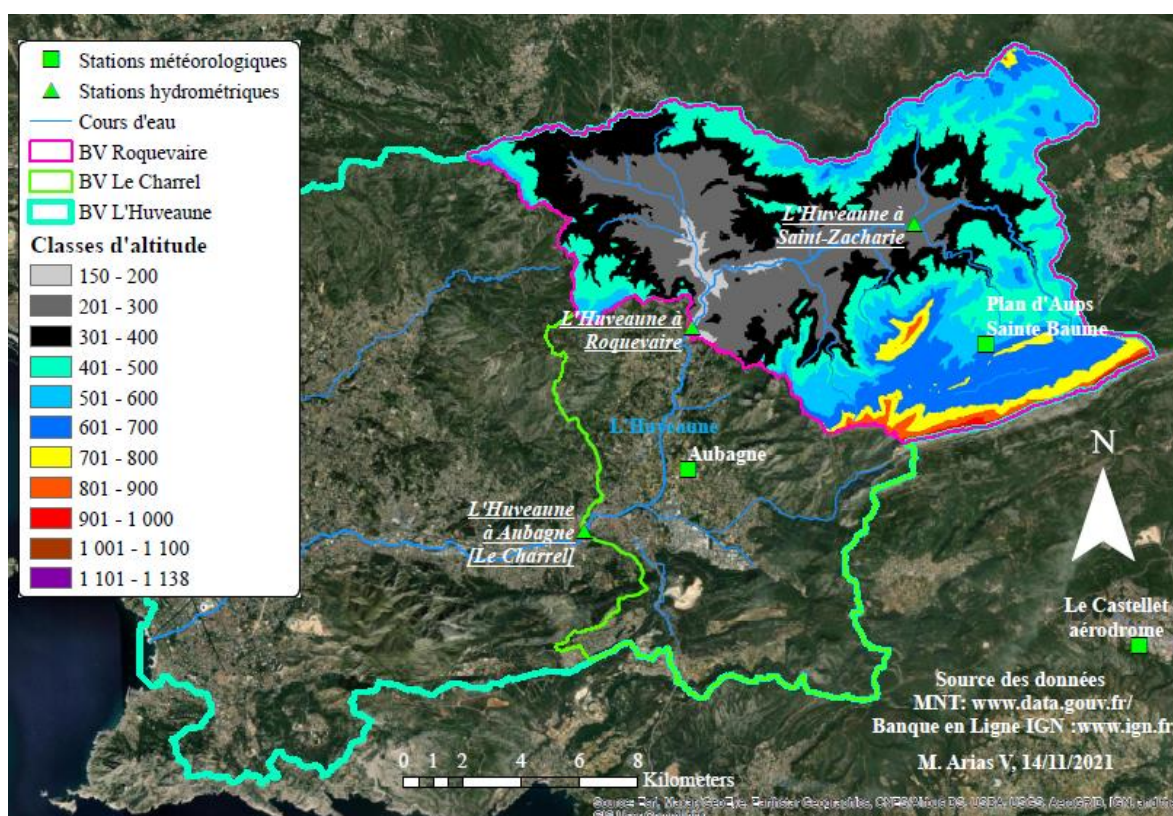


Figure 15 : Distribution des altitudes dans le sous-bassin versant de la station de Roquevaire.

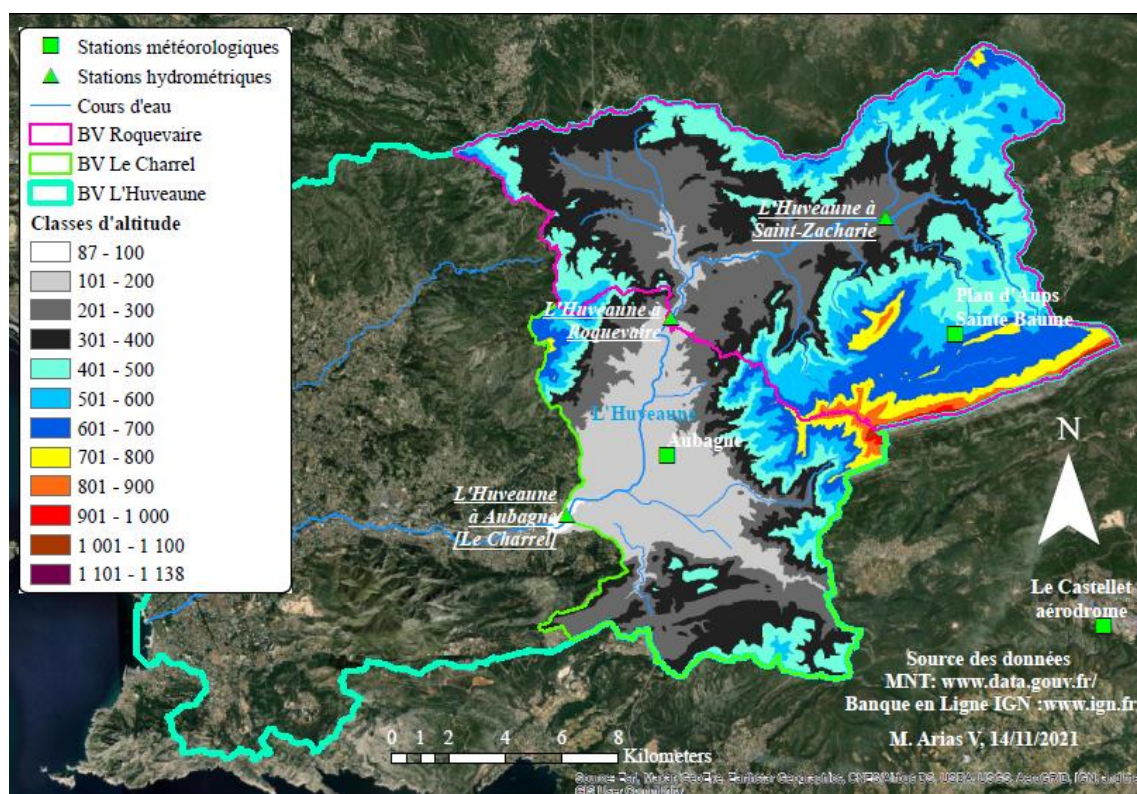


Figure 16 : Distribution des altitudes dans le sous-bassin versant de la station de Le Charrel.

Tableau 6 : Distribution des altitudes au Charrel et à Roquevaire.

Le Charrel				Roquevaire			
Altitude	Surface km ²	Pourcentage		Altitude	Surface km ²	Pourcentage	
0 - 100	673 125	0,25%	94,95%	0 - 200	2 692 500	1,61%	93,57%
101 - 200	37 863 100	13,83%		200 - 300	36 786 200	22,00%	
201 - 300	59 984 400	21,91%		301 - 400	38 975 000	23,30%	
301 - 400	59 710 600	21,81%		401 - 500	33 058 800	19,77%	
401 - 500	44 617 500	16,29%		501 - 600	24 985 600	14,94%	
501 - 600	31 963 100	11,67%		601 - 700	19 990 000	11,95%	6,43%
601 - 700	25 193 100	9,20%	5,05%	701 - 800	6 865 630	4,11%	
701 - 800	8 873 130	3,24%		801 - 900	2 448 750	1,46%	
801 - 900	3 185 630	1,16%		901 - 1000	1 009 380	0,60%	
901 - 1000	1 261 880	0,46%		1001 - 1100	370 000	0,22%	
1001 - 1100	440 000	0,16%		1101 - 1200	58 125	0,03%	
1101 - 1200	58 125	0,02%					

La Figure 15 et la Figure 16 montrent que les surfaces supérieures à 700 mètres d'altitude représentent une faible proportion de la surface totale du bassin versant pour les deux sous-bassins (Roquevaire et Le Charrel). Les pluies sur les hautes altitudes de la Sainte-Baume (>700m) ne sont pas mesurées car la station météorologique se trouve au Plan d'Aups à 605m d'altitude, mais cela reste négligeable au regard des faibles proportions de surface (5 à 6%). La station du Plan d'Aups et la station d'Aubagne sont localisées à des altitudes et dans des contextes topographiques qui caractérisent la dualité géographique du bassin versant de l'Huveaune : la station d'Aubagne (100m) est en plaine, tandis que la station du Plan d'Aups (605m) est située sur le plateau montagneux du nord de la Sainte-Baume. Ces deux stations météorologiques

permettent ainsi de mesurer l'hétérogénéité des précipitations sur le bassin versant, à la fois pour tenir compte des pluies plus importantes (en moyenne annuelle) sur les zones d'altitude, et pour enregistrer les événements pluvieux localisés en plaine ou en montagne. Environ 50% des surfaces du bassin versant (Roquevaire ou Le Charrel) sont comprises dans l'altitude médiane de 400 mètres. Les données de pluies étant limitées aux deux stations météorologiques, l'évaluation de la pluie moyenne sur chaque bassin versant est nécessairement incertaine. Toutefois, les deux stations se trouvent réparties sur les parties Est et Ouest du secteur d'étude, et dans des gammes d'altitudes qui correspondent aux deux zones topographiques préalablement définies : le secteur montagneux en altitude, et le secteur de plaines à basse altitude. Ainsi, afin de tenir compte des hétérogénéités des précipitations sur les bassins versants, nous utiliserons les données des deux stations météorologiques (Aubagne et Le Plan d'Aups), en attribuant un poids de 50% à chaque station ($\text{Pluie moyenne} = 50\% \text{ Pluie Plan d'Aups} + 50\% \text{ Pluie Aubagne}$). Ce poids de 50% s'explique également par la répartition altitudinale des surfaces du bassin versant autour de l'altitude médiane de 400 mètres.

4.2 Étude des relations pluie-débit sur l'Huveaune

4.2.1 Un écoulement divisé en deux composantes

La Figure 17 montre le débit (échelle logarithmique) à Roquevaire et à Le Charrel, et la pluie de la station Plan d'Aups au cours du temps. Il est possible d'identifier graphiquement 2 composantes d'écoulement : une variation saisonnière sur laquelle se surimpose des pics de crues de courte durée. Une première caractéristique remarquable est que les débits n'atteignent jamais zéro, et cela pour les deux stations. Par exemple, entre juillet et octobre 2019, la rivière a eu un écoulement très faible, qui a diminué au cours de la période estivale, mais la rivière ne s'est pas asséchée sur ces deux stations de mesure. La rivière continue d'être alimentée par une composante lente provenant du sous-sol, via un transfert d'eau souterraine vers le cours d'eau de surface.

De plus, tout comme l'existence d'un écoulement lent qui alimente la rivière de manière continue au cours de l'année, la présence d'une composante rapide est une caractéristique de l'Huveaune, visible sur l'hydrogramme. Les crues présentent une montée extrêmement rapide, avec un maximum généralement atteint en quelques heures. Les crues s'observent sur les deux stations de mesure, aussi bien à Roquevaire dans la partie amont du bassin versant, qu'à Aubagne en aval. Les crues qui passent à Roquevaire sont ensuite enregistrées à Aubagne. Le pas de temps journalier utilisé dans cette étude ne permet pas de voir le détail de la propagation des crues, ni la contribution quelques fois séparée entre le ruissellement urbain et l'apport du bassin versant naturel en amont. Ces éléments avaient été spécifiquement étudiés par des études antérieures : EGIS 2014 (Fabrègue et Raymond, 2014) ou BRGM 2013 (Charlier & al., 2013).

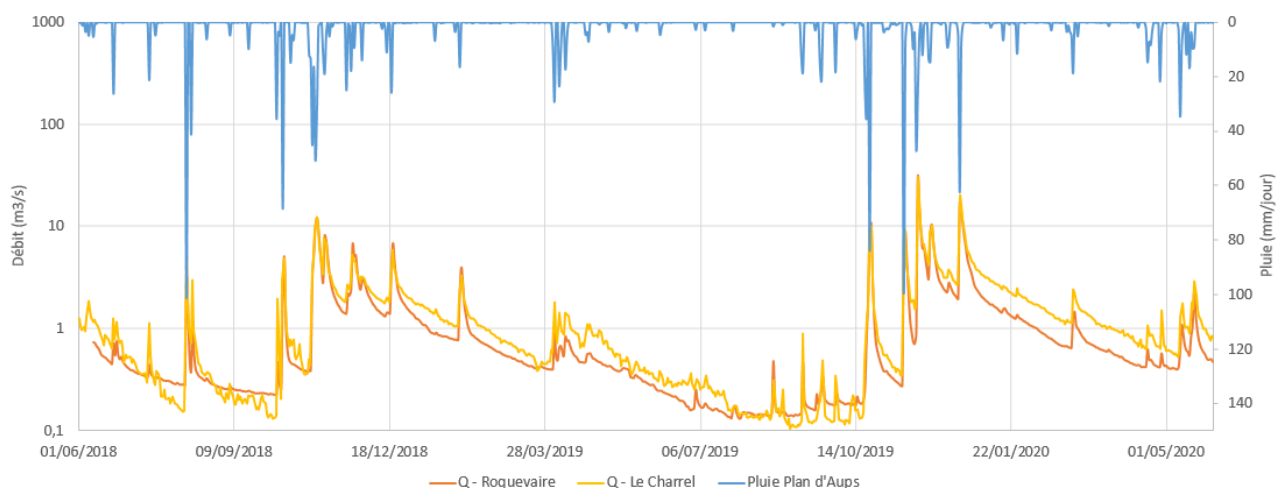


Figure 17 : Graphique pluie – débit de l'Huveaune (juin 2018 – mai 2020). L'axe des débits est en échelle logarithmique pour faciliter la lecture des valeurs dans des gammes de 0,1 à 50 m³/s.

4.2.2 Capacité de rétention du système lors des premières pluies d'automne

Lors de l'analyse des premières pluies après la période de basses-eaux estivales, il est possible de voir la capacité de stockage de l'hydrosystème. Des pluies équivalentes au cours de l'automne ne génèrent pas des crues équivalentes : les premières pluies donnent de faibles crues dans la rivière tandis que les pluies suivantes engendrent de plus fortes crues. Ce phénomène s'observe chaque année, comme par exemple entre septembre et décembre 2014 : la crue la plus importante (autour de 12 m³/s le 6 décembre 2014) a lieu lors d'une pluie de l'ordre de 45 mm (Plan d'Aups), alors que la pluie de 93 mm du 4 novembre 2014 n'avait engendré qu'une crue de l'ordre de 4 m³/s. Ce comportement est caractéristique d'un hydrosystème qui stocke l'eau d'infiltration au sein du sol, de l'épikarst et dans la zone non saturée, typique des aquifères carbonatés. Une partie vient alimenter la nappe d'eau souterraine, rechargeant ainsi le stock de la zone saturée. Lorsque le stock de la surface et de la zone non saturée est reconstitué en début d'automne (lors des premières pluies), les pluies suivantes favorisent le transfert rapide de l'eau souterraine au sein de l'aquifère, et le ruissellement sur la surface de sol. Ainsi la pluie qui génère la crue la plus forte après l'été n'est pas la première pluie. Toutefois, lorsque le ruissellement urbain est fort, des crues très brèves et de fort débit peuvent être enregistrées ; ces crues n'ont pas été étudiées dans la présente étude utilisant le débit moyen journalier, ce qui nécessiterait des études complémentaires au pas de temps horaire (voire à la minute).

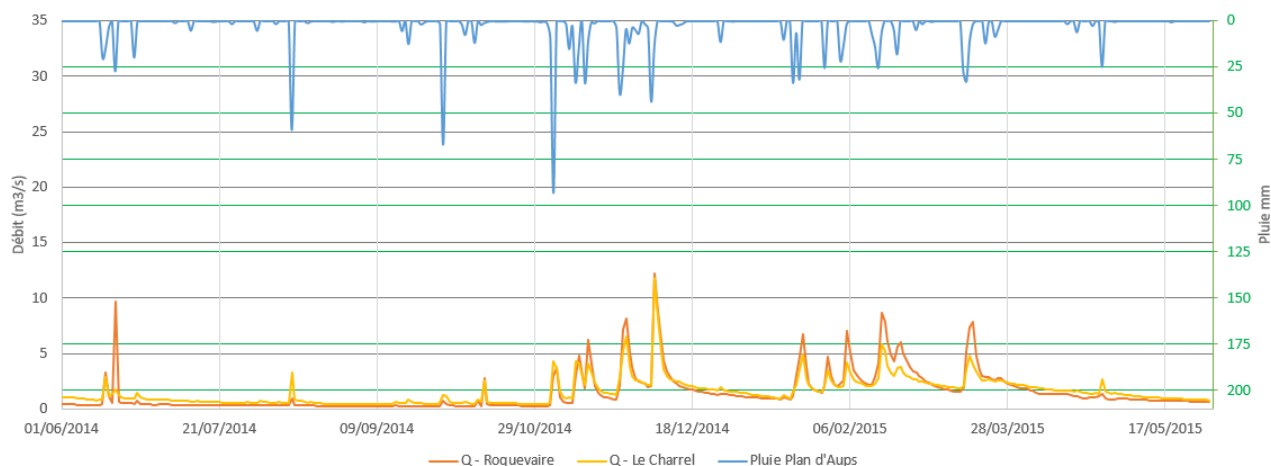


Figure 18 : Graphique pluie – débit (juin 2014 – mai 2015).

4.3 Étude des composantes d'écoulement

4.3.1 Démarche méthodologique (loi de Maillet)

KarstMod dispose d'un outil d'optimisation du calage, permettant de trouver le jeu de paramètres optimal pour une fonction objectif définie par le modélisateur. Malgré tout, le modélisateur doit choisir les bonnes gammes de valeurs des paramètres, qui vont également conditionner la convergence du modèle vers un résultat acceptable et cohérent. En périodes de tarissement, le débit suivi globalement une loi de vidange exponentielle, ou une succession de lois de vidanges exponentielles. En appliquant une loi de Maillet, il est donc possible de simuler la décroissance du débit lors du tarissement pour de courtes périodes définies graphiquement sur l'hydrogramme. Cela permet de calculer un coefficient de récession pour chaque période.

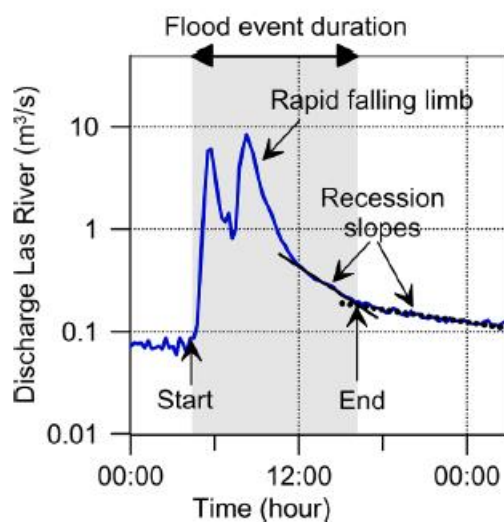


Figure 19 : Exemple de caractérisation des pentes de récession en période de tarissement. Dans cette figure extraite de Dufresne et al. 2020 sur un cours d'eau karstique (Le Las à Toulon), après le double-pic de crue, la décrue rapide est suivie par le tarissement suivant 2 pentes de récession

Pour les deux stations (Le Charrel et Roquevaire), les coefficients de récession ont été calculés dans Excel sur des portions de courbes (évolution du débit au cours du temps) de tarissement tout au long de la chronique de débit disponible. Préalablement, les périodes de tarissement ont été

mis en évidence sur le graphique d'évolution du débit (en échelle logarithmique) au cours du temps en repérant manuellement les droites caractéristiques. Ensuite une courbe a été simulée avec la loi de Maillet pour chaque portion de courbe, avec un ajustement automatique à l'aide du solveur d'Excel, permettant ainsi de caler les coefficients de récession. Ces coefficients ont été regroupés par familles, correspondant à des valeurs proches et typiques d'une composante lente ou rapide d'écoulement. Pour chaque famille, une valeur moyenne est calculée. C'est cette valeur qui sera ensuite utilisée dans KarstMod.

La loi de Maillet constitue l'équation fondamentale de vidange linéaire d'un réservoir :

$Q = Q_0 * e^{-k*t}$, avec Q le débit (en m³/s) ; k le coefficient de récession (en j⁻¹) ; Q₀ le débit initial (en m³/s) ; t le temps (en j). Le coefficient de récession ainsi calculé est équivalent au coefficient k utilisé dans KarstMod.

4.3.2 Résultats du calage manuel des coefficients de récession (Roquevaire, Le Charrel)

Comme illustré sur la Figure 20, des droites de pentes différentes (une couleur correspondant à une pente) sont tracées selon les coefficients de récession les plus fréquents, chaque coefficient correspondant à un écoulement plus ou moins lent. Les droites de pente ainsi fixée se retrouvent d'une année sur l'autre, montrant ainsi qu'il s'agit d'une dynamique d'écoulement caractéristique du point de mesure. Le coefficient de récession de chaque droite du graphique est ensuite calculé.

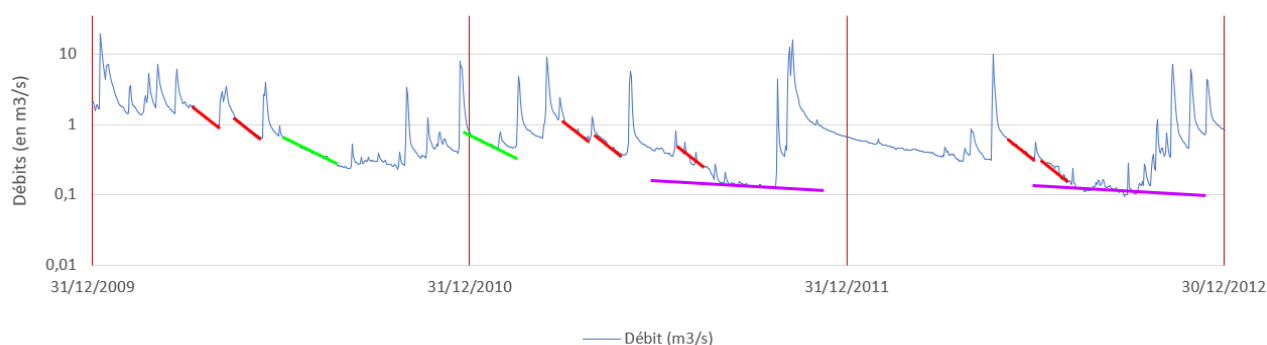


Figure 20 : Exemple d'analyse manuelle des coefficients de récession sur les débits observés (en échelle logarithmique) pour la station de Roquevaire

Pour la station de Roquevaire, 3 coefficients de récession ont été déterminés : un coefficient pour les écoulements particulièrement lents égal à 0.0015 j⁻¹ qui est représenté par les droites violettes dans la Figure 20 ; deux autres coefficients pour des écoulements plus rapides (mais n'incluant pas la décrue rapide) : 0.0146 j⁻¹ (correspondant aux droites vertes) et 0.0302 j⁻¹ (correspondant aux droites rouges). Selon le nombre de composante d'écoulement simulé dans les modèles KarstMod, la moyenne des coefficients de récession 0.0146 et 0.0302 a pu être utilisée, soit un coefficient de 0.0224 j⁻¹.

Pour la station de Le Charrel, 2 coefficients de récession ont été sélectionnés. La Figure 21 montre les débits simulés après calcul des coefficients associés via le solveur. La composante de tarissement correspondant à l'écoulement le plus rapide est représentée par les droites rouges, avec un coefficient de récession de 0.019 j⁻¹. La composante la plus lente est indiquée par les droites vertes, avec un coefficient de récession de 0.004 j⁻¹.

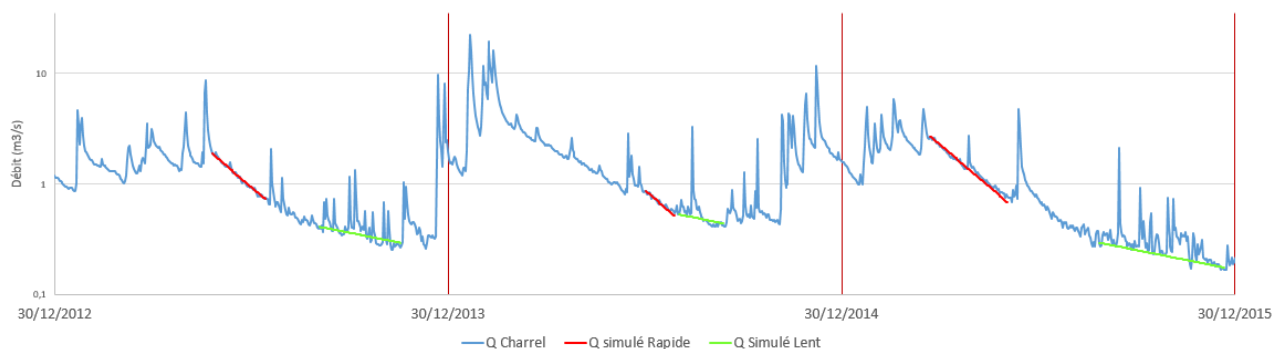


Figure 21 : Les coefficients de récession sur les débits de la station Le Charrel.

5. Résultats des modèles Pluie-Débit KarstMod

5.1 Scénarios testés

À partir de l'analyse de l'hydrosystème faite précédemment, différents scénarios ont été testés sur KarstMod, prenant en compte les compartiments correspondant à une composante lente de l'écoulement, une composante rapide et le stockage de l'eau dans le sol.

Dans le réservoir E (ou compartiment E), la capacité de stockage du sol est simulée à l'aide du paramètre E_{min} ; l'eau des précipitations est ainsi stockée dans la réserve Emin (disponible pour l'évapotranspiration) et s'écoule vers l'exutoire (source ou rivière) quand le seuil est atteint. Ensuite, l'eau peut s'écouler en utilisant un ou plusieurs des chemins d'écoulements proposés par KarstMod : 3 réservoirs intermédiaires C, M ou L, et 2 écoulements directs (ES, ou hyES avec un seuil et une fonction d'hystérèse). 7 scénarios ont été testés dans cette étude :

Le premier scénario (ou modèle) comprend un compartiment M pour l'écoulement lent et un compartiment C pour l'écoulement rapide.

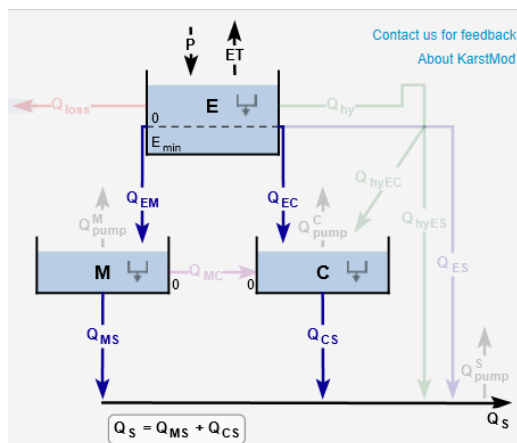


Figure 22 : Scénario 1 avec 2 composantes d'écoulement (M et C).

Le deuxième scénario considère une interaction entre les écoulements lents ayant lieu dans le compartiment M et les écoulements rapides en C. Ceci se rapprocherait d'un échange entre la matrice et les conduits dans le contexte karstique de cette étude.

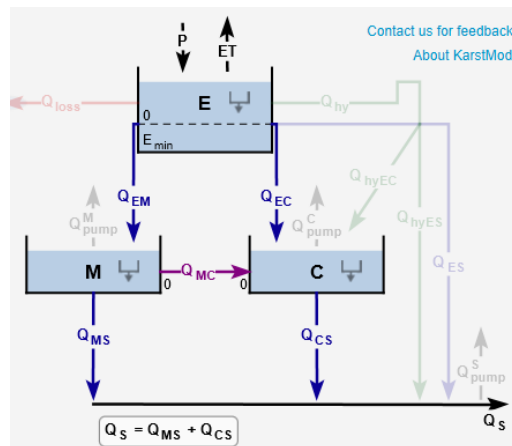


Figure 23 : Scénario 2 avec deux composantes d'écoulement pouvant interagir.

D'après les analyses de la période de tarissement faites pour les deux stations et l'existence d'au moins deux composantes d'écoulement lent lors de cette période, le troisième scénario a pris en compte deux compartiments pour les écoulements lents.

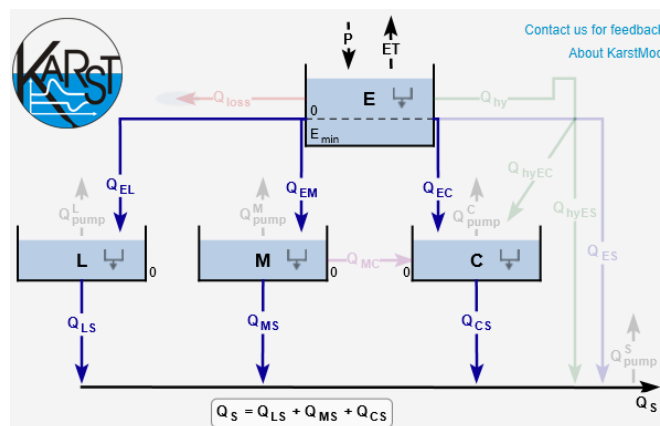


Figure 24 : Scénario 3 avec trois composantes d'écoulement..

Le quatrième scénario testé comprend un écoulement rapide qui passe directement du réservoir E à la sortie du système (Q_{ES}), et deux composantes lentes (L et M).

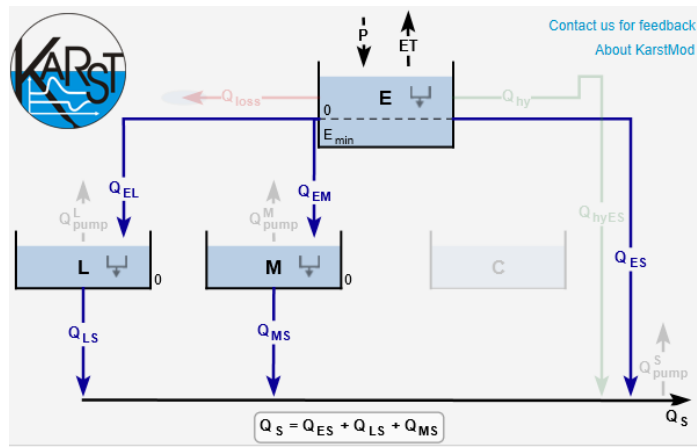


Figure 25 : Scénario 4 avec 2 composantes lentes et un écoulement rapide direct..

Le cinquième scénario testé considère deux écoulements lents en utilisant L et M, et deux écoulements rapides avec le compartiment C et l'écoulement direct vers l'exutoire Q_{ES} .

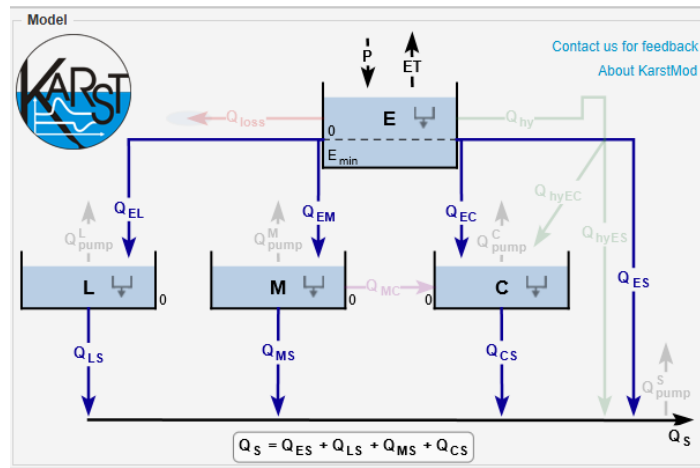


Figure 26 : Scénario 5, avec 2 composantes lentes et 2 composantes d'écoulement rapides.

Le sixième scénario testé considère deux écoulements rapides au travers d'écoulements directs de E vers la sortie du système, en intégrant des propriétés d'hystérésis à l'un des deux (Q_{hyES}).

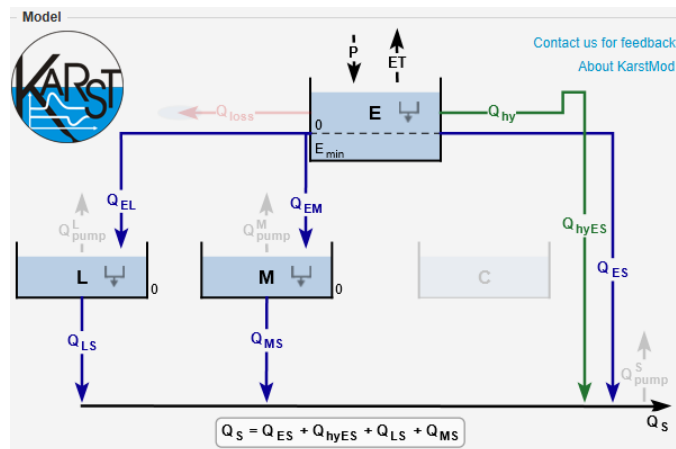


Figure 27 : Scénario 6, avec deux composantes lentes et deux composantes rapides d'écoulement (dont 1 avec hystérèse).

Finalement, le septième et dernier scénario testé ne prend en compte qu'un compartiment pour les écoulements lents et la même structure pour les écoulements rapides que celle du scénario 6.

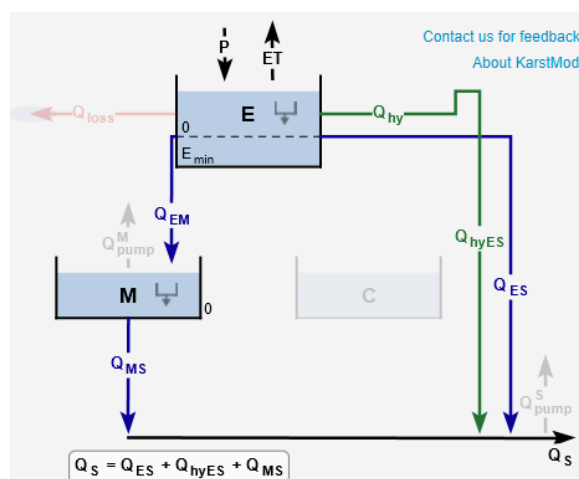


Figure 28 : Scénario 7 avec un écoulement lent et deux composantes d'écoulement rapide (dont 1 avec hystérèse).

5.2 L'impact de la station de pluie choisie sur la taille du bassin versant des modèles

Pour la modélisation pluie-débit de l'Huveaune, les données de pluie utilisées sont celles de la station du Plan d'Aups et d'Aubagne. La station du Plan d'Aups enregistre un cumul de précipitations plus important que celle d'Aubagne du fait de sa position en altitude dans le bassin versant d'étude. La modélisation Pluie-Débit avec KarstMod repose sur un équilibre du bilan hydrologique, qui dépend donc des précipitations, de l'évapotranspiration réelle (simulée dans le premier réservoir E du modèle), et de la surface du bassin versant. KarstMod permet d'ajuster la surface du bassin versant (BV) pour équilibrer le bilan hydrologique. Cette surface est donc impactée par la chronique de pluie utilisée : par exemple, en utilisant uniquement la pluie de la station ayant le cumul de précipitation le plus fort (ici Plan d'Aups), la taille du BV calé sera plus petite que si le modélisateur utilise la pluie de la station d'Aubagne. Il est également possible, et généralement recommandé, d'utiliser une pluie reconstituée à partir de la moyenne (éventuellement pondérée) de plusieurs stations représentatives du BV. Cette pluie combinée a l'avantage de minimiser l'effet d'orages isolés enregistrés par une seule station pluviométrique. Des tests dans KarstMod ont été réalisés pour évaluer l'impact de ce choix.

Pour la station hydrométrique de Roquevaire, la taille des bassins versants calés par KarstMod en fonction de la proportion de pluie par station météorologique a été étudiée sur un même scénario (le scénario 5, Figure 26), en fixant tous les paramètres, excepté la taille du bassin versant. Les proportions de pluie choisies sont : (cas 1) 100% de la pluie du Plan d'Aups et 0% de la pluie d'Aubagne, (cas 2) 79% de la pluie du Plan d'Aups et 21% de la pluie d'Aubagne (pourcentages correspondant au découpage de l'influence des stations selon les polygones de Thiessen) et (cas 3) 50% de la pluie du Plan d'Aups et 50% de la pluie d'Aubagne. Les résultats obtenus confirment les observations faites précédemment : plus la proportion de pluie de la station du Plan d'Aups est importante, plus la taille du bassin versant est petite (Tableau 7). En effet, si des précipitations plus importantes ont lieu, une surface de recharge plus restreinte suffit pour reproduire les débits observés.

Tableau 7: Etude de la taille du bassin versant calée selon le type de pluie intégré au modèle (scénario 5), pour la simulation du débit de l'Huveaune à Roquevaire.

Proportion de pluie	100% PA + 0% A	79% PA + 21% A	50% PA + 50% A
Taille du bassin versant calée	78,4 km ²	85,4 km ²	94,5 km ²

* Avec PA : la pluie de la station du Plan d'Aups et A : la pluie de la station d'Aubagne.

Pour la simulation du débit à la station hydrométrique Le Charrel, le Tableau 8 donne un résumé des surfaces calées par le logiciel pour les scénarios 4, 5 et 6 en utilisant soit uniquement la pluie du Plan d'Aups soit une pluie combinée avec une proportion de 50% + 50% entre les stations Plan d'Aups et Aubagne.

Tableau 8 : Résumé des surfaces (km²) calées par KarstMod pour la simulation du débit à la station hydrométrique de l'Huveaune Le Charrel.

Pluie	Scénario 4	Scénario 5	Scénario 6
Plan d'Aups	103 km ²	100 km ²	91,9 km ²
Combinée (50% Plan d'Aups + 50% Aubagne)	114 km ²	146 km ²	124 km ²

5.3 Roquevaire

5.3.1 Comparaison des scénarios testés

Parmi les scénarios présentés précédemment, 2 d'entre eux ont été retenus comme étant les meilleurs pour la simulation des débits de l'Huveaune au niveau de la station de Roquevaire : les scénarios 4 et 5. Trois modèles ont été sélectionnés (avec deux modèles du scénario 4). Pour les représentations graphiques, une période du 01/09/2011 au 01/09/2017 a été choisie afin d'avoir un aperçu interannuel, sur des périodes à gros pics de crue et des périodes de tarissement. Le modèle est initialisé sur la période du 02/09/2007 au 01/09/2008, puis le calage est fait du 02/09/2008 au 02/09/2011, et enfin la validation du 03/09/2011 au 01/11/2020. La pluie utilisée est une combinaison entre la station du Plan d'Aups (50%) et Aubagne (50%), et l'ETP est celle du Plan d'Aups.

Les deux modèles du scénario 4 ont la même structure KarstMod (Figure 25) ; ils diffèrent par la gamme des valeurs autorisées pour le calage des paramètres (Tableau 9 et Tableau 10). Les coefficients de récession des deux réservoirs lents M et L sont fixés par les valeurs obtenues lors de l'étude manuelle de l'hydrogramme avec calage d'une loi de Maillet (section 4.3.2) : 0.0224 j⁻¹, la moyenne des deux coefficients qui caractérisent un écoulement plus rapide et le coefficient 0.0015 j⁻¹ (section 4.3.2). Cela permet de constater que la moyenne des coefficients de récession 0.0302 et 0.0146 peut suffire pour modéliser les débits à Roquevaire en période de tarissement.

Le modèle 4.1 est le modèle simulant le mieux les grands pics de crue. Comme attendu, ce modèle respecte également les pentes des courbes de débit en période de tarissement. Son Nash est de 0.736 pour la phase de validation avec 5000 simulations satisfaisantes (pour un Nash > 0.4). M₀ et L₀ n'impactent pas la qualité du modèle quelle que soit leur valeur, puisqu'ils servent uniquement à lancer les premiers essais de simulation en période de chauffe.

Malgré tout, le modèle 4.1 ne parvient quasiment pas à simuler les petits pics de crue qui ont lieu en période de tarissement (comme les crues du 18/07/2013, du 13/10/2014 ou du 28/02/2016). Il ne simule pas non plus un pic de crue pourtant important, ayant lieu en milieu de période d'été, le 18/06/2014. Ce type de problème est lié à un E_{min} trop important (en valeur absolue), de -105 mm ici. Si le sol simulé stocke plus d'eau que le sol réel, les pics de crue ont plus de chances

d'être sous-estimés, d'autant plus en période d'étiage. Les grands pics de crue sont très bien simulés grâce à une taille de bassin versant calée plus importante que pour la majorité des autres modèles réalisés (voir Annexe A).

Tableau 9 : Résultats du scénario 4.1 pour la station de Roquevaire

Paramètres	Valeur optimale
E_0 (mm)	3,86
E_{min} (mm)	-105
k_{ES} (mm/jour)	0,270
k_{EL} (mm/jour)	0,2
k_{EM} (mm/ jour)	0,341
M_0 (mm)	36,4
k_{MS} (mm/ jour)	0,0224
L_0 (mm)	0.34
k_{LS} (mm/ jour)	0,0015
R_A (km ²)	100
Volume cumulé observé (m ³)	257429404
Volume cumulé simulé (m ³)	258 504 677
WOBJ value (phase de calage)	0,709
WOBJ value (phase de validation)	0,736

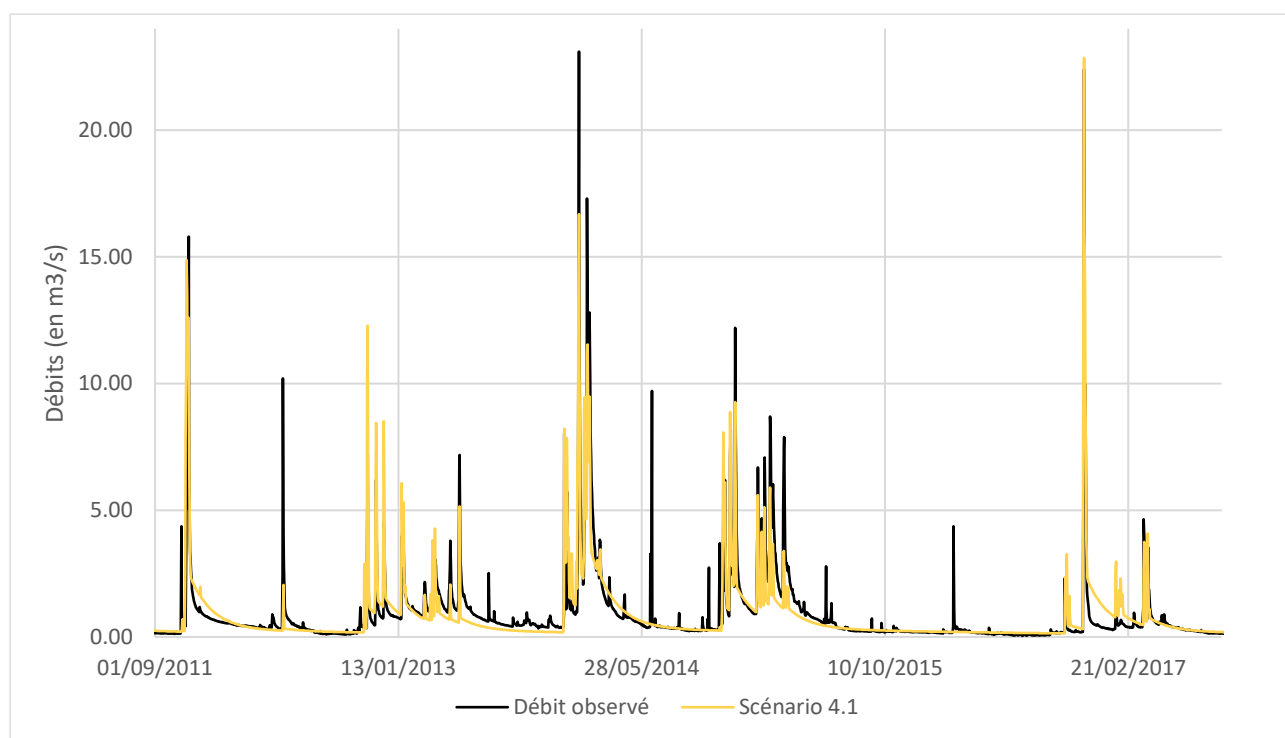


Figure 29 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4.1 à Roquevaire

Le modèle 4.2 est le modèle simulant le mieux les petits pics de crue en période de tarissement, tout en simulant un apport d'eau assez important (plus important que le scénario 5). Les débits simulés par ce modèle en période de tarissement sont très proches de ceux du modèle 4.1, comme

attendu (les coefficients de récession renseignés sont les mêmes). Pour les grands pics de crue en revanche, ce modèle ne produit pas assez d'eau et il a tendance à surestimer certains petits pics de crue. Son Nash est de 0.744 pour la phase de validation avec 5000 simulations satisfaisantes (pour Nash>0.4). Les gammes de 0.02 à 3 mm/j ont été choisies pour k_{ES} , k_{EL} et k_{EM} pour aider KarstMod à centrer ses tirages aléatoires, tout en respectant des valeurs cohérentes pour l'hydrosystème. Les gammes du bassin versant vont de 50 à 167 km², pour laisser au logiciel le soin de caler la valeur de la superficie de recharge du système, puisque l'on sait qu'une partie de l'eau du bassin versant de l'Huveaune est drainée vers Port Miou (section 2.4). La gamme de valeurs accordée à Emin permet de restreindre le logiciel à une capacité de stockage du sol plus faible que pour le modèle 4.1.

Tableau 10 : Résultats du scénario 4.2 pour la station de Roquevaire

Paramètre	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E₀ (mm)	152,765	0	200
E_{min} (mm)	-58,182	-60	-20
k_{ES} (mm/jour)	0,203	0,02	3
k_{EL} (mm/jour)	0,153	0,02	3
k_{EM} (mm/ jour)	0,252	0,02	3
M₀ (mm)	48,236	0	200
k_{MS} (mm/ jour)	0,0224	0,0224	0,0224
L₀ (mm)	91,888	0	200
k_{LS} (mm/ jour)	0,0015	0,0015	0,0015
R_A (km²)	85,278	50	167
Volume cumulé observé (m³)		257 429 404	
Volume cumulé simulé (m³)		265 893 791	
WOBj value (phase de calage)		0,720	
WOBj value (phase de validation)		0,744	

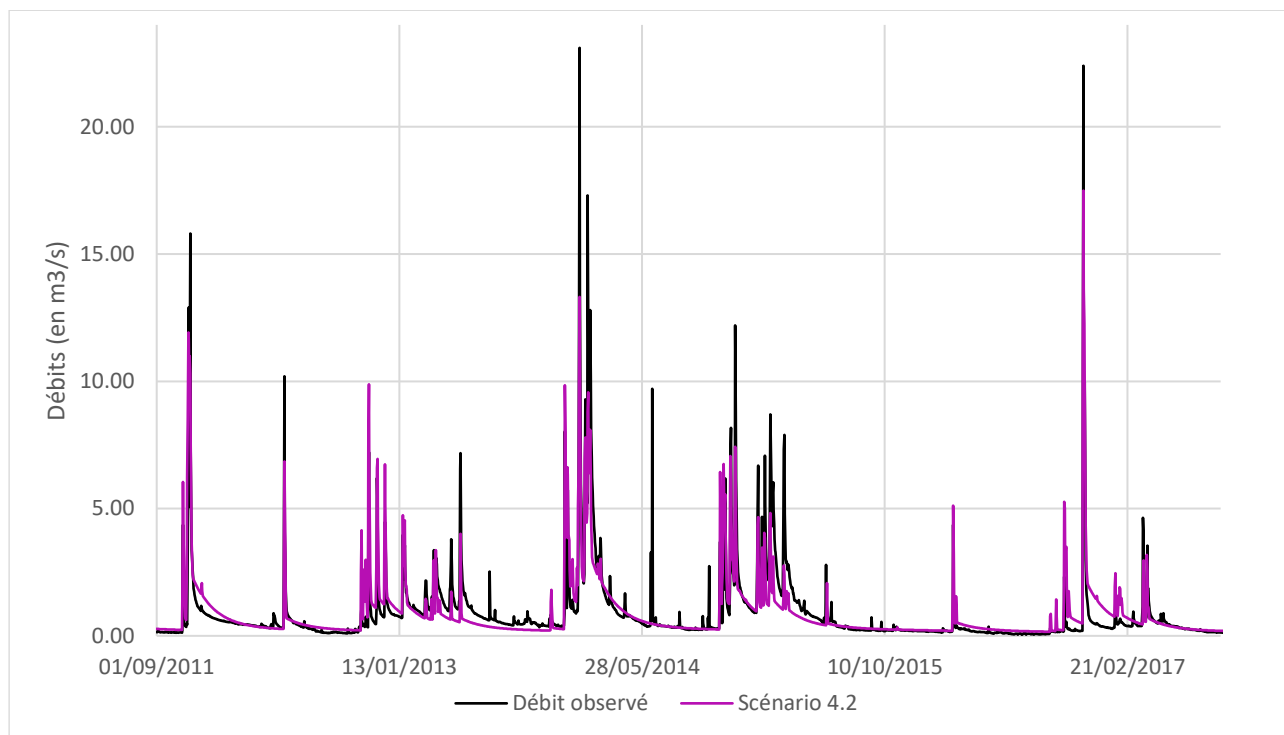


Figure 30 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4.2 à Roquevaire

Le scénario 5 comprend 3 compartiments à écoulement lent (Tableau 11) et un écoulement rapide via Q_{ES} (Figure 31). Il respecte les trois coefficients de récession calculés (0.0302 , 0.0146 et 0.0015 j^{-1}) et doit avoir pour avantage un débit simulé en période de tarissement plus précis. Or ce n'est pas forcément le cas, comme on peut l'observer dans la Figure 32 qui compare les trois meilleurs modèles. En revanche il représente un intermédiaire entre le modèle 4.1 qui simule bien les grands pics de crue et le modèle 4.2 qui simule bien les petits pics de crue en période de tarissement. Son Nash est de 0.763 pour la phase de validation. Ici tous les paramètres ont été fixés, au cours de l'optimisation du modèle. Le E_{min} choisi à -80 mm est en effet un intermédiaire entre ceux des modèles 4.1 et 4.2, de respectivement -105 mm et -58 mm . La taille du bassin versant de 90 km^2 est très proche de celle des modèles 4.1 et 4.2. Finalement, ce scénario 5 n'apporte pas de bénéfice à la simulation ; il renforce l'idée que le scénario 4 avec 2 compartiments à écoulement lent suffit pour la simulation de la relation pluie-débit de l'Huveaune.

Tableau 11 : Résultats du scénario 5 pour la station de Roquevaire.

Paramètre	Valeur fixée
$E_0 \text{ (mm)}$	179,861
$E_{min} \text{ (mm)}$	-80
$k_{ES} \text{ (mm/jour)}$	0,187
$k_{EL} \text{ (mm/jour)}$	0,13
$k_{EM} \text{ (mm/ jour)}$	0,245
$k_{EC} \text{ (mm/ jour)}$	0,012
$M_0 \text{ (mm)}$	111,185
$k_{MS} \text{ (mm/ jour)}$	0,0146
$C_0 \text{ (mm)}$	167,764
$k_{CS} \text{ (mm/ jour)}$	0,0302
$L_0 \text{ (mm)}$	129,05

Paramètre	Valeur fixée
k_{LS} (mm/ jour)	0,0015
R_A (km ²)	90
Volume cumulé observé (m ³)	257 429 404
Volume cumulé simulé (m ³)	256 667 424
WOBJ value (phase de calage)	0,739
WOBJ value (phase de validation)	0,763

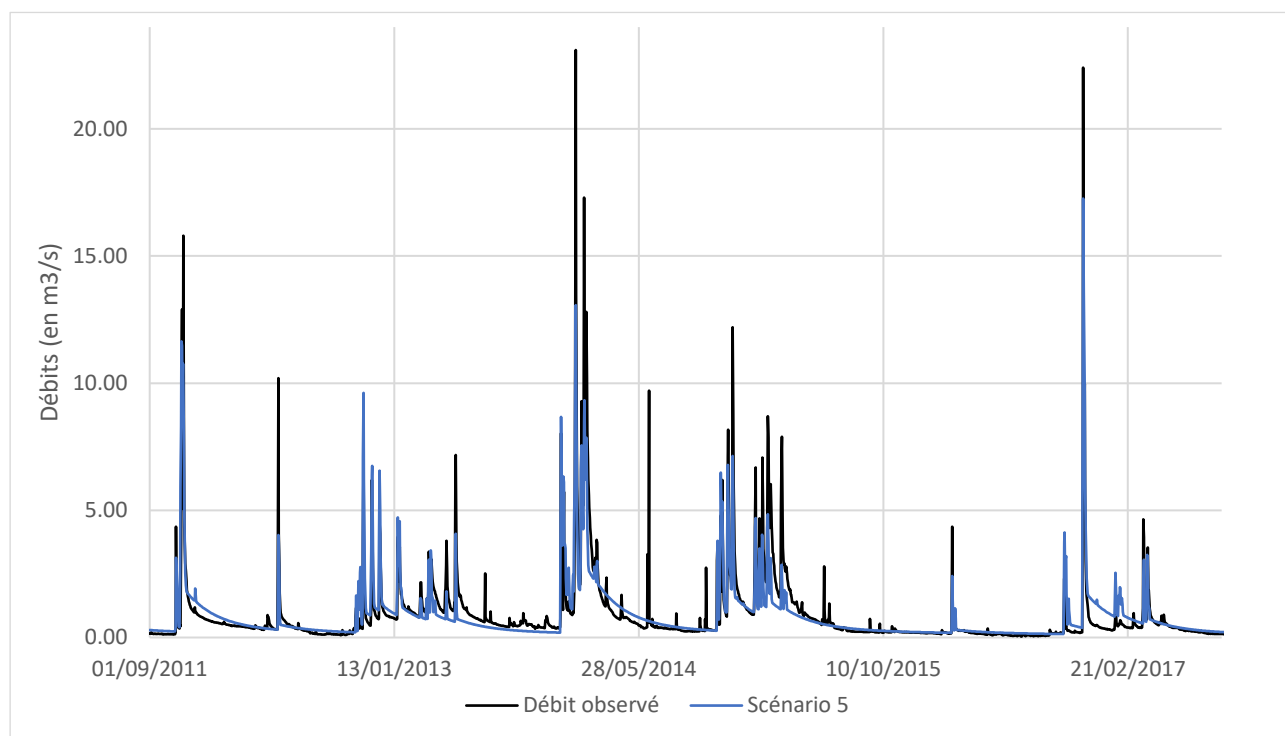


Figure 31 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 5.

La période de plus forte variabilité dans le taux de précipitations : de 2014 à 2018 n'est pas moins bien simulée que les autres années, quel que soit le modèle (Figure 32). Les crues du 18/06/2014 et du 13/10/2014 ne sont simulées par aucun modèle. Sur la courbe des volumes cumulés (Figure 33), le décalage visible entre les volumes observés et simulés démarre en février 2015, du fait de la sous-estimation des débits simulés durant les hautes-eaux 2014-2015 (sur les 3 modèles). Le débit de base ou en période d'étiage est correctement simulé avec les 3 modèles.

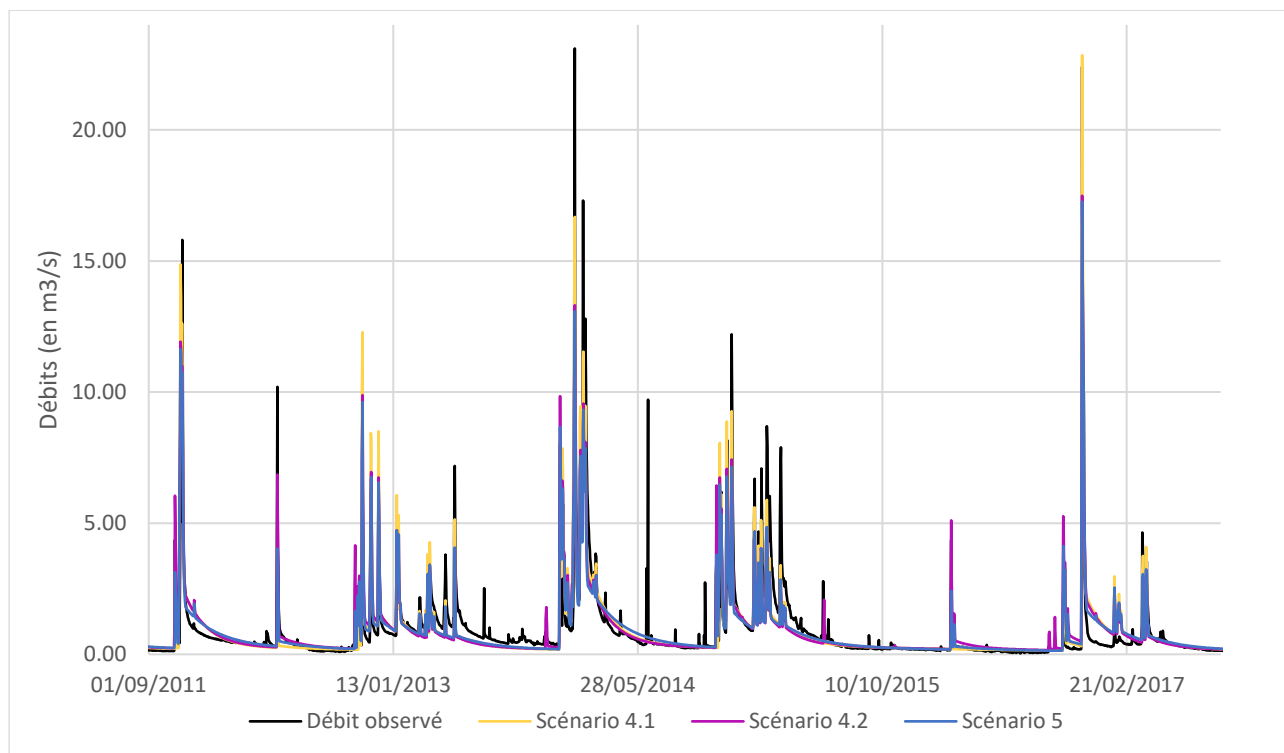


Figure 32 : Comparaison des résultats obtenus avec les trois meilleurs scénarios par rapport au débit observé.

La Figure 33 qui présente les volumes cumulés observés et simulés, doit être considérée avec précaution sur la période de calage car les résultats incluent également la période de chauffe du modèle (2007-2008) qui génère un décalage pour les scénarios 4.2 et 5. En supprimant la période de chauffe, les trois scénarios équilibrent correctement le volume cumulé simulé sur la période de calage et la période de validation.

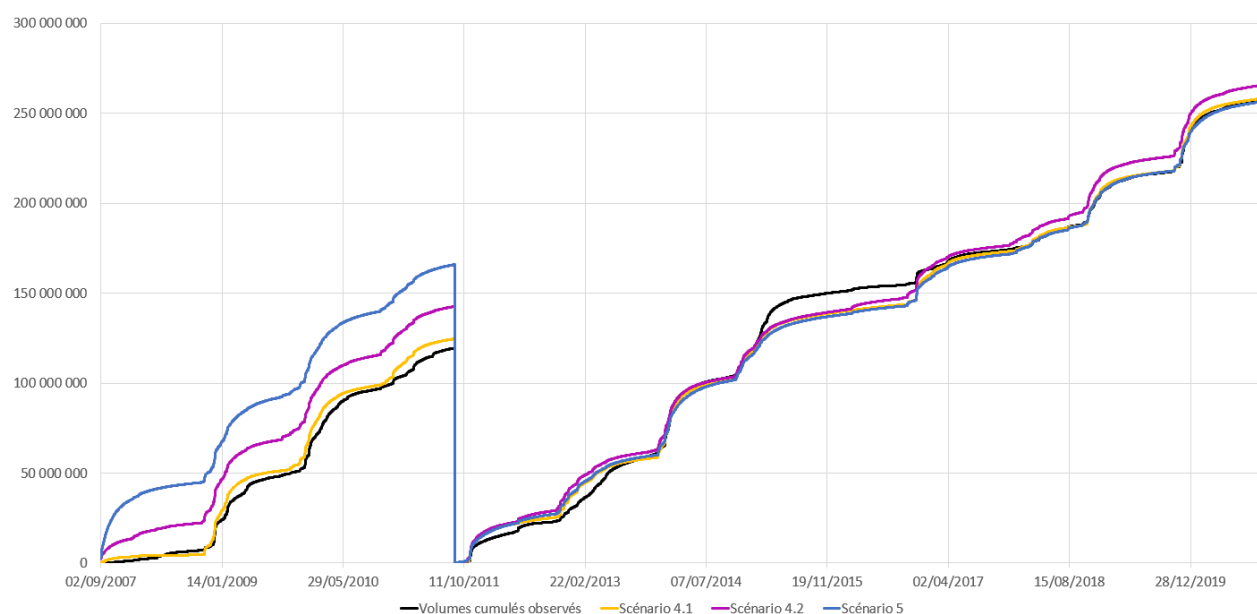


Figure 33 : Graphiques des volumes cumulés des trois meilleurs modèles de la station de Roquevaire.

5.3.2 Le meilleur modèle et ses limites

Les trois modèles présentés donnent de bons résultats. Il n'y a pas de « meilleur modèle ». Le scénario 4.1 est celui ayant permis de simuler le mieux les grands pics de crue (Figure 29) tout en restant fidèle aux débits observés, comme on peut le voir dans la Figure 33. De plus, sa structure est plus simple que celle du scénario 5, étant donné qu'il ne nécessite que deux composantes à écoulement lent (représentées par les réservoirs L et M).

Si l'on zoome sur les débits simulés du 01/09/2017 au 01/09/2020 (Figure 34), on remarque que le modèle 4.1 simule une grande partie des pics de crue, dont quelques pics en période d'été, malgré leur sous-estimation évoquée précédemment. Certains pics sont très bien estimés, comme celui du 20/12/2019 mais beaucoup restent surestimés (comme le pic du 31/10/2018) ou sous-estimés (comme le pic du 23/11/2019). Les débits de base en période d'été restent fidèles aux débits observés. On remarque également que sur la période de 2017 à 2019, les débits sont globalement mieux simulés que sur la période de 2013 à 2015 analysée précédemment.

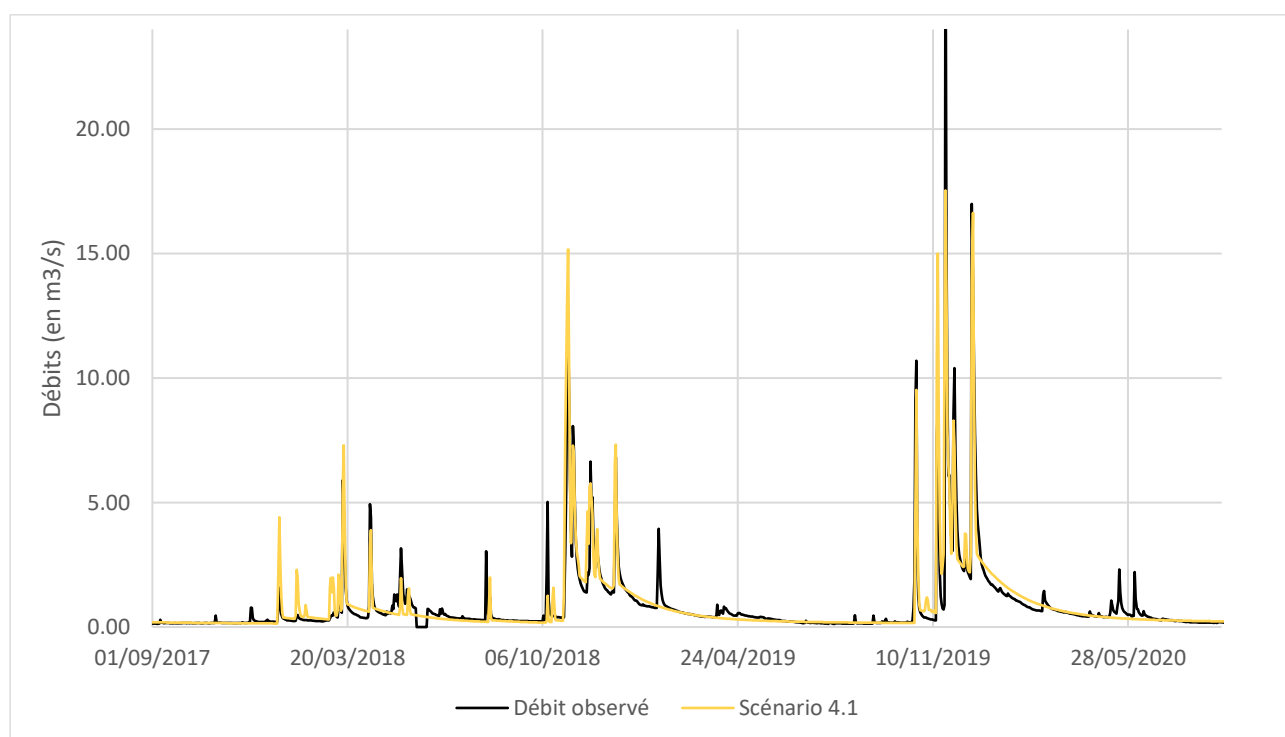


Figure 34 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4.1 - Roquevaire 2017 - 2020

Les données de pluie annuelle et d'évapotranspiration réelle peuvent être utilisées pour déterminer la pluie efficace par période de temps (par exemple par année hydrologique). Cette manipulation n'est possible que grâce aux données d'évapotranspiration réelle simulées par le modèle. La pluie efficace calculée est fortement dépendante de la valeur du paramètre E_{min} qui caractérise la réserve utile (RU) du sol, c'est-à-dire le stock d'eau dans le réservoir E (sol + épikarst) qui va être disponible uniquement pour l'évapotranspiration. Dans le modèle 4.1, $E_{min}=105$ mm, c'est une valeur très forte, beaucoup plus forte que les valeurs trouvées habituellement dans la littérature (cette valeur est généralement inférieure à 60 mm). Il devient donc risqué d'utiliser ce modèle pour un tel calcul de pluie efficace. L'élaboration d'un modèle qui répond aux critères de Nash ou de volume cumulé, ainsi qu'à la bonne simulation globale des crues et des récessions, ne constitue pas pour autant un modèle parfait. Le modélisateur se doit donc d'être vigilant dans l'utilisation du modèle pour des calculs complémentaires ou des simulations dans des conditions hydrologiques différentes. Le calcul de pluie efficace a été testé,

mais les résultats en partie aberrants sur les années de très faibles précipitations (par exemple l'année 2015-2016) montrent qu'il est préférable de ne pas exploiter ces résultats de pluie efficace. La modélisation du débit de Roquevaire peut encore être améliorée.

5.4 Le Charrel

5.4.1 Comparaison des scénarios testés

Pour la station Le Charrel trois scénarios avec des résultats satisfaisants ont été sélectionnés pour l'étude du bassin versant (les scénarios 4, 5 et 6). Dans cette partie du rapport la comparaison concernant ces trois scénarios sera développée. L'explication des résultats trouvés pour les scénarios restants se trouve dans l'annexe B. Comme pour la station hydrométrique de Roquevaire, le modèle est initialisé sur la période du 02/09/2007 au 01/09/2008, puis le calage est fait du 02/09/2008 au 02/09/2011, et enfin la validation du 03/09/2011 au 01/11/2020. La pluie utilisée est celle combinée entre 50% de la station météorologique du Plan d'Aups et 50% d'Aubagne. L'ETP est celle du Plan d'Aups.

Le Tableau 12 montre l'ensemble des valeurs optimales pour les différents paramètres du scénario 4 et les gammes imposées au logiciel pour les trouver. Par exemple, pour les coefficients de vidange des réservoirs L et M (k_{LS} et k_{MS}), des gammes autour des valeurs calculées dans l'analyse des coefficients de récession (section 4.3.2) ont été utilisées : 0.004 j^{-1} pour l'écoulement le plus lent et 0.019 j^{-1} pour l'écoulement le plus rapide (parmi les écoulements lents en période de tarissement). Dans la démarche de calage de ce scénario, les valeurs précédentes ont été fixées, mais les résultats trouvés n'ont pas été d'aussi bonne qualité que ceux obtenus en laissant le logiciel caler parmi une gamme de valeurs.

La gamme choisie pour la valeur de $E_{\min}$ correspond à la gamme la plus large admissible ici, qui a donné des résultats satisfaisants. Pourtant, l'ensemble des paramètres trouvés en utilisant la même gamme dans les autres scénarios ne permettait pas de simuler correctement le fonctionnement de l'hydrosystème.

Tableau 12 : Résultats du scénario 4 pour la station Le Charrel

Paramètre	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E_0 (mm)	164	0	200
$E_{\min}$ (mm)	-51,1	-60	-20
k_{EL} (mm/jour)	0,0754	0,01	3
k_{EM} (mm/jour)	0,234	0,01	3
k_{ES} (mm/jour)	0,133	0,1	3
L_0 (mm)	73	0	200
k_{LS} (mm/jour)	0,00503	0,001	0,009
M_0 (mm)	186	0	200
k_{MS} (mm/day)	0,0117	0,01	0,02
RA (km ²)	114	20	167
Volume cumulé observé (m ³)	324 978 307		
Volume cumulé simulé (m ³)	362 669 136		
WOBJ value (phase de calage)	0,7513		

Paramètre	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
WOBJ value (phase de validation)		0,7638	

La Figure 35 compare graphiquement les débits observés et simulés avec le scénario 4 pour l'année 2015. Le modèle arrive à simuler les pics de crue entre janvier et février de manière très similaire à ce qui est observé. En mars, même si le pic est simulé, il est sous-estimé. Pendant la période de tarissement qui commence à peu près en mars, le modèle simule le débit de base de la rivière qui se maintient pendant la période de faibles précipitations. Cependant, il n'est pas capable de simuler les petites crues comme celle du 13 septembre 2015.

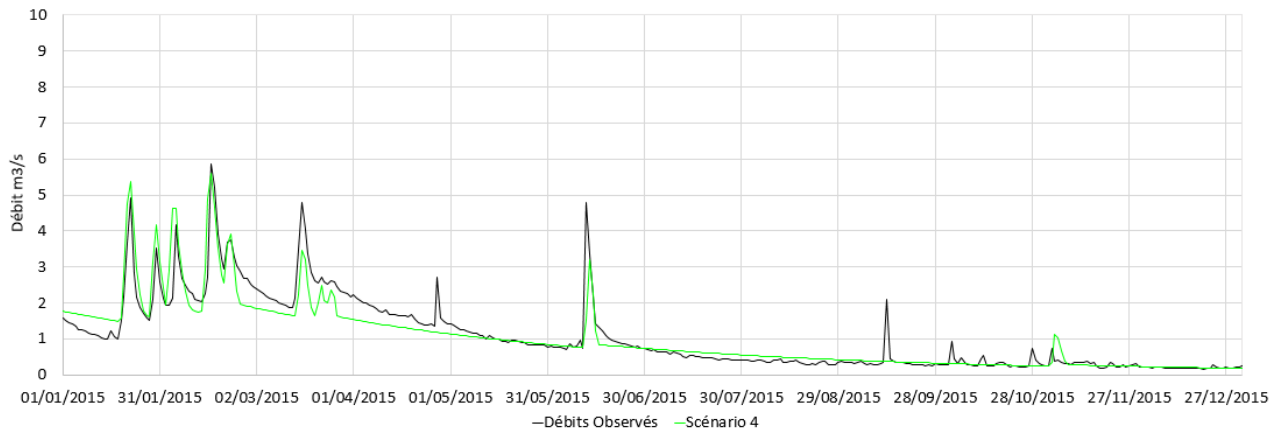


Figure 35 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4 – Le Charrel.

De la même manière, le scénario 5 a montré des résultats assez bons. Le Tableau 13 montre l'ensemble des paramètres optimaux et des gammes utilisées. Pour les compartiments qui simulent les écoulements lents (k_{MS} et k_{LS}), même si la gamme utilisée est grande (entre 0,001 et 0,1), elle reste représentative des écoulements lents. Il est remarquable que même en laissant une gamme plus grande le logiciel a trouvé des valeurs assez proches de celles trouvées en utilisant la loi de Maillet.

Tableau 13 : Résultats du scénario 5 pour la station Le Charrel

Paramètre	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E_0 (mm)	14,3	0	200
E_{min} (mm)	-114	-120	-50
k_{EL} (mm/jour)	0,506	0,01	3
k_{EM} (mm/jour)	0,0883	0,01	3
k_{EC} (mm/jour)	0,076	0,01	3
k_{ES} (mm/jour)	0,14	0,01	3
L_0 (mm)	176	0	200
k_{LS} (mm/jour)	0,0106	0,001	0,1
M_0 (mm)	172	0	200
k_{MS} (mm/jour)	0,00651	0,001	0,1
C_0 (mm)	81	0	200
k_{CS} (mm/jour)	0,271	0,1	3
RA (km ²)	146	20	167

Paramètre	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
Volume cumulé observé (m ³)		324 978 307	
Volume cumulé simulé (m ³)		364 647 667	
WOBJ value (phase de calage)		0,7700	
WOBJ value (phase de validation)		0,7612	

La Figure 36 montre la comparaison des débits observés avec les résultats des scénarios 4 et 5. Les pics des crues durant la période de hautes eaux sont légèrement surestimés. Néanmoins, les pics de crue de la période d'été ne sont probablement pas simulés à cause de la valeur de E_{min} .

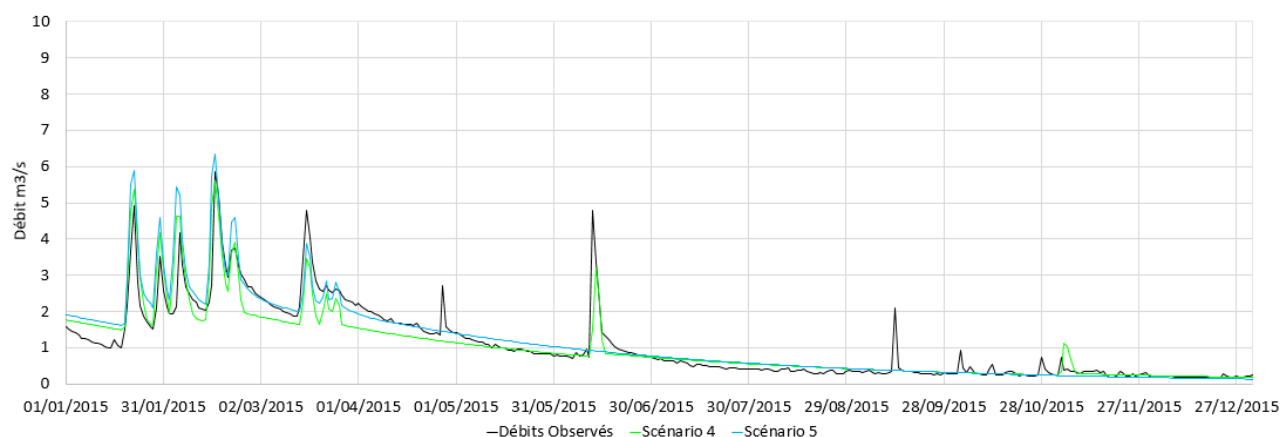


Figure 36 : Comparaison des débits observés et simulés avec les scénarios 4 et 5 – Le Charrel.

Finalement, le Tableau 14 montre les paramètres optimaux pour le scénario 6. Cette fois-ci les coefficients de récession ont été fixés pour les compartiments M et L en fonction des résultats trouvés par calage manuel d'une loi de Maillet (voir la section 4.3.2). De manière similaire au scénario 5, cette configuration du système n'a pas admis l'utilisation d'un E_{min} plus petit (en valeur absolue).

Tableau 14 : Résultats du scénario 6 pour la station Le Charrel.

Paramètre	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E_0 (mm)	167	0	200
E_{min} (mm)	-97,6	-100	-50
k_{EL} (mm/jour)	0,359	0,01	3
k_{EM} (mm/jour)	0,409	0,01	3
k_{ES} (mm/jour)	0,27	0,27	0,27
k_{hy} (mm/jour)	0,01	0,001	3
E_{hy} (mm)	20,1	0,1	40
DE_{hy} (mm)	39,2	30	40
α_{hy} (sans unité)	1,76	1	2
L_0 (mm)	93,6	0	200
k_{LS} (mm/jour)	0,004	0,004	0,004
M_0 (mm)	62,2	0	200
k_{MS} (mm/jour)	0,019	0,019	0,019

Paramètre	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
RA (km ²)	124	20	167
Volume cumulé observé (m ³)		324 978	307
Volume cumulé simulé (m ³)		330 080	789
WOBJ value (phase de calage)		0,755	
WOBJ value (phase de validation)		0,748	

La configuration utilisée dans le scénario 6 montre une surestimation, plus grande que celle trouvée avec le scénario 5 pour les trois premières crues de l'année 2015 (Figure 37), mais les crues de la période de tarissement ne sont pas simulées (effet de stockage de la pluie dans le réservoir E du modèle du fait de Emin).

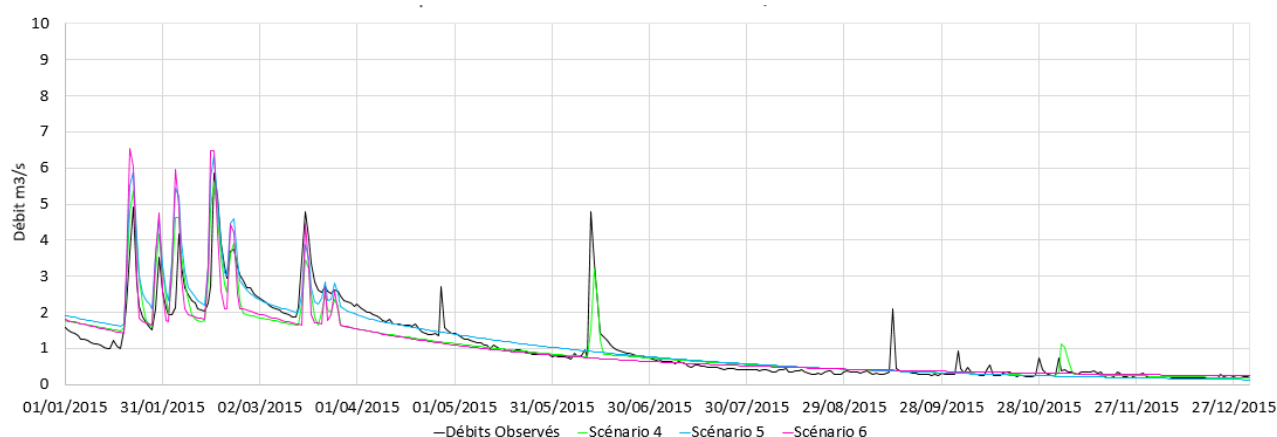


Figure 37 : Comparaison des débits observés et simulés avec les scénarios 4, 5 et 6 – Le Charrel.

Une caractéristique du scénario 5 qui est mise en évidence dans la Figure 37 et la Figure 38 est le fait que ce scénario surestime les débits après les pics de crue. Par exemple, entre février et juin 2014 les débits simulés par le scénario 5 sont plus grands par rapport aux valeurs observées, et aussi en comparaison avec les valeurs simulées des scénarios 4 et 6.

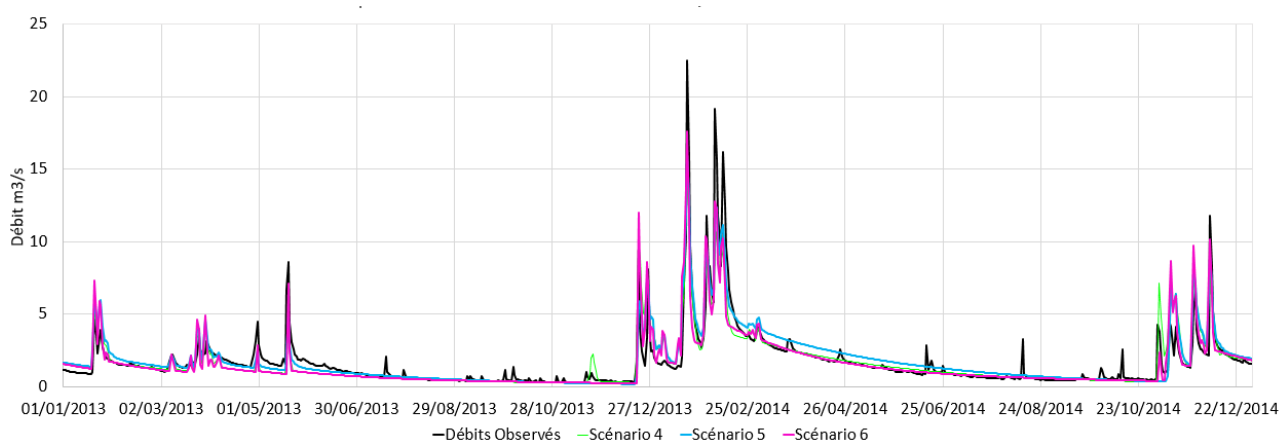


Figure 38 : Comparaison des débits observés et simulés avec les scénarios 4, 5 et 6 (2013 – 2014).

Quant aux pics de crue les plus forts observés fin 2019 (Figure 43), le scénario 5 génère les plus grandes crues (événements de crue entre novembre et décembre 2019) en estimant 4 des 5 crues observées. Même si les deux premiers sont surestimés, le modèle n'arrive pas à reproduire le pic

le plus fort mesuré le 23 novembre 2019. Il est important de noter qu'aucun scénario, y compris ceux décrits dans les annexes, n'a réussi à simuler les plus gros pics de crue.

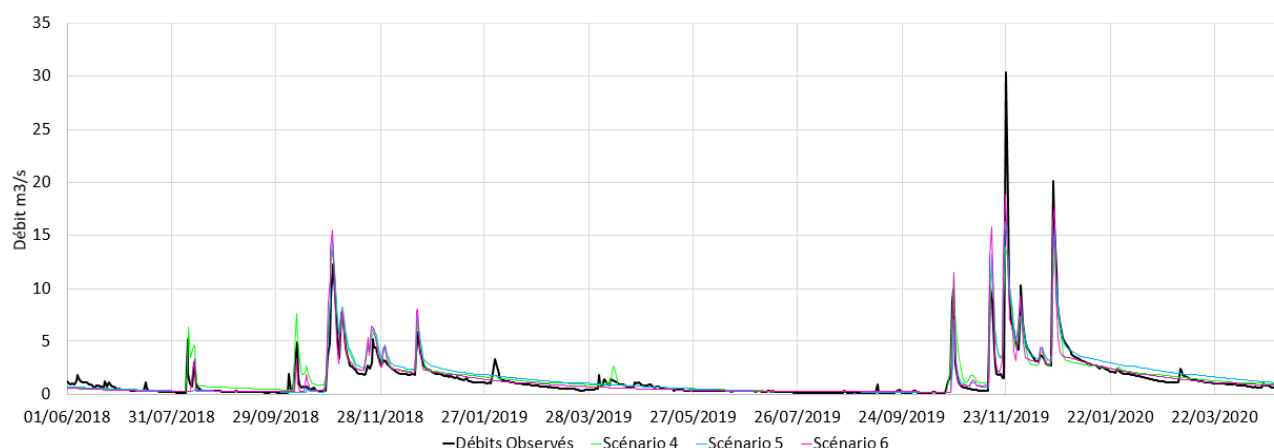


Figure 39 : Comparaison des débits observés et simulés avec les scénarios 4, 5 et 6 (Juin 2018 - Mai 2020).

Par rapport au volume cumulé simulé, en comparaison avec celui observé, la Figure 40 met en évidence que le modèle le plus proche du volume réel est le scénario 6 avec seulement une surestimation du volume de 2%. Les deux autres scénarios montrent une différence considérable à partir de la fin de novembre 2016 (événement intense de précipitations et crue de l'Huveaune à partir du 21/11/2016). Cette différence correspond à une surestimation de 12% pour les scénarios 4 et 5.

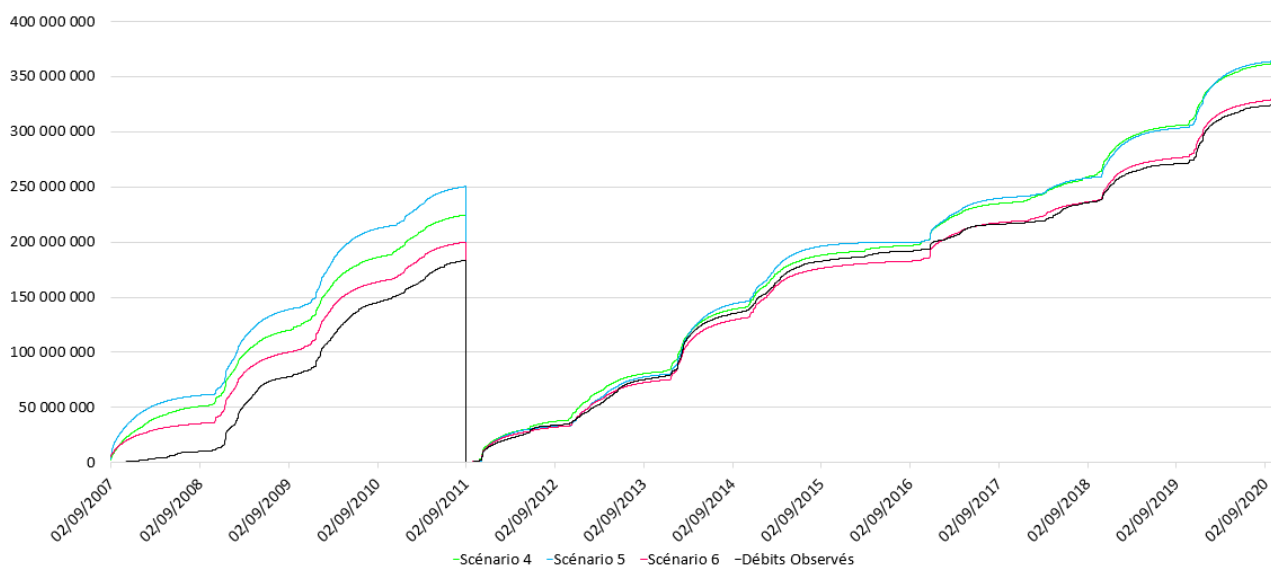


Figure 40 : Comparaison des volumes cumulés des scénarios 4, 5 et 6.

Pour finir la comparaison entre les scénarios, une des caractéristiques nécessaires à rectifier dans le fonctionnement des modèles est leur capacité à utiliser tous les compartiments et sorties vers la rivière. À titre informatif, il a pu être constaté dans cette démarche que le scénario 6 n'utilise pas l'écoulement Q_{hyES} correctement. En fait, l'écoulement Q_{hyES} n'a été utilisé qu'une fois, lors de la pluie du 21 novembre 2016, alors même que les pluies de novembre 2019 ont généré des crues plus importantes.

5.4.2 Le meilleur modèle et ses limites

Par rapport à la section 5.4.1, il a été observé que les trois modèles présentés ont de bonnes capacités dans la simulation des débits observés. Les simulations ne sont pas parfaites, en particulier il est difficile d'obtenir un modèle qui simule correctement à la fois les débits de pointe des crues et les étiages. L'analyse manuelle préliminaire visant à rechercher les pentes caractéristiques lors des récessions a permis d'orienter la modélisation et d'améliorer les calages. Le scénario 4 (2 composantes lentes passant par les réservoirs M et L, et un écoulement rapide direct) avait donné des résultats satisfaisants pour la simulation de la station de Roquevaire, située en amont de la station du Charrel à Aubagne. Ce scénario est également bien adapté pour simuler le débit au Charrel. Toutefois, les pics de crue mal simulés (le modèle sous-estime généralement le débit de pointe dans les crues extrêmes) mettent en évidence des arrivées d'eau très rapides durant les événements pluvieux intenses. Cette caractéristique, mise en évidence par la modélisation, montre : (1) qu'il est encore possible d'améliorer les modèles, soit par un meilleur calage, soit en complexifiant la structure, et (2) que le cas d'étude présente un fonctionnement qui n'a pas encore été totalement inclus dans le modèle conceptuel pour l'instant. Cet apport d'eau rapide et intense durant les crues pourrait provenir de la contribution des zones urbanisées et imperméabilisées du bassin versant dans la plaine d'Aubagne.

Quelques graphiques sont donnés ci-après, pour illustrer les résultats obtenus avec le scénario 4 au Charrel (Huveaune à Aubagne)

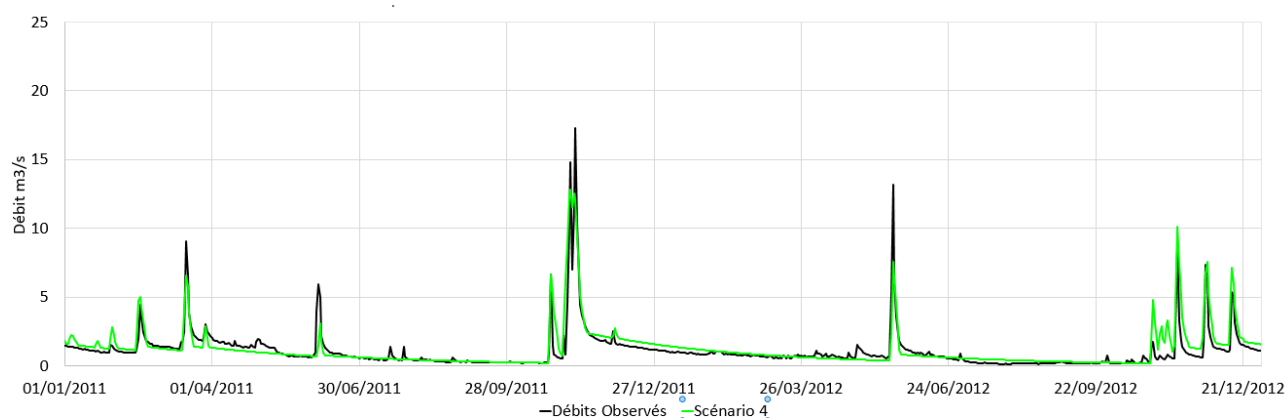


Figure 41 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4 - Le Charrel 2011 - 2012.

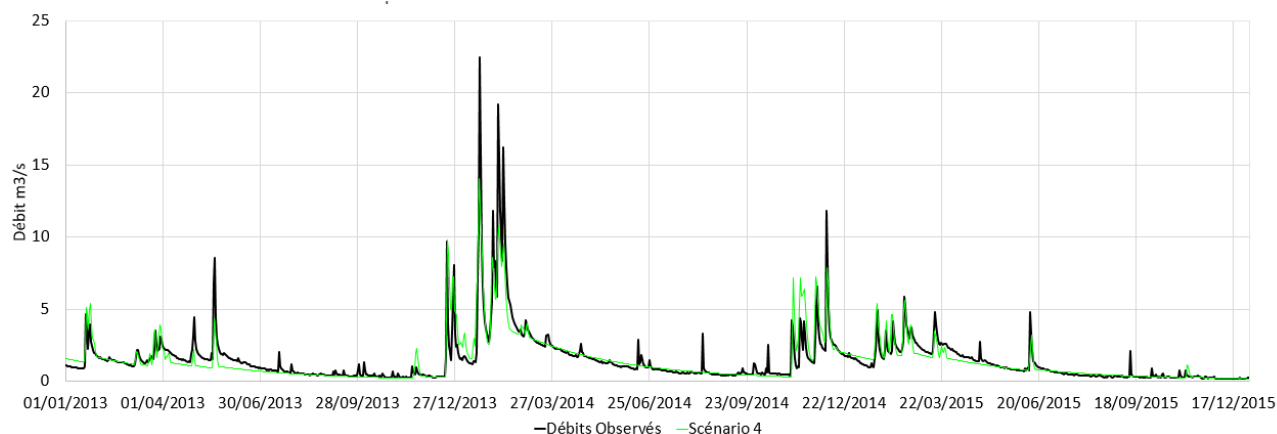


Figure 42 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4 - Le Charrel 2013 - 2015

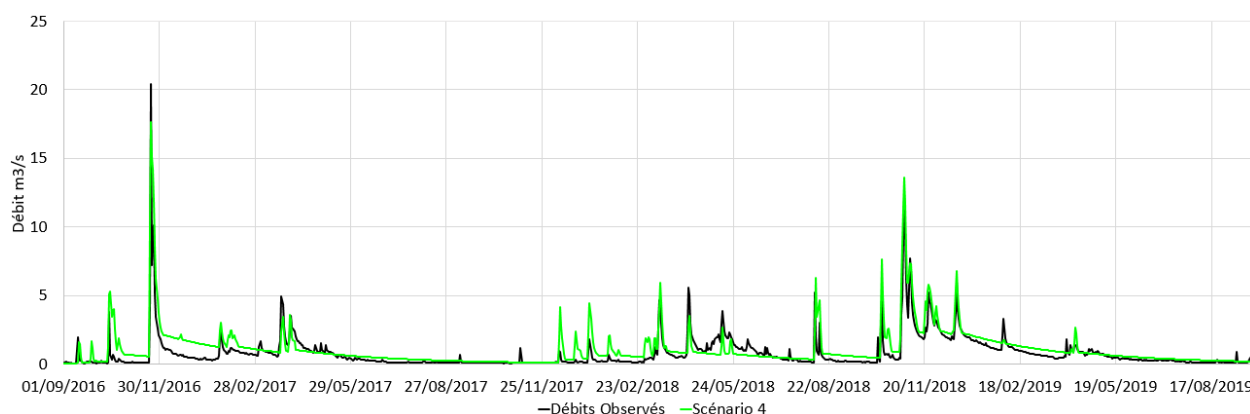


Figure 43 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4 - Le Charrel Sept 2016 - Oct 2019..

Pour finir l'analyse des données obtenues avec le modèle KarstMod utilisant le scénario 4, il est proposé de calculer la pluie efficace par année hydrologique (entre le 1er octobre et le 30 septembre de l'année suivante). Les valeurs d'évapotranspiration réelle ont été extraites des résultats du modèle calé par KarstMod. La pluie efficace correspond à la différence entre la pluie totale et l'évapotranspiration réelle.

Les résultats sont présentés dans le Tableau 15. La pluie efficace a des valeurs extrêmes annuelles comprises entre 110 et 696 mm/an, respectivement en 2015-2016 et 2008-2009. Les années les plus pluvieuses sont celles qui produisent la pluie efficace la plus forte.

Tableau 15 : Calcul de pluie efficace avec le modèle KarstMod utilisant le scénario 4, pour la pluie combinée (50% Plan d'Aups + 50% Aubagne) et le débit mesuré à la station de Le Charrel

Année hydrologique (1 oct. – 30 sept.)	Pluie totale (mm/an) (50% PA + 50% A)	ETP (mm/an)	ETRéelle (mm/an)	Pluie efficace (mm/an)	% P. Efficace /P. totale
2008 - 2009	1 160	1 190	464	697	60%
2009 - 2010	1 057	1 095	546	511	48%
2010 - 2011	808	1 112	494	315	39%
2011 - 2012	758	1 230	412	346	46%
2012 - 2013	959	1 102	577	382	40%
2013 - 2014	1 087	1 115	528	559	51%
2014 - 2015	849	1 211	481	368	43%
2015 - 2016	540	1 189	430	110	20%
2016 - 2017	735	1 241	446	289	39%
2017 - 2018	902	1 123	663	239	26%
2018 - 2019	819	1 242	439	381	46%
2019 - 2020	1 021	1 190	515	506	50%

6. Discussion et conclusion

Cette étude avait pour but de tester la capacité de la plateforme de modélisation Pluie-Débit KarstMod à simuler le débit moyen journalier d'une rivière en contexte karstique. Deux stations hydrométriques suivies par la DREAL ont été choisies sur la rivière Huveaune : (1) Roquevaire

(banque hydro : Y4414030) et (2) Le Charrel (banque hydro : Y4424040). La première est caractérisée par un bassin versant peu urbanisé correspondant à l'amont du bassin versant de l'Huveaune entre le flanc nord de la Sainte-Baume et le versant sud du Régagnas-Olympe, tandis que la seconde est située à l'aval d'Aubagne et draine une partie de la plaine urbanisée Aubagne-Gémenos.

Les résultats obtenus sont satisfaisants, aussi bien en terme de valeur de critère de Nash et de cumul des volumes simulés, que d'un point de vue qualitatif sur l'allure des courbes qui représentent correctement la dynamique du cours d'eau. Ces résultats satisfaisants ont permis d'utiliser le modèle pour estimer la taille du bassin versant alimentant les deux stations. Cette estimation est basée sur un calcul de bilan hydrique réalisé par le modèle. Cette zone d'étude est particulièrement intéressante pour deux caractéristiques majeures : (1) L'Huveaune est un cours d'eau aux fortes variations de débit, alternant entre quelques centaines de litres par secondes à l'étiage et des pics de crues supérieur à 50 m³/s (sur les 2 stations étudiées). L'eau du cours d'eau est en lien direct avec les eaux souterraines karstiques, qui l'alimentent en partie à l'étiage, et qui viennent augmenter l'effet de crues éclair durant les événements pluvieux méditerranéens par transfert rapide dans le karst. L'Huveaune en crue devient un fleuve qui présente un fort risque inondation dans la zone urbanisée continue entre Aubagne et Marseille. (2) A l'échelle régionale, le débit moyen interannuel de l'Huveaune est identifié comme largement déficitaire par rapport à la taille de son bassin topographique. Cette situation implique qu'une partie de l'eau des précipitations tombées sur le bassin topographique ne participe pas à l'alimentation de l'Huveaune. Cette eau part alors par la voie souterraine pour alimenter les masses d'eau circulant dans les aquifères carbonatés en direction de la mer à Cassis (sources de Port-Miou et Bestouan), traversant ainsi les grands accidents géologiques de la basse-Provence calcaire entre la Sainte-Baume et l'unité du Beausset.

Les résultats présentés dans ce rapport constituent uniquement une étude préliminaire de la relation Pluie-Débit de l'Huveaune. Cette étude a permis de montrer qu'il était possible de simuler le débit d'une rivière en contexte karstique, impliquant des débits variables dans une large gamme et des crues rapides, via un modèle conceptuel à réservoir, spécifique des sources karstiques. Cela a permis de voir qu'un système à réservoirs, même s'il n'est pas fait initialement pour la simulation des débits d'une rivière, s'adapte convenablement aux dynamiques impliquées dans ce type d'hydrosystème de surface. Comme une source karstique, l'alimentation d'une rivière en contexte karstique dépend des mêmes types d'écoulement que la source, c'est-à-dire un certain nombre d'écoulements lents et rapides. Les meilleurs modèles sélectionnés pour Roquevaire et Le Charrel sont des modèles qui simulent bien les dynamiques impliquées dans le fonctionnement de l'hydrosystème, malgré la simplification effectuée en ne prenant en compte que trois composantes d'écoulement : deux composantes lentes et une composante rapide. Les modèles reposent aussi sur l'hypothèse qu'à l'échelle pluriannuelle il n'y a pas de stockage ou d'utilisation des réserves du système. Dans le processus de modélisation, l'utilisateur a également contraint le modèle en fournissant des gammes de coefficients de récession obtenues par l'analyse graphique des hydrogrammes.

La plateforme de modélisation KarstMod a pour avantage de proposer un calage automatique des valeurs de chaque paramètre au sein d'une gamme de valeurs plausibles définies par l'utilisateur. Parmi les paramètres, la surface du bassin versant peut être calée et n'est donc pas nécessairement fixée a priori. C'est une des différences avec les modèles de type GR (INRAE), qui sont connus pour être facilement adaptables pour la modélisation des cours d'eau à différentes échelles temporelles. Sur les deux stations hydrométriques de Roquevaire et du Charrel, le calage de la taille du bassin versant a donné systématiquement une surface très inférieure à celle du bassin versant topographique. Cette différence était attendue, étant donné l'écoulement souterrain régional souterrain vers Cassis, mais KarstMod permet de la quantifier. Plusieurs scénarios ont été testés, donnant par exemple pour la station du Charrel une surface comprise entre 114 et 146

km², alors que le bassin topographique est donné par la DREAL égal à 245 km². A Roquevaire, la surface du bassin optimale se situe entre 85 et 100 km², alors que le bassin topographique est de 165 km² (DREAL). C'est donc environ 50% de la surface du bassin versant topographique qui ne contribue au débit de l'Huveaune, et qui contribue à l'écoulement souterrain vers l'exutoire régional à Cassis. Les 50% de surface restant alimentent l'Huveaune via des écoulements multiples : (1) les écoulements souterrains qui sortent au pied des massifs carbonatés (comme par exemple les sources du flanc nord de la Sainte-Baume, telles que La Brise, La Foux de Saint-Zacharie, les Encanaux...), ou (2) par les alluvions des plaines d'accompagnement de l'Huveaune (principalement Auriol et Aubagne), ou (3) par le ruissellement lors des pluies intenses sur les roches saturées en eau et les zones urbaines imperméabilisées.

L'analyse graphique préliminaire a permis de voir que les débits au niveau des deux stations pouvaient se décomposer en deux composantes lentes (les coefficients de récession calculés en période de tarissement) et une composante rapide (pour les pics de crue rapides). Pour la station de Roquevaire cependant, les écoulements lents sont plus variés, mais par rapport aux résultats obtenus (en comparant les scénarios 4 et 5), aucune différence significative en termes de qualité n'a été remarquée entre les modèles utilisant deux écoulements lents et ceux en utilisant trois. Ces écoulements lents voire très lents mettent en valeur le fait que l'Huveaune ne s'assèche jamais, même en période d'étiage. L'eau de la rivière à l'étiage provient d'un mélange entre l'eau souterraine apportées par les rares sources d'aquifères carbonatés qui ne tarissent pas (par exemple les sources des Encanaux qui alimentent la Vède), l'eau souterraine des nappes alluviales (par exemple à l'aval de la plaine d'Auriol), et les rejets anthropiques (par exemple la STEP d'Auriol). A l'inverse, en crue une partie du débit rapide de l'Huveaune est mal simulé, car les pics de crue ont été généralement sous-estimés par les différents modèles. Il existe donc une composante rapide mal prise en compte par ces modèles KarstMod, mais qui pourrait être mieux appréhendée par des travaux futurs. Le développement de nouveaux modèles sur ce cas d'étude pourra être amélioré en proposant plusieurs pistes d'investigations : tester des modèles non linéaires, voir l'effet du pas de temps (journalier ou horaire), prendre en compte des surfaces contributives temporaires (artificiellement imperméabilisées), intégrer la distribution spatiale hétérogène des précipitations.

Finalement, au regard des résultats, l'utilisation de KarstMod s'avère valable en tant qu'outil de modélisation pluie-débit d'une rivière en contexte karstique. Il serait intéressant de comparer les résultats obtenus par d'autres modèles sur le même cas d'étude, comme par exemple les modèles GR, afin de voir si les difficultés de modélisation sont liées aux caractéristiques de l'outil de modélisation choisi ou à la spécificité karstique de l'hydrosystème étudié.

7. Bibliographie

- Arfib B. (2018) Ressources en eau, hydrologie et hydrogéologie. In Villeneuve et al., Mémoire explicatif, Carte géol. France (1/50 000), feuille Aubagne- Marseille, 3ème édition (1044), pp. 262-271.
- Arfib, B., Charlier, J.B., 2016. Insights into saline intrusion and freshwater resources in coastal karstic aquifers using a lumped Rainfall–Discharge–Salinity model (the Port-Miou brackish spring, SE France). *Journal of Hydrology* 540, 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.010>
- Baudement C, B. Arfib, N. Mazzilli, J. Jouves, T. Lamarque, Y. Guglielmi. 2017. Groundwater management of a highly dynamic karst by assessing baseflow and quickflow with a rainfall-discharge model (Dardennes springs, SE France), BSGF – Earth Sciences Bulletin. 188: 40 <https://doi.org/10.1051/bsgf/2017203>
- Baudement C. (2018) Évaluation des capacités d'écoulement et de stockage d'un aquifère karstique dynamique par caractérisation géologique et modélisation pluie-débit. Sources de Dardennes, Toulon, France. Thèse de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille. 271 pages.

- Bestani, L., N. Espurt, J. Lamarche, O. Bellier, and F. Hollender (2016), Reconstruction of the Provence Chain evolution, southeastern France, *Tectonics*, 35, 1506–1525, doi:10.1002/2016TC004115.
- Bezès, C., 1976. Contribution à la modélisation des systèmes aquifères karstiques; établissement du modèle Bemer; son application à quatre systèmes karstiques du midi de la France. PhD Thesis, Université des Sciences et Techniques du Languedoc. , 135 pp.
- Cavalera T. (2007) Etude du fonctionnement et du bassin d'alimentation de la source sous-marine de Port Miou (Cassis, Bouches-du-Rhône). Approche multicritère. Thèse de doctorat de l'Université de Provence. 403 pages.
- Charlier J.B., Chapuis H., Desprats J-F. (2013) Appui au Schapi 2013 – Module 1 – Identification du rôle potentiel du karst dans les crues sur le territoire du SPC Méditerranée-Est. Rapport BRGM RP-62888-FR. 104 p.
- Coulier, C., 1985. Hydrogéologie karstique de la Sainte Baume occidentale, Bouches du Rhône - Var. Université de Provence Aix Marseille I.
- Dufresne C., Arfib B., Ducros L., Duffa C., Giner F., Rey V. (2020), Karst and urban flood-induced solid discharges in Mediterranean coastal rivers : The case study of Las River (SE France), *Journal of Hydrology*, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125194>
- Fabrègue V., Raymond M. (2014) Etude hydrologique et hydraulique sur le bassin versant de l'Huveaune. Rapport de présentation Version 1 mars 2014. EGIS, DDTM13. 214 p.
- Fleury, Perrine. (2007). Modelling of the functioning of karst aquifers with a reservoir model: Application to Fontaine de Vaucluse (South of France). *Journal of hydrology (Amsterdam)*. (345)1. p.38 - 49.
- Garin T., Arfib B., La modélisation Pluie-Débit-Niveau de l'aquifère karstique de Dardennes : synthèse des modèles proposés au cours du projet Dardennes (2014-2018). [Rapport de recherche] AMU Aix-Marseille Université ; CEREGE. 2018. hal-02518051
- Garin, T (2021). 5e comité de pilotage du projet Karst-Huveaune. Université Aix-Marseille, 13/09/2021.
- Hartmann A., Lange J., Vivó Aguado A., Mizyed N., Smiatek G., Kunstmann H. (2012) A multi-model approach for improved simulations of future water availability at a large Eastern Mediterranean karst spring, *Journal of Hydrology* 468–469 130–138
- Jourde H., Massei N., Mazzilli N., Binet S., Batiot-Guilhe C., Labat D., Steinmann M., Bailly-Comte V., Seidel J. L., Arfib B., Charlier, J.B., Jardani A., Fournier M. et al. (2018) SNO KARST: a French network of observatories for the multidisciplinary study of critical zone processes in karst watersheds and aquifers. *Vadose Zone Journal*. 17:180094, doi:10.2136/vzj2018.04.0094
- Le Mesnil M., Charlier J-B., Moussa R., Caballero Y., Dörfliger N. (2020). Interbasin groundwater flow: Characterization, role of karst areas, impact on annual water balance and flood processes. *Journal of hydrology (Amsterdam)*. (585).
- Mazzilli N., Bertin D., KarstMod User Guide - version 2.2. 2019. hal-01832693.
- Mazzilli N., V. Guinot, H. Jourde, N. Lecoq, D. Labat, B. Arfib, C. Baudement, C. Danquigny, L. Dal Soglio, D. Bertin (2019) KarstMod: a modelling platform for rainfall - discharge analysis and modelling dedicated to karst systems. *Environmental Modelling and Software*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.03.015>
- Météo-France (2021) Le climat en France métropolitaine, 24/02/2020. Consulté le 16/07/21. <https://meteofrance.com/comprendre-climat/france/le-climat-en-france-metropolitaine>
- Mouelhi S. (2003) Vers une chaîne cohérente de modèles pluie-débit aux pas de temps pluriannuel, annuel, mensuel et journalier. *Hydrologie. ENGREF (AgroParisTech)*, 2003. Français. HAL Id : tel-00005696
- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I -- A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282.
- Perrin C. (2000) Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble. 530 p.
- Perrin, C., C. Michel and V. Andréassian (2003). "Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation." *Journal of Hydrology* 279(1-4): 275-2
- Tritz, S., Guinot, V., Jourde, H., 2011. Modelling the behaviour of a karst system catchment using nonlinear hysteretic conceptual model. *Journal of Hydrology*, 397(3-4): 250-262. DOI:10.1016/j.jhydrol.2010.12.001
- Villeneuve, M., Blanc, J.-J., Collina-Girard, J., Dubar, M., Floquet, M., Masse, J.P., Monteau, R., Nury, D., Philip, J., Arfib, B., Argyriadis, I., Arlhac, P., Arnal, C., Caron, J.-P., Fournier, F., Jouves, J., Hennuy, J., Laville, P., Ricour, J., Rousset, C., Tassy, A., Thinon, I., Vacca-Goutoulli, M., 2018. Mémoire explicatif. Carte géol.

France (1/50 000), feuille Aubagne-Marseille, 3ème édition (1004). Orléans : BRGM, 333 p. Carte géologique par Laville P., Monteau R., Villeneuve M. et al.

Liste de tableaux

Tableau 1 : Période des données disponibles de Pluie et ETP.	11
Tableau 2 : Présentation de la station hydrométrique Roquevaire (http://www.hydro.eaufrance.fr/stations/Y4414030)	11
Tableau 3 : Présentation de la station hydrométrique Le Charrel (http://www.hydro.eaufrance.fr/stations/Y4424040)	11
Tableau 4 : Période des données de débit de l’Huveaune disponibles pour cette étude.	12
Tableau 5 : Caractéristiques des bassins versants	12
Tableau 6 : Distribution des altitudes au Charrel et à Roquevaire.	21
Tableau 7: Etude de la taille du bassin versant calée selon le type de pluie intégré au modèle (scénario 5), pour la simulation du débit de l’Huveaune à Roquevaire.	30
Tableau 8 : Résumé des surfaces (km ²) calées par KarstMod pour la simulation du débit à la station hydrométrique de l’Huveaune Le Charrel.	30
Tableau 9 : Résultats du scénario 4.1 pour la station de Roquevaire	31
Tableau 10 : Résultats du scénario 4.2 pour la station de Roquevaire	32
Tableau 11 : Résultats du scénario 5 pour la station de Roquevaire.	33
Tableau 12 : Résultats du scénario 4 pour la station Le Charrel	37
Tableau 13 : Résultats du scénario 5 pour la station Le Charrel	38
Tableau 14 : Résultats du scénario 6 pour la station Le Charrel.	39
Tableau 15 : Calcul de pluie efficace avec le modèle KarstMod utilisant le scénario 4, pour la pluie combinée (50% Plan d’Aups + 50% Aubagne) et le débit mesuré à la station de Le Charrel	43
Tableau 16 : Résultats du scénario 1 de la station de Roquevaire.....	51
Tableau 17 : Résultats du scénario 2 de la station de Roquevaire.....	52
Tableau 18 : Résultats du scénario 3 de la station de Roquevaire.....	53
Tableau 19 : Résultats des scénarios 4.0, 4.01 et 4.02 de la station de Roquevaire	54
Tableau 20 : Résultats des scénarios 5.0, 5.01 et 5.02 de la station de Roquevaire	56
Tableau 21 : Résultats du scénario 6 de la station de Roquevaire.....	57
Tableau 22 : Résultats du scénario 7.0 et 7.01 de la station de Roquevaire	58
Tableau 23 : Résultats du scénario 1 de la station Le Charrel.....	59
Tableau 24 : Résultats du scénario 2 de la station Le Charrel.....	60
Tableau 25 : Résultats du scénario 3 de la station Le Charrel.....	61
Tableau 26 : Comparaison des résultats du scénario 4 - station Le Charrel.....	61
Tableau 27 : Comparaison des résultats du scénario 5 - station Le Charrel.....	63
Tableau 28 : Comparaison des résultats du scénario 6 - station Le Charrel.....	64
Tableau 29 : Résultats du scénario 7 avec la station Le Charrel – Pluie combinée.....	65

Liste de figures

Figure 1 : L’occupation du sol sur les communes du bassin versant de l’Huveaune (extrait du Contrat de rivière Huveaune, 2015).....	7
Figure 2 : Carte géologique au 1/250 000 (source : Infoterre). Les limites approximatives des unités structurales sont tracées : l’Unité du Beausset en vert foncé, le bassin Oligocène de Marseille-Aubagne en rouge, le massif de	

la Sainte-Baume étendu aux Monts Régagnas-Olympe- Aurélien et de l'Agnis en bleu et le massif de l'Etoile en orange. L'emplacement d'une récente coupe géologique faite à l'échelle de la Provence est représenté en trait pointillé noir (Bestani et al., 2016). [carte réalisée par T. Garin, 2019].....	8
Figure 3 : Exemples de restauration du chevauchement pyrénéo-provençal (trait rouge). Les chevauchements de la Sainte-Baume (1) et de l'Aurélien (2) sont déformés par un ensemble de failles normales à fort pendage et comprennent des remontées de sel du Trias notamment au niveau du bassin de l'Huveaune (d'après Bestani et al., 2016).....	9
Figure 4 : Localisation des masses d'eau souterraines sur le bassin versant de l'Huveaune, et des cours d'eau affluents de l'Huveaune. Le tracé rouge du bassin versant est le bassin versant administratif du SMBVH. Le tracé noir correspond aux limites du bassin versant topographique. Carte extraite du Contrat de rivière 2015, mise à jour en 2019.....	10
Figure 5 : Stations météorologiques et hydrométriques utilisées pour cette étude.....	11
Figure 6 : Représentation graphique de l'ETP journalière moyenne par mois (données pluriannuelles) aux stations météorologiques du Castellet et du Plan d'Aups.	13
Figure 7 : Représentation graphique des précipitations mensuelles interannuelles des différentes stations météorologiques (Aubagne 2001-2020, Le Castellet aérodrome 2000-2020, Plan d'Aups 2008-2020).	14
Figure 8 : Pluie annuelle mesurée sur les stations météorologiques du Castellet aérodrome, Aubagne et Plan d'Aups Sainte-Baume (données Météo-France).....	14
Figure 9 : Débit moyen mensuel pluriannuel des stations hydrométriques de l'Huveaune (de l'amont vers l'aval : Le Moulin Blanc à Zaint Zacharie, Roquevaire, Le Charrel à Aubagne).	15
Figure 10 : Débit moyen annuel des différentes stations.	15
Figure 11 : Bassin versant hydrogéologique de Port Miou.proposé par Arfib, Garin et Jouvès en 2021.....	16
Figure 12 : Théorie de la division du bilan hydrique à l'échelle d'un bassin versant (schéma en coupe). Précipitations (P), Ruissellement ou écoulement de surface (S), Eau dans le sol (W), Écoulements souterrains (U), Évapotranspiration (E). L'addition de U et S donne le débit total du cours d'eau (Q). D'après Le Mesnil et al., 2020.	17
Figure 13 : Représentation simplifiée du fonctionnement d'un hydrosystème karstique : réservoir E représentant le sol et l'épikarst qui distribue vers cinq composantes d'écoulement souterrain en direction de la source (C : conduit, M : matrice, L : latéral, S : source, Q_{hyES} : écoulement direct avec seuil, Q_{ES} : écoulement direct). Extrait du logiciel KarstMod.	18
Figure 14 : Interface du logiciel KarstMod. Dans cet exemple, trois réservoirs sont utilisés : le réservoir E qui reçoit la pluie (P), laisse partir l'évapotranspiration (ET) et alimente les réservoirs M et C, le réservoir M représentant l'écoulement lent (ou M comme matrice) vers la source, le réservoir C représentant l'écoulement rapide (ou C comme Conduit) vers la source. Extrait de Garin et Arfib, 2018.	19
Figure 15 : Distribution des altitudes dans le sous-bassin versant de la station de Roquevaire.	20
Figure 16 : Distribution des altitudes dans le sous-bassin versant de la station de Le Charrel.	21
Figure 17 : Graphique pluie – débit de l'Huveaune (juin 2018 – mai 2020). L'axe des débits est en échelle logarithmique pour faciliter la lecture des valeurs dans des gammes de 0,1 à 50 m ³ /s.	23
Figure 18 : Graphique pluie – débit (juin 2014 – mai 2015).....	24
Figure 19 : Exemple de caractérisation des pentes de récession en période de tarissement. Dans cette figure extraite de Dufresne et al. 2020 sur un cours d'eau karstique (Le Las à Toulon), après le double-pic de crue, la décrue rapide est suivie par le tarissement suivant 2 pentes de récession	24
Figure 20 : Exemple d'analyse manuelle des coefficients de récession sur les débits observés (en échelle logarithmique) pour la station de Roquevaire.....	25
Figure 21 : Les coefficients de récession sur les débits de la station Le Charrel.	26
Figure 22 : Scénario 1 avec 2 composantes d'écoulement (M et C).	26
Figure 23 : Scénario 2 avec deux composantes d'écoulement pouvant interagir.....	27
Figure 24 : Scénario 3 avec trois composantes d'écoulement.....	27
Figure 25 : Scénario 4 avec 2 composantes lentes et un écoulement rapide direct..	28

Figure 26 : Scénario 5, avec 2 composantes lentes et 2 composantes d'écoulement rapides.....	28
Figure 27 : Scénario 6, avec deux composantes lentes et deux composantes rapides d'écoulement (dont 1 avec hystérèse).....	28
Figure 28 : Scénario 7 avec un écoulement lent et deux composantes d'écoulement rapide (dont 1 avec hystérèse).	29
Figure 29 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4.1 à Roquevaire	31
Figure 30 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4.2 à Roquevaire	33
Figure 31 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 5.....	34
Figure 32 : Comparaison des résultats obtenus avec les trois meilleurs scénarios par rapport au débit observé.	35
Figure 33 : Graphiques des volumes cumulés des trois meilleurs modèles de la station de Roquevaire.	35
Figure 34 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4.1 - Roquevaire 2017 - 2020	36
Figure 35 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4 – Le Charrel.....	38
Figure 36 : Comparaison des débits observés et simulés avec les scénarios 4 et 5 – Le Charrel.	39
Figure 37 : Comparaison des débits observés et simulés avec les scénarios 4, 5 et 6 – Le Charrel.	40
Figure 38 : Comparaison des débits observés et simulés avec les scénarios 4, 5 et 6 (2013 – 2014).....	40
Figure 39 : Comparaison des débits observés et simulés avec les scénarios 4, 5 et 6 (Juin 2018 - Mai 2020).	41
Figure 40 : Comparaison des volumes cumulés des scénarios 4, 5 et 6.	41
Figure 41 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4 - Le Charrel 2011 - 2012.	42
Figure 42 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4 - Le Charrel 2013 - 2015	42
Figure 43 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4 - Le Charrel Sept 2016 - Oct 2019.....	43
Figure 44 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 1	52
Figure 45 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 2.....	53
Figure 46 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 3.....	54
Figure 47: Comparaison des débits observés avec les débits simulés des scénarios 4.0, 4.01 et 4.02	55
Figure 48 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 5.0, 5.01 et 5.02	56
Figure 49 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 6.....	57
Figure 50 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 7.0 et 7.01	58
Figure 51 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 1.....	59
Figure 52 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 2.....	60
Figure 53 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 3.....	61
Figure 54 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4.....	62
Figure 55 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 5.....	63
Figure 56 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 6.....	64
Figure 57 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 7.....	65

Annexe A - Roquevaire

Concernant les données de pluie des modèles qui sont présentés dans cette annexe, il s'agit pour les scénarios 1, 2, 3, 4.0, 4.01, 4.02, 5.0, 5.01 et 5.02 de la pluie combinée utilisée en début d'étude, avec 21% de la pluie d'Aubagne et 79% de la pluie du Plan d'Aups. Ces proportions avaient été déterminées en calculant sur ArcGis les zones d'influence respectives des stations météorologiques sur le sous-bassin versant de l'Huveaune au niveau de la station de Roquevaire, via la méthode des polygones de Thiessen. Pour les scénarios 6, 7.0 et 7.01, c'est la pluie combinée utilisée pour les modèles présentés dans le rapport qui a été utilisée (avec 50% de pluie d'Aubagne et 50% de pluie du Plan d'Aups), car ils ont été réalisés après l'étude de distribution des altitudes sur le bassin versant de l'Huveaune.

Le scénario 1 a été testé avec les gammes de valeurs représentées dans le Tableau 16. La valeur de E_{min} est importante pour une capacité de stockage du sous-sol (elle est très proche du maximum imposé). La Figure 44 permet de voir les débits simulés du modèle. Il est facile d'y observer qu'un seul compartiment pour les écoulements lents n'est pas suffisant pour simuler les débits de base et en période d'étiage, comme on peut le voir de juin à décembre 2013. Ceci a justifié la démarche d'identification et de calcul manuel des coefficients de récession dans cette étude, afin de trouver le nombre de coefficients qui serait suffisant pour une bonne simulation des débits de base et en période d'étiage. Les pics de crue sont presque tous sous-estimés et les pics en période d'étiage ne sont pas simulés (comme le 18/07/2013 ou le 11/06/2015). De plus, les débits de décrue sont mal simulés, comme la surestimation visible de mars à juin 2014.

Tableau 16 : Résultats du scénario 1 de la station de Roquevaire

Paramètres	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E_0 (mm)	3,21	0	200
E_{min} (mm)	-116	-120	0
k_{EM} (mm/jour)	0,419	0,0001	3
k_{EC} (mm/jour)	0,789	0,0001	3
C_0 (mm)	140	0	200
k_{CS} (mm/ jour)	0,0182	0,0001	3
M_0 (mm)	150	0	200
k_{MS} (mm/ jour)	1,69	0,0001	3
R_A (km ²)	76,6	50	167,23
Volume cumulé observé (m ³)		257 429 404,80	
Volume cumulé simulé (m ³)		236 804 007,57	
WOBJ value (phase de calage)		0,760	
WOBJ value (phase de validation)		0,750	

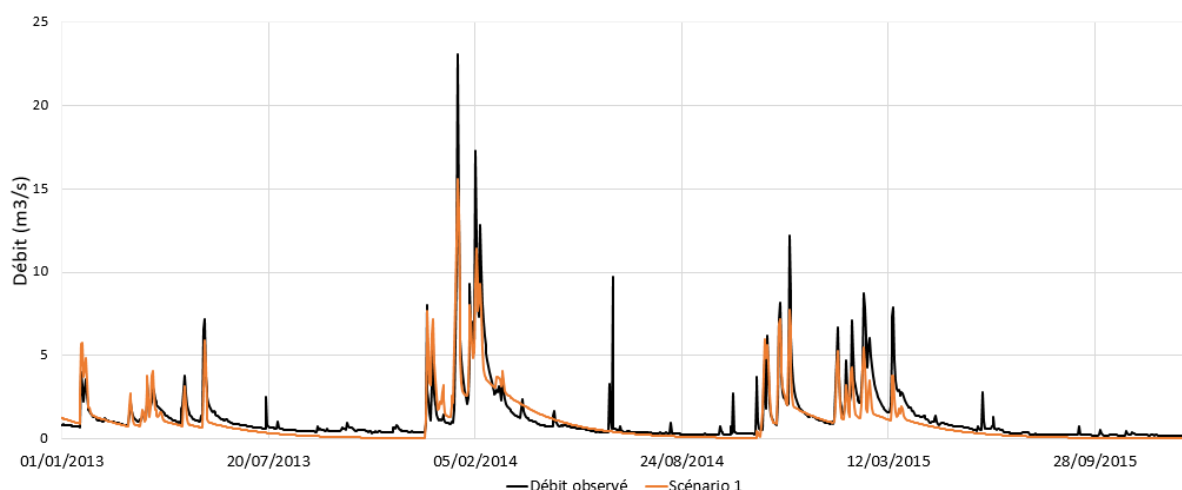


Figure 44 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 1

Le scénario 2 a été effectué de la même façon que le 1, avec des gammes très larges, mais en rajoutant un échange entre le compartiment M et le compartiment C, représenté par k_{MC} (Tableau 17). La qualité du modèle est très similaire à celle du premier scénario (Figure 45). On y retrouve les mêmes défauts, comme les débits qui atteignent zéro, ce qui ne correspond pas au fonctionnement de l'Huveaune. Le débit de base semble être encore plus sous-estimé que précédemment.

Tableau 17 : Résultats du scénario 2 de la station de Roquevaire

Paramètres	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E_0 (mm)	26,9	0	200
E_{min} (mm)	-93,3	-120	0
k_{EM} (mm/jour)	0,79	0,0001	3
k_{EC} (mm/jour)	2,26	0,0001	3
C_0 (mm)	149	0	200
k_{CS} (mm/ jour)	0,808	0,0001	3
M_0 (mm)	188	0	200
k_{MS} (mm/ jour)	0,00127	0,0001	3
k_{MC} (mm/ jour)	0,0117	0,0001	3
R_A (km ²)	67,1	50	167,23
Volume cumulé observé (m ³)		257 429 404,80	
Volume cumulé simulé (m ³)		225 818 245,27	
WOBj value (phase de calage)		0,763	
WOBj value (phase de validation)		0,749	

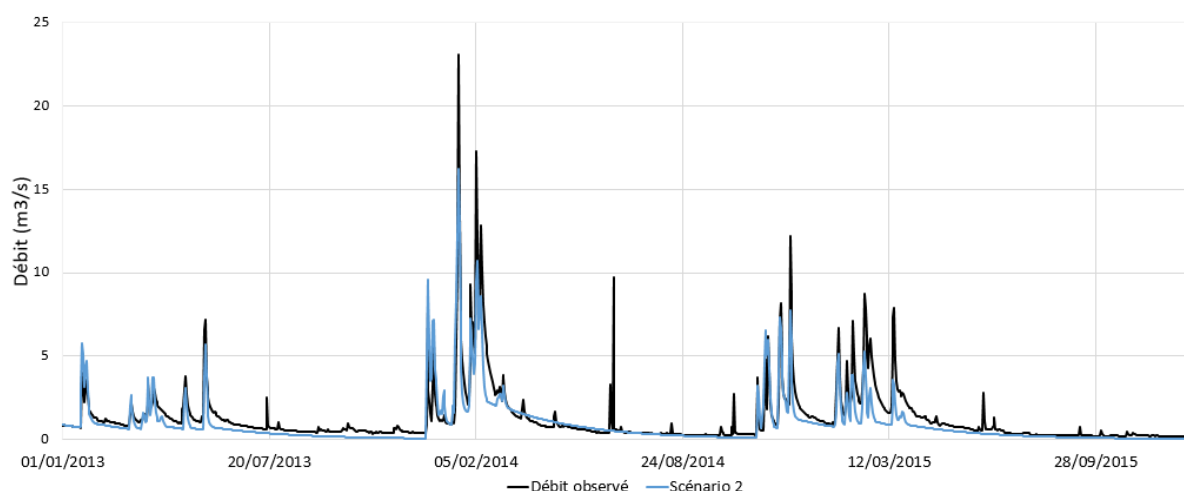


Figure 45 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 2

Le scénario 3 comprend 2 compartiments à écoulement lent et un compartiment à écoulement rapide (Tableau 18). Il est à noter que le compartiment L n'est pas utilisé par KarstMod pour la simulation des débits. On peut voir avec un k_{EL} de 0,000123mm/jour et un k_{LS} de 0,000123mm/jour que ce compartiment ne contribue pas du tout à la simulation des débits. Les débits simulés, visibles dans la Figure 46 ne suivent pas correctement les dynamiques des débits observés, avec des pentes en décrue non représentatives de la réalité hydrologique. Cela aurait pu être dû aux gammes trop larges utilisées, mais même en fixant les coefficients de récession avec les valeurs calculées au cours de cette étude (0,0224mm/jour pour le compartiment M et 0,0015mm/jour pour le compartiment L), les résultats obtenus ne changent presque pas, mis à part une sous-estimation plus prononcée des pics de crue.

Tableau 18 : Résultats du scénario 3 de la station de Roquevaire

Paramètres	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E_0 (mm)	163	0	200
E_{min} (mm)	-107	-120	0
k_{EL} (mm/jour)	0,000123	0,0001	3
k_{EM} (mm/jour)	0,0485	0,0001	3
k_{EC} (mm/jour)	0,383	0,0001	3
C_0 (mm)	131	0	200
k_{CS} (mm/ jour)	2,96	0,0001	3
M_0 (mm)	4,71	0	200
k_{MS} (mm/ jour)	0,0161	0,0001	3
L_0 (mm)	102	0	200
k_{LS} (mm/ jour)	0,000123	0,0001	3
R_A (km ²)	67,4	50	167,23
Volume cumulé observé (m ³)		257 429 404,80	
Volume cumulé simulé (m ³)		216 737 803,24	
WOBJ value (phase de calage)		0,757	
WOBJ value (phase de validation)		0,731	

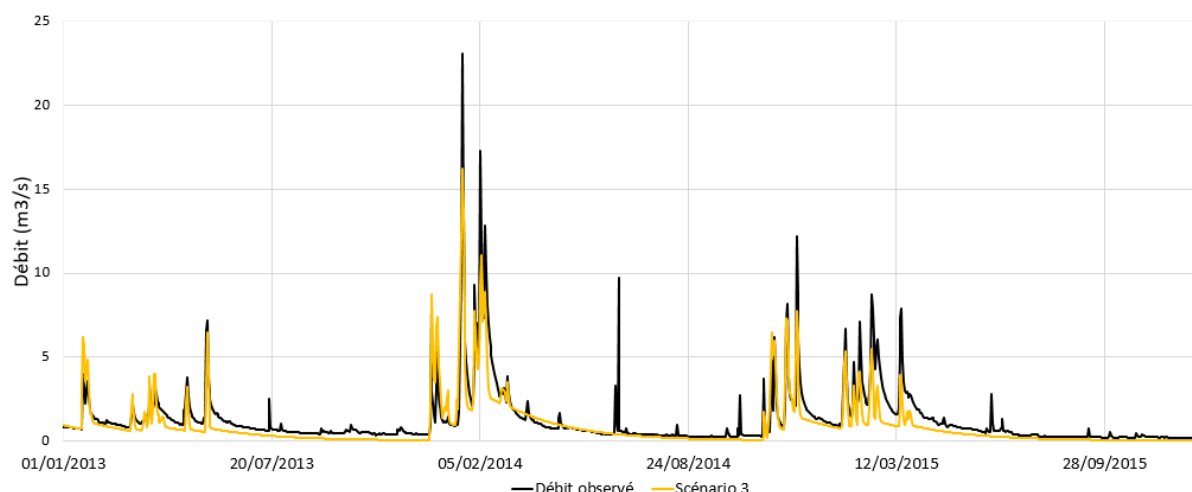


Figure 46 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 3

Pour le scénario 4, les écoulements étaient décomposés en 2 écoulements lents via les compartiments M et C et un écoulement rapide via Q_{ES} . Le compartiment C a été remplacé par le compartiment L dans les meilleurs modèles du scénario 4 présentés dans le rapport, pour plus de logique théorique, étant donné que le compartiment C est habituellement associé aux écoulements rapides dans les conduits karstiques. Mais ce remplacement ne change rien dans les résultats obtenus. Trois versions du scénario 4 ont été testées ici : en laissant KarstMod caler seul les valeurs de chaque paramètre (scénario 4.0), en imposant le coefficient de récession calculé le plus lent (0,0015) et en laissant KarstMod caler le reste (scénario 4.01) et enfin en fixant un E_{min} plus faible (pour éviter la sous-estimation des pics de crue en période d'étiage) et les deux coefficients calculés, 0,0015mm/jour et 0,0224mm/jour (scénario 4.02). Le scénario 4.01 permettait de voir si KarstMod sélectionnerait une deuxième composante de l'écoulement lent ou si le logiciel privilégierait une composante de soutien des écoulements rapides, pour les grands pics de crue souvent sous-estimés. Or on peut voir dans le Tableau 19 que le k_{CS} calé par KarstMod (de 0,0155mm/jour) est proche du coefficient de récession calculé (de 0,0224 mm/jour). Le logiciel privilégie donc l'utilisation de deux composantes de l'écoulement lent pour mieux déterminer les débits de base et en période de tarissement. La Figure 47 permet de voir qu'effectivement les scénarios 4.01 et 4.02 simulent les débits de base et en période d'étiage de manière similaire. En revanche, le scénario 4.0 qui a fixé deux composantes d'écoulement rapide (k_{MS} et k_{ES}) et une seule composante d'écoulement lent (k_{CS}) simule moins bien les débits en période d'étiage, comme on peut le voir de mars à juin 2014. C'est le scénario 4.02 qui sous-estime le moins les pics de crue, grâce à son k_{ES} légèrement plus élevé que celui du 4.01 et son E_{min} beaucoup plus faible.

Tableau 19 : Résultats des scénarios 4.0, 4.01 et 4.02 de la station de Roquevaire

Paramètres	4.0			4.01			4.02		
	Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max		Min	Max		Min	Max
E_0 (mm)	165	0	200	188	0	200	143	0	200
E_{min} (mm)	-106	-120	0	-104	-120	0	-75	-75	-75
k_{ES} (mm/jour)	0,228	0,001	3	0,184	0,001	3	0,215	0,001	3
k_{EM} (mm/jour)	1,23	0,001	3	0,00122	0,001	3	0,095	0,001	0,1

Paramètres	4.0			4.01			4.02		
	Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max		Min	Max		Min	Max
k_{EC} (mm/jour)	2,41	0,001	3	0,189	0,001	3	0,257	0,001	3
C_0 (mm)	185	0	200	106	0	200	116	0	200
k_{CS} (mm/ jour)	0,0107	0,001	3	0,0155	0,001	3	0,0224	0,0224	0,0224
M_0 (mm)	178	0	200	183	0	200	130	0	200
k_{MS} (mm/ jour)	0,58	0,001	3	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
R_A (km ²)	74,1	50	167,23	68,6	50	167,23	74,7	50	167,23
Volume cumulé observé (m ³)	257 429 404,80			257 429 404,80			257 429 404,80		
Volume cumulé simulé (m ³)	239 089 772,81			218 924 686,61			264 377 729,00		
WOBJ value (phase de calage)	0,768			0,753			0,746		
WOBJ value (phase de validation)	0,76			0,741			0,753		

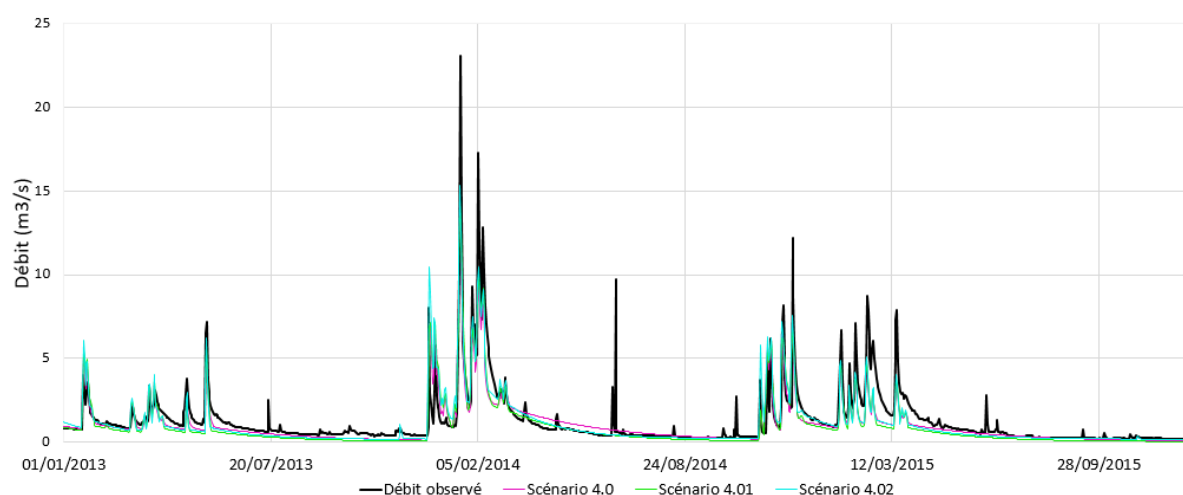


Figure 47: Comparaison des débits observés avec les débits simulés des scénarios 4.0, 4.01 et 4.02

Le scénario 5 comprend trois compartiments et l'écoulement direct vers la rivière Q_{ES} . Cette configuration a permis de tester des modèles en laissant KarstMod agir seul (scénario 5.0), en fixant trois composantes à écoulement lent (scénario 5.01) avec les coefficients de récession calculés dans l'étude et en cherchant à fixer deux composantes lentes (scénario 5.02). Dans le scénario 5.02, KarstMod a sélectionné une troisième composante à écoulement lent (voir Tableau 20), en plus des deux fixées, au lieu de favoriser un écoulement rapide. Mais cela n'améliore pas réellement le modèle, les grands pics de crue étant les moins bien simulés, comparés aux scénarios 5.0 et 5.01 (Figure 48). D'autre part, les débits de base et en période d'étiage sont mal simulés pour les trois modèles, avec peut-être plus de stabilité pour les scénarios 5.0 et 5.01. Le scénario sous-estimant le moins les pics de crue est le 5.0, calé par KarstMod. Or ce scénario n'utilise pas le compartiment M et privilégie deux écoulements lents (avec les compartiments C et L) et un écoulement rapide (avec Q_{ES}). Il est le scénario sous-estimant le plus les débits de mars à juin 2014, mais il reste intéressant car il simule mieux que les autres scénarios les petits pics de crue (comme celles du 19/05/2013 et du 26/11/2014). Le scénario 5.0 permet de suggérer

que le scénario 4 suffirait à simuler correctement les débits de l’Huveaune, ce qui a été confirmé dans le rapport. Le fait de forcer KarstMod à adopter deux écoulements lents et deux écoulements rapides a été tenté en restreignant les gammes du réservoir C et de Q_{ES} mais les résultats obtenus sous-estiment beaucoup trop les grands pics de crue, malgré l’amélioration de la simulation des débits en période d’étéage.

Tableau 20 : Résultats des scénarios 5.0, 5.01 et 5.02 de la station de Roquevaire

Paramètres	5.0			5.01			5.02		
	Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max		Min	Max		Min	Max
E_0 (mm)	102	0	200	180	0	200	104	0	200
E_{min} (mm)	-106	-120	0	-116	-120	0	-75	-75	-75
k_{ES} (mm/jour)	0,198	0,0001	3	0,187	0,001	3	0,217	0,001	3
k_{EL} (mm/jour)	0,0015	0,0001	3	0,13	0,001	3	0,0199	0,001	3
k_{EM} (mm/jour)	0,000902	0,0001	3	0,245	0,001	3	0,00124	0,001	3
k_{EC} (mm/jour)	0,346	0,0001	3	0,0124	0,001	3	0,283	0,001	3
C_0 (mm)	123	0	200	168	0	200	147	0	200
k_{CS} (mm/ jour)	0,00898	0,0001	3	0,0302	0,0302	0,0302	0,0105	0,001	3
M_0 (mm)	70,9	0	200	111	0	200	162	0	200
k_{MS} (mm/ jour)	0,00639	0,0001	3	0,0146	0,0146	0,0146	0,0015	0,0015	0,0015
L_0 (mm)	69,1	0	200	129	0	200	151	0	200
k_{LS} (mm/ jour)	0,0656	0,0001	3	0,0015	0,0015	0,0015	0,0224	0,0224	0,0224
R_A (km ²)	88	50	167,23	85,5	50	167,23	66,1	50	167,23
Volume cumulé observé (m ³)	257 429 404,80			257 429 404,80			257 429 404,80		
Volume cumulé simulé (m ³)	279 597 478,58			265 151 881,64			233 593 050,34		
WOBJ value (phase de calage)	0,760			0,767			0,752		
WOBJ value (phase de validation)	0,754			0,768			0,756		

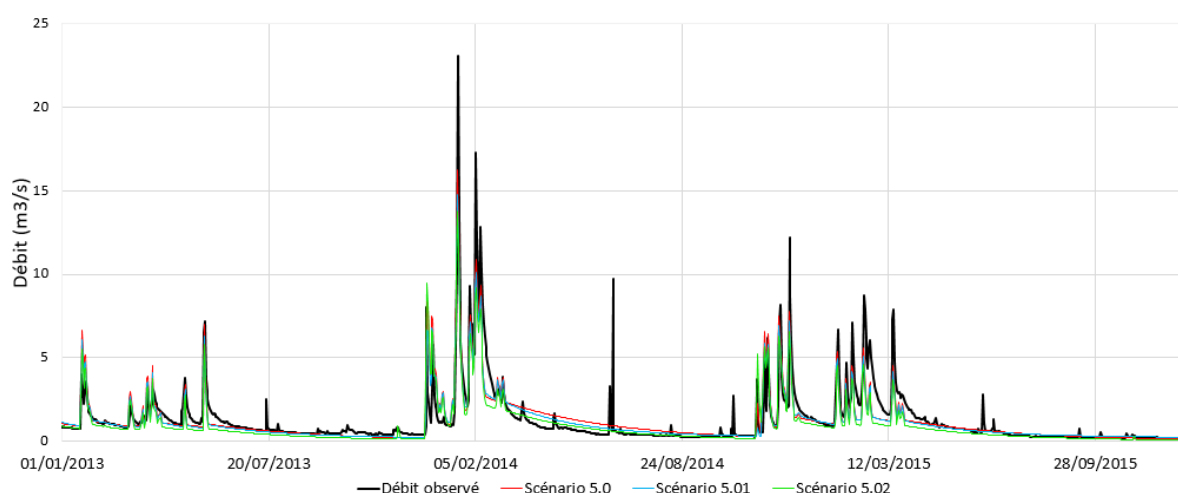


Figure 48 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 5.0, 5.01 et 5.02

Le scénario 6 a pour but de simuler deux composantes à écoulement lent via les compartiments M et L et deux écoulements directs vers la source (Q_{ES} et Q_{hyES}), dont l'un au minimum représente les écoulements rapides : Q_{ES} . KarstMod a donc calé deux coefficients de récession similaires par rapport à ceux calculés (0,0218 se rapprochant de 0,0224mm/jour et 0,00721 se rapprochant de 0,0015mm/jour), un écoulement rapide avec Q_{ES} et un écoulement très lent avec Q_{hyES} (Tableau 21). Les résultats obtenus sont très mauvais car très éloignés des débits observés (Figure 49).

Tableau 21 : Résultats du scénario 6 de la station de Roquevaire

Paramètres	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E_0 (mm)	67,1	0	200
E_{min} (mm)	-115	-120	0
k_{hy} (mm/jour)	0,00171	0,0001	3
E_{hy} (mm)	36,5	0	200
DE_{hy} (mm)	18,5	0	50
α_{hy}	1,64	1	4
k_{ES} (mm/jour)	0,167	0,05	3
k_{EL} (mm/jour)	0,105	0,0001	3
k_{EM} (mm/jour)	0,245	0,0001	3
M_0 (mm)	20,3	0	200
k_{MS} (mm/ jour)	0,00721	0,0001	0,009
L_0 (mm)	112	0	200
k_{LS} (mm/ jour)	0,0218	0,009	0,05
R_A (km ²)	90,7	50	167,23
Volume cumulé observé (m ³)		257429404,8	
Volume cumulé simulé (m ³)		253968537,6	
WOBJ value (phase de calage)		0,767	
WOBJ value (phase de validation)		0,755	

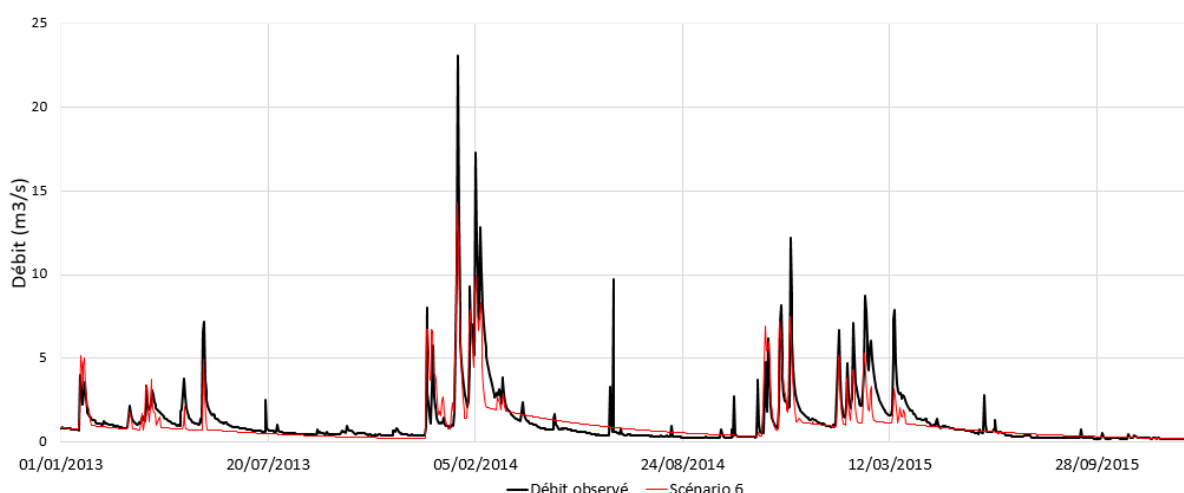


Figure 49 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 6

Le scénario 7.0 reprend la structure du 6 sans le compartiment C, pour essayer un modèle plus simplifié, en laissant le logiciel caler tous les paramètres (scénario 7.0) ou en fixant une partie

des paramètres, d'après les valeurs vers lesquelles convergeait déjà le logiciel ou d'après les connaissances acquises (scénario 7.01). Pour le scénario 7.0, KarstMod a calé deux coefficients de récession très lents pour le compartiment M et Q_{hyES} (Tableau 22) et une composante pour les écoulements rapides avec Q_{ES} . Comme pour le scénario 6, les résultats obtenus sont très mauvais (Figure 50). Pour le scénario 7.01, le modèle n'utilise pas Q_{hyES} (k_{hy} est de 0,0001mm/jour) et se contente du compartiment M pour les écoulements lents et de Q_{ES} pour les écoulements rapides. Les résultats sont meilleurs que le 7.0, notamment pour la simulation des débits en période de décrue, mais il reste trop éloigné des débits observés (comme la période d'avril à décembre 2013).

Tableau 22 : Résultats du scénario 7.0 et 7.01 de la station de Roquevaire

Paramètres	7.0			7.01		
	Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max		Min	Max
E_0 (mm)	102	0	200	191	0	200
E_{min} (mm)	-115	-120	0	-107	-120	0
k_{hy} (mm/jour)	0,00128	0,0001	3	0,000338	0,0001	3
E_{hy} (mm)	49,3	0	200	38,6	0	200
DE_{hy} (mm)	2,07	0	50	0,369	0	50
α_{hy}	3,05	1	4	3,51	1	4
k_{ES} (mm/jour)	0,113	0,0001	3	0,25	0,25	0,25
k_{EM} (mm/jour)	0,228	0,0001	3	0,4	0,4	0,4
M_0 (mm)	102	0	200	105	0	200
k_{MS} (mm/ jour)	0,00221	0,0001	3	0,0224	0,0224	0,0224
R_A (km ²)	104	50	167,23	79	79	79
Volume cumulé observé (m ³)	257 429 404,80			257 429 404,80		
Volume cumulé simulé (m ³)	259 797 880,22			201 016 451,43		
WOBj value (phase de calage)	0,773			0,765		
WOBj value (phase de validation)	0,657			0,734		

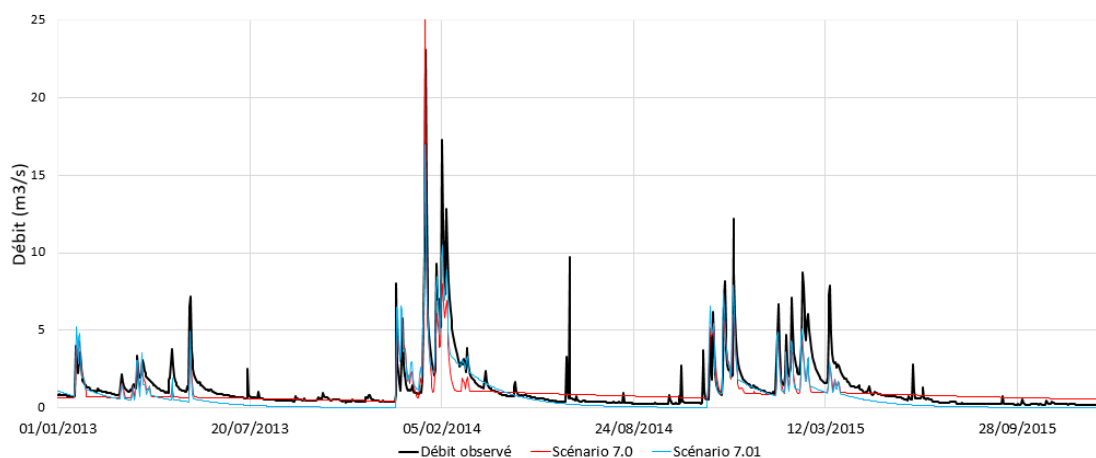


Figure 50 : Comparaison des débits observés avec les débits simulés du scénario 7.0 et 7.01

Annexe B – Le Charrel

Le meilleur modèle obtenu avec le scénario 1 a des valeurs optimales qui sont présentées dans le Tableau 23. La période entre juin 2014 et mai 2015 étudiée dans la Figure 51 a été choisie pour mettre en évidence le fait que le modèle permet une bonne simulation de certaines crues, comme celles de janvier et février 2015. Par contre, le modèle n'arrive pas à simuler les fortes crues, comme celle du 6 décembre 2014. Il est aussi remarquable que le modèle n'arrive pas à simuler la période de tarissement chaque année.

Tableau 23 : Résultats du scénario 1 de la station Le Charrel

Paramètres	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E₀ (mm)	123	0	200
E_{min} (mm)	-97,9	-120	-50
k_{EM} (mm/jour)	2,17	0,01	3
k_{EC} (mm/jour)	0,865	0,01	3
M₀ (mm)	91,3	0	200
k_{MS} (mm/jour)	0,00886	0,004	0,1
C₀ (mm)	183	0	200
k_{CS} (mm/jour)	0,594	0,01	3
RA (km²)	102	20	167,23
Volume cumulé observé (m³)		324 978 307,20	
Volume cumulé simulé (m³)		387 252 040,83	
WOBJ value (phase de calage)		0,760	
WOBJ value (phase de validation)		0,747	

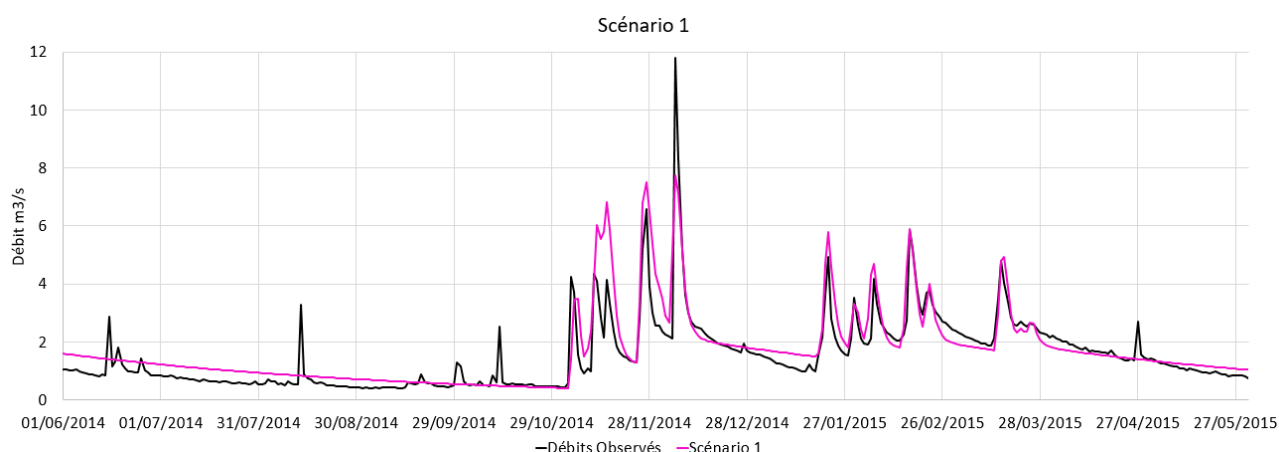


Figure 51 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 1.

Sur la même période, en analysant les résultats du scénario 2, la Figure 52 montre que les valeurs optimales et la gamme choisie pour le calage de ce scénario, résumés dans le Tableau 24, ont donné un modèle qui a des caractéristiques comparables à celles scénario 1 dans la génération des crues, mais qui n'arrive pas à estimer la période de tarissement. La majorité du temps ce

modèle sous-estime les débits générés dans la période d'été. Il est l'unique modèle qui simule des débits qui atteignent zéro, ce qui n'est pas représentatif du fonctionnement de l'Huveaune.

Tableau 24 : Résultats du scénario 2 de la station Le Charrel

Paramètres	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E_0 (mm)	13,6	0	200
$E_{\min}$ (mm)	-87,9	-120	-50
k_{EM} (mm/jour)	2,36	0,01	3
k_{EC} (mm/jour)	0,996	0,01	3
M_0 (mm)	158	0	200
k_{MS} (mm/jour)	0,019	0,019	0,019
k_{MC} (mm/jour)	0,004	0,004	0,004
C_0 (mm)	79	0	200
k_{CS} (mm/jour)	0,915	0,01	30
RA (km ²)	86,9	20	167,23
Volume cumulé observé (m ³)	324 978 307,20		
Volume cumulé simulé (m ³)	338 984 714,43		
WOBJ value (phase de calage)	0,721		
WOBJ value (phase de validation)	0,696		

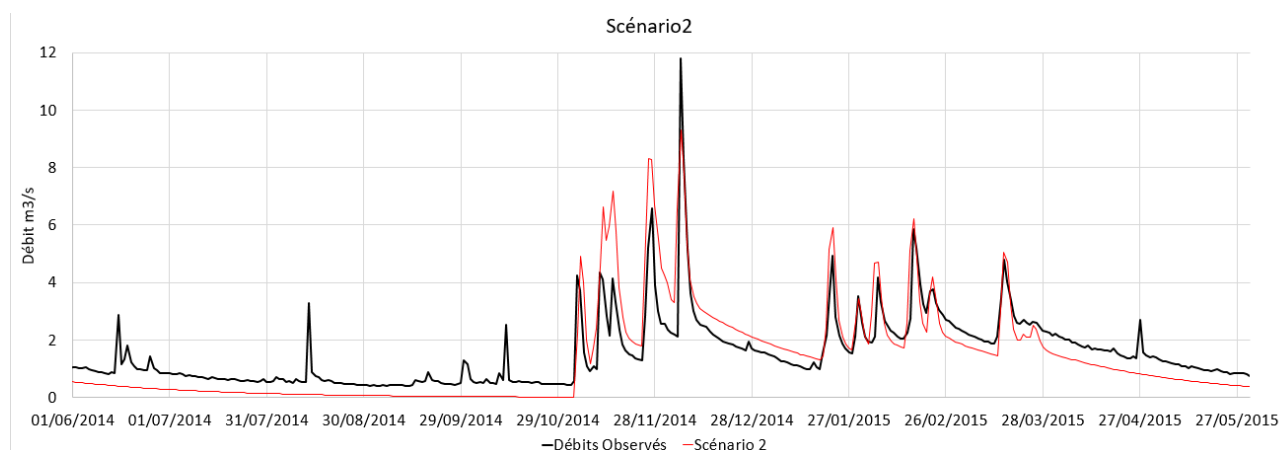


Figure 52 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 2.

Du fait du nombre de compartiments dans le scénario 3, deux ont été choisis comme des compartiments pour les écoulements lents (L et M). La démarche de calage a été faite en suivant deux méthodes. La première en fixant une gamme représentative des écoulements lents (0,0001 et 0,1 mm/jour) et la deuxième en fixant les valeurs des coefficients de récession en période de tarissement résultant de l'application de la loi de Maillet.

Le Tableau 25 montre le résumé des valeurs obtenues dans chacune des démarches réalisées. Il est à noter que dans le calage utilisant une gamme, les valeurs calées par le modèle sont très proches des valeurs trouvées dans l'étude des composantes lentes de l'écoulement faites à la station Le Charrel.

Tableau 25 : Résultats du scénario 3 de la station Le Charrel

Paramètres	Gamme			Fixés		
	Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max		Min	Max
E₀ (mm)	180,463	0	200	80,9	0	200
E_{min} (mm)	-108,791	-120	-50	-101	-120	-50
k_{EL} (mm/jour)	2,085	0,01	3	0,761	0,01	3
k_{EM} (mm/jour)	0,9	0,01	3	1,97	0,01	3
k_{EC} (mm/jour)	0,968	0,01	3	1,19	0,01	3
L₀ (mm)	40,753	0	200	130	0	200
k_{LS} (mm/jour)	0,00766	0,0001	0,1	0,004	0,004	0,004
M₀ (mm)	127,679	0	200	99,8	0	200
k_{MS} (mm/jour)	0,012	0,0001	0,1	0,019	0,019	0,019
C₀ (mm)	65,338	0	200	155	0	200
k_{CS} (mm/jour)	0,677	0,1	3	0,614	0,001	3
RA (km²)	106,038	20	167,23	96,1	20	167,23
Volume cumulé observé (m³)	324978307,20			324978307,20		
Volume cumulé simulé (m³)	390143068,62			361394380,68		
WOBj value (phase de calage)	0,761			0,749		
WOBj value (phase de validation)	0,764			0,731		

En analysant les résultats graphiquement, les comportements des modèles sont presque les mêmes dans la simulation des crues en période de hautes eaux. Dans la période de tarissement, les modèles ont tendance à avoir des différences plus marquées

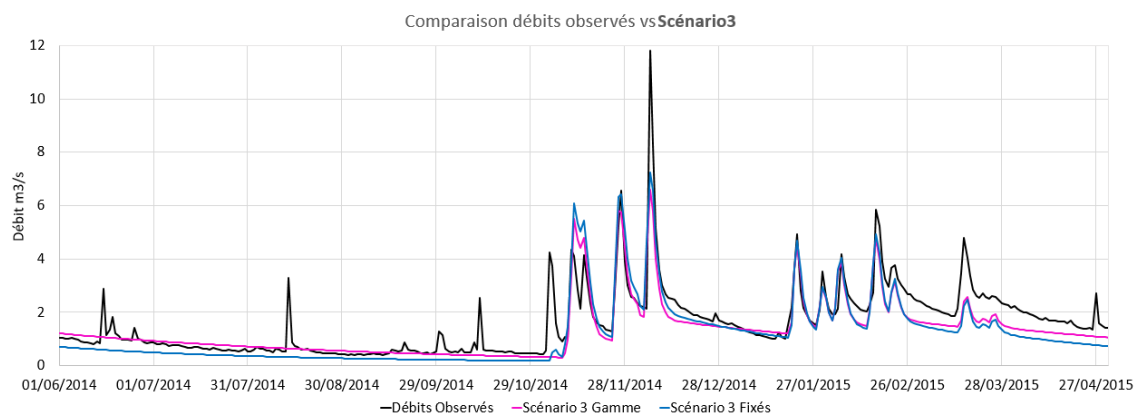


Figure 53 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 3.

Pour le scénario 4, le Tableau 26 montre les résultats de la démarche de calage pour chacune des pluies utilisées. En comparaison avec les résultats montrés dans le Tableau 7 du rapport, plus d'informations sont apportées, comme la différence de capacité de stockage du sol. En utilisant la pluie combinée, la valeur calée a une valeur de -51,1 mm alors qu'en utilisant la pluie du Plan d'Aups, la valeur est de -118 mm.

Tableau 26 : Comparaison des résultats du scénario 4 - station Le Charrel.

Paramètres	Pluie Plan d'Aups		Pluie combinée	
		Gamme		Gamme

	Valeur optimale	Min	Max	Valeur optimale	Min	Max
E_0 (mm)	172	0	200	164	0	200
$E_{\min}$ (mm)	-118	-120	-50	-51,1	-60	-20
k_{EL} (mm/jour)	0,154	0,01	3	0,0754	0,01	3
k_{EM} (mm/jour)	0,223	0,01	3	0,234	0,1	3
k_{ES} (mm/jour)	0,155	0,01	3	0,133	0	200
L_0 (mm)	152	0	200	73	0	200
k_{LS} (mm/jour)	0,004	0,004	0,004	0,00503	0,001	0,009
M_0 (mm)	48,3	0	200	186	0	200
k_{MS} (mm/jour)	0,019	0,019	0,019	0,0117	0,01	0,02
RA (km ²)	103	20	167,23	114	20	167,23
Volume cumulé observé (m ³)	324 978 307,20			324 978 307,20		
Volume cumulé simulé (m ³)	363 155 853,18			362 669 136,38		
WOBj value (phase de calage)	0,755			0,751		
WOBj value (phase de validation)	0,748			0,764		

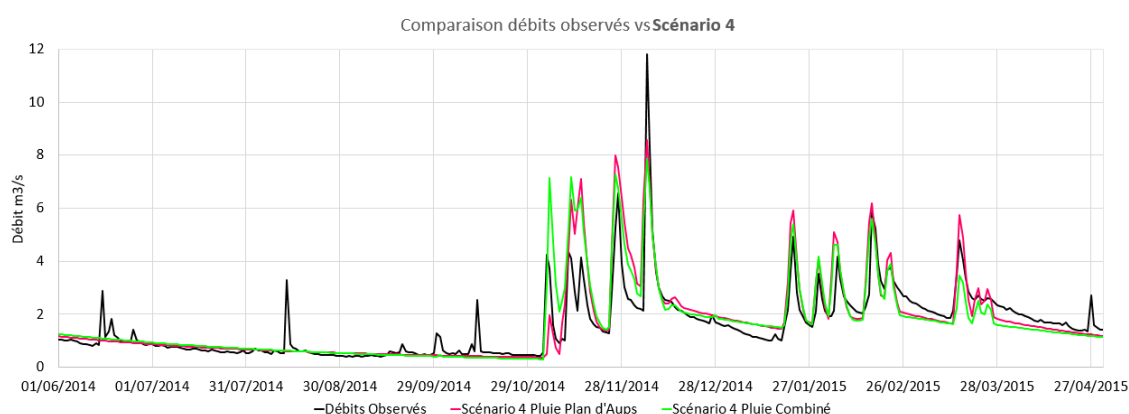


Figure 54 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 4.

Pour le scénario 5, le Tableau 27 donne les valeurs optimales calées par le logiciel et les gammes utilisées. Dans cette démarche de modélisation, il a été nécessaire de fixer les coefficients k_{LS} et k_{MS} car même en utilisant une gamme représentative des écoulements lents, le logiciel n'arrive pas à trouver de valeurs qui donnent une simulation proche de la réalité.

En comparant avec les valeurs optimales trouvées pour la pluie combinée, la capacité de stockage du sous-sol ($E_{\min}$) a des valeurs très similaires. Par rapport aux coefficients de vidange des compartiments M et L, le fait d'utiliser des gammes a fait que pour le modèle avec la pluie combinée, les écoulements les plus lents se trouvent dans le compartiment M et les plus rapides dans le L. A part ça, les valeurs trouvées sont très semblables à celles étudiées avec la loi de Maillet. On peut remarquer aussi que la valeur de k_{ES} est égale pour les deux pluies, même en utilisant une gamme. Les uniques paramètres qui montrent des valeurs avec des différences considérables sont la surface du bassin versant et le coefficient k_{CS} .

Tableau 27 : Comparaison des résultats du scénario 5 - station Le Charrel

Paramètres	Pluie Plan d'Aups			Pluie combinée		
	Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max		Min	Max
E_0 (mm)	52,5	0	200	14,3	0	200
E_{min} (mm)	-117	-120	-50	-114	-120	-50
k_{EL} (mm/jour)	0,285	0,01	3	0,506	0,01	3
k_{EM} (mm/jour)	0,507	0,01	3	0,0883	0,01	3
k_{EC} (mm/jour)	0,177	0,01	3	0,076	0,01	3
k_{ES} (mm/jour)	0,14	0,01	3	0,14	0,01	3
L_0 (mm)	187	0	200	176	0	200
k_{LS} (mm/jour)	0,004	0,004	0,004	0,0106	0,001	0,1
M_0 (mm)	67,3	0	200	172	0	200
k_{MS} (mm/jour)	0,019	0,019	0,019	0,00651	0,001	0,1
C_0 (mm)	163	0	200	81	0	200
k_{CS} (mm/jour)	1,17	0,1	3	0,271	0,1	3
RA (km ²)	100	20	167,23	146	20	167,23
Volume cumulé observé (m ³)	324 978 307,20			324 978 307,20		
Volume cumulé simulé (m ³)	356 214 121,16			364 647 667,71		
WOBj value (phase de calage)	0,753661			0,770045		
WOBj value (phase de validation)	0,732481			0,761302		

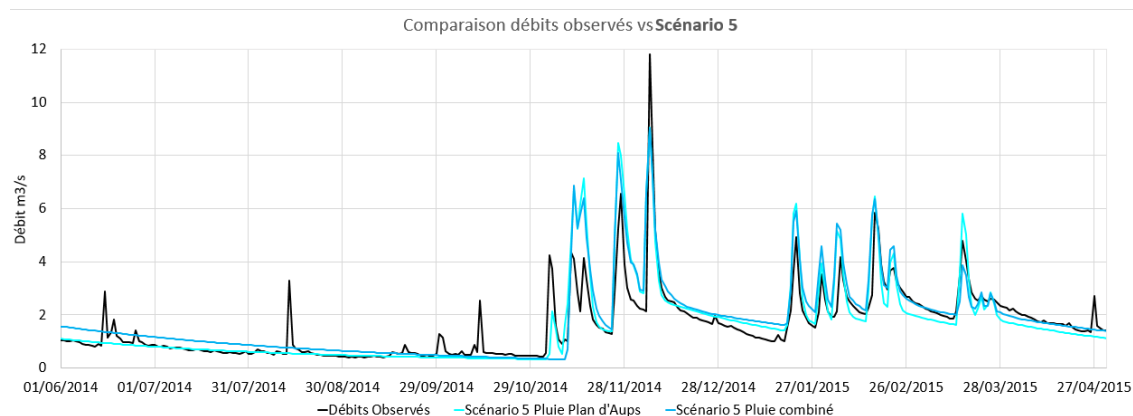


Figure 55 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 5.

De la même façon, le Tableau 28 montre la comparaison des résultats en utilisant les deux types de pluie et le scénario 6. Il est à remarquer que la valeur calée pour le E_{min} est presque la même pour les deux pluies.

Tableau 28 : Comparaison des résultats du scénario 6 - station Le Charrel.

Paramètres	Pluie Plan d'Aups			Pluie combinée		
	Valeur optimale	Gamme		Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max		Min	Max
E_0 (mm)	141,514	0	200	167	0	200
E_{min} (mm)	-99,8	-120	-50	-97,6	-100	-50
k_{EL} (mm/jour)	0,0785	0,01	3	0,359	0,01	3
k_{EM} (mm/jour)	0,167	0,01	3	0,409	0,01	3
k_{ES} (mm/jour)	0,0175	0,01	3	0,27	0,27	0,27
k_{hy} (mm/jour)	0,00199	0,001	3	0,01	0,001	3
E_{hy} (mm)	4,03	0	40	20,1	0,1	40
DE_{hy} (mm)	35	30	50	39,2	30	40
α_{hy} (sans unité)	1,97	1	2	1,76	1	2
L_0 (mm)	89,8	0	200	93,6	0	200
k_{LS} (mm/jour)	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
M_0 (mm)	10,2	0	200	62,2	0	200
k_{MS} (mm/jour)	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
RA (km ²)	91,9	20	167,23	124	20	167,23
Volume cumulé observé (m ³)	324 978 307,20			324 978 307,20		
Volume cumulé simulé (m ³)	337 873 541,99			330 080 789,46		
WOBj value (phase de calage)	0,77348			0,754973		
WOBj value (phase de validation)	0,722123			0,747825		

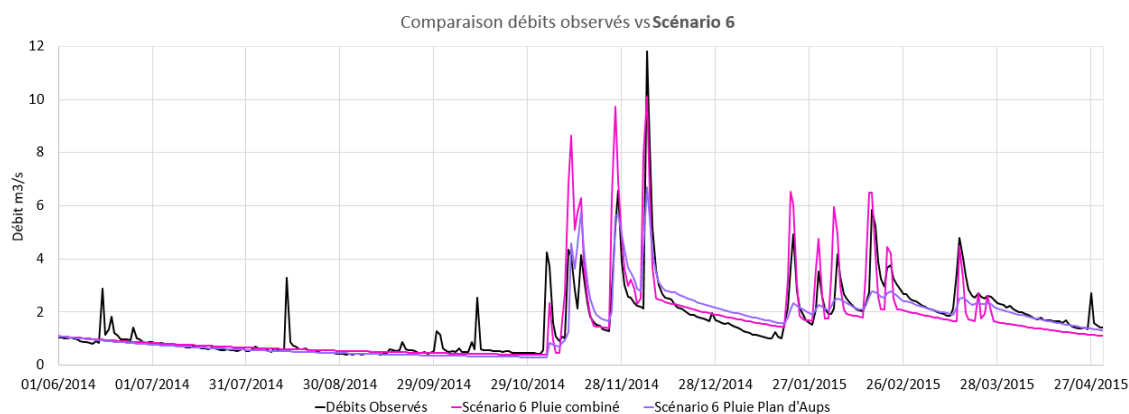


Figure 56 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 6.

Finalement, le scénario 7 a été testé pour voir l'incidence de deux écoulements rapides et un seul écoulement lent. Cette démarche a été faite après la réalisation des scénarios précédents et c'est uniquement pour cette raison qu'il utilise la pluie combinée.

La gamme choisie pour le coefficient de vidange k_{MS} est la moyenne entre les valeurs trouvées pour l'étude des écoulements lents. L'utilisation d'une gamme équivalente a été aussi essayée et le résultat a été très similaire. Le modélisateur a fixé la valeur pour avoir une convergence plus importante dans les autres paramètres.

Tableau 29 : Résultats du scénario 7 avec la station Le Charrel – Pluie combinée

Paramètres	Valeur optimale	Gamme	
		Min	Max
E_0 (mm)	40	0	200
E_{min} (mm)	-108	-120	-20
k_{EM} (mm/jour)	0,349	0,01	3
k_{ES} (mm/jour)	0,0627	0,1	3
k_{hy} (mm/jour)	0,00535	0,001	3
E_{hy} (mm)	10,4	0	50
DE_{hy} (mm)	31,5	25	50
α_{hy} (sans unité)	1,78	0,2	0,4
M_0 (mm)	130	0	200
k_{MS} (mm/jour)	0,0115	0,0115	0,0115
RA (km ²)	116	20	167,23
Volume cumulé observé (m ³)		324 978 307,20	
Volume cumulé simulé (m ³)		293 315 765,53	
WOBJ value (phase de calage)		0,785	
WOBJ value (phase de validation)		0,763	

La Figure 57 met en évidence qu'en utilisant uniquement un compartiment pour les écoulements lents, le modèle perd sa capacité de simuler la période de tarissement.

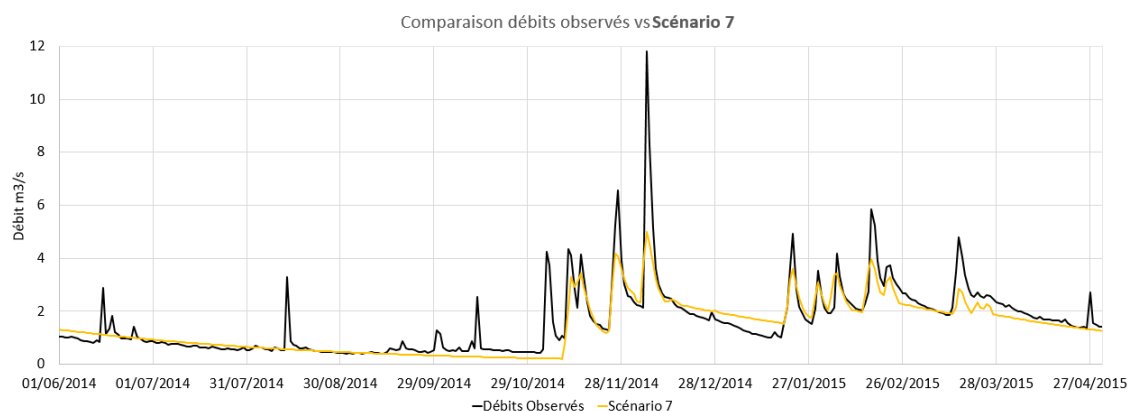


Figure 57 : Comparaison des débits observés et simulés avec le scénario 7.