Caractérisation des crues karstiques sur le bassin versant de l'Agly

hıb-2 d7-hta BRGM/RP-69551-FR

Rapport final

Mars 2020

de-hia hib

Situat	ion per a onçon de viç	Jirai	ice ciues .	
/oir sur a carte	Nom		Vigilance	RSS
¢	Lez	+	Vert	2
¢	Hérault amont	+	Vert	3
¢	Hérault aval	+	Vert	2
\diamond	Orb amont	+	Vert	9
\diamondsuit	Orb aval	+	Vert	2
¢	Haute vallée de l'Aude	+	Rouge ()	3
¢	Vallée centrale de l'Aude	+	Orange 🕕	2
\diamondsuit	Basses plaines de l'Aude	+	Qrange ()	2
\diamond	Orbieu	+	Orange ()	2
¢	Cesse	+	Vert	2
\diamond	Berre	+	laune 🛈	2
\diamond	Agly	+	Rouge ()	3
0	Tât	4	Orange (i)	2





.89 3740,46 -625.5

Document public









Caractérisation des crues karstiques sur le bassin versant de l'Agly

Rapport final

BRGM/RP-69551-FR

Mars 2020

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM AP18MPL010

P. Fleury, J-B. Charlier, H. Bessiere

Approbateur :
Nom : A. BLUM
Fonction : directrice régionale
Deta : $01/07/2020$
Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001. Contact : <u>gualite@brgm.fr</u>



Mots-clés : Crues karstiques, Bassin versant de l'Agly, Modélisation, Outil pour la vigilance.

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

Fleury P., J-B. Charlier, H. Bessière (2020) - Caractérisation des crues karstiques sur le bassin versant de l'Agly. Rapport final. BRGM/RP-69551-FR, 176 p., 167 ill., 3 ann., 1 clé USB.

© BRGM, 2020, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La présente étude « caractérisation des crues karstiques sur le bassin versant de l'Agly » résulte d'une convention de recherche et développement partagée établie entre le Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly (SMBVA) et le BRGM. Elle est cofinancée par ces derniers, le département des Pyrénées-Orientales, l'Europe et la Région Occitanie. Elle vise à améliorer les connaissances sur ce système hydrogéologique en particulier pendant les périodes de hautes eaux, afin de permettre une meilleure prévision des crues. Elle s'appuie sur une importante étude du fonctionnement hydrogéologique du massif des Corbières (Dörfliger *et al.*, 2006 ; Ladouche *et al.*, 2004).

Le fleuve Agly, long de 76 km est caractérisé par des crues éclair liées en partie au régime de pluies méditerranéennes, caractérisées par des évènements très intenses et globalement de courtes durées, avec parfois de forts cumuls (pouvant atteindre plusieurs centaines de mm en une journée). Dans ce contexte, le service de Prévision des Crues Méditerranée-Ouest (SPC Med-Ouest) réalise un suivi des niveaux tout au long du fleuve afin d'assurer la prévision des crues et envisager les risques associés. Les stations de suivis à Tautavel sur le Verdouble (affluent principal de l'Agly), d'Estagel et Rivesaltes sur l'Agly sont ainsi utilisées. Les prévisionnistes du SPC Med-Ouest ont confirmé les difficultés de prévisions sur ce bassin complexe du fait d'une mosaïque de formations géologiques, où la part des formations calcaires karstiques est importante. Les études réalisées dans le passé par le BRGM sur les crues karstiques notamment en contexte méditerranéen tendent à montrer que le fonctionnement du ou des unités karstiques modifie la réponse hydrologique des cours d'eau, aussi bien en période de basses eaux qu'en période de hautes eaux. Le karst lorsqu'il est faiblement rechargé a en effet un fort pouvoir écrêteur. À l'inverse lorsqu'il est saturé, il peut amplifier les crues, du fait notamment de circulations souterraines rapides.

Ce projet s'est ainsi attaché à caractériser le fonctionnement des quatre sous-bassins suivants :

- 1- le Verdouble à Tautavel ;
- 2- l'Agly en sortie du barrage ;
- 3- l'Agly à Estagel, à l'aval de la traversée du karst et des zones de pertes ;
- 4- l'Agly à Rivesaltes.

Les analyses réalisées comportent : (i) une analyse hydrogéologique des séries temporelles, (ii) la définition de modèles conceptuels de fonctionnement, (iii) la mise en place d'une modélisation semi-distribuée et (iv) d'une modélisation globale.

L'analyse hydrogéologique des séries temporelles a montré que le karst influence les crues de deux manières :

- par une atténuation des pics de crue ou en tout cas, des premiers pics lors des crues multi-pics
 lorsque l'épisode se produit en condition de karst sous-saturé. Cette atténuation est liée aux pertes de plusieurs dizaines de m³/s auquel s'ajoute un très probable ralentissement de la vitesse de l'onde de crue ;
- par une contribution d'eau souterraine d'origine karstique et/ou de ruissellement sur karst saturé (refus à l'infiltration) et conduisant à des apports importants de plusieurs centaines de m³/s.

Ainsi, à partir de l'analyse Débit-Débit sur les deux tronçons entre (amont Estagel – Estagel et Estagel – Rivesaltes), le rôle complexe du karst à savoir l'atténuation et la contribution aux crues de l'Agly en lien avec son niveau de remplissage a été mis en évidence. Le second tronçon Estagel \rightarrow Rivesaltes semble plus influencé que le premier tronçon Planeze+Tautavel \rightarrow Estagel.

Concernant la modélisation semi distribuée, elle est réalisée au pas de temps horaire sur la période 2005-2018 à l'aide du logiciel Vensim®. Quatre modèles emboités représentant chacun un des quatre sous bassins-versants ont étés créés. Basés sur le modèle conceptuel de fonctionnement, ils représentent les bassins versants à composante karstique (TAUTAVEL, ESTAGEL, RIVESALTES) et peu influencé par le karst (CARAMANY). Chacun de ces modèles est alimenté par la pluie sur le sous bassin-versant associé et l'évaporation sur le bassin versant de l'Agly (données Météo-France). Les modèles amont (CARAMANY et TAUTAVEL) sont indépendants. Le modèle ESTAGEL en plus des données climatiques est alimenté par les sorties des modèles CARAMANY et TAUTAVEL (c'est-à-dire le débit simulé à Tautavel et en sortie du barrage). De la même façon le modèle RIVESALTES est alimenté par le débit simulé sortant du modèle ESTAGEL et les données climatiques sur son sous bassin-versant.

Les modèles ont été calés à partir des hydrogrammes des différentes stations (données issues de la banque hydro et du CD66 pour le débit du barrage de Caramany), mais aussi à partir de l'information de la saturation de l'aquifère karstique (donnée piézométrique à Estagel provenant du réseau CD66 géré par le BRGM). En effet, sur les modèles Estagel et Tautavel, le comportement du réservoir karst a été simulé de manière à reproduire le comportement observé au niveau du piézomètre Estagel. Ce piézomètre permet en effet d'appréhender les périodes de recharge, de tarissement ainsi que l'état de saturation du système (saturé ou non).

Les modèles ont étés calés afin de reproduire au mieux les épisodes de moyennes et fortes crues, conformément aux objectifs du projet. Le débit des petites crues n'est pas toujours bien reproduit. La modélisation mise en œuvre vise également à reproduire l'état de saturation du karst qui est appréhendée au niveau du piézomètre Estagel. Un des objectifs est ainsi de prévoir l'arrivée des crues au bon moment après une période sèche ou d'étiage.

La qualité des données (pluie et débit) diffère à l'échelle des 13 années de la chronique. Les données récentes (post 2013) sont ainsi de meilleures qualité (à l'exception d'Estagel pour les fortes crues après 2013 suite à un détarrage de la courbe de jaugeage).

Cette modélisation se révèle être dans l'ensemble de bonne qualité, avec un critère de Nash calculé en mode évènementiel à partir de 2013 qui est globalement supérieur à 70 %. Il atteint 85 % à Rivesaltes, attestant d'une bonne reproduction des hydrogrammes de crue au niveau de cette station de référence utilisée pour la vigilance et l'alerte. Aussi, dans la classification des niveaux d'alerte utilisé et fournie par le SPC, sur les 19 épisodes principaux de pluie, 17 ont reproduit le bon niveau d'alerte sur Tautavel et Rivesaltes.

Aussi, à l'issue de la modélisation, les paramètres calés du modèle et les chroniques simulées ont été comparés au modèle conceptuel de fonctionnement. Le volume des 3 réservoirs karsts totalise ainsi 60 Mm³ (karst Verdouble = 30 Mm³, karst Estagel = 20 Mm³ et karst Rivesaltes = 10 Mm³). L'étude Corbières (Dörfliger *et al.*, 2006) avait permis de définir le volume du karst à 70 m³, ces valeurs sont comparables.

Les débits qui circulent au sein des 3 compartiments des réservoirs karstiques ont été appréhendés. Le débit souterrain annuel moyen rechargeant le karst est ainsi égal à 2,75 m³/s (Tautavel = $0,75 \text{ m}^3$ /s; Estagel = $1,60 \text{ m}^3$ /s et Rivesaltes = $0,45 \text{ m}^3$ /s). Le modèle conceptuel établi lors de l'étude du karst des Corbières fournissait un débit de recharge égal à 2,5 m³/s. Cette valeur est également en accord avec le modèle conceptuel de fonctionnement.

Ainsi la modélisation mise en œuvre, réalisée de manière indépendante des paramètres définis lors de l'étude Corbières, a permis d'obtenir des résultats comparables en terme de volume de réservoir et de débit de recharge, tendant à montrer la robustesse de la modélisation mise en œuvre dans le cadre de la présente étude. Ce modèle a ainsi été utilisé pour définir les capacités de rétention des systèmes « sol + aquifère ». L'objectif est de pouvoir évaluer en période de gestion de crise les capacités de rétention du système. Selon les 4 sous bassins-versants, les capacités de rétention évoluent entre environ 150 mm (Caramany, Estagel et Rivesaltes) et 200 mm à Tautavel. Aussi, le barrage de Caramany permet un écrêtage important des crues du bassin amont.

Le travail de modélisation a été validé lors de la réunion intermédiaire (octobre 2019) réunissant les membres du comité de pilotage. Il a ainsi été décidé de transférer la structure du modèle au SPC afin que ces derniers l'importent dans leur chaîne de prévision temps réel. Ensuite, ce modèle a été utilisé en mode prévisionnel, dans le but d'établir un abaque Pluie (cumul / intensité) – Débit.

Une version test de cet abaque a été réalisé au début du mois de janvier 2020, juste avant la crue majeure du 22 janvier 2020 associée à la tempête Gloria. Cet épisode qui a débuté le 21 janvier 2020 a été caractérisé par 2 épisodes de précipitations successifs, avec un cumul compris selon les 4 sous bassin-versant, entre 50 et 80 mm le 21 janvier 2020 et entre 40 et 180 mm le 22 janvier 2020. Météo-France annonçait dès le 20 janvier 2020 une prévision pour l'épisode du 21 janvier de 50 mm avec des intensités comprises entre 5 et 10 mm/h. Pour le 22 janvier le cumul attendu était d'au moins 100 mm avec la même gamme d'intensité. Dès le 20 janvier, le BRGM après échange avec le SPC, a pu informer le SMBVA que le premier épisode saturerait les différents horizons et que le second génèrerait une crue importante. Le débit maximal à Rivesaltes avait alors été évalué entre 600 m³/s à 900 m³/s selon l'intensité des pluies. Les seuils d'alerte orange ou rouge seraient alors franchis selon l'intensité.

Cette prévision s'est ainsi révélée correcte. En effet, le débit au pic de crue a été de l'ordre de 900 m³/s à Rivesaltes franchissant le seuil de vigilance rouge. Le 22 janvier, la pluie sur le bassinversant de Rivesaltes a atteint 100 mm avec une intensité de 7 mm/h. L'abaque fournit alors un débit compris entre 750 et 910 m³/s, dépassant également le seuil de vigilance rouge. Lors du retour d'expérience réalisé par le SPC, la prévision réalisée à partir de l'abaque BRGM a été validé, le SPC a considéré que l'outil était robuste et adapté.

Une comparaison sur la valeur au pic de crue à Tautavel et Rivesaltes a également été réalisée sur les principales crues entre le modèle et l'abaque. Le modèle fournit ainsi une meilleure reconstitution du débit au pic de crue. Ceci est lié en partie à une meilleure prise en compte de l'état initial du système du modèle en continu mais aussi de l'utilisation de la chronique de pluie réelle. En effet, l'abaque est basé sur des courbes moyennes de pluie pour différentes intensités. L'abaque fournit ainsi une estimation acceptable du débit au pic de crue (généralement en accord avec la couleur de vigilance établie par la grille du SPC), mais la valeur définie par le modèle est plus proche de l'observée.

L'abaque a ainsi été fourni au SPC, ainsi que la structure du modèle réservoir (présentée également dans ce rapport). Au cours des crues de janvier et avril 2020, l'abaque a été utilisé en temps réel pour réaliser la prévision/vigilance. Le SMBVA confirme qu'il a donné satisfaction. Cependant, nous recommandons vivement pour une meilleure qualité de prévision, l'intégration du modèle à la plateforme de simulation du SPC, notamment pour l'évaluation des capacités initiales de rétention du système.

En complément de ce travail de modélisation, une nouvelle approche a été développée à partir des outils de modélisation du BRGM (GARDENIA et EROS). Le but est de tester ces modèles en vue d'une éventuelle intégration à l'outil de vigilance temps réel actuellement en cours de développement au BRGM. Cette plateforme appelée « MétéEAU des nappes » permettrait aux gestionnaires de suivre en temps réel les débits sur l'Agly et le niveau piézométrique à Estagel, et en période de crise, de lancer des prévisions de débit à partir de scénarios climatiques.

L'objectif de ce volet plus exploratoire du projet est de confronter les résultats à des modèles hydrologiques afin d'améliorer la robustesse des prévisions et la rapidité de calcul. À terme, cela permettrait de disposer d'un outil plus opérationnel pour les gestionnaires (syndicats, SPC).

Cette approche de modélisation est satisfaisante, avec une simulation comparable en terme de qualité à la modélisation semi-distribuée basée sur le modèle conceptuel. Les résultats de ce modèle sont toutefois meilleurs à Rivesaltes, confirmant l'intérêt de son utilisation pour la mise en œuvre des abaques. À ce jour cette plateforme réalise des prévisions journalières des niveaux d'eau, des ajustements pour intégrer les débits et passer au pas de temps horaire seront toutefois nécessaires.

Sommaire

1.	Intr	roduction	17
	1.1	PRÉSENTATION DU BASSIN DE L'AGLY	17
	1.2	SINGULARITÉ HYDROGÉOLOGIQUE AFFECTANT LE FONCTIONNEMENT DE L'AGLY ET DU VERDOUBLE AU VOISINAGE D'ESTAGEL	19
	1.3	CONTENU DU RAPPORT	21
2.	Pré	sentation des données	23
	2.1	DONNÉES CLIMATIQUES	23
	2.2	HYDROGRAMMES	24
	<u></u>		24
	2.3	NIVEAUX D'EAU DU KARST	24
	2.4	ANALYSE CRITIQUE DES DONNÉES – PRÉSENTATION DES ÉPISODES	25
		2.4.1 Crue n° 1 : 14/10/2005	26
		2.4.2 Crue n° 2 : 15/11/2005	27
		2.4.3 Crue n° 3 : 29/01/2006	28
		2.4.4 Crue n° 4 : 27/12/2008	29
		2.4.5 Crue n° 5 : 12/04/2009	30
		2.4.6 Crue nº 6 : 04/05/2010	31
		2.4.7 Crue nº 7 : 17/10/2010	32
		2.4.0 Crue nº 0 : 28/10/2011	აა 24
		2.4.9 Crue n° 10: 21/11/2011	34
		2.4.10 Crue n° 11 : 06/03/2013	36
		2.4.11 Crue n° 12 : 18/11/2013	30
		2.4.12 Crue nº 13 : 30/11/2014	38
		2 4 14 Crue nº 14 : 22/03/2015	
		2 4 15 Crue nº 15 : 14/02/2017	40
		2.4.16 Crue n° 16 : 25/03/2017	41
		2.4.17 Crue n° 17 : 11/04/2018	42
		2.4.18 Crue n° 18 : 15/10/2018	43
		2.4.19 Analyse spécifique des épisodes et synthèse	44
3.	Ар	proche débit-débit développée lors des crues	47
	3.1	PRINCIPE	47
		3.1.1 Échanges latéraux	47
		3.1.2 Modélisation des échanges latéraux lors des crues	48
		3.1.3 Échanges latéraux	48
		3.1.4 Stratégie de calibration	50
		3.1.5 Application du modèle au site d'étude	50

	3.2	RÉSULTATS DE L'APPROCHE DÉBIT-DÉBIT SUR LES CRUES MAJEURES	51
		3.2.2 Échanges latéraux au cours des crues	53
		3.2.3 Synthèse	60
4.	Мо	délisation semi-distribuée du système « bassin versant de l'Agly »	63
	4.1	PRÉSENTATION DU MODÈLE	63
	4.2	MODÈLE TYPE	65
	4.3	RÉSERVOIR KARST	69
	4.4	MODÈLE CARAMANY	71
	4.5	MODÈLE TAUTAVEL	76
	4.6	MODÈLE ESTAGEL	77
	4.7	MODÈLE RIVESALTES	80
	4.8	QUALITÉ DES SIMULATIONS	81
	4.9	ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE SUR LES DONNÉES	82
	4.1(D INFORMATIONS DÉDUITES DE LA MODÉLISATION EN LIEN AVEC LE MODÈLE CONCEPTUEL DE FONCTIONNEMENT 4.10.1 Rappel des principaux résultats issus du modèle conceptuel de fonctionnement 4.10.2 Évaluation du débit circulant dans le karst des Corbières à partir de la	82 83
		modélisation	83
		4.10.3 Evaluation du volume des reserves de l'aquifere karstique des Corbieres	.84
		4.10.5 Capacités de rétention globale pour les différents sous bassins versants	85
	4.1 ⁻	1 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS EN MODE ÉVÉNEMENTIEL	86
		4.11.1 Crue n° 11 : 06/03/2013 (Illustration 82)	87
		4.11.2 Crue n° 13 : 30/11/2014 (Illustration 85)	89
		4.11.3 Crue n° 18 : 15/10/2018 (Illustration 88)	91
	4.12	2 AIDE A LA VIGILANCE DES TRONÇONS DU SPC	92
	4.13	3 MISE EN PLACE D'UN OUTIL POUR LA VIGILANCE	94
		4.13.1 Évaluation des capacités de rétention	94
		4.13.2 Caractérisation des relations pluie-débit	96
	4.14	4 ANALYSE DE L'ÉPISODE MAJEUR DU 22/01/2020 4.14.1 Hydrogrammes 4.14.2 ReX sur la gestion de crise « temps réel »	98 98 98
		4.14.3 Recour d'experience, utilisation des abaques	101 102
		4.14.4 Utilisation du modele en mode previsionnel	103
		4.14.6 Caramany sortant	104
		,	

5.7 COMPARAISON DE LA QUALITÉ DES DIFFÉRENTS MODÈLES	125
5.6.1 Caramany entrant 5.6.2 Caramany sortant 5.6.3 Tautavel 5.6.4 Rivesaltes	
5.6 RÉSULTATS DU CALAGE	
5.5 PARAMÉTRES HYDROLOGIQUES DU MODÈLE	110
5.4 CALAGE	110
5.3 INITIALISATION	110
5.2 LE SCHÉMA DE CALCUL EROS	109
5.1 LE SCHÉMA DE CALCUL GARDÉNIA	108
Approche modéles globaux : GARDENIA - EROS	107
4.15 CONCLUSION MODÉLISATION SEMI-DISTRIBUÉE (MODELE VENSIM) MIS EN PLACE POUR LA PRÉVISION	ET OUTIL 105
4.14.9 Rivesaltes	
4.14.7 Tautavel	
	 4.14.7 Fautavel. 4.14.8 Estagel. 4.14.9 Rivesaltes 4.15 CONCLUSION MODÉLISATION SEMI-DISTRIBUÉE (MODELE VENSIM) MIS EN PLACE POUR LA PRÉVISION. Approche modéles globaux : GARDENIA - EROS. 5.1 LE SCHÉMA DE CALCUL GARDÉNIA . 5.2 LE SCHÉMA DE CALCUL GARDÉNIA . 5.2 LE SCHÉMA DE CALCUL EROS. 5.3 INITIALISATION . 5.4 CALAGE. 5.5 PARAMÉTRES HYDROLOGIQUES DU MODÈLE. 5.6 RÉSULTATS DU CALAGE

Liste des figures

Illustration 1:	Présentation du bassin de l'Agly (fond de carte d'après rapport ISL 2014)	18
Illustration 2 :	Carte du bassin-versant de l'Agly à Rivesaltes simplifiée	19
Illustration 3 :	Date des 18 principaux épisodes de précipitations	23
Illustration 4 :	Chroniques piézométriques à Estagel (10903X0034/PZSTGL)	24
Illustration 5 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel - épisode 1	26
Illustration 6 :	Hydrogrammes sur le Verdouble (à gauche) et piézométrie à Estagel - épisode 2	27
Illustration 7 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel - épisode 2	27
Illustration 8 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 3	28
Illustration 9 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 3	28
Illustration 10 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 4	29
Illustration 11 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 4	29
Illustration 12 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 5	30
Illustration 13 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 5	30
Illustration 14 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 6	31
Illustration 15 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 6	31
Illustration 16 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 7	32
Illustration 17 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 7	32
Illustration 18 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 8	33
Illustration 19 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 8	33
Illustration 20 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 9	34
Illustration 21 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 9	34
Illustration 22 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 10	35
Illustration 23 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 10	35
Illustration 24 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 11	36
Illustration 25 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 11	36
Illustration 26 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 12	37
Illustration 27 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 12	37
Illustration 28 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 13	38
Illustration 29 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 13	38
Illustration 30 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 14	39
Illustration 31 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 14	39
Illustration 32 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 15	40
Illustration 33 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 15	40
Illustration 34 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 16	41
Illustration 35 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 16	41
Illustration 36 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 17	42
Illustration 37 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 17	42
Illustration 38 :	Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 18	43
Illustration 39 :	Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 18	43

Illustration 40 :	Comparaison du débit à Tautavel pour les épisodes 3 (à gauche) et 10 (à droite) caractérisés par des conditions hydroclimatiques comparables	14
Illustration 41 :	Débit entrant à Caramany pour les épisodes 8 (à gauche) et 13 (à droite) caractérisés par des conditions hydroclimatiques comparables en début d'épisode	45
Illustration 42 :	Synthèse des principaux épisodes, code couleur niveau initial du karst : rouge : karst saturé, orange : moyennement rempli, vert : niveaux bas, pour le débit au pic de crue le code couleur est celui de la vigilance du SPC, voir Illustration 89	45
Illustration 43 :	Processus hydrologiques en jeu dans les échanges latéraux lors des crues (Charlier et al., 2019)	47
Illustration 44 :	Principe du modèle de propagation sur un tronçon entre deux stations hydrométriques amont I (inflows) et aval O (outflows) sans échanges latéraux (a), avec apports latéraux (b et des pertes latérales (c) uniformément réparties (d'après Charlier et al. 2019)	ว) 48
Illustration 45 :	Relations Pluie-Volume écoulé (P-V) en mm de lame d'eau (en haut) et coefficient de ruissellement (CR) en % (en bas) pour les 4 stations Planeze, Tautavel, Mas de Jau et Rivesaltes ; Le dégradé de bleu représente l'état de saturation initial du karst au forage Estagel.	51
Illustration 46 :	Relations Pluie-Débit maximal (Qx) pour les 4 stations Planeze, Tautavel, Mas de Jau et Rivesaltes.	52
Illustration 47 :	Relations Pluie-Volume écoulé (P-V) en mm de lame d'eau (en haut) et coefficient de ruissellement (CR) en % (en bas) pour les 2 sous-bassins latéraux.	53
Illustration 48 :	Exemple d'application du modèle sur la crue du 29/01/2011 sur le tronçon Mas de Jau -> Rivesaltes avec apports latéraux ; sont représentées de haut en bas les chroniques de pluie, de débit et de niveau d'eau du forage Estagel (en vert)	55
Illustration 49 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 23/03/2015, intégrant une incertitude de 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)	56
Illustration 50 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 30/11/2014, intégrant une incertitude de 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)	57
Illustration 51 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 21/11/2011, intégrant une incertitude de 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)	58
Illustration 52 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 03/01/2008, intégrant une incertitude c 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)	le 59
Illustration 53 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 18/11/2013, intégrant une incertitude de 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)	30
Illustration 54 :	Pics de crue minimum (▼) et maximum (▲) de chaque épisode de crue exprimés en fonction de la pluie du sous-bassin latéral (P _A) ; le dégradé de bleu indique le niveau de saturation initial du karst (cote piézométrique en m NGF au forage Estagel)	51
Illustration 55 :	Représentation schématique du modèle	64
Illustration 56 :	Représentation schématique de la structure du modèle type	35
Illustration 57 :	Fonctionnement du réservoir SOL, exemple pour CARAMANY année 2005	6
Illustration 58 :	Fonctionnement du Réservoir Lent, exemple pour CARAMANY année 2005	37
Illustration 59 :	Alimentation du réservoir Rapide, exemple du modèle CARAMANY.	38
Illustration 60 :	Simulation des débits sortants des réservoirs Lent et Rapide du modèle AQUIFERE, exemple pour le modèle CARAMANY pour le calcul du débit entrant dans le barrage	39
Illustration 61 :	Structure schématique du module KARST.	70
Illustration 62 :	Fonctionnement du réservoir KARST, exemple pour le modèle TAUTAVEL.	70
Illustration 63 :	Débit aval délivré par le barrage.	71
Illustration 64 :	Structure schématique du module barrage.	72
Illustration 65 :	Structure schématique du modèle CARAMANY incluant le module Barrage pour la simulation des débits sortants du barrage de Caramany	73

Crues karstiques Agly

Illustration 66 :	Fonctionnement du réservoir Barrage du Modèle CARAMANY.	74
Illustration 67 :	Débits simulés et observés à l'entrée (haut) et à la sortie (bas) du barrage de Caramany	.75
Illustration 68 :	Structure schématique du modèle TAUTAVEL.	76
Illustration 69 :	Débits simulés et observés à la station de Tautavel.	77
Illustration 70 :	Structure schématique du modèle ESTAGEL	78
Illustration 71 :	Débits simulés et observés à la station d'Estagel.	79
Illustration 72 :	Piézométrie mesurée à Estagel et niveau simulé dans le réservoir Karst Estagel	79
Illustration 73 :	Structure schématique du modèle RIVESALTES.	80
Illustration 74 :	Débits simulés et observés à la station de Rivesaltes.	81
Illustration 75 :	Bilan hydrologique annuel en mm/an	82
Illustration 76 :	Bilan hydrologique en Mm³/an	82
Illustration 77 :	Représentation schématique du modèle conceptuel de fonctionnement du karst des Corbières (Rapport BRGM RP-54708-FR, Dörfliger et al, 2006)	83
Illustration 78 :	Évolution du débit souterrain des compartiments karstiques	84
Illustration 79 :	Évolution des volumes des réservoirs karsts des 3 modèles à composante karstique	85
Illustration 80 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée	87
Illustration 81 :	Résultats de la modélisation à Caramany (entrée sortie du barrage)	87
Illustration 82 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 11	88
Illustration 83 :	Volume dans le réservoir karst à Tautavel et Estagel et piézométrie mesurée (Estagel).	89
Illustration 84 :	Résultats de la modélisation à Caramany (entrée sortie du barrage)	89
Illustration 85 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 13	90
Illustration 86 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et Tautavel et piézométrie mesurée	91
Illustration 87 :	Résultats de la modélisation à Caramany (entrée sortie du barrage)	91
Illustration 88 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 18	92
Illustration 89 :	Gammes de débits associées à la vigilance.	92
Illustration 90 :	Comparaison des débits observés et simulés au pic de crue	93
Illustration 91 :	Présentation des résultats de la modélisation dans la grille de vigilance du SPC	93
Illustration 92 :	Pourcentage d'erreur au pic de crue pour les crues ayant présenté une vigilance	94
Illustration 93 :	Relation en HU et les capacités de rétention déduites des résultats de la simulation	95
Illustration 94 :	Capacités de rétention en fonction de la valeur initiale de HU.	95
Illustration 95 :	Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit à Tautavel	97
Illustration 96 :	Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit à Rivesaltes	97
Illustration 97 :	Comparaison des niveaux de vigilance obtenus pour 3 épisodes principaux récents en utilisant le modèle et l'abaque.	98
Illustration 98 :	Hydrogrammes pour la crue du 22/01/2020	99
Illustration 99 :	Utilisation de l'abaque en temps réél	100
Illustration 100 :	REX épisode 22 janvier 2020 à Caramany entrant	101
Illustration 101 :	REX épisode 22/01/2020 à Caramany sortant	102
Illustration 102 :	REX épisode 22/01/2020 à Tautavel	102
Illustration 103 :	REX épisode 22/01/2020 à Estagel.	103

Illustration 104 :	REX épisode 22/01/2020 à Rivesaltes	.103
Illustration 105 :	Résultats de la modélisation en mode validation pour la crue de janvier 2020.	.104
Illustration 106 :	Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA pour un sous bassin.	.108
Illustration 107 :	Schéma de fonctionnement pour un réservoir souterrain (à gauche) ou un réservoir souterrain à deux orifices (à droite) (Thiéry, 2018).	.109
Illustration 108 :	Différents termes du bilan hydrologique (en mm/an) obtenu après calage avec le modèle GARDENIA et Vensim à Caramany entrant	.113
Illustration 109 :	Comparaison des différentes contributions (en %) au débit total ; respectivement la part des eaux souterraines, des échanges extérieurs et du ruissellement	.114
Illustration 110 :	Comparaison des pics de crue observés et simulés des modèles EROS et GARDENIA retenus à Caramany entrant	.114
Illustration 111 :	Comparaison des débits observés et simulés pour EROS et GARDENIA à Caramany entrant pour les principales crues.	.115
Illustration 112 :	Différents termes du bilan hydrologique (en mm/an) obtenus après calage avec le modèle GARDENIA et Vensim à Caramany sortant	.116
Illustration 113 :	Comparaison des différentes contributions (en %) au débit total ; respectivement la part des eaux infiltrées en souterrain, des échanges vers l'extérieur et du ruissellement à Caramany sortant.	.116
Illustration 114 :	Comparaison des pics de crue observés et simulés des modèles EROS et GARDENIA retenus à Caramany sortant	.117
Illustration 115 :	Comparaison des débits observés et simulés pour EROS et GARDENIA à Caramany sortant pour les principales crues	.118
Illustration 116 :	Différents termes du bilan hydrologique (en mm/an) obtenu après calage avec le modèle GARDENIA et Vensim à Tautavel	.119
Illustration 117 :	Comparaison des différentes contributions (en %) au débit total ; respectivement la part des eaux infiltrées en souterrain, des échanges vers l'extérieur et du ruissellement à Tautavel.	119
Illustration 118 :	Comparaison des pics de crue observés et simulés des modèles EROS et GARDENIA retenus à Tautavel.	.120
Illustration 119 :	Comparaison des débits observés et simulés pour EROS et GARDENIA à Tautavel pour les principales crues	.121
Illustration 120 :	Différents termes du bilan hydrologique (en mm/an) obtenu après calage avec le modèle GARDENIA et Vensim à Rivesaltes.	.122
Illustration 121 :	Comparaison des différentes contributions (en %) au débit total ; respectivement la part des eaux infiltrées en souterrain, des échanges vers l'extérieur et du ruissellement à Rivesaltes.	.122
Illustration 122 :	Comparaison des pics de crue observés et simulés des modèles EROS et GARDENIA retenus à Rivesaltes.	.123
Illustration 123 :	Comparaison des débits observés et simulés pour EROS et GARDENIA à Rivesaltes pour les principales crues	.124
Illustration 124 :	Critères de Nash calculés sur la période 2005-2018.	.125
Illustration 125 :	Critères de Nash calculés en mode évènementiel sur la période post 2013	.125
Illustration 126 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 12/04/2009	.133
Illustration 127 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 04/05/2010	.134
Illustration 128 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 11/10/2010	.135
Illustration 129 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 15/03/2011	.136
Illustration 130 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 28/10/2011	.137
Illustration 131 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 21/11/2011	.138

Crues karstiques Agly

Illustration 132 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 06/03/2013	.139
Illustration 133 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 18/11/2013	.140
Illustration 134 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 30/11/2014	.141
Illustration 135 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 23/03/2015	.142
Illustration 136 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 14/02/2017	.143
Illustration 137 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 25/03/2017	.144
Illustration 138 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 11/04/2018	.145
Illustration 139 :	Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 15/10/2018	.146
Illustration 140 :	Saturation du réservoir karst à Tautavel et Estagel pour l'épisode n° 4	.149
Illustration 141 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n °4	.150
Illustration 142 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée pour l'épisode n° 5	.151
Illustration 143 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 5	.152
Illustration 144 :	Volume dans le réservoir karst à Tautavel et piézométrie mesurée (Estagel)	.153
Illustration 145 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée (épisode 6)	.153
Illustration 146 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 6	.154
Illustration 147 :	Volume dans le réservoir karst à Tautavel et piézométrie mesurée (Estagel)	.155
Illustration 148 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 7	.156
Illustration 149 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée	.157
Illustration 150 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 8	.158
Illustration 151 :	Volume dans le réservoir karst à Tautavel et Estagel et piézométrie mesurée (Estagel).	159
Illustration 152 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 9	.160
Illustration 153 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée	.161
Illustration 154 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 10	.162
Illustration 155 :	Volume dans le réservoir karst à Tautavel et piézométrie mesurée (Estagel)	.163
Illustration 156 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 12	.164
Illustration 157 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée	.165
Illustration 158 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 14	.166
Illustration 159 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée	.167
Illustration 160 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 15	.168
Illustration 161 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée	.169
Illustration 162 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 16	.170
Illustration 163 :	Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée	.171
Illustration 164 :	Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (b gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 17	as .172
Illustration 165 :	Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit entrant à Caramany	.175

Illustration 166 :	Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit sortant de Caramany	175
Illustration 167 :	Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit à Estagel	176

Liste des annexes

Annexe 1 :	Modélisation des échanges latéraux lors des principales crues de l'Agly	131
Annexe 2 :	Résultats graphiques de la modélisation semi-distribuée pour les différents épisodes	147
Annexe 3 :	Abaques aux stations de Caramany et Estagel	173

1. Introduction

La présente étude « caractérisation des crues karstiques sur le bassin versant de l'Agly » résulte d'une convention de recherche et développement partagée établie entre le Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Agly (SMBVA) et le BRGM. Elle est cofinancée par ces derniers, le département des Pyrénées-Orientales, l'Europe et la Région Occitanie. Elle vise à améliorer les connaissances sur ce système hydrogéologique en particulier pendant les périodes de hautes eaux, afin de permettre une meilleure prévision des crues.

Le fleuve Agly, long de 76 km est caractérisé par des crues éclairs liées en partie au régime de pluies méditerranéennes caractérisées par des évènements très intenses et globalement de courtes durées avec parfois de forts cumuls (plusieurs centaines de mm en 24 h). Dans ce contexte, le service de Prévision des Crues Méditerranée-Ouest (SPC Med-Ouest) réalise un suivi des niveaux tout au long du fleuve afin d'assurer la prévision des crues, établir le niveau de vigilance en période de crise et envisager les risques associés. Les stations de Tautavel sur le Verdouble (affluent principal de l'Agly), d'Estagel et Rivesaltes sur l'Agly sont ainsi utilisées. Les prévisionistes du SPC Med-Ouest ont confirmé les difficultés de prévisions sur ce bassin complexe du fait d'une mozaïque de formations géologiques, où la part des formations calcaires karstiques est importante. Les études réalisées dans le passé par le BRGM sur les crues karstiques notamment en contexte méditerranéen (Nîmes, Lez, Nartuby, Tarn, Calavon-Coulon, Gapeau, bassins cévenols... voir Fleury et al, 2011, 2015; Charlier et al., 2015), tendent à montrer que le fonctionnement du ou des unités karstiques modifie la réponse hydrologique des cours d'eau, aussi bien en période de basses eaux qu'en période de hautes eaux. Il a été montré que l'état de saturation du bassin sur les zones karstiques était contrôlé par le niveau de remplissage de l'aquifère plutôt que par la saturation du sol. Ceci étant lié à de faibles épaisseurs de sols sur zones karstiques et à la forte capacité d'infiltration des formations karstifiées. Ainsi, en fonction du degré de remplissage du karst, les crues du cours d'eau peuvent être atténuées (lorsque les niveaux sont bas) ou amplifiées (lorsque les niveaux sont élevés, les capacités de stockage de l'aquifère étant réduites, ceci peut favoriser dans certains cas des phénomènes de débordement). On voit que les réponses des systèmes karstiques ont des conséquences très différentes selon l'état de saturation. Il est alors nécessaire de bien caractériser et mieux comprendre ce fonctionnement pour améliorer la prévision des crues des bassins comprenant des zones karstiques étendues. Ce projet a pour objectif de caractériser le rôle du karst des Corbières dans la genèse des crues de l'Agly et de ses affluents en évaluant l'influence de son remplissage sur l'intensité des crues.

1.1 PRÉSENTATION DU BASSIN DE L'AGLY

Le fleuve Agly long de 76 km prend sa source au col de Linas à proximité du Puech de Bugarach et se jette en mer au niveau de la commune Le Barcarès. L'Agly et ses affluents (voir Illustration 1) drainent la partie méridionale des Corbières (roches calcaires karstifiées), les Fenouillèdes (gneissique et schisteux), et le nord de la plaine du Roussillon (terrains détritiques néogènes et quaternaires), soit autant d'entités géographiques fort différentes du point de vue de leurs comportements hydrologiques et hydrogéologiques. Bien que la partie occidentale du bassin versant soit soumise à un climat de moyenne montagne (point culminant à 1 843 m, pic Dourmidou), les caractéristiques climatiques dominantes sont de type méditerranéen. Les pluies très intenses et globalement de courtes durées sont parfois caractérisées par un fort cumul (plusieurs centaines de mm en 24 h). Elles peuvent alors provoquer des crues rapides (temps de concentration de quelques heures).

Afin de réduire les crues sur l'Agly, le barrage de Caramany a été construit au début des années 1990 et mis en fonctionnement en novembre 1994. Il est situé à l'amont du bassin, et draine 409 km² (Illustration 1).



Illustration 1 : Présentation du bassin de l'Agly (fond de carte d'après rapport ISL 2014).

Le débit du fleuve à l'aval du barrage (Planèze) est mesuré pour l'élaboration des seuils de vigilance et la mise en place de l'alerte en temps réel, aux stations d'Estagel (Mas de Jau) et de Rivesaltes. Les surfaces totales du bassin de l'Agly à Estagel et à Rivesaltes sont respectivement de 909 km² et 1 049 km² (Illustration 1).

À l'aval de Planèze, les principaux affluents de l'Agly sont le Verdouble et le Maury, dont les surfaces de bassin versant sont respectivement de 321 km² et 84 km² (Illustration 1). La confluence avec le Verdouble se produit à Estagel en rive gauche en amont de la station de mesure du « Mas de Jau ». Les débits du Verdouble sont estimés à Tautavel¹ en amont des gorges du Verdouble (Bassin de 308 km²) où se produisent des pertes dans la zone karstique des calcaires du Jurassique.

Le sous bassin de l'Agly localisé entre le barrage de Caramany et Estagel en amont de la confluence avec le Verdouble a une superficie de 192 km², associé en grande partie au bassin du Maury (bassin non karstique de 84 km²). Les débits du Maury ne sont pas suivis. Toutefois, une estimation a été réalisée par Faillat (1972) à partir du rapport entre le débit spécifique du Maury et le débit spécifique du Verdouble à Tautavel (Maury 6,0 l/s/km² au Mas Comps, Verdouble 9,9 l/s/km² à Tautavel).

Ainsi le débit à la station Mas de Jau à Estagel correspond à la somme des flux (i) sortant du barrage à Planèze (qui contrôle 409 km²), (ii) issus du sous bassin de 192 km² situé entre le Barrage et Estagel et (iii) du Verdouble (308 km²). Dans ce contexte, les débits de l'Agly à Mas de Jau sont fortement impactés par ceux du Verdouble.

Le bassin de l'Agly à Rivesaltes représente 1 049 km² soit 13 % de plus que celui à Estagel (909 km² à Mas Jau). L'Agly entre Estagel et Rivesaltes parcourt un linéaire de près de 20 km. Le principal affluent est le Roboul, cours d'eau temporaire dont le bassin versant se développe au sein des

¹ Un suivi des débits du Verdouble est également réalisé en amont, stations de Padern et Vingrau

calcaires des Corbières. L'analyse des chroniques de débit pour les crues les plus fortes, montre qu'il n'y a pas nécessairement d'augmentation du débit entre Estagel et Rivesaltes. Selon les crues, on observe soit une augmentation, soit une stabilisation, voire parfois une diminution des débits entre l'amont et l'aval. À ce stade, trois hypothèses peuvent être proposées pour expliquer la variabilité temporelle du fonctionnement :

- l'incertitude sur les mesures de débit. Pour certaines crues importantes, le débit au pic de crue est évalué avec 50 % d'erreur (source SPC) ;
- des aménagements et des modifications du lit du cours d'eau peuvent engendrer des variations dans les écoulements au fil des ans ;
- la partie karstique en amont du tronçon (Roboul notamment) peut influer sur les débits selon l'état de remplissage du karst.

Une représentation cartographique simplifiée du bassin versant est ainsi proposée ci-après (Illustration 2).



Illustration 2 : Carte du bassin-versant de l'Agly à Rivesaltes simplifiée.

1.2 SINGULARITÉ HYDROGÉOLOGIQUE AFFECTANT LE FONCTIONNEMENT DE L'AGLY ET DU VERDOUBLE AU VOISINAGE D'ESTAGEL

Sur la commune d'Estagel, selon les conditions hydrogéologiques, une partie, voire la totalité du débit de l'Agly se perd au sein des calcaires, dans le bief compris entre la cave coopérative d'Estagel et le trou de la Pastère, près du Mas de Jau (zone de pertes de 3 km). Les pertes sont totales lorsque le débit lâché par le barrage correspond au débit réservé, lors des périodes de basses eaux dans la rivière. Les études des pertes de l'Agly réalisées conjointement de 1980 à 1986 (BRL, DDAF, 1986) en vue de la mise en place d'un barrage en amont sur l'Agly ont permis de les estimer. Le débit moyen des pertes de l'Agly peut être compris entre 0.3 et 1,5 m³/s selon l'importance des débits moyens de l'Agly à Planèze. Des études complémentaires importantes menées par le BRGM sous maîtrise d'ouvrage des départements de l'Aude et des Pyrénées Orientales ont permis de préciser ce comportement et l'évolution du débit d'infiltration en fonction du niveau d'eau dans le karst.

Les données disponibles indiquent par ailleurs que la capacité d'absorption du karst dans la zone des pertes est minimale (<480 l/s) en période de hautes eaux (Dorfliger et Ladouche, 2006 : BRGM/RP-54708-FR). En étiage, la dynamique de fonctionnement et l'importance des débits de pertes de l'Agly sont contrôlées par les modalités de gestion du barrage de Caramany (Ladouche et Aunay, 2011 : BRGM/RP- 60457-FR). Lors des périodes de soutien des débits de l'Agly par le Barrage de Caramany, le karst dans la zone des pertes est saturé d'eau (charge du karst comprise en moyenne entre 55 et 60 m NGF, piézométrie de l'ouvrage d'Estagel, BSS : 10903X0034). Le débit aux exutoires de Fontdame et Fontestramar se trouve alors constamment compensé par le débit d'absorption des pertes de l'Agly, ce dernier n'étant pas limité puisque les débits soutenus de l'Agly sont supérieurs au débit d'absorption des pertes. L'arrêt du soutien d'étiage du débit de l'Agly, généralement à partir de mi-octobre, se traduit par une perte totale du débit de l'Agly et par une diminution rapide de la charge piézométrique du karst dans la zone de pertes. En effet, le débit des sources karstique de Fontdame et Fontestramar (>1.5 m³/s) devient alors très supérieur au débit d'infiltration des pertes de l'Agly (= débit réservé de $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ à ces périodes), toute l'eau s'infiltre, et ce flux est insuffisant pour compenser l'alimentation vers l'aval, ce qui se traduit par une diminution des niveaux piézométriques sur ce secteur des pertes. Lorsque les niveaux piézométriques dans la zone de pertes sont < 20 m NGF, la capacité d'absorption du karst dans sa zone de pertes devient alors maximale, dans le secteur de l'Agly, celle-ci est évaluée à quelques m³/s.

Pour le Verdouble, des pertes sont également observées dans les gorges du Verdouble entre l'auberge de l'Alzine (situé à l'aval de Tautavel) et la confluence avec l'Agly. Les études des pertes du Verdouble réalisées par le BRGM ont montré que la zone des pertes peut absorber jusqu'à 7,6 m³/s lorsque le karst est très « sec » (contexte de basses eaux), alors qu'il n'absorbe plus que 2,9 m³/s pour le même débit à l'amont dans un contexte de moyennes eaux. Les pertes du Verdouble sont totales lorsque le débit à Tautavel est inférieur à 0,7 m³/s. Ces résultats illustrent la variabilité temporelle du fonctionnement de la zone des pertes en fonction de l'état de remplissage du karst qualifié par la piézométrie dans la zone d'Estagel (Dorfliger et Ladouche, 2006).

Sur la période 1997-2003, **le débit moyen interannuel des pertes de l'Agly et du Verdouble (cumul des 2 pertes) a été évalué à 1,5 m³/s** (Ladouche *et al*, 2004 : BRGM/RP-52919-FR). Les modélisations réalisées sur le système karstique du Bas Agly à l'aide d'une approche par fonction de transfert (TEMPO) ont permis de préciser le rôle et l'importance des pertes dans le fonctionnement du karst. Ces pertes contribuent pour environ 60 % au fonctionnement hydrogéologique du karst binaire² du synclinal du Bas-Agly dont les sources de Fontdame et Fontestramar sont les deux principaux exutoires.

Dans le cadre du projet Vulcain (2007-2009), le module de modélisation du karst précédemment développé (modèle Tempo, Dorfliger et Ladouche, 2006 : BRGM/RP-54708-FR et Dorfliger *et al*, 2008) a été intégré dans une approche de modélisation semi-distribué plus globale définie à l'échelle du bassin de l'Agly (à la station Mas de Jau). Outre la simulation des débits des pertes (Agly et Verdouble) et des sources de Fontdame et Fontestramar, ce modèle, au pas de temps journalier, permet la simulation des débits journalier de l'Agly aux stations du Mas de Jau, Planèze et Ansignan ainsi que le débit du Verdouble à Tautavel.

Les études précédentes réalisées sur le karst des Corbières ont donc montré l'existence de zones de pertes. Leur fonctionnement a été caractérisé à l'échelle du cycle hydrologique en montrant que 60 % de la recharge du karst s'effectuait via l'infiltration directe au niveau de ces secteurs. Toutefois, le fonctionnement spécifique en période de crue n'a pas été étudié. C'est l'objet de la présente étude. Plusieurs hypothèses de fonctionnement peuvent d'ores et déjà être envisagées. Retenons la possibilité d'une atténuation des pics de crues en condition de basses et moyennes eaux dans le karst ou à l'inverse une amplification sur les secteurs aval du karst en condition de karst saturé, du fait de transfert rapide en souterrain et des apports importants en conditions extrêmes.

² Pour mémoire un karst binaire est un karst alimenté à la fois par les pluies sur les zones de calcaire affleurant et par une infiltration directe provenant des cours d'eau

1.3 CONTENU DU RAPPORT

Ce projet vise à caractériser le débit du Verdouble et de l'Agly au niveau des stations de suivi du SPC de Tautavel (pour le Verdouble), d'Estagel et de Rivesaltes (pour l'Agly). Pour ce faire, le comportement de plusieurs sous-bassins sera caractérisé.

Les quatre sous bassins versants ou sous BV envisagés sont (Illustration 1) :

- 1- le Verdouble à Tautavel ;
- 2- l'Agly en sortie du barrage de Caramany ;
- 3- l'Agly à Estagel, à l'aval de la traversée du karst et des zones de pertes ;
- 4- l'Agly à Rivesaltes.

Le travail ainsi réalisé va être présenté dans les parties suivantes de ce rapport, la partie 1 constituant la présente introduction :

- partie 2 : constitution de la base de données et critique des différentes chroniques ;
- partie 3 : analyse hydrogéologique des séries temporelles afin de caractériser les échanges latéraux (pertes/apports) entre 2 stations hydrométriques pour mieux comprendre le rôle des unités karstiques latérales dans la modification de la réponse hydrologique du cours d'eau ;
- partie 4 : mise en place d'une modèle numérique semi-distribué basé sur le modèle conceptuel de fonctionnement afin de simuler les débits entrants et sortants de Caramany, des stations de Tautavel, Estagel et Rivesaltes et également d'appréhender les phénomènes de remplissage, écrêtage et saturation des horizons superficiels et du karst ; à l'issue de ce travail de modélisation, le modèle sera utilisé en mode prévisionnel afin de réaliser un outil pour la vigilance ; enfin un retour d'expérience sur la crue de janvier 2020 basé sur l'utilisation de ces outils (modèle semidistribué + abaque) sera réalisé ;
- partie 5 : une nouvelle approche de modélisation globale a été testée à partir des outils de modélisation du BRGM (GARDENIA et EROS), en vue d'évaluer leur pertinence pour une éventuelle intégration à la plateforme de vigilance temps réel en cours de développement au BRGM (« MétéEAU des nappes ») ; cette dernière permettrait aux gestionnaires de suivre en temps réel les débits sur l'Agly et le niveau piézométrique à Estagel, et en période de crise de lancer des prévisions de débit à partir de scénarios climatiques.

2. Présentation des données

Ce projet est basé sur l'analyse des crues sur les cours d'eau du Verdouble et de l'Agly ainsi que sur l'évolution des niveaux d'eau dans le karst des Corbières. Au vu de la rapidité de montée des eaux en période de crue, le pas de temps horaire a été choisi pour réaliser l'étude. Les données de débit sont collectées et validées par le Service de Prévision des Crues Méditerranée Ouest (SPC MedOuest) / DREAL Occitanie. D'après le SPC MedOuest, il n'y a pas de données fiables avant 2005. Les chroniques ont ainsi été constituées au pas de temps horaire sur la période 2005-2018. Une critique de ces données a été réalisée en partenariat avec le SPC. Il n'y a pas eu de crues majeures en 2019. En janvier 2020, en fin de projet une crue majeure s'est produite. La partie 5 sera ainsi dédiée à l'analyse de cette crue et aux résultats de la modélisation associée.

Les données climatiques de précipitation et l'évaporation sur le bassin versant ont été fournies par Météo-France. Les données de débit aux différentes stations ont été récupérées sur la Banque Hydro. Enfin, les données de niveau piézométrique dans l'aquifère karstique proviennent du suivi piézométrique assuré par le BRGM pour le CD66 et diffusé via la banque ADES. L'ensemble des données sont présentées ci-après.

Sur la période 2005 à 2018, 18 épisodes majeurs de précipitations ont été enregistrés (voir liste Illustration 3). Ces derniers donnent lieu, soit à une crue dans le karst et les cours d'eau, soit uniquement à une remontée des niveaux piézométriques dans le karst lorsque ce dernier est initialement déprimé. Les crues de surface sont concomitantes avec les crues souterraines.

n° crue	Date
1	13/10/2005
2	14/11/2005
3	29/01/2006
4	27/12/2008
5	12/04/2009
6	04/05/2010
7	11/10/2010
8	15/03/2011
9	28/10/2011
10	21/11/2011
11	06/03/2013
12	18/11/2013
13	30/11/2014
14	22/03/2015
15	14/02/2017
16	25/03/2017
17	11/04/2018
18	15/10/2018

Illustration 3 : Date des 18 principaux épisodes de précipitations.

2.1 DONNÉES CLIMATIQUES

Les chroniques de précipitations spatialisées sur chacun des 4 sous bassin versant précédemment caractérisés, sont issues d'une interpolation des données Radar réalisée par Météo-France. Actuellement la donnée la plus fiable provient de la lame d'eau radar appelée « Antilope j+1 », issue d'un recalage de la donnée radar avec les postes pluviométriques au sol. Cette dernière existe depuis le 01 juillet 2006. Pour la période 01/01/2005-30/06/2006, la lame d'eau Comephore également issue d'une analyse des données radar sera utilisée. Cette dernière est jugée moins fiable par le SPC. Aussi, d'après le SPC, Météo-France travaille continuellement sur les algorithmes de calcul des lames d'eau en vue d'améliorer les données. Ceci génère un biais sur les chroniques longues, ce qui est le cas pour cette étude. Les données du début de chroniques (2006) présentent des différences par rapport aux données actuelles, sans que cette dernière puisse toutefois être caractérisée. C'est pourquoi dans la modélisation à venir la période récente (post 2011) sera priorisée pour le calage du modèle.

Concernant la spatialisation, les découpages des sous bassins-versants sont associés à des codes utilisés par Météo-France. Ces derniers sont rappelés ci-après :

- Verdouble à Tautavel (S_{BV} = 308 km²) BV TAUTAVEL : MO 790 ;
- Agly à Caramany ($S_{BV} = 409 \text{ km}^2$) BV CARAMANY : MO 101;
- Agly à Estagel ($S_{sous-BV} = 192 \text{ km}^2$) BV ESTAGEL (909 km²) : MO 67 ;
- Agly à Rivesaltes (S_{sous-BV} = 140 km²) BV RIVESALTES (1049 km²) : MO 77.

Enfin, les données d'évapotranspiration potentielle ont été fournies par Météo-France à l'échelle du bassin de l'Agly au pas de temps journalier.

2.2 HYDROGRAMMES

Les données de débit sont collectées et validées par le SPC MedOuest / DREAL Occitanie. Ces données sont accessibles via le site internet : <u>http://hydro.eaufrance.fr/</u>. Les stations sont identifiées via un code station fourni ci-après. Les chroniques de débit horaire des stations du Verdouble à Padern (Y0655020), Vingrau (Y0655005) et Tautavel (Y0655010) et de l'Agly à Planèze (Y0634030), Estagel - Mas de Jau (Y0664040) et Rivesaltes (Y0664060), ont été récupérées. Une analyse critique de ces données a été réalisée en partenariat avec le SPC, une restitution est proposée dans le paragraphe 2.5.

Les chroniques au pas de temps horaire des niveaux d'eau dans le barrage, du débit entrant et sortant ont été fournies par le CD66.

2.3 NIVEAUX D'EAU DU KARST

Le piézomètre d'Estagel permet de suivre les niveaux d'eau dans le karst. Les chroniques sont le site internet https://ades.eaufrance.fr/, à partir du code consultables sur BSS 10903X0034/PZSTGL. Ces données serviront à caractériser le comportement du karst en période de crue. Les études précédentes sur le karst des Corbières (Dörfliger et al., 2006 ; Ladouche et al., 2004) ont identifié le piézomètre Estagel comme ouvrage représentatif du comportement de la zone des pertes, il caractérise ainsi l'état de remplissage de l'aquifère dans ce secteur. Le fonctionnement est le suivant : lorsque le karst est rempli, le niveau piézométrique avoisine les 59 m NGF, une partie de l'eau qui circule dans le cours d'eau s'infiltre au niveau des zones de pertes. Il y a alors un équilibre entre le volume infiltré par les pertes et le volume écoulé en souterrain. Le niveau reste alors proche de 59 m. Lorsque le débit de l'Agly diminue (notamment au moment de l'arrêt des lâchers du barrage), les pertes deviennent total, le débit infiltré diminue et ne compense plus le flux souterrain. Le niveau dans le karst diminue alors fortement pour atteindre des niveaux pouvant chuter de 30 à 40 m en quelques semaines (Illustration 4). Les épisodes de fortes pluies permettent une recharge quasi instantanée (quelques heures) du karst, le niveau atteint à nouveau 59 m. Lors des crues, des pics piézométriques sont observés, ils peuvent atteindre 66 m NGF comme cela a été observé pour la forte crue de mars 2013.



Illustration 4 : Chroniques piézométriques à Estagel (10903X0034/PZSTGL).

2.4 ANALYSE CRITIQUE DES DONNÉES – PRÉSENTATION DES ÉPISODES

Les échanges avec les membres du Comité de Pilotage ont permis d'établir qu'il n'y avait pas de données de débit fiables avant 2005. La simulation débutera donc le 01 janvier 2005. Par ailleurs, des travaux d'aménagements sur le cours d'eau ou son lit ont été réalisés :

- à Tautavel en 2007-2008, les données de débit avant 2008 sont donc soumises à caution ;
- à Rivesaltes en 2013, il peut donc y avoir une rupture dans les chroniques de débit en 2013 ;
- à Estagel, après la crue de mars 2013 (lors de l'été 2013 ou 2014), il y a eu un dégagement de matériel dans le cours d'eau. Le comportement du cours d'eau se trouve modifié en période de moyennes et hautes eaux, avec des hauteurs d'eau moindres, engendrant une sous-estimation du débit pour les crues conséquentes. La DREAL a récemment identifié ce problème, à ce jour la courbe de tarage n'a pas été reprise et de nouveaux jaugeages en crues sont envisagés pour établir une nouvelle courbe de tarage. Ainsi, à partir de l'été 2013 ou 2014 la donnée de débit pour les fortes crues est probablement sous-estimée. Les crues n° 13 (30/11/2014) et 18 (15/10/2018) sont ainsi concernées.

Au vu de l'ensemble de ces éléments, la modélisation sera réalisée afin de reproduire au mieux les différentes crues, tout en gardant à l'esprit que des dérives significatives pourront avoir lieu à l'échelle des 13 années étudiées. Les chroniques les plus récentes (post 2013) seront jugées les plus fiables (à l'exception du débit à Estagel pour les fortes crues). Cette période aura ainsi plus de poids dans le calage « qualitatif » du modèle. Enfin, il est particulièrement compliqué de simuler correctement l'ensemble de la gamme des crues. C'est pourquoi, le projet ayant pour objectif d'améliorer la prévision des fortes crues, un poids plus important sera donné pour la simulation des crues conséquentes. Le travail s'attachera toutefois à reproduire au mieux les différents mécanismes physiques qui prennent place, en particulier le remplissage et la saturation du karst et l'arrivée des premières crues. Il faut noter que l'intensité de ces premières crues lorsqu'elles ont un débit faible est particulièrement difficile à reproduire.

Une analyse de la qualité des données sur les 18 principaux épisodes, a été réalisée à partir des chroniques de débit de Padern, Vingrau, Tautavel, Estagel, Rivesaltes, du débit sortant du barrage, des niveaux piézométriques à Estagel et des cumuls de pluie sur les différents sous BV. Les épisodes sont ainsi numérotés par ordre chronologique croissant, de 1 à 18, de novembre 2005 à novembre 2018. Cette analyse qualitative est proposée ci-après. Deux graphiques sont ainsi proposés pour chacun des cours d'eau. Les hydrogrammes de Padern, Vingrau et Tautavel sont utilisés pour le Verdouble. À Caramany, le débit sortant du barrage est mesuré à l'exutoire et le débit entrant est calculé à partir des variations de hauteur d'eau et donc de volume au sein du barrage. Ces données sont fournies par le CD66. Les hydrogrammes du débit entrant et sortant du barrage, et ceux d'Estagel et Rivesaltes seront utilisés pour l'Agly. La piézométrie à Estagel est fournie dans les 2 graphiques afin d'appréhender le remplissage du karst.

2.4.1 Crue n° 1 : 14/10/2005

L'épisode débute en condition de karst déprimé, la piézométrie initiale étant à 28 m NGF (Illustration 5). Les précipitations sur 24 h sont comprises entre 60 et 110 mm selon les sous bassins-versants. Elles conduisent à une bonne recharge du karst avec un niveau final à 59 m NGF. Le karst est alors rechargé. Il n'y a toutefois pas de pic de crue marqué dans l'aquifère.

Une petite crue a été enregistrée à Estagel (80 m³/s), il n'y a pas de données aux autres stations. Compte tenu de l'absence de données aux stations de Tautavel et Rivesaltes, cet épisode sera difficilement exploitable pour le calage du modèle.



Illustration 5 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel - épisode 1.

2.4.2 Crue n° 2 : 15/11/2005

L'épisode se déroule en condition de karst rechargé, la piézométrie initiale à Estagel étant à 59 m NGF (Illustration 6). La pluie, comprise selon les sous bassins entre 100 et 200 mm en 48 h, génère une forte crue. Au niveau du karst, le niveau piézométrique à Estagel atteint un pic à 66 m. Cette crue du karst est comparable à la crue majeure du 6 mars 2013.

La valeur du débit au pic de crue à Tautavel (débit à 750 m³/s) semble trop élevée. En effet, cet épisode est proche de celui du 6 mars 2013 en terme de pluie (≈210 mm en 48 h sur le BV du Verdouble à Tautavel pour l'épisode et 165 mm en 36 h le 06 mars 2013) et de condition initiale du karst (rechargé). Le débit à Tautavel était alors égal à 450 m³/s. Aussi, on observe un accroissement du débit entre Padern (350 m³/s) et Vingrau (470 m³/s). Pour être en cohérence avec le débit de ces 2 stations et l'accroissement progressif le long du cours d'eau en condition de karst rechargé, le débit à Tautavel au pic de crue devrait être compris entre 500 et 600 m³/s.

Le SPC précise qu'avant 2008 la courbe de tarage à Tautavel surestime les débits dans les moyennes et hautes eaux. Elle a été, par la suite, très fortement diminuée.



Illustration 6 : Hydrogrammes sur le Verdouble (à gauche) et piézométrie à Estagel - épisode 2.

Sur l'Agly, le débit au pic de crue à Rivesaltes (760 m³/s) est très inférieur à celui d'Estagel situé en amont (1 150 m³/s), ce qui n'est pas cohérent. D'après le SPC, cette valeur à Estagel est surestimée. Ainsi, la hauteur anormalement haute mesurée pendant la crue est sûrement due à un embâcle sur le pont du Verdouble à Estagel qui aurait lâché, juste en amont de la station. Le débit à Estagel aurait dû être compris entre 600 et 700 m³/s.



Illustration 7 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel - épisode 2.

Au vu des erreurs sur les données de débit à Tautavel et Estagel, cette crue ne semble pas pertinente pour le calage du modèle.

2.4.3 Crue n° 3 : 29/01/2006

Cet épisode se produit en condition de karst rechargé (la piézométrie initiale étant à 59 m NGF), les précipitations sont fortes, comprises entre 70 à 140 mm en 24h selon les BV. Il est associé à une forte crue dans le karst avec un niveau maximum à 67 m et également sur les cours d'eau (Illustrations 8 et 9).



Illustration 8 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel - épisode 3.



Illustration 9 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel - épisode 3.

Sur l'Agly, le débit à Estagel est fortement supérieur à celui de Rivesaltes, ce qui n'est pas cohérent. Le SPC précise que cette crue est inférieure à celle de 2005, confirmant l'erreur probable sur la chronique à Estagel. Le débit au pic de crue à Estagel devrait être compris entre 450 et 500 m³/s. Le SPC précise également que la neige était présente avant la crue et que les lames d'eau sont ainsi à prendre avec précaution.

Au vu de ces éléments, il apparaît que cette crue sera difficilement exploitable pour le calage du modèle.

2.4.4 Crue n° 4 : 27/12/2008

Cet épisode débute en condition de karst fortement déprimé (niveau initial à 18 m NGF). La pluie conséquente comprises entre 85 à 150 mm en 36h selon le BV, assure la recharge du karst et une petite crue karstique (le niveau piézométrique maximal égal à 61 m). Une petite crue de surface est observée avec des débits faibles de l'ordre de 35 m³/s à Tautavel et quasi nuls à Estagel (Illustrations 10 et 11).



Illustration 10 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 4.



Illustration 11 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel - épisode 4.

Crues karstiques Agly

2.4.5 Crue n° 5 : 12/04/2009

Cet épisode se déroule en condition de karst rechargé (le niveau initial à Estagel étant égal à 59 m NGF). Les pluies sont comprises entre 20 et 35 mm en 12 h selon les sous BV. Il est associé à une crue de faible amplitude sur le karst et les cours d'eau avec un maximum piézométrique à Estagel à 61 m et un débit inférieur à 50 m³/s sur l'ensemble des stations (Illustrations 12 et 13).



Illustration 12 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel - épisode 5.



Illustration 13 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 5.

2.4.6 Crue n° 6 : 04/05/2010

Cet épisode a lieu en condition de karst rechargé avec une piézométrie initiale dans le karst à 58 m NGF. Les précipitations sont comprises entre 70 et 85 mm en 24 h selon les sous BV. Elles engendrent une faible remontée des niveaux dans le karst (+ 2 m) ainsi que des débits faibles dans les cours d'eau, inférieurs à 50 m³/s (Illustrations 14 et 15). Pour cet épisode le karst était rechargé et les pluies ont été conséquentes. Toutefois la crue a été très limitée. Il est probable que les sols ont écrêté une partie des pluies, les précipitations ayant été limitées le mois précédent l'épisode (inférieures à 30 mm).



Illustration 14 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 6.



Illustration 15 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 6.

2.4.7 Crue n° 7 : 11/10/2010

L'épisode débute en condition de karst sous saturé avec un niveau piézométrique bas à 46 m NGF. Les pluies sont fortes, comprises selon les sous BV entre 205 et 270 mm en 48 h. Dans un premier temps le karst se recharge puis le système génère une crue conséquente. Le niveau dans le karst atteint 63 m.

Sur le Verdouble, les données entre Padern (180 m³/s), Vingrau (230 m³/s) et Tautavel (280 m³/s) sont cohérentes (Illustration 16).



Illustration 16 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 7.

Un accroissement du débit a lieu à Estagel, avec un débit maximal de 470 m³/s. L'hydrogramme au pic de crue à Rivesaltes n'est pas connu (absence de mesure). En estimant une augmentation du débit de 10 à 20 % entre Estagel et Rivesaltes, le débit maximale à Rivesaltes est estimé à 550 m³/s (Illustration 17).



Illustration 17 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 7.

2.4.8 Crue n° 8 : 15/03/2011

Cet épisode se déroule en condition de karst rechargé, début mars la piézométrie étant égale à 59 m NGF. Le capteur n'a pas fonctionné pour cette crue. Le niveau piézométrique au pic de crue n'est donc pas connu. Les pluies sont fortes, comprises entre 75 et 105 mm en 24 h selon les sous BV. Les débits sont importants dans les cours d'eau.

Les débits mesurés sur le Verdouble et l'Agly semblent cohérents (Illustrations 18 et 19), avec un accroissement des débits de l'amont vers l'aval (130 m³/s à Padern, 200 m³/s à Vingrau et 220 m³/s Tautavel et 270 m³/s à la sortie du barrage, 350 m³/s à Estagel et 400 m³/s à Rivesaltes).



Illustration 18 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 8.



Illustration 19 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 8.

2.4.9 Crue n° 9 : 28/10/2011

L'épisode débute en condition de karst sous-saturé (niveau piézométrique à 34 m NGF). Les pluies varient de 25 à 110 mm en 12 h selon les bassins versants, elles conduisent à la recharge du karst et la genèse d'une petite crue de surface.

Les chroniques mesurées sur le Verdouble et l'Agly semblent cohérentes (Illustrations 20 et 21), avec un accroissement des débits de l'amont vers l'aval (50 m³/s à Vingrau, 70 m³/s Tautavel, 80 m³/s à Estagel et 100 m³/s à Rivesaltes).



Illustration 20 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 9.



Illustration 21 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 9.
2.4.10 Crue n° 10 : 21/11/2011

L'épisode se déroule en condition de karst rechargé avec un niveau piézométrique à 59 m NGF en début de crue. Les précipitations sont importantes, comprises entre 70 et 120 mm en 24 h. Le karst réagit avec une montée des niveaux atteignant 63 m. Une crue se propage sur les cours d'eau, avec pour le Verdouble un accroissement des débits de l'amont vers l'aval allant de 50 m³/s à Padern, 170 m³/s à Vingrau et 200 m³/s Tautavel (Illustration 22). Sur l'Agly les débits augmentent également de l'amont vers l'aval avec et 20 m³/s à la sortie du barrage, 310 m³/s à Estagel et 410 m³/s à Rivesaltes (Illustration 23).



Illustration 22 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel - épisode 10.



Illustration 23 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 10.

2.4.11 Crue n° 11 : 06/03/2013

Cet épisode a lieu en condition initiale de karst saturé avec un niveau piézométrique à 59 m NGF. Les pluies sont conséquentes, comprises entre 90 et 135 mm en 24 h. Une forte crue est observée sur le karst avec un niveau piézométrique final à 66 m NGF. Les débits au pic de crue sont également très importants. Les chroniques mesurées sur le Verdouble et l'Agly semblent cohérentes, avec un accroissement des débits de l'amont vers l'aval. Sur le Verdouble les débits au pic de crue sont égaux à 200 m³/s à Padern, 440 m³/s à Vingrau et 450 m³/s Tautavel (Illustration 24). Sur l'Agly, le débit atteint 230 m³/s à la sortie du barrage, 910 m³/s à Estagel et 970 m³/s à Rivesaltes (Illustration 25). Sur l'hydrogramme de débit sortant du barrage (Illustration 25), une forte diminution des débits est observée avec un débit passant de 240 à 30 m³/s. Sur cet épisode, afin d'atténuer la crue vers l'aval, les vannes du barrage ont été fermées durant la crue pour diminuer le débit lâché et réduire l'impact de la crue à l'aval. Cette intervention n'a eu lieu sur le barrage que lors de cet épisode de très forte crue.



Illustration 24 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 11.



Illustration 25 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 11.

2.4.12 Crue nº 12 : 18/11/2013

Cet épisode débute en condition de karst sous saturé, avec un niveau bas dans le karst à Estagel à 34 m NGF. Les pluies sont d'environ 140 mm en 48 h sur le bassin de l'Agly. Le karst se recharge pendant la crue assurant une fonction de rétention de la crue de surface. Il atteint 61 m NGF à la fin de l'épisode. Une petite crue de surface se propage dans le système.

Les chroniques mesurées sur le Verdouble et l'Agly semblent cohérentes, avec un accroissement des débits de l'amont vers l'aval. Sur le Verdouble, les débits au pic de crue atteignent 60 m³/s à Padern, 80 m³/s à Vingrau et 100 m³/s Tautavel (Illustration 26). Sur l'Agly le débit atteint 120 m³/s à la sortie du barrage, 170 m³/s à Estagel et 260 m³/s à Rivesaltes (Illustration 27).



Illustration 26 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 12.



Illustration 27 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 12.

2.4.13 Crue n° 13 : 30/11/2014

Le système est en condition initiale de karst légèrement sous saturé avec un niveau à 51 m NGF. Les précipitations sont très fortes, comprises selon les sous BV entre 150 et 210 mm en 24 h. Le karst se recharge pendant la crue et atteint un niveau haut à 65 m NGF à la fin de l'épisode.

La crue de surface est importante. Sur le Verdouble, on observe un accroissement des débits avec au pic de crue 270 m³/s à Padern, 520 m³/s à Vingrau et 580 m³/s à Tautavel (Illustration 28). Sur l'Agly, les débits sont également en accord avec un accroissement amont-aval, avec en sortie de barrage : 250 m³/s, 800 m³/s à Estagel et 970 m³/s à Rivesaltes (Illustration 29).

Le débit à la station Estagel est sous-estimé (extraction de matériaux modifiant la courbe de tarage). Une estimation de débit maximum est proposée dans l'Illustration 29 en réduisant de 10 % le débit au pic de crue à Rivesaltes.



Illustration 28 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel - épisode 13.



Illustration 29 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 13.

2.4.14 Crue n° 14 : 22/03/2015

Le système est en condition initiale de karst rechargé. Les précipitations sont comprises entre 40 et 70 mm en 24 h selon les sous BV. Il y a une petite crue dans le karst, la piézométrie passe de 59 m à 61 m NGF. La crue de surface est également limitée. Le débit à Tautavel est égal à 50 m³/s, il est légèrement supérieur à celui de Padern et Vingrau (Illustration 30). Le débit en sortie de barrage avoisine les 50 m³/s, celui d'Estagel 100 m³/s et celui de Rivesaltes est proche également de 100 m³/s (Illustration 31).



Illustration 30 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 14.



Illustration 31 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel - épisode 14.

2.4.15 Crue n° 15 : 14/02/2017

Cet épisode a lieu en condition initiale de karst saturé avec un niveau piézométrique à 59 m NGF. Le karst se recharge pendant la crue et atteint 62 m NGF à la fin de l'épisode. Les précipitations sont comprises entre 35 et 70 mm en 24 h. La crue de surface générée est de faible intensité.

Les chroniques mesurées sur le Verdouble révèlent un accroissement des débits de l'amont vers l'aval avec un débit au pic de crue de 50 m³/s à Padern, 180 m³/s à Vingrau et 200 m³/s Tautavel (Illustration 32). Sur l'Agly un accroissement des débit amont-aval est également observé avec un débit de 10 m³/s à la sortie du barrage, 160 m³/s à Estagel et 300 m³/s à Rivesaltes (Illustration 33).



Illustration 32 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 15.



Illustration 33 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 15.

2.4.16 Crue n° 16 : 25/03/2017

L'épisode se déroule en condition de karst rechargé. Les précipitations comprises entre 40 et 70 mm en 12 h engendrent une petite crue dans le karst (le niveau piézométrique passe de 59 à 60 m NGF) et dans les cours d'eau. Le débit à Tautavel est égal à 60 m³/s, il est légèrement supérieur à celui de Vingrau (Illustration 34). Le débit en sortie de barrage avoisine les 40 m³/s, celui d'Estagel 80 m³/s et celui de Rivesaltes est proche de 110 m³/s (Illustration 35).



Illustration 34 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 16.



Illustration 35 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 16.

2.4.17 Crue n° 17 : 11/04/2018

L'épisode se déroule en condition de karst rechargé. Les précipitations sont comprises entre 30 et 40 mm en 12 h. Elles engendrent une petite crue dans le karst (le niveau piézométrique passe de 59 à 61 m NGF) et dans les cours d'eau. Le débit à Tautavel est égal à 70 m³/s, il est légèrement supérieur à celui de Vingrau (Illustration 36). Le débit en sortie de barrage est faible (70 m³/s), celui d'Estagel 100 m³/s et celui de Rivesaltes est proche de 200 m³/s (Illustration 37).



Illustration 36 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel - épisode 17.



Illustration 37 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 17.

2.4.18 Crue n° 18 : 15/10/2018

L'épisode de pluie significatif avec des précipitations comprises entre 70 et 125 mm en 12 h, intervient en condition initiale proche de la saturation du karst avec un niveau à 58 m NGF. Le karst atteint 62 m NGF à la fin de l'épisode. Les capacités de rétention du karst étaient limitées. Une crue significative de surface se propage.

Le débit à Tautavel est égal à 480 m³/s (Illustration 38), il est supérieur à celui de Vingrau (400 m³/s). Le débit en sortie de barrage est égal à 40 m³/s, celui d'Estagel 340 m³/s et celui de Rivesaltes supérieur à 600 m³/s (Illustration 39). Les données semblent cohérentes à l'exception d'Estagel, où les débits sont vraisemblablement sous-estimés (lié au détarrage de la courbe de jaugeage suite à l'extraction de matériau dans le lit du cours d'eau). Le débit à Estagel devrait être compris entre 500 et 550 m³/s (le débit à Tautavel étant égal à 480 m³/s et celui de Rivesaltes 600 m³/s).



Illustration 38 : Hydrogrammes sur le Verdouble et piézométrie à Estagel – épisode 18.



Illustration 39 : Hydrogrammes sur l'Agly et piézométrie à Estagel – épisode 18.

2.4.19 Analyse spécifique des épisodes et synthèse

L'analyse des données a conduit à : (i) ne pas prendre en compte dans le volet calage du modèle les 3 premiers épisodes du fait de l'erreur sur les données et le démarrage de la chronique Antilope j+1 à partir du 01 juillet 2006, (ii) proposer un débit reconstitué au pic de crue à 550 m³/s à Rivesaltes pour l'épisode 7 et (iii) évaluer un débit au pic de crue à Estagel d'environ 900 m³/s pour l'épisode 18 en condition de détarrage de la courbe de jaugeage.

Par ailleurs une analyse pluie-débit a été conduite en inter comparaison entre les différents épisodes. Deux erreurs potentielles sur les pluies sur un sous BV semblent se dégager. Elles concernent :

- l'hydrogramme de crue n° 10 du 21/11/11 à Tautavel :

Cette crue a lieu en condition de karst rechargé. Le 21 novembre 2011, il y a eu sur le sous BV de Tautavel 100 mm de pluie, avec une intensité maximale de 70 mm en 7 h (soit 7 mm/h) au moment du pic de crue. Le débit a été mesuré à 200 m³/s. La crue n° 3 du 29 janvier 2006 est comparable en termes de pluie et de condition initiale de karst rechargé. Il y a eu 116 mm de pluie sur le sous BV et une intensité maximale de 83 mm en 11 h (soit 7,5 mm/h). Le débit a atteint 400 m³/s ce qui représente le double du débit de l'épisode n° 10. Aussi, pour cet épisode une forte hétérogénéité de la pluie a été mesurée, avec 100 mm sur le sous BV de Tautavel, 50 mm à Caramany, 90 mm à Estagel et 120 mm Rivesaltes. Il semble donc probable pour cet épisode que la pluie à Tautavel ait été surestimée. La pluie annoncée devrait en effet donner un pic de crue proche de 400 m³/s.



Illustration 40 : Comparaison du débit à Tautavel pour les épisodes 3 (à gauche) et 10 (à droite) caractérisés par des conditions hydroclimatiques comparables.

- débit entrant à Caramany pour la crue n° 8 du 15 mars 2011 :

Une analyse critique sur les chroniques de débit entrant à Caramany a également été conduite. Les chroniques de débit entrant et sortant et les relations pluie/débit sont dans l'ensemble cohérentes, à l'exception de l'épisode du 14-15 mars 2011. En effet, il y a eu 115 mm de pluie en 30 h sur le sous BV de Caramany (et environ 50 mm de pluie les j précédents) conduisant à un débit maximal entrant dans le barrage égal à 480 m³/s. À titre de comparaison, pour l'épisode 13 du 30 novembre 2014 il y a eu pour le premier pic 120 mm en 10 h (soit une intensité 3 fois plus forte) et 40 mm les jours précédents. Le débit au pic de crue issu du sous BV de l'Agly à Caramany était alors égal à 400 m³/s, soit inférieur à l'épisode n° 8 bien que présentant une intensité des précipitations trois fois plus fortes. Pour le second pic du 30 novembre 2014, il y a eu 70 mm en 7 h (intensité comparable au 1^{er} pic), le débit a alors atteint 480 m³/s. Il semble donc que l'épisode n° 8 avec des intensités inférieures à 4 mm/h n'est pas en accord avec un débit de 480 m³/s. L'épisode du 15 mars 2011 semble ainsi marqué par une sous-estimation des précipitations sur le sous BV de Caramany.



Illustration 41 : Débit entrant à Caramany pour les épisodes 8 (à gauche) et 13 (à droite) caractérisés par des conditions hydroclimatiques comparables en début d'épisode.

Ces 2 épisodes (8 et 10) sont ainsi conservés pour la modélisation, mais lors du calage « visuel » cette erreur probable sur les données sera gardée à l'esprit et prise en compte dans l'interprétation des résultats.

		Pluie		karst		Qmax	Crue
N° épisode	Date	min	max	niveau ini	niveau fin	Rivesaltes	conservée
1	14/10/2005	60	110	28	59	abs donnée	non
2	15/11/2005	100	200	59	66	760	non
3	29/01/2006	70	140	59	67	550	non
4	27/12/2008	85	150	18	61	abs donnée	oui
5	12/04/2009	20	35	59	61	abs donnée	oui
6	04/05/2010	70	85	58	60	abs donnée	oui
7	11/10/2010	205	270	46	63	abs donnée	oui
8	15/03/2011	75	105	59	?	400	oui
9	28/10/2011	25	110	34	59	100	oui
10	21/11/2011	70	120	59	63	410	oui
11	06/03/2013	90	135	59	66	970	oui
12	18/11/2013	130	150	34	61	260	oui
13	30/11/2014	150	210	51	65	970	oui
14	22/03/2015	40	70	59	61	100	oui
15	14/02/2017	35	70	59	62	300	oui
16	25/03/2017	40	70	59	60	110	oui
17	11/04/2018	30	40	59	61	200	oui
18	15/10/2018	70	125	58	62	600	oui

Une synthèse des données associées aux principaux épisodes est fournie ci-après (Illustration 42).

Illustration 42 : Synthèse des principaux épisodes, code couleur niveau initial du karst : rouge : karst saturé, orange : moyennement rempli, vert : niveaux bas, pour le débit au pic de crue le code couleur est celui de la vigilance du SPC, voir Illustration 89.

Ainsi, au vu des incertitudes sur les données, les crues 1 à 3 ne seront pas présentées par la suite. Les crues 8 et 10 sont conservées, bien qu'une erreur sur les données de précipitation semble exister sur certains des sous BV. Dans l'ensemble on vérifie que les données post 2013 sont de meilleurs qualité, à l'exception d'Estagel, où les débits des moyennes et fortes crues sont sousestimés après l'été 2013.

3. Approche débit-débit développée lors des crues

3.1 PRINCIPE

3.1.1 Échanges latéraux

Les échanges latéraux sur un tronçon de rivière se caractérisent par (Illustration 43) :

- a. des pertes liées aux processus de débordement ou d'infiltration vers l'aquifère sous-jacent ;
- b. des apports liés au ruissellement de surface ou aux apports souterrains ;
- c. des cas plus complexes combinant plusieurs processus avec pertes et/ou apports.

L'eau de rivière en crue est alors un mélange de ces eaux d'origines variées.



Illustration 43 : Processus hydrologiques en jeu dans les échanges latéraux lors des crues (Charlier et al., 2019)

a) Cas des bassins karstiques

Dans le cas des bassins à composante karstique, les pertes par infiltration peuvent représenter une part non négligeable du fait de la forte capacité d'infiltration des formations fracturées et karstifiées. Si les zones de débordement sont limitées dans les tronçons de canyons, elles peuvent influencer les écoulements de crue comme dans tout bassin si une plaine d'inondation existe. Les apports par ruissellement sont privilégiés dans les zones marneuses moins perméables généralement localisées en bas de versant. Mais elles peuvent se produire sur les affleurements calcaires lorsque les intensités de pluie sont élevées (comme en climat méditerranéen) ou lorsque la zone superficielle (épikarst) est saturée.

b) Objectif de l'approche

Une approche Débit-Débit est développée depuis plusieurs années et appliquée sur différents bassins karstiques pour simuler les hydrogrammes de crue du sous-bassin latéral délimité par deux stations hydrométriques (cf. Charlier *et al.*, 2015 ; 2019 pour l'approche méthodologique). L'intérêt est que cette approche par tronçon permet de mieux quantifier les contributions du sous-bassin

latéral. Ainsi, sur un tronçon karstique, les échanges latéraux – c'est à dire les écoulements de pertes et/ou d'apports du sous-bassin latéral – sont analysés en utilisant une approche dite débitdébit, qui utilise la solution inverse du modèle de l'onde diffusante tenant compte des échanges latéraux développée par Moussa (1996). L'hydrogramme latéral ainsi simulé sera analysé en regard des variations de remplissage du karst.

3.1.2 Modélisation des échanges latéraux lors des crues

À partir des hydrogrammes mesurés à la station amont *I* (inflow) et à la station aval *O* (outflow), il est possible de modéliser l'hydrogramme latéral du bassin intermédiaire, sur lequel se produisent les écoulements latéraux issus des versants situés entre les deux stations.



Illustration 44 : Principe du modèle de propagation sur un tronçon entre deux stations hydrométriques amont I (inflows) et aval O (outflows) sans échanges latéraux (a), avec apports latéraux (b) et des pertes latérales (c) uniformément réparties (d'après Charlier et al. 2019).

De manière théorique, l'Illustration 44 synthétise trois cas de crues types à l'échelle d'un tronçon de rivière (Charlier *et al.*, 2019) :

- a) une crue de propagation sans apports latéraux, ce qui engendre une diminution du pic de crue à l'aval liée à la diffusion de l'onde de crue ;
- b) une crue avec apports latéraux, ce qui engendre une augmentation du pic de crue à l'aval liée aux contributions ;
- c) une crue avec pertes latérales, ce qui engendre une diminution du pic de crue à l'aval liée à la combinaison de la diffusion de l'onde de crue et des pertes de ruissellement par infiltration en profondeur ou débordement.

Pour différencier la part de diminution du pic de crue liée aux pertes et à la diffusion de l'onde de crue, il est évidemment nécessaire d'utiliser un modèle de propagation qui tienne compte de la diffusivité du milieu, tel que le modèle de l'onde diffusante.

3.1.3 Échanges latéraux

Le modèle de l'onde diffusante avec ou sans écoulements latéraux simule la propagation de l'onde de crue entre deux stations *I* (inflow) et *O* (outflow). Pour caractériser ces écoulements latéraux, nous utilisons dans cette étude la résolution du problème inverse qui simule le débit latéral à partir des données mesurées au droit des stations *I* et *O*.

a) Modèle de l'onde diffusante

Dans le but de modéliser les écoulements de surface en 1-D dans un cours d'eau, l'équation de Saint-Venant peut être simplifiée sous plusieurs hypothèses, conduisant à l'équation de l'onde diffusante (Moussa & Bocquillon, 1996) :

Eq. 1
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C \frac{\partial Q}{\partial x} - D \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0$$

où x [L] est la longueur le long du cours d'eau, t [T]) est le temps, et la célérité C [L.T⁻¹] et la diffusivité D [L² T⁻¹] sont fonctions du débit Q [L³ T⁻¹].

À l'échelle du tronçon de rivière – délimité par la station amont *I* (amont) et la station aval O – le modèle est appliqué sur la composante de crue $(Q_{I,f}(t) \text{ et } Q_{O,f}(t))$ du débit total $(Q_{I}(t) \text{ et } Q_{O}(t))$ enregistré respectivement aux 2 stations *I* et *O*. $Q_{I,f}(t)$ et $Q_{O,f}(t)$ sont estimées en retirant la composante de base $Q_{I,b}(t)$ et $Q_{O,b}(t)$ de $Q_{I,f}(t)$ et $Q_{O}(t)$.

La résolution de l'Eq. 1 est obtenue en utilisant le produit de convolution proposé par Moussa (1996) basé sur les hypothèses d'Hayami (Hayami, 1951), i.e. considérant *C* et *D* comme des paramètres constants avec le temps le long du cours d'eau de longueur *I* :

Eq. 2:
$$Q_{Ifr}(t) = \int_0^p Q_{If}(t-T) K(T) dT = Q_{If}(t) * K(t)$$

où $Q_{lfr}(t)$ est l'hydrogramme *l* propagé sur la composante de crue sans échanges latéraux, *p* est le temps mémoire du système, et le symbole * représente le produit de convolution. Comme il n'y a pas de problème de temps de calcul, le terme *p* peut être large en comparaison du temps de transit dans le cours d'eau. Dans l'Eq. 2, la fonction du noyau d'Hayami K(t) est exprimée ainsi :

Eq. 3
$$K(t) = \frac{l}{2(\pi D)^{1/2}} \frac{exp\left[\frac{Cl}{4D}(2-\frac{l}{Ct}-\frac{Ct}{l})\right]}{t^{3/2}}$$

L'Eq. 2 est ensuite utilisée comme une approche directe pour définir les paramètres *C* et *D*, en comparant $Q_{lfr}(t)$ avec $Q_{Of}(t)$. Dans un cas théorique sans échanges latéraux sous les hypothèses d'Hayami, l'hydrogramme amont propagé est égal à l'hydrogramme aval ($Q_{lfr}(t) = Q_{Of}(t)$) comme indiqué sur l'Illustration 44a.

b) Modèle de l'onde diffusante avec échanges latéraux

Plusieurs solutions existent pour résoudre l'équation de l'onde diffusante avec des échanges latéraux (voir Cimoreli *et al.* (2014) pour une revue). Celle de Moussa (1996) est sélectionnée car une solution analytique a été proposée pour résoudre le problème inverse. Le modèle est basé sur les hypothèses d'Hayami (*C* et *D* constants) et considérant des échanges latéraux uniformément répartis le long du tronçon. Il est utilisé pour propager l'hydrogramme amont vers l'aval en tenant compte des échanges. Une solution au problème inverse est utilisée pour simuler les échanges latéraux, connaissant les 2 hydrogrammes amont et aval. Cette solution du modèle inverse a été validée expérimentalement par Moussa and Majdalani (2019) sur une grande variété de scenarios d'hydrogrammes. Cette approche est intéressante lorsque l'on n'a pas accès à des observations sur les flux latéraux. En effet, cela donne des informations sur les contributions potentielles du bassin intermédiaire.

Intégrer les échanges latéraux dans l'équation de l'onde diffusante nécessite de tenir compte du débit latéral par unité de longueur q [L² T⁻¹] le long du cours d'eau, comme proposé par Moussa (1996) :

Eq. 4
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C\left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q\right) - D\left(\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} - \frac{\partial q}{\partial x}\right) = 0$$

Dans le cas particulier d'une distribution uniforme de q le long du tronçon, sous les hypothèses d'Hayami (C et D constants), Moussa (1996) propose une solution analytique :

Eq. 5
$$Q_{Ifr}(t) = \phi(t) + \left(Q_{If}(t) - \phi(t)\right) * K(t)$$

Eq. 6 avec $\phi(t) = \frac{c}{l} \int_0^t [Q_{Af}(\lambda) - Q_{Af}(0)] d\lambda$

Eq. 7 et avec
$$Q_{Af}(t) = \int_0^l q(x, t) dx$$

où q(x, t) [L² T⁻¹] est le débit par unité de longueur fonction de la distance x le long du tronçon. $Q_{A,f}(t)$ représente la composante de crue de l'hydrogramme latéral $Q_A(t)$. Comme indiqué sur l'Illustration 44llustration 44b,c, l'expression q(x, t) peut être positive ou négative selon que la direction des échanges vers le cours d'eau avec respectivement des apports et des pertes.

D'après Moussa (1996), le problème inverse identifie $Q_{Af}(t)$ en connaissant $Q_{lf}(t)$ et $Q_{Of}(t)$, et suite à la prédétermination de *C* et *D*. Donnant,

Eq. 8
$$Q_{Afr}(t) = Q_{0f}(t) - Q_{Ifr}(t)$$

Eq. 9 avec
$$\phi(t) - \phi(t) * K(t) = Q_{Afr}(t)$$

 $Q_{A,f}(t)$ est calculé en utilisant l'Eq. 10, après l'identification de K(t) dans l'Eq. 3:

Eq. 10
$$Q_{Af}(t) = \frac{l}{c_Q} \frac{d\phi}{dt}$$

L'hydrogramme latéral $Q_A(t)$ est simplement calculé à partir de $Q_A_t(t)$ en additionnant $Q_{A,b}(t)$, la différence de débit de base entre les stations O et $I(Q_{O,b}(t) - Q_{I,b}(t))$.

3.1.4 Stratégie de calibration

Dans cette étude, du fait de crues rapides, la détermination des paramètres *C* et *D* a été conduit en mettant en phase les pics des 2 hydrogrammes amont propagés et aval $Q_{Lr}(t)$ et $Q_O(t)$. Une analyse des incertitudes liées à la paramétrisation de ce modèle est disponible dans le papier Charlier *et al.* (2019).

3.1.5 Application du modèle au site d'étude

a) Décomposition des hydrogrammes de crue

La séparation du débit de crue $(Q_{If}(t)$ et $Q_{Of}(t))$ et du débit de base $(Q_{Ib}(t)$ et $Q_{Ob}(t))$ pour l'application du modèle de l'onde diffusante a été réalisé en considérant que le débit de base n'évolue pas au cours de la crue et qu'il est égal à la valeur de débit total initial. Cette simplification a été réalisée en raison des très fortes valeurs de pics de crue en regard des (très faibles) valeurs de débit de base.

b) Détermination des paramètres du modèle

L'onde diffusante est plus sensible à la célérité *C* qu'à la diffusivité *D* (Moussa, 1996). Le paramètre *D* est peu sensible et a été fixé à 1 000 m² s⁻¹ qui est l'ordre de grandeur pour ce type de cours d'eau (Todini, 1996).

c) Incertitudes liées aux mesures de débit

Afin d'encadrer les résultats des simulations, une courbe enveloppe intégrant une erreur de 10 % sur les données des 2 hydrogrammes I et O a été calculée lors de la simulation de Q_A(t).

3.2 RÉSULTATS DE L'APPROCHE DÉBIT-DÉBIT SUR LES CRUES MAJEURES

3.2.1 Bilan des écoulements

a) Au niveau des bassins en amont des stations hydrométriques

L'analyse Pluie-Débit sur les principaux épisodes de crue (cf. Section 2.4) présentée dans l'Illustration 45 est effectuée à partir des lames d'eau des précipitations (P) et du volume écoulé (V), et du coefficient de ruissellement CR (avec CR = V/P) pour les 4 stations de Planèze, Tautavel, Mas de Jau, et Rivesaltes. Le dégradé de bleu met en évidence l'état de saturation initial du karst au forage Estagel.



Illustration 45 : Relations Pluie-Volume écoulé (P-V) en mm de lame d'eau (en haut) et coefficient de ruissellement (CR) en % (en bas) pour les 4 stations Planeze, Tautavel, Mas de Jau et Rivesaltes ; Le dégradé de bleu représente l'état de saturation initial du karst au forage Estagel.

Globalement, se vérifie de manière classique l'augmentation du volume écoulé (et du coefficient de ruissellement) avec celle de la lame d'eau précipitée. Les épisodes de pluies en condition de karst saturé (cercles blancs) engendrent des coefficients de ruissellement atteignant 40 à 60 %). Les épisodes de précipitation les plus élevés (P > 200 mm) qui se sont produits en condition de karst non saturé (cercles bleus) ont engendré des écoulements en mm de lame d'eau équivalents aux épisodes de précipitations deux fois plus faibles, ce qui amène des coefficients de ruissellement de l'ordre de 25 %.



Illustration 46 : Relations Pluie-Débit maximal (Qx) pour les 4 stations Planeze, Tautavel, Mas de Jau et Rivesaltes.

L'Illustration 47 présente les débits maximum lors de chaque crue exprimés en fonction de la lame d'eau précipitée, toujours en fonction du niveau de remplissage du karst (dégradé bleu). De la même manière que pour le volume écoulé, les pointes de crue les plus fortes se produisent pour les épisodes les plus importants. En comparant les 2 épisodes pluvieux les plus élevés (en condition de karst non saturé) avec les épisodes en condition de karst saturé, on observe des pointes de crue équivalentes ou plus faibles. Cela est cohérent avec les résultats précédents et renforce l'idée que l'état de saturation initial du karst tamponne l'intensité de la réponse hydrologique pour les épisodes majeurs.

Ainsi, malgré le faible nombre d'épisodes supérieurs à 100 mm de précipitations, on peut émettre l'hypothèse que la réponse hydrologique de l'Agly (en terme de volume écoulé et de pointe de crue) est considérablement atténuée en condition de karst non saturé.

b) Au niveau des sous-bassins latéraux comprenant des affleurements karstiques

Si l'on se place maintenant au niveau des sous-bassins latéraux, c'est à dire les sous-bassins compris entre 2 (ou 3) stations hydrométriques, la même analyse peut être conduite en réalisant un différentiel sur les volumes écoulés.

L'Illustration 47 présente les relations P-V et P-Qx pour les deux sous-bassins Planeze+Tautavel - >Mas de Jau, et Mas de Jau-> Rivesaltes qui traversent une zone karstique. Les valeurs de volume écoulé négatives indiquent un déficit d'écoulement entre la station en Sortie et la (les) stations en Entrée, témoignage de pertes par débordement du lit mineur (avec stockage dans le lit majeur sans restitution au cours de la crue) et/ou par infiltration vers le souterrain. Les crues concernées se sont produites en condition de karst saturé, ce qui nous oriente plutôt vers des pertes générées par du débordement (cas de la crue du 15 mars 2011 notamment). L'incertitude sur les courbes de tarage doit également être considérée pour expliquer ce phénomène.

Les valeurs de V au-dessus de la droite en tiretés indiquent que les écoulements sont supérieurs aux précipitations, ce qui engendre un coefficient de ruissellement CR supérieur à 100 % pour la crue du 12 avril 2018.

Même si les relations P-V et P-CR sont peu évidentes à l'échelle des sous-bassins, on observe globalement une réponse hydrologique plus faible pour les épisodes majeurs en condition de karst initialement non saturé, avec des CR inférieurs à 20 % (contre 50 % en condition saturée) pour le premier tronçon Planeze+Tautavel->Mas de Jau, et avec des CR autour de 50 % (contre 80 %) pour le second tronçon Mas de Jau-> Rivesaltes.

L'analyse des hydrogrammes latéraux proposée dans la section suivante permettra d'amener des précisions quant aux processus en jeu concernant ces crues majeures.



Illustration 47 : Relations Pluie-Volume écoulé (P-V) en mm de lame d'eau (en haut) et coefficient de ruissellement (CR) en % (en bas) pour les 2 sous-bassins latéraux.

3.2.2 Échanges latéraux au cours des crues

a) Exemple d'épisode de crue

L'approche développée a pour objectif de simuler les échanges latéraux entre deux stations I et O et de mettre en lien la dynamique de l'hydrogramme latéral Q_A avec le niveau d'eau piézométrique au forage Estagel.

Sur chaque Illustration des épisodes de crue pour lesquelles le modèle a été appliqué – comme sur l'exemple de l'Illustration 48 - sont affichés de haut en bas : la pluie, le débit de la rivière et le niveau d'eau du forage Estagel.

Sur les chroniques hydrométriques (Illustration 48), 5 courbes sont présentées :

- Q_I ; courbe noire = débit mesuré à la station amont (I) ;
- Q_{Ir}; courbe en tiretés gris = même débit Q_I propagé sur le tronçon jusqu'à la station aval (O) à l'aide du modèle de l'onde diffusante sans écoulements latéraux;
- Q₀; courbe bleue = débit mesuré à la station aval (O);
- Q_A; courbe en pointillés rouges = débit latéral calculé à partir du modèle inverse de l'onde diffusante. Pour tenir compte des incertitudes sur les courbes de tarage et minimiser les échanges

latéraux (non mesurés), on applique une erreur sur chacun des hydrogrammes d'entrée et de sortie (dans ce cas d'étude 5 %) pour obtenir la courbe enveloppe rose ;

 Q_A valid ; courbe en tiretés rouges épais = débit qui minimise les débits latéraux à partir de la courbe enveloppe. C'est cette dernière courbe dite valide qui est utilisée par la suite dans l'analyse des échanges latéraux.

<u>Remarques</u> : le débit de sortie n'est pas égal à la somme des débits entrée + latéral mais bien à la somme des débits entrée propag. + latéral propag. (non représenté). Les débits « négatifs » calculés pour le sous-bassin intermédiaire correspondent à des pertes au sein du réseau hydrographique (débordement et/ou infiltration).

Sur l'exemple de l'Illustration 48 du tronçon Mas de Jau->Rivesaltes, l'analyse montre une légère diminution du pic de crue de quelques m³/s entre I (Mas de Jau) et O (Rivesaltes). La simulation de l'hydrogramme latéral indique une réponse plus complexe, avec une succession de 2 pics de crue de 5 m³/s, d'1 pic de pertes de 15 m³/s lors de la montée de crue principale, puis d'un signal quasinul lors du pic et de la décrue. Si l'on fait abstraction des 2 premiers pics de crue en début d'épisode, les échanges latéraux sont dominés par des pertes qui contribuent à retarder la montée de crue à Rivesaltes, et probablement à atténuer quelque peu le pic. Il est également intéressant de noter la dynamique très rapide du niveau piézométrique au forage Estagel qui augmente de manière synchrone avec la montée de crue et le phénomène de perte. Une recharge de l'aquifère karstique par les pertes de rivière simulées par le modèle est donc probable. Lors de la décrue, la différence d'amplitude entre les 2 hydrogrammes d'entrée et de sortie n'est pas significative si l'on tient compte de 5 % d'erreur sur les hydrogrammes.

Ainsi, nous pouvons conclure sur cet exemple, que sur la base de la modélisation, les échanges lors de la crue sont principalement des pertes sur le secteur karstique identifié (Illustration 2), lors de la montée de crue, puis l'absence de contributions significatives.



Illustration 48 : Exemple d'application du modèle sur la crue du 29/01/2011 sur le tronçon Mas de Jau -> Rivesaltes avec apports latéraux ; sont représentées de haut en bas les chroniques de pluie, de débit et de niveau d'eau du forage Estagel (en vert).

a) Analyse des crues majeures

L'ensemble des graphiques issus de l'approche débit-débit sur les épisodes de crue de l'Agly sont présentés en Annexe 1. Les crues d'intérêt sont discutées dans cette section.

Crues sans échanges latéraux significatifs

La crue la plus importante sans échanges latéraux significatifs est la crue du 23 mars 2015 qui se produit dans des conditions de karst saturé (cote piézométrique initiale de 60 mNGF). On note des apports de quelques dizaines de m³/s sur les deux tronçons mais qui restent très faibles comparé aux pics de crue aux stations de l'Agly en aval comme en amont (entre 60 et 100 m³/s).



Illustration 49 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 23/03/2015, intégrant une incertitude de 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)

Crues avec pertes latérales

La crue majeure caractérisée par les pertes latérales les plus importantes est celle du 30 novembre 2014. En début d'épisode, c'est-à-dire lors des deux premiers pics de crue les 28 et 29 novembre 2014, des pertes latérales sont simulées sur le second tronçon à une période où le karst est en phase de saturation. Des apports importants sont simulés par la suite lors de la journée du 29 novembre 2014.



Illustration 50 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 30/11/2014, intégrant une incertitude de 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)

• Crues avec apports latéraux

La crue majeure caractérisée par des apports importants sur les 2 tronçons de l'Agly est celle du 21 novembre 2011, en condition de karst saturé. Les apports latéraux sont respectivement de l'ordre de 100 et 150 m³/s pour le 1^{er} et le second tronçon.



Illustration 51 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 21/11/2011, intégrant une incertitude de 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)

• Crue en condition de karst sous-saturé

La crue du 03 janvier 2008 se produit en condition de karst sous-saturé, en notant que le niveau piézométrique reste sous la cote des 59 m NGF durant tout l'épisode. Cet épisode est caractérisé par des pertes sur le premier tronçon tout au long de l'épisode, sachant qu'elles sont très probablement masquées en cours d'épisode lorsque les pertes s'annulent du fait des contributions concomitantes du sous-bassin latéral.



Illustration 52 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 03/01/2008, intégrant une incertitude de 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)

• Crue avec saturation du karst en cours d'épisode

Plusieurs crues dont celle du 18 novembre 2013 se produisent en condition de karst initial soussaturé, karst qui se recharge pour atteindre le niveau de saturation au cours de l'épisode. Globalement, on note la prédominance d'apports, notamment sur le second tronçon, mais également de pertes en début d'épisode lorsque le karst est en phase de saturation.



Illustration 53 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 18/11/2013, intégrant une incertitude de 10 % sur les données de débit (courbe enveloppe rose)

3.2.3 Synthèse

L'Illustration 54 présente pour les deux tronçons les valeurs minimales ($\mathbf{\nabla}$) et maximales ($\mathbf{\Delta}$) des débits simulés du sous-bassin latéral (courbe $Q_{A \text{ valid}}$ en tiretés gras rouge de l'Illustration 48). Ces valeurs sont exprimées en fonction de la pluie du sous-bassin (P_A en abscisses) et du niveau de saturation initial du karst (piézo initiale au forage Estagel - couleur dégradé de bleu).

Pour le premier tronçon Planeze+Tautavel -> Mas de Jau, on observe de nombreux épisodes sans échanges significatifs (pics autour de 0) mais également des apports de l'ordre de 50 à 100 m³/s pour des pluies inférieures à 150 mm et des apports qui atteignent plus de 200 m³/s pour les épisodes de pluie les plus forts. Les pertes maximales sur ce tronçon restent inférieures à 30m³/s si l'on ne tient pas compte des pertes simulées pour la crue du 15 octobre 2018 pour laquelle de fortes incertitudes existent sur la validité des données de débit à Mas de Jau (sous-estimation de près de 200 m³/s).

Pour le second tronçon Mas de Jau -> Rivesaltes, on observe des apports plus importants pour les pluies inférieures à 200 mm (valeurs atteignant 180 et plus de 300 m³/s). Ce qui caractérise ce tronçon est l'influence potentielle du niveau de remplissage du karst dans l'intensité des échanges latéraux. En effet, les apports les plus importants se produisent en condition de karst initialement saturé (couleur blanche). Lorsque les conditions initiales sont sous-saturées (couleur bleu clair et bleu foncé), des pertes importantes, supérieures à 50 m³/s sont simulées. Elles atteignent plus de 100 m³/s pour la crue du 30 novembre 2014.



Illustration 54 : Pics de crue minimum ($\mathbf{\nabla}$) et maximum ($\mathbf{\Delta}$) de chaque épisode de crue exprimés en fonction de la pluie du sous-bassin latéral (P_A) ; le dégradé de bleu indique le niveau de saturation initial du karst (cote piézométrique en m NGF au forage Estagel).

D'après l'analyse des crues majeures réalisée précédemment, les pertes se produisent en début d'épisode lorsque le karst est sous-saturé. Cependant, il faut noter que des pertes ne sont pas simulées pour tous les épisodes se produisant en condition de karst sous-saturé (couleurs bleu). Cela signifie probablement que les pertes sont accompagnées d'apports concomitants et qu'elles sont susceptibles d'être masquées par l'importance du ruissellement. Ainsi, sans pour autant avoir suffisamment d'épisodes pour valider complètement cette hypothèse, on peut supposer que le karst influence les crues de deux manières :

- par une atténuation des pics de crue ou en tout cas, des premiers pics lors des crues multi-pics
 lorsque l'épisode se produit en condition de karst sous-saturé. Cette atténuation est liée aux pertes de plusieurs dizaines de m³/s auquel s'ajoute un très probable ralentissement de la vitesse de l'onde de crue ;
- par une contribution d'eau souterraine d'origine karstique et/ou de ruissellement sur karst saturé (refus à l'infiltration) et conduisant à des apports importants de plusieurs centaines de m³/s.

Ainsi, à partir de l'analyse Débit-Débit sur les deux tronçons entre Mas de Jau et Rivesaltes, nous pouvons mettre en évidence que le karst joue un rôle complexe d'atténuation et de contribution aux crues de l'Agly en lien avec son niveau de remplissage. Le second tronçon Mas de Jau \rightarrow Rivesaltes semble plus influencé que le premier tronçon Planeze+Tautavel \rightarrow Rivesaltes. Une meilleure connexion de la rivière avec le karst via un réseau de drainage souterrain plus développé sur la partie aval est une première hypothèse pour expliquer cette différence. Une seconde hypothèse est que les pertes sont liées à la plus grande proportion de karst sur le sous-bassin Mas de Jau->Rivesaltes.

4. Modélisation semi-distribuée du système « bassin versant de l'Agly »

4.1 PRÉSENTATION DU MODÈLE

L'objectif de cette modélisation est de reproduire le fonctionnement des différents compartiments du système en présence. Ce travail doit ainsi permettre de reproduire les débits aux différentes stations mais aussi évaluer la recharge efficace par les pluies et le flux qui recharge les différents compartiments du système, en particulier le karst. Ce travail permettra donc d'évaluer les capacités de rétention des différents compartiments (sol, aquifère, pertes karstiques).

La modélisation permet ainsi (i) de simuler les réponses du système karstique en terme de tarissement et saturation, ce qui doit permettre d'évaluer ses capacités de rétention, et (ii) de retranscrire les réactions en termes de débit des cours d'eau aux stations de Tautavel, Caramany (entrée et sortie du barrage), Estagel et Rivesaltes. Les chroniques de débit à l'entrée et à la sortie du barrage, à Tautavel, à Estagel et Rivesaltes seront utilisées pour caler les différents modèles. Ces dernières ont été présentées précédemment dans la partie 2. Présentation des données.

Le logiciel utilisé est un logiciel simulateur de système appelé VENSIM ®. Il permet de simuler des systèmes à l'aide de réservoir. Un modèle spécifique a été mis en œuvre dans le cadre de la présente étude. La modélisation est réalisée au pas de temps horaire sur la période 2005-2018. Le modèle a été calé sur cette période de 13 années. Ce travail a été initié début 2019. En l'absence de crue majeure en 2019, le travail de simulation s'est dans un premier temps arrêté à fin 2018. Cependant, suite à la crue du 22 janvier 2020 intervenue à la fin du projet, le modèle a été testé en mode validation sur la période 01 janvier 2019 au 31 janvier 2020. Les résultats pour la crue du 22 janvier 2020 seront présentés en partie 4.14. Ainsi, la modélisation est réalisée à partir de 4 modèles réservoirs représentant chacun un des sous bassin-versants (sous BV), ces derniers sont présentés dans l'Illustration 1 :

- modèle CARAMANY, représentant le fonctionnement du BV de l'Agly en sortie du barrage de Caramany, soit un BV de 409 km² ;
- modèle TAUTAVEL, représentant le fonctionnement du sous BV du Verdouble à Tautavel, soit un BV de 308 km². La station de Tautavel se situe en secteur karstique ;
- modèle ESTAGEL, représentant le fonctionnement du sous BV de l'Agly entre le barrage de Caramany et Estagel, soit un BV de 192 km². La partie aval de ce sous BV est en domaine karstique ;
- modèle RIVESALTES, représentant le fonctionnement du sous BV aval de l'Agly entre Estagel et Rivesaltes, soit un BV de 140 km². Une partie de ce sous BV appartient au karst des Corbières.

Les modèles CARAMANY et TAUTAVEL sont tous deux indépendants, ils sont situés à l'amont et sont alimentés uniquement par les données de précipitations et d'ETP survenues sur leur bassin versant respectif. Le modèle ESTAGEL est quant à lui alimenté à la fois par les données météorologiques sur le sous BV et également par les données de débit issues des 2 précédents modèles (débit sortant CARAMANY et TAUTAVEL). Enfin, le modèle RIVESALTES est alimenté par les pluies sur son sous BV et par le débit issu du modèle ESTAGEL (débit ESTAGEL). La structure schématique globale de la modélisation mise en œuvre sur le système Agly est présentée ci-après (Illustration 55). Le code couleur suivant a été utilisé : en violet les éléments constituant le modèle CARAMANY, en jaune ceux du modèle ESTAGEL, bleu ceux de TAUTAVEL et vert ceux de RIVESALTES. Dans la suite du rapport ce code couleur sera conservé notamment dans les graphiques présentant les chroniques résultantes de la modélisation. Concernant les résultats graphiques de la modélisation, la donnée sera toujours présentée en trait plein et la chronique simulée en pointillé.



Illustration 55 : Représentation schématique du modèle.

Les structures des 4 sous modèles vont ainsi être présentées, les paramètres issus de calage seront systématiquement précisés en rouge dans chacune des illustrations. Les résultats de la simulation, à savoir les débits simulés, mais aussi le comportement des systèmes karstiques avec l'évolution de leur saturation et les débits rechargeant l'aquifère karstique souterrain seront présentés.

Concernant les hydrogrammes simulés, ils seront dans un premier temps présentés sur l'ensemble de la période d'étude (2005-2018), puis en mode évènementiel sur les principales crues identifiées. Les données présentant de nombreuses incertitudes sur la période 2005-2006 (voir partie 2. Présentation des données), les résultats évènementiels de la modélisation ne seront présentés qu'à partir de l'épisode 4.

Une analyse de la qualité de la modélisation est proposée. Sur l'ensemble de la chronique, c'est le critère de Nash qui sera utilisé. La qualité de la modélisation étant liée en partie à la qualité des données, le critère de Nash sera également calculé à partir de l'année 2013 pour lesquelles les données sont jugées les plus fiables (voir partie 2. Présentation des données). Le critère de Nash est défini par :

$$C_{\text{Nash}} = 1 - \frac{\Sigma (Q_{\text{mes}} - Q_{\text{sim}})^2}{\Sigma (Q_{\text{mes}} - \overline{Q_{\text{mes}}})^2}$$

avec C_{Nash} le critère de Nash, Q_{mes} le débit mesuré, Q_{sim} le débit simulé,

 Q_{mes} la moyenne du débit mesuré sur la série.

Ainsi lorsque :

 $\begin{array}{l} C_{\text{Nash}} < 0,65 \text{ la simulation n'est pas satisfaisante ;} \\ 0,65 < C_{\text{Nash}} < 0,8 \text{ la simulation est acceptable ;} \\ 0,8 < C_{\text{Nash}} < 0,9 \text{ la simulation est de bonne qualité ;} \\ 0,9 < C_{\text{Nash}} \text{ la simulation est de très bonne qualité ;} \end{array}$

Dans la présente étude, il y a moins de 20 épisodes de crue significatifs, ils durent en moyenne 2 jours. Au final cela représente une durée cumulée inférieure à 40 j sur une chronique de près de 5 000 j, soit moins de 1 % des données. Aussi, dans la partie présentation des données, des erreurs sur les données de débit ont été mises en évidence, ce qui aura un impact négatif sur la simulation et également le calcul du critère de Nash. Pour l'ensemble de ces raisons, le calage a été réalisé visuellement afin de reproduire au mieux le débit au pic de crue, ainsi que les saturations du karst pour être en accord avec le modèle conceptuel. Le calage n'a pas été réalisé par rapport au Critère qualitatif de Nash qui est fourni ici à titre indicatif.

Le critère de Nash sera fourni sur l'intégralité de la chronique 2005-2018. Afin de réduire l'impact des longues périodes sans crue constituant l'essentiel de la chronique et donner plus de poids aux périodes de crue objet du projet, le critère de Nash a également été calculé « en mode évènementiel » sur les principaux épisodes à partir de 2013, période où les données sont de meilleur qualité. Il s'agit des épisodes 11 à 18.

4.2 MODÈLE TYPE

Les simulations des 4 sous BV sont réalisées à partir d'une structure commune appelée « **modèle type** » (voir représentation schématique Illustration 56). Les paramètres calés sont notés en rouge. Les équations associées aux différents réservoirs sont présentées en bleu.



Illustration 56 : Représentation schématique de la structure du modèle type.

Ce modèle est constitué dans sa partie amont d'un **réservoir Sol** en relation avec l'atmosphère, c'est-à-dire alimenté par les **Pluies** sur le sous BV et l'**ETP** sur le BV de l'Agly qui constitue une sortie. Ce réservoir sol comporte un seuil défini par calage, **H**_{min sol}, correspondant à la quantité d'eau qui peut être stockée dans le sol. Il s'agit de l'unique paramètre calé de ce réservoir. Le fonctionnement « pas à pas » de ce réservoir est présenté à titre d'exemple dans l'Illustration 57 ci-après pour le modèle CARAMANY, année 2005. Le paramètre calé **H**_{min sol} pour le modèle CARAMANY vaut -20 mm. Ainsi l'Évaporation va conduire à la diminution progressive des niveaux dans le réservoir Sol. C'est la Pluie qui va ensuite recharger le réservoir. Une fois le niveau 0 atteint, l'excédent de pluie va constituer l'**Infiltration.** Ainsi, lorsque le réservoir sol est à 0, la pluie entrant sur un pas de temps va alimenter le réservoir sol puis au pas de temps suivant être évacuée pour alimenter le réservoir sol permet ainsi d'écrêter une partie des précipitations



en stockant de l'eau entre $H_{min \ sol}$ et 0. Le paramètre $H_{min \ sol}$ est ainsi calé afin de reproduire correctement l'arrivée des crues.

Illustration 57 : Fonctionnement du réservoir SOL, exemple pour CARAMANY année 2005.

Le fonctionnement des réservoirs de vidange va également être présenté « pas à pas » toujours à partir de l'exemple du modèle CARAMANY pour l'année 2005 (Illustration 58). L'**Infiltration** permet d'alimenter le réservoir dit de vidange lente ou **Réservoir lent** (voir structure du modèle Illustration 56). Ce dernier se vidange selon une loi de Maillet. Ainsi, la hauteur sortant du Réservoir lent est égale à la hauteur du réservoir multipliée par un coefficient de vidange appelé **K**_{Lent}. Ce dernier, dit coefficient de vidange lente, est définit par calage. Les hauteurs d'eau sortantes (**H**_{sortant lent}) sont ensuite intégrées sur la surface du sous bassin versant. Le réservoir de vidange lente permet de reproduire l'essentiel du débit de base et assure donc une restitution lente de l'eau. Les tarissements simulés durent plusieurs mois.



Illustration 58 : Fonctionnement du Réservoir Lent, exemple pour CARAMANY année 2005.

Un seuil noté $H_{\text{Seuil réservoir lent}}$ est ajouté au Réservoir lent (voir structure modèle Illustration 56), il est défini par calage. Lorsque ce niveau est atteint, une partie de l'eau d'infiltration (1-x) est envoyée vers un second réservoir de vidange, dit **Réservoir rapide**. Ce coefficient de répartition x est également défini par calage. Les modalités de vidange du Réservoir rapide sont comparables à celle du Réservoir lent. Le coefficient de vidange K_{rapide} déduit d'un calage est fortement supérieur au K_{Lent} . Ce fonctionnement pas à pas est présenté dans l'Illustration 59 toujours pour le modèle CARAMANY, année 2005.



Illustration 59 : Alimentation du réservoir Rapide, exemple du modèle CARAMANY.

Les hauteurs sortantes du réservoir rapide ($H_{Sortant rapide}$) sont également intégrées à la surface du sous bassin versant, le débit ainsi simulé permet de reproduire l'essentiel des pics de crue et le débit fourni ne dure que quelques heures (Illustration 60). Conceptuellement le niveau seuil ajouté dans le réservoir de vidange lente permet de reproduire un fonctionnement dit de « trop plein ». En effet, lorsque le système est rechargé, il y a moins d'eau qui peut s'infiltrer et une partie des pluies part en ruissellement, alimentant alors rapidement le débit du cours d'eau. Ainsi, la valeur $H_{Seuil réservoir}$ lent représente une « capacité de rétention » du système, l'eau étant stockée et restituée de façon différée dans le temps. Une fois ce seuil atteint une partie de l'infiltration (1-x) regagne alors le réservoir rapide et alimente le cours d'eau.



Illustration 60 : Simulation des débits sortants des réservoirs Lent et Rapide du modèle AQUIFERE, exemple pour le modèle CARAMANY pour le calcul du débit entrant dans le barrage.

Ainsi le modèle de base comporte 5 paramètres calés (en rouge dans l'Illustration 56) listés cidessous :

- H_{min sol};
- H_{seuil réservoir lent ;}
- K_{Lent;}
- Krapide;
- X.

Ce premier module « modèle type » permet de calculer le débit issu des différents sous BV alimentant les différents tronçons des cours d'eau suite aux précipitations sur les sous BV. C'est ce modèle qui va être utilisé pour simuler le débit issu du sous BV de l'Agly à Caramany soit le débit entrant dans le barrage.

4.3 RÉSERVOIR KARST

Par la suite, un réservoir **Karst** est ajouté pour la simulations des 3 sous BV à composante karstique (TAUTAVEL, ESTAGEL et RIVESALTES). Ce réservoir permet d'écrêter une partie du débit lorsque le karst est sous-saturé. Cette influence du karst a notamment été mise en évidence par l'approche débit-débit présentée dans la partie 3. Ce réservoir Karst est ainsi alimenté par le débit ou le volume sortant du modèle type (**V/Q**_{simulé cours d'eau}). Deux vidanges s'opèrent au sein de ce réservoir. Une première dite « **Vidange souterraine karst** » évacue de l'eau du réservoir selon une loi de maillet à partir d'un coefficient de vidange calé « **K**_{Vidange karst} ». La structure est schématisée Illustration 61. Conceptuellement ce débit alimente le karst en souterrain et assure notamment la recharge localisée de ce dernier au niveau des zones de pertes mais aussi la recharge plus diffuse sur l'aire

Crues karstiques Agly

d'alimentation du bassin karstique. Ce flux évacué du modèle, correspond à la vidange du karst qui s'effectue essentiellement au niveau des exutoires côtiers (Fontestramar et Fontame). La seconde vidange a lieu lorsque le système karstique est rechargé, c'est-à-dire lorsque le niveau dans le réservoir karst est supérieur à une hauteur notée ici $V_{\text{Seuil karst}}$ et définit par calage. Toute l'eau entrant dans le réservoir est alors directement évacuée. Ainsi, conceptuellement, lorsque le système karstique est saturé, il ne peut plus absorber d'eau et l'ensemble du flux alimente le cours d'eau. Le karst ne possède plus de capacités de rétention, il devient « transparent ».

Le module Karst comporte ainsi 2 paramètres calés :

- VSeuil karst ;
- Kvidange karst.



Illustration 61 : Structure schématique du module KARST.

Le fonctionnement « pas à pas » de ce réservoir KARST est présenté ci-après pour le modèle TAUTAVEL (Illustration 62).



Illustration 62 : Fonctionnement du réservoir KARST, exemple pour le modèle TAUTAVEL.
Les différents modules (TYPE comprenant les réservoirs Sol, de Vidange lente et Rapide et KARST) ayant été caractérisés, les 4 modèles (CARAMANY, TAUTAVEL, ESTAGEL et RIVESALTES) vont ainsi être présentés.

4.4 MODÈLE CARAMANY

Concernant le modèle CARAMANY, le débit simulé par le modèle de base permet de calculer le débit entrant dans le barrage (il s'agit du débit issu du ruissellement sur le bassin versant amont de l'Agly). Pour rappel, la surface du BV de l'Agly à Caramany est égale à 409 km².

Ensuite, un réservoir spécifique dit « **Barrage** » est ajouté. Il permet de calculer à partir du débit issu du sous BV amont de l'Agly (Q_{Agly entrant barrage}), le débit sortant du barrage (Q_{Sortant barrage}). Un « débit de base » est également ajouté, il correspond au débit aval restitué en continu par le barrage. Cette valeur est fournie (Illustration 63) par le CD66. La structure complète du modèle CARAMANY est présentée sur l'Illustration 65.

Débit aval délivré (m ³ /s)							
01-janv	31-mars	0,45					
01-avr	15-avr	1,5					
16-avr	15-mai	1,7					
16-mai	15-juin	1,8					
16-juin	31-août	2					
01-sept	15-sept	1,6					
16-sept	30-sept	1,3					
01-oct	15-oct	1					
16-oct	31-oct	0,75					
01-nov	31-déc	0,45					

Illustration 63 : Débit aval délivré par le barrage.

Par ailleurs, les précipitations et l'évaporation sur le plan d'eau sont faibles devant les volumes entrant et sortant, ces paramètres sont ainsi négligés dans le réservoir Barrage.

Lors d'un épisode de pluie conséquent, le débit de l'Agly amont alimente le réservoir Barrage (Q/V_{Agly} entrant barrage). Le barrage est caractérisé par un volume de débordement, égal à 27,5 Mm³ (valeur fournie par le CD66). Lorsque le volume de ce réservoir atteint la valeur seuil ($V_{Seuil barrage}$), un débit/volume de crue est calculé ($Q/V_{Sortant barrage crue}$) à partir d'une loi de vidange de type loi de Maillet. Elle est appliquée, au volume excédent la valeur seuil. Cette dernière est multipliée par un coefficient de vidange K_{Barrage} défini par calage afin de reproduire au mieux le débit sortant du barrage au moment des crues. La structure de ce réservoir est présentée sur l'Illustration 64, puis la structure globale du modèle CARAMANY dans l'Illustration 65.



Illustration 64 : Structure schématique du module barrage.



Illustration 65 : Structure schématique du modèle CARAMANY incluant le module Barrage pour la simulation des débits sortants du barrage de Caramany.

Le comportement « pas à pas » du Barrage est présenté ci-après (Illustration 66).



Illustration 66 : Fonctionnement du réservoir Barrage du Modèle CARAMANY.

Le modèle CARAMANY comporte 6 paramètres calés, présentés en rouge dans l'Illustration 65 et fournis ci-après :

- $H_{min \ sol} = -20 \ mmmod mmmod ;$
- H_{seuil réservoir lent} = 130 mm ;
- $K_{Lent} = 1.10^{-3}$;
- K_{rapide}= 0,35 ;
- x = 0,5 ;
- $K_{Barrage} = 0,08.$

Les capacités de rétention du système aquifère du BV de l'Agly à Caramany peuvent ainsi être appréhendées à partir des paramètres calés du modèle, à savoir $H_{min sol} = -20$ mm et $H_{seuil réservoir lent} = 130$ mm, soit un écrêtage pouvant aller jusqu'à 150 mm lorsque les réservoirs sont au niveau le plus bas.

Les résultats graphiques de la modélisation sur les débits entrant et sortant du barrage sur la période 2005-2018 sont présentés ci-après.



Illustration 67 : Débits simulés et observés à l'entrée (haut) et à la sortie (bas) du barrage de Caramany.

Les critères de Nash ont été calculés sur l'ensemble de la chronique. Ils valent 63 % pour le débit entrant et 56 % pour le débit sortant. En mode évènementiel post 2013, ils valent respectivement 75 et 64 %.

Une évaluation de l'erreur sur la valeur au pic de crue des principaux épisodes sera également fournie lors de la présentation des résultats des épisodes dans la partie 4.11.

4.5 MODÈLE TAUTAVEL

La structure du modèle TAUTAVEL est représentée Illustration 68 et le fonctionnement « pas à pas » du réservoir Karst a été présentée Illustration 62. Le modèle « TYPE » génère un débit dit « Q_{Verdouble} ». Ce débit alimente ensuite le réservoir « Karst Verdouble ». Ce dernier se vidange en continu *et al*imente le système karstique Q_{vidange karst Verdouble souterrain}. Conceptuellement, ce débit correspond à la recharge du karst via les pertes du Verdouble et les pluies sur le bassin d'alimentation du système karstique. Ce flux est ensuite transféré vers l'aval hydraulique. Lorsque le seuil V_{Seuil karst} est franchi dans le réservoir Karst, l'excédent d'eau est intégralement évacué pour fournir le débit mesuré à la station de Tautavel (Q_{Tautavel}).



Illustration 68 : Structure schématique du modèle TAUTAVEL.

Le modèle TAUTAVEL comporte 7 paramètres calés, présentés en rouge dans l'Illustration 68 et fournis ci-après :

- $H_{min sol} = -90 mm$;
- H_{seuil réservoir lent} = 70 mm ;
- $K_{Lent} = 7.10^{-4}$;
- K_{rapide}= 0,33 ;
- x = 0,45 ;
- V_{Seuil karst} = 30 Mm³;
- K_{Vidange Karst} = 1.10⁻⁴



Les résultats de la modélisation sur les débits à Tautavel pour la période 2005-2018 sont présentés ci-après. Le critère de Nash vaut 65 %. Il vaut 79 % pour le calcul en mode évènementiel post 2013.

Illustration 69 : Débits simulés et observés à la station de Tautavel.

4.6 MODÈLE ESTAGEL

Ce modèle est comparable au modèle TAUTAVEL. Toutefois, une seconde alimentation est ajoutée dans le réservoir Karst (voir structure Illustration 70). En plus du débit du cours d'eau issu du modèle de base (débit sous BV Estagel), il y a le débit sortant du barrage de Caramany. Le réservoir « Karst Estagel » se vidange pour alimenter le système karstique en souterrain via les pertes de l'Agly et l'infiltration sur le bassin d'alimentation du karst (Q_{Vidange karst Agly Estagel souterrain}). Lorsque ce réservoir est sous saturé, les débits issus du ruissellement sur le sous BV de l'Agly et provenant du barrage permettent sa recharge. Le karst écrête alors le débit du cours d'eau de l'Agly. Ensuite, c'est seulement lorsque le réservoir karst Estagel est saturé (le volume V_{Seuil karst} est franchi) qu'il fournit un débit Q_{Sous BV Estagel}. Ce dernier est alors sommé au débit Q_{Tautavel} pour fournir le débit à Estagel Q_{Estagel}.



Illustration 70 : Structure schématique du modèle ESTAGEL.

Le modèle ESTAGEL comporte comme le modèle TAUTAVEL 7 paramètres calés, présentés en rouge dans l'Illustration 70 et fournis ci-après :

- $H_{min sol} = -90 \text{ mm}$
- H_{seuil réservoir lent} = 25 mm
- $K_{Lent} = 1.10^{-3}$
- K_{rapide}= 0,33
- x = 0,5
- V_{Seuil karst} = 20 Mm³
- K_{Vidange Karst} = 3.10⁻⁴

Les résultats de la modélisation sur les débits à Estagel pour la période 2005-2018 sont présentés ci-après Illustration 71. Le critère de Nash vaut 71 % à la fois sur la durée totale de la chronique et en mode évènementiel post 2013.

Crues karstiques Agly





Par ailleurs la modélisation permet d'appréhender la saturation du réservoir karst. Le remplissage de ce dernier est comparé au niveau piézométrique mesuré à Estagel (voir Illustration 72). Globalement les périodes de saturation et de recharge simulées sont bien concomitantes à ce qui est observé sur le piézomètre Estagel. On note toutefois, que le modèle n'arrive pas à représenter correctement le début des phases de tarissement, le volume du karst baisse en effet après les diminutions piézométriques.



Illustration 72 : Piézométrie mesurée à Estagel et niveau simulé dans le réservoir Karst Estagel.

4.7 MODÈLE RIVESALTES

Ce modèle est comparable au modèle TAUTAVEL. Le débit issu du réservoir Karst Rivesaltes correspond au débit issu du sous BV de l'Agly entre Estagel et Rivesaltes. Ce dernier est sommé au débit Estagel issu du Modèle ESTAGEL pour fournir le débit de l'Agly à Rivesaltes (Q_{Rivesaltes}). La structure de ce modèle est synthétisée (Illustration 73).



Illustration 73 : Structure schématique du modèle RIVESALTES.

Le modèle RIVESALTES comporte comme également 7 paramètres calés, présentés en rouge dans l'Illustration 73 et fournis ci-après :

- $H_{min \ sol} = \ 40 \ mm$;
- H_{seuil réservoir lent} = 50 mm ;
- $K_{Lent} = 1.10^{-3}$;
- K_{rapide}= 0,1 ;
- x = 0,5 ;
- V_{Seuil karst} = 10 Mm³;
- K_{Vidange Karst} = 2.10⁻⁴.

Les résultats de la modélisation sur les débits à Rivesaltes sur la période 2005-2018 sont présentés ci-après. Le critère de Nash vaut 63 % sur cette période et 85 % en mode évènementiel post 2013.



Illustration 74 : Débits simulés et observés à la station de Rivesaltes.

4.8 QUALITÉ DES SIMULATIONS

La qualité des différents modèles a été évaluée sur les résultats des débits simulés. Sur l'ensemble de la période 2005-2018 le critère de Nash vaut :

- 63 et 56 % pour les débits entrants et sortants du barrage ;
- 65 % pour les débits de Tautavel ;
- 67 % pour les débits d'Estagel ;
- 63 % pour les débits de Rivesaltes.

Ces résultats révèlent une qualité moyenne des simulations sur la chronique d'une durée de 13 années, qui rappelons-le est essentiellement constituée de longues périodes d'étiage.

Les raisons sont aussi liées au fait que le modèle a été calé sur une longue période et qu'il y a eu une évolution continue de l'algorithme de calcul des pluies spatialisées sur les différents sous BV engendrant variation dans le calcul de cette dernière au cours du temps. Aussi, les débits mesurés sont de mauvaise qualité en début de chronique (notamment à Tautavel et Rivesaltes). Pour Estagel les forts débits sont également sous-estimés après 2013 suite à l'extraction de sédiments dans le cours d'eau qui modifie la courbe de tarrage. La chronique à Rivesaltes débute en 2010 (seule les 2 épisodes de crue n° 2 et 3 ont été reconstitués sur la période ancienne

Le critère de Nash calculé en mode évènementiel post 2013 (épisodes 11 à 18) est nettement supérieur attestant d'une bonne simulation des hydrogrammes de crue :

- 75 et 64 % pour les débits entrants et sortants du barrage ;
- 79 % pour les débits de Tautavel ;
- 71 % pour les débits d'Estagel ;
- 85 % pour les débits de Rivesaltes.

4.9 ÉVALUATION DE L'INCERTITUDE SUR LES DONNÉES

L'incertitude sur les données est difficile à caractériser. Concernant les débits, le SMBVA a réalisé des campagnes de jaugeages selon différents états de végétalisation du cours d'eau au niveau de la station de Rivesaltes. Ainsi, pour une même hauteur d'eau, il y aurait ainsi une différence de 15 % sur le débit selon l'état du couvert végétal. Cet ordre de grandeur d'une dizaine de pourcents est ainsi proposé pour l'évaluation de la gamme d'incertitude sur les débits mesurés.

Aussi, la donnée Radar utilisée pour la modélisation présente également des incertitudes. D'après Météo-France il semblerait que les fortes pluies sont sous-estimées de 10 à 20 % sur le bassin de l'Agly (communication personnelle de Mr Olivier Laurantin de Météo-France). À nouveau, il est proposé d'estimer la gamme d'incertitude d'une dizaine de pourcents cette fois-ci sur les données de pluie.

4.10 INFORMATIONS DÉDUITES DE LA MODÉLISATION EN LIEN AVEC LE MODÈLE CONCEPTUEL DE FONCTIONNEMENT

Le modèle permet ainsi de réaliser des bilans hydrologiques annuels à l'échelle des sous BV ou à l'échelle globale du BV de l'Agly à Rivesaltes. Les paramètres hydroclimatiques moyens sur les 14 années étudiées sont présentés en mm/an dans l'Illustration 75.

Sous BV	Caramany	Tautavel	Estagel	Rivesaltes	BV global Rivesaltes
Pluie	755	680	610	590	685
ETR (évapotranspiration réelle)	410	450	430	350	420
Ruissellement	345	230	180	240	265

Illustration 75 : Bilan hydrologique annuel en mm/an.

Le bilan global des écoulements à l'échelle du BV en prenant en compte les pertes vers le karst a également été calculé (Illustration 76).

	BV de l'Agly à Rivesaltes
Ruissellement total	275
Infiltration vers le karst (pertes)	85
Ruissellement à Rivesaltes	190

Illustration 76 : Bilan hydrologique en Mm³/an.

La contribution des pluies au débit du cours d'eau est égal à 275 Mm³/an (correspondant au ruissellement de 265 mm sur le BV de 1 040 km², voir Illustration 75), un volume de 85 Mm³/an regagne le karst et ne contribue plus au débit de surface (ce qui représente 31 % du débit du cours d'eau), il résulte alors un volume de 190 Mm³/an évacué par le cours d'eau l'Agly au niveau de la station de Rivesaltes.

4.10.1 Rappel des principaux résultats issus du modèle conceptuel de fonctionnement

Le karst des Corbières est alimenté par les pluies sur le bassin d'alimentation et par l'infiltration directe au niveau des zones de pertes. Le débit moyen d'infiltration des pluies sur le bassin karstique est égal à 1 000 l/s soit une recharge de 30 Mm³/an. L'infiltration au niveau des zones de pertes représente 1 500 l/s soit une recharge de 45 Mm³/an. À l'échelle globale l'infiltration est ainsi en moyenne de 2 500 l/s soit un volume de 75 Mm³/an.

Par ailleurs, la ressource de cette nappe est très importante, le système évacue près de 100 Mm³/an et le volume des réserves souterraines a été évalué à 70 Mm³ pour l'ensemble de la nappe (Dörfliger *et al.*, 2006).



Illustration 77 : Représentation schématique du modèle conceptuel de fonctionnement du karst des Corbières (Rapport BRGM RP-54708-FR, Dörfliger et al, 2006).

4.10.2 Évaluation du débit circulant dans le karst des Corbières à partir de la modélisation

Les modèles ont été calés afin de reproduire les débits sur les différents tronçons des cours d'eau. Pour se faire la réponse du karst a également été simulée, afin de reproduire les phénomènes de rétention du karst. Ainsi, le réservoir karst se recharge à partir du débit du cours d'eau. Il faut d'abord recharger le karst avant de produire un débit. Une fois ce dernier rechargé, il devient transparent et le débit simulé est conservé. Ce réservoir karst se vidange en continu. Le flux représente conceptuellement le transfert souterrain et est assimilé au tarissement naturel de l'aquifère karstique. Pour le réservoir Karst Verdouble le débit simulé alimentant le karst est compris entre 0,4 et 0,8 m³/s, à Estagel, il varie entre 1 et 1,8 m³/s et fluctue entre 0,1 et 0,6 m³/s à Rivesaltes (Illustration 78). Le débit moyen est égal à 0,74 m³/s à Tautavel, 1,58 m³/s à Estagel et 0,43 m³/s à Rivesaltes. Ainsi, le débit souterrain total simulé pour ces 3 sous-systèmes karstiques est égal à 2,75 m³/s.

Le modèle conceptuel de fonctionnement issu de l'étude Corbières fournit un débit de 2,5 m³/s pour la recharge du système karstique. Ces valeurs proches montrent que le modèle développé dans le cadre de la présente étude reproduit bien les phénomènes de recharge à l'échelle du karst des Corbières et est ainsi en accord avec le modèle conceptuel de fonctionnement.



4.10.3 Évaluation du volume des réserves de l'aquifère karstique des Corbières

Les paramètres calés « V_{seuil karst} » des 3 modèles présentant une composante karstique, permettent d'évaluer le volume des réserves du karst. Les valeurs sont :

- Verdouble = 30 Mm^3 ;
- Estagel = 20 Mm³;
- Rivesaltes = 10 Mm^3 .

Le volume total des réserves équivaut ainsi à 60 Mm³, cette valeur est comparable à celle définie dans le modèle conceptuel (70 Mm³), montrant à nouveau que la modélisation réalisée est en accord avec le modèle conceptuel de fonctionnement du karst des Corbières.

4.10.4 Évaluation des capacités de rétention du karst

Dans le modèle TAUTAVEL, le volume du compartiment karst évolue entre 15 et 30 Mm³, soit une capacité de stockage de 15 Mm³ (Illustration 79). Rapporté à la surface de 308 km², la hauteur écrêtée correspond à 49 mm.

Dans le modèle ESTAGEL, le volume du compartiment karst évolue entre 11 et 20 Mm³, soit une capacité de stockage de 9 Mm³ (Illustration 79). Rapporté à la surface de 192 km², la hauteur écrêtée correspond à 47 mm.

Dans le modèle RIVESALTES, le volume du compartiment karst évolue entre 2 et 10 Mm³, soit une capacité de stockage de 8 Mm³ (Illustration 79). Rapporté à la surface de 140 km², la hauteur écrêtée correspond à 57 mm.

Les capacités de rétention maximale des karsts sur la période simulée (2005-2018) sont ainsi proches sur ces trois sous bassins versants, de l'ordre de 50 mm.



4.10.5 Capacités de rétention globale pour les différents sous bassins versants

Les capacités maximales de rétention peuvent ainsi être déduites des paramètres calés du modèle et de la capacité de rétention des karsts précédemment définie. Les différents paramètres sont ainsi rappelés ci-après pour chacun des sous BV. À l'issue de cette présentation une analyse des capacités de rétention sera conduite.

a) Sous BV de Caramany

Les capacités de rétention à Caramany sont :

- sol : 20 mm ;
- réservoir vidange lente : 130 mm ;

Soit un total de 150 mm.

b) Sous BV de Tautavel

Les capacités de rétention à Tautavel sont :

- sol : 90 mm ;
- réservoir vidange lente : 70 mm ;
- karst : 49 mm ;

Soit un total de 209 mm.

c) Sous BV de Estagel

Les capacités de rétention à Estagel sont :

- sol : 90 mm ;
- réservoir vidange lente : 25 mm ;
- karst : 47 mm ;

Soit un total de 162 mm.

d) Sous BV de Rivesaltes

Les capacités de rétention à Rivesaltes sont :

- sol : 40 mm ;
- réservoir vidange lente : 50 mm ;
- karst : 57 mm ;

Soit un total de 147 mm.

e) Analyse des capacités de rétention

Les capacités de rétention sont proches, comprises entre 150 et 210 mm sur les différents sous BV. Les capacités maximales ont été trouvées à Tautavel (environ 210 mm).

4.11 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS EN MODE ÉVÉNEMENTIEL

Les résultats de la modélisation ne seront pas présentés sur les épisodes 1 à 3, les données présentant de nombreuses incertitudes (voir partie 2. Analyse des données). Afin, de ne pas surcharger le rapport ; seuls les résultats graphiques des 3 principaux épisodes sont présentés (11, 13 et 18), il s'agit des crues de mars 2013, novembre 2014 et octobre 2018. Pour les autres épisodes les résultats et leur analyse sont présentés en annexe 1. Sur les graphiques les courbes en trait plein présentent les données et les courbes en pointillé les hydrogrammes simulés.

Aussi, Météo-France a précisé que les données de pluie lors des épisodes conséquents présentaient une incertitude de 10 à 20 %. Les modèles tels qu'ils sont développés présentent une non linéarité liée à l'effet de rétention des différents horizons du modèle. Par contre, une fois les horizons saturés (sol, réservoir de vidange lente et karst), les systèmes sont linéaires. Dans ce cas + /- 10% de pluie se traduisent par une variation du débit comparable (+ /- 10%).

Ainsi, les hydrogrammes simulés avec + /- 10 % de précipitation sont présentés sur les graphiques résultats, ce qui permet d'appréhender la courbe enveloppe liée à l'incertitude.

Une analyse critique qualitative des résultats est réalisée.

4.11.1 Crue n° 11 : 06/03/2013 (Illustration 82)

L'épisode débute en condition de karst rechargé (Illustration 80). La saturation initiale du réservoir karst est bien reproduite par le modèle.



Illustration 80 : Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée.

À Tautavel, le débit est correctement simulé. Le pic de crue simulé est à 430 m³/s et l'observé à 450 m³/s.

Le débit simulé entrant à Caramany est sous-estimé (260 au lieu de 320 m³/s). Il est également sous-estimé en sortie du barrage (160 au lieu de 240 m³/s). Signalons que pour cet épisode le débit sortant réel a été diminué au moment du pic de crue suite à la fermeture des vannes du barrage visant à réduire les débits à l'aval (Illustration 81).



Illustration 81 : Résultats de la modélisation à Caramany (entrée sortie du barrage).

Le débit simulé à Estagel présente le bon ordre de grandeur avec un pic simulé à 810 m³/s et 910 m³/s pour l'observé.

À Rivesaltes, la simulation est également satisfaisante avec un débit simulé de 910 m³/s et un débit mesuré à 980 m³/s.



Illustration 82 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 11.

4.11.2 Crue n° 13 : 30/11/2014 (Illustration 85)

En début d'épisode le système karstique est sous-saturé. Les précipitations rechargent les réservoirs sols puis karst. A Estagel, la saturation du réservoir karst (20 Mm³) est concomitante avec la remontée des niveaux piézométrique et le passage à 59 m des niveaux du piézomètre Estagel (Illustration 83). À Tautavel la saturation est un peu plus tardive.



Illustration 83 : Volume dans le réservoir karst à Tautavel et Estagel et piézométrie mesurée (Estagel).

La simulation du débit de cette forte crue est correcte à Tautavel, avec un pic simulé à 560 m³/s au lieu de 580 m³/s avec toutefois un décalage au pic de crue de 4 h.

À Caramany les hydrogrammes simulés entrant et sortant sont également proches (Illustration 84). L'hydrogramme simulé entrant caractérisé par 2 pics de crue est dans l'ensemble bien représenté en terme de dynamique. Par contre l'intensité est moins bien représentée, avec un 1^{er} pic sousévalué et un second surévalué. La dynamique de l'hydrogramme sortant avec un seul pic amorti à 280 m³/s au lieu de 250 m³/s est correctement reproduit.



Illustration 84 : Résultats de la modélisation à Caramany (entrée sortie du barrage).

Le débit maximum simulé à Estagel atteint 980 m³/s, le débit reconstitué à Estagel pour cette crue est évalué à 900 m³/s, ce qui est cohérent.

Enfin, l'hydrogramme simulé à Rivesaltes est correct avec un débit au pic de crue simulé égal à $1 \ 120 \ m^3$ /s au lieu de 970 m^3 /s.



Illustration 85 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 13.

4.11.3 Crue n° 18 : 15/10/2018 (Illustration 88)

Les conditions initiales, à savoir un karst saturé ou proche de la saturation, sont bien reproduites dans le modèle (voir le comportement des réservoirs karst des modèles Tautavel et Estagel Illustration 86).



Illustration 86 : Volume dans le réservoir karst à Estagel et Tautavel et piézométrie mesurée.

Le débit simulé à Tautavel (340 m³/s) est inférieur au débit mesuré (480 m³/s). En effet, le réservoir karst du modèle TAUTAVEL est initialement légèrement sous-saturé, les pluies en début d'épisode permettent d'abord sa saturation avant de fournir du débit.

À Caramany, la simulation sous-estime le débit entrant (Illustration 87) avec un débit entrant au pic de crue de 200 m³/s au lieu de 340 m³/s. En sortie, le débit simulé est proche à environ 50 m³/s au pic de crue.



Illustration 87 : Résultats de la modélisation à Caramany (entrée sortie du barrage).

Le débit à Estagel simulé au pic de crue (540 m³/s) est proche du débit reconstitué au pic de crue (voir partie 2. Présentation des données). Le débit à Rivesaltes est bien représenté avec un débit maximum de 600 m³/s au lieu de 610 m³/s pour le mesuré.



Illustration 88 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 18.

En prenant en compte les courbes enveloppes (+/- 10 %) et l'incertitude sur la mesure du débit, on vérifie que les débits au pic de crue sont bien représentés pour ces 3 épisodes majeurs aux 4 stations.

4.12 AIDE A LA VIGILANCE DES TRONÇONS DU SPC

Lors de la prévision des crues, le SPC propose d'utiliser un code couleur associé à la vigilance qui dépend de la valeur de débit au pic de crue. Ces codes couleurs sont définis à Tautavel et Rivesaltes selon les valeurs de débit (Illustration 89) et constituent ainsi la grille de vigilance.

Couleur	Débit Tautavel (m³/s)	Débit Rivesaltes (m³/s)
	0-210	0-280
	210-500	280-575
	400-750	575-800
	>750	>800

Illustration 89 : Gammes de débits associées à la vigilance.

Pour les crues 4 à 18, les débits au pic de crue simulés et observés sont fournis dans le tableau ciaprès (Illustration 90). Les 3 premières crues ne sont pas présentées, la données d'entrée étant jugée de mauvaise qualité.

n° crue	Date	Q TAU	TAVEL	Q entrant 0	CARAMANY	Q sortant C	ARAMANY	Q EST	AGEL	Q RIVE	SALTES
Q en	m³/s	Observé	Simulé	Observé	Simulé	Observé	Simulé	Observé	Simulé	Observé	Simulé
4	27/12/2008	35	0	40	12	1	1	0	86		86
5	12/04/2009	48	0	28	8	5	7	54	9		11
6	04/05/2010	43	0	73	10	2	9	44	6		20
7	11/10/2010	269	280	273	329	149	150	467	431	550	516
8	15/03/2011	227	280	475	274	263	100	347	381	400	429
9	28/10/2011	66	0	1	0	1	1	79	0	107	63
10	21/11/2011	198	330	23	14	22 (moy j)	14	319	487	419	613
11	06/03/2013	450	430	325	259	242	163	914	823	969	907
12	18/11/2013	108	0	180	172	66	82	164	105	258	133
13	30/11/2014	582	550	486	570	252	279	900	969	969	1125
14	22/03/2015	50	50	155	14	56	14	103	138	105	138
15	14/02/2017	196	210	10	9	1	8	167	215	302	264
16	25/03/2017	57	100	171	13	29	12	82	185	115	187
17	11/04/2018	72	180		53	68	26	104	270	200	270
18	15/10/2018	473	340	344	100	47	58	550	486	609	600

Illustration 90 : Comparaison des débits observés et simulés au pic de crue.

Dans les tableaux, les valeurs en rouge correspondent au débit au pic de crue reconstitué, et en bleu les 2 épisodes pour lesquels une erreur sur la donnée de pluie est suspectée (voir partie 2. Présentation des données).

Les valeurs sont ainsi représentées dans la grille de vigilance du SPC (Illustration 91).

n° crue	Date	Couleur T	AUTAVEL	Couleur R	VESALTES
Q en m ³ /s		Observé	Simulé	Observé	Simulé
4	27/12/2008			absence donnée	
5	12/04/2009			absence donnée	
6	04/05/2010			absence donnée	
7	11/10/2010				
8	15/03/2011				
9	28/10/2011				
10	21/11/2011				
11	06/03/2013				
12	18/11/2013				
13	30/11/2014				
14	23/03/2015				
15	14/02/2017				
16	25/03/2017				
17	11/04/2018				
18	15/10/2018				

Illustration 91 : Présentation des résultats de la modélisation dans la grille de vigilance du SPC.

Pour l'épisode 10, pour lequel une erreur sur la donnée de pluie sur le sous BV de Tautavel est pressentie (surestimation, voir partie 2. Présentation des données), les résultats de la modélisation sont différents avec une vigilance jaune au lieu de verte à Tautavel et orange au lieu de jaune Rivesaltes.

Pour les épisode 15 et 17, il y a également une différence à Rivesaltes. Pour l'épisode 15 le seuil pour passer la vigilance jaune est 280 m³/s, le modèle présente un pic à 264 m³/s, le débit mesuré était égal à 302 m³/s. Toutefois, cet épisode est dans la gamme d'incertitude du modèle lié à la pluie (+/- 10 %). Pour l'épisode 17 ce même seuil a été dépassé avec une valeur de 270 m³/s alors que l'observé était égal à 200 m³/s. La différence reste toutefois limitée, rappelons que l'intérêt du modèle est de bien reproduire les crues significatives, le modèle présente certaines limites pour les petites crues.

Dans l'ensemble, les codes couleurs simulés sont proches de ceux du SPC, en particulier pour les fortes crues (orange et rouge) : ce résultat permet de valider la qualité du modèle développé pour l'aide à la vigilance.

Enfin, pour les épisodes ayant présenté un niveau de vigilance (jaune, orange ou rouge), l'erreur sur la valeur de débit au pic de crue a été calculée. Cette dernière est plutôt faible à Tautavel, Estagel et Rivesaltes. Elle est plus importante à Caramany. Les débits y sont en effet plus faibles, les différences de débit du même ordre de grandeur que sur les autres BV engendrent un pourcentage d'erreur beaucoup plus grand. Globalement les résultats sont meilleurs à Rivesaltes.

n° crue	Date	TAUTAVEL	Entrée CARAMANY	Sortie CARAMANY	ESTAGEL	RIVESALTES
7	11/10/2010	4	21	1	8	6
8	15/03/2011	23	43	62	10	7
10	21/11/2011	66	39	37	52	46
11	06/03/2013	4	20	33	10	6
13	30/11/2014	5	17	11	7	16
15	14/02/2017	7	70	>100	29	13
18	15/10/2018	28	71	23%	12	1

Illustration 92 : Pourcentage d'erreur au pic de crue pour les crues ayant présenté une vigilance.

Enfin, l'incertitude sur les données d'entrée a été évaluée à +/- 10 % sur les pluies. Aussi, une fois les différents réservoirs saturés (SOL, RESERVOIR VIDANGE LENTE et KARST), le modèle présente un comportement relativement linéaire. L'essentiel du débit est alors fourni par le RESERVOIR VIDANGE RAPIDE. Une variation de 10 à 20 % sur la donnée de pluie (gamme incertitude fournie par Météo-France) en entrée conduit à une fluctuation du débit au pic de crue du même ordre de grandeur (dès lors que les capacités de rétention seront neutralisées). Enfin, l'incertitude sur les débits également évaluée à 10 % permet de montrer que pour les 3 stations Tautavel, Estagel et Rivesaltes et à l'exception de la crue n° 10, les débits simulés sont dans l'ensemble dans la fourchette d'erreur (erreur maximale de 29 %).

4.13 MISE EN PLACE D'UN OUTIL POUR LA VIGILANCE

Le modèle développé se révèle adapté à la simulation des débits aux différentes stations de mesures sur le cours d'eau de l'Agly. Il a ainsi été validé par les membres du CoPil lors de la réunion intermédiaire d'octobre 2019 Ce modèle pourra être intégré dans les outils de modélisation utilisés pour la prévision par le SCHAPI. Toutefois, le SMBVA souhaite disposer d'un outil permettant d'évaluer la réponse du cours d'eau dès lors qu'un épisode de pluie conséquent est annoncé par Météo-France. Pour ce faire, il est proposé d'utiliser le modèle pour définir :

- les capacités initiales de rétention du système avant l'épisode de pluie annoncé ;
- la réponse en terme de débit de chacun des sous-systèmes lorsque le système ne peut plus écrêter les pluies.

4.13.1 Évaluation des capacités de rétention

L'objectif est de proposer un outil qui permet d'appréhender l'état des réserves ou la capacité de rétention de chacun des sous-systèmes à partir d'un paramètre météorologique suivi en temps réel et disponible quotidiennement.

Pour rappel, les capacités de rétention des systèmes (arrondies) déduites des modèles sont les suivantes :

- Caramany : 150 mm ;
- Tautavel : 160 mm + 50 mm karst, soit 210 mm au total ;
- Estagel : 115 mm + 45 mm karst, soit 160 mm au total ;
- Rivesaltes : 90 mm + 60 mm karst, soit 150 mm au total.

Afin d'évaluer l'état hydrique initial des systèmes, le SPC utilise actuellement le paramètre HU. Il reçoit quotidiennement ce paramètre calculé par Météo-France, qui correspond à l'état hydrique du système. La valeur initiale de HU pour les principaux épisodes de crue est ainsi comparée aux capacités de rétention du système afin d'établir un lien éventuel entre ces 2 paramètres et donc évaluer les capacités de rétention avant une crue, directement à partir du paramètre HU.

Un graphique HU en fonction des capacités de rétention est ainsi proposé sur les 4 sous BV (Illustration 93). Une correction qualitative est fournie sur l'illustration lorsque le modèle sur ou sousestime les capacités de rétention. Ainsi, lorsque le débit simulé d'une crue est sous-estimé, on considère que le modèle surestime les capacités de rétention. Dans ce cas, le point correspondant à la crue, est déplacé dans le graphique via une flèche rouge, ce qui correspond à une diminution des capacités de rétention. L'inverse est réalisé dans le cas d'une sous-estimation des capacités de rétention (flèche rouge vers la droite). L'information « sur ou sous-estimation des capacités de rétention » est déduite des hydrogrammes simulés pour chacun des épisodes, ils sont présentés dans la partie analyse des résultats.



Illustration 93 : Relation en HU et les capacités de rétention déduites des résultats de la simulation.

Aussi, une courbe de tendance linéaire a été ajoutée. Il existe une dispersion significative des points représentant chacun des épisodes de crue. Toutefois une relation entre les 2 variables, matérialisée par la courbe de tendance, se dégage sur chacun des sous BV. Il est ainsi possible d'évaluer l'ordre de grandeur des capacités de rétention à partir des valeurs de HU (Illustration 94).

CARAMANY TA		TAUT	AVEL	ESTAGEL		RIVESALTES	
Valeur HU	rétention	Valeur HU	rétention	Valeur HU	rétention	Valeur HU	rétention
>65	20	>75	0	>70	0	60 - 70	0 - 60
60 - 65	0 - 60	70 - 75	0 - 40	65 - 70	0 - 30	50 - 60	60 - 120
55 - 60	60 - 90	65 - 70	40 - 80	60 - 65	30 - 60		
50 - 55	90 - 120	60 - 65	80 - 120	55 - 60	60 - 80		
40 - 50	120 - 150	55 - 60	120 - 160	40 - 55	80 - 110		
		<55	>160				

Illustration 94 : Capacités de rétention en fonction de la valeur initiale de HU.

4.13.2 Caractérisation des relations pluie-débit

Le modèle étant validé, il a été utilisé en mode prévisionnel, une fois l'ensemble des capacités de rétention neutralisées (sol, réservoirs vidange lente et karst). Différents scénarii de précipitation appelées « pluies projet » sont alors testés. L'objectif est ainsi de simuler le débit au pic de crue aux différentes stations pour des précipitations d'intensité fixée.

La modélisation réalisée étant constituée de modèles emboités et les débits étant calculés pour l'ensemble des 4 sous modèles (CARAMANY, TAUTAVEL, ESTAGEL et RIVESALTES) en condition de système rechargé, on considère que tous les modèles sont saturés en même temps, ce qui ne sera pas systématiquement le cas. Cette approximation est toutefois nécessaire afin de réaliser l'outil. Cette différence de l'état de saturation entre les différents sous-systèmes apportera donc un biais dans l'outil.

À l'échelle de la chronique 2005-2018 le cumul maximal lors d'un épisode a été d'environ 150 mm. Ainsi, des cumuls supérieurs, c'est à dire allant jusqu'à 200 mm seront simulés pour réaliser l'outil, bien que cette situation n'ait pas été rencontrée. Par ailleurs, les intensités fortes supérieures à 15 mm/h ont rarement été observées, et n'ont duré qu'entre une et deux heures.

Pour ces valeurs extrêmes (200 mm et intensité supérieure à 15 mm/h) il n'y a pas eu de mesure. Le modèle n'a donc pas été calé sur cette gamme de valeurs, les résultats sont donc fournis à titre informatif et nécessiteront d'être mis à jour dès lors qu'une crue comprenant ces valeurs sera observée.

Les cumuls de pluie suivant ont été testés : 25 mm, 50 mm, 75 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm. Les intensités de pluie suivantes ont été prises en considération : 5 mm/h, 10 mm/h, 15 mm/h, 20 mm/h. Pour chaque couple « cumul – intensité » la valeur de débit simulé par le modèle au pic de crue est relevée.

Un abaque est ainsi constitué sur chacune des 5 stations du modèle (CARAMANY entrant, CARAMANY sortant, TAUTAVEL, ESTAGEL, RIVESALTES) en réalisant une courbe « débit maximal en fonction du cumul de pluie » pour chacune des quatre intensités. Les incertitudes sur les courbes d'intensité représentant +/- 10 % du débit ont été ajoutées. Ce dernier comporte ainsi 4 courbes. Les abaques à TAUTAVEL et RIVESALTES sont fournis (Illustrations 95 et 96). Les abaques aux autres stations sont fournis à titre indicatif en Annexe 3.

Ces outils pourront-être utilisés en temps réél par le SPC Med-Ouest. La vigilance étant réalisée aux stations de Tautavel et Rivesaltes, il a été ajouté sur ces 2 abaques, les niveaux seuils de vigilance (jaune, orange, rouge) (Illustrations 95 et 96).



Illustration 95 : Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit à Tautavel.



Illustration 96 : Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit à Rivesaltes.

Aussi, les 3 crues principales récentes (mars 2013, novembre 2014 et octobre 2018) ont été repositionnées dans les abaques de Tautavel et Rivesaltes, afin de les tester. L'objectif est de réaliser une comparaison sur ces 3 épisodes majeurs des résultats fournis avec le modèle et les l'abaque dans la grille de vigilance du SPC (Illustration 91).

		vigilance observée	vigilance calc	ulée Tautavel	vigilance observée	vigilance calcu	ulée Rivesaltes
N° épisode	date	Tautavel	modèle	abaque	Rivesaltes	modèle	abaque
11	06/03/2013						
13	30/11/2014						
18	15/10/2018			-			

Illustration 97 : Comparaison des niveaux de vigilance obtenus pour 3 épisodes principaux récents en utilisant le modèle et l'abaque.

Le modèle fournit une meilleure reconstitution du débit au pic de crue, les niveaux de vigilance simulés pour ces 3 épisodes sont conformes à l'observé. Par contre, l'abaque utilisé en REX présente 2 erreurs de niveau de vigilance (Tautavel, crue n° 13 et Rivesaltes crue n° 11). Le modèle fournit donc un meilleur résultat. Ceci est lié en partie à une meilleure prise en compte de l'état initial du système par le modèle en continu mais aussi du fait de l'utilisation de la chronique de pluie réelle. En effet, l'abaque est basé sur des courbes moyennes de pluie pour différentes intensités fixées. L'abaque fournit ainsi une estimation du débit au pic de crue (généralement en accord avec la couleur de vigilance établie par la grille du SPC), mais la valeur déduite reste meilleure avec le modèle.

L'abaque a ainsi été fourni au SPC, ainsi que la structure du modèle réservoir (présentée dans ce rapport). Nous recommandons vivement pour une meilleure qualité de prévision, l'intégration du modèle à la plateforme de simulation du SPC. L'utilisation du modèle en temps réel permettra également une meilleure évaluation des capacités initiales de rétention.

4.14 ANALYSE DE L'ÉPISODE MAJEUR DU 22/01/2020

L'ensemble du travail de modélisation a été réalisé en 2019 à partir des chroniques 2005-2018. Il a été présenté et validé lors de la réunion du comité de pilotage en octobre 2019. Un outil de type abaque Pluie (cumul – intensité) / Débit basé sur l'utilisation du modèle en mode prévisionnel (voir partie 5) était en cours d'élaboration au début du mois de janvier 2020. Cet abaque a ainsi été testé en temps réel lors de la tempête Gloria survenue du 20 au 23 janvier 2020.

Dans un premier temps les données de débits mesurés à l'issue de cet épisode sont analysées. Cet épisode avec des débits proches de 1 000 m³/s à Rivesaltes constitue un épisode majeur de la chronique.

Ensuite, l'intervention du BRGM lors de la crise est présentée. L'analyse temps réel a en effet été conduite à partir des prévisions météorologiques fournies par Météo-France et l'utilisation de l'abaque qui était en cours de développement.

Enfin, un retour d'expérience basé sur l'utilisation des abaques à partir des données des lames d'eau de pluies mesurées est réalisé. Les résultats de la simulation de la crue à l'aide du modèle en mode validation (période janvier 2019-janvier 2020) seront également présentés.

4.14.1 Hydrogrammes

Les données de débit pour cette crue ont été fournies par le SPC. Les hydrogrammes sont présentés dans l'Illustration 98.

Les débits sont très forts à l'entrée du barrage de Caramany (900 m³/s enregistrés à 16h). Les précipitations ont en effet été soutenues avec un cumul de près de 180 mm en 24 h sur ce sous-BV amont. Le barrage atténue et retarde la propagation de la crue. Le maximum de débit sortant atteint 600 m³/s à 20 h.

À Tautavel, les débits sont relativement faibles, inférieurs à 300 m³/s pour le pic qui a lieu à 14 h. La crue est de courte durée, à 17 h elle est terminée et le débit devient inférieur à 100 m³/s. Les précipitations ont été plus faibles sur ce sous-BV avec moins de 90 mm sur la journée.

La station d'Estagel reçoit les débits issus de Caramany et de Tautavel. Le pic de crue à 620 m³/s est atteint entre 18 et 19 h. La courbe de tarrage n'a toujours pas été reprise, aussi nous avons vu dans la partie 2 que le débit à Estagel était sous-estimé depuis 2014 pour les fortes crues. Le pic mesuré à 620 m³/s est vraisemblablement sous-estimé. En effet, ce débit correspond au pic de crue de Tautavel (300 m³/s) auquel s'ajoute le débit de Caramany sortant (300 à 400 m³/s) et la contribution du sous BV d'Estagel. Les pluies sur le sous BV d'Estagel ont en effet été conséquentes le 22 janvier de 0 h à 15 h avec 105 mm de pluie. Après 15 h les pluies sont plus faibles avec moins de 15 mm pour le reste de la journée. Le pic de crue à Estagel devrait très probablement suivre l'hydrogramme de Caramany sortant, avec un débit majoré de la contribution du sous BV d'Estagel (probablement de + 10 à 20 %). Ainsi, le débit maximum était probablement proche de 750 m³/s.

Aussi, sur le sous BV de Rivesaltes la pluie a été limitée avec seulement 35 mm avant 10 h le matin suivi d'une interruption des précipitations. Dans ces conditions, le débit en fin d'après-midi correspond au transfert de débit de l'amont vers l'aval et une très faible contribution du sous BV de Rivesaltes. Sur cette période la contribution du sous BV devait être limitée. Dans ces conditions, il semble que le pic de crue mesuré à 970 m³/s et des débits forts supérieurs à 900 m³/s étalés sur 10 h (17 h le 21/01 à 02 h le 22/01), soient surestimés. Cette dynamique n'est, en effet, pas en accord avec les mesures à Caramany sortant (débit sortant maximum égal à 600 m³/s sur une courte durée), Estagel et la propagation de ces hydrogrammes vers l'aval.



Le SPC confirme que la mesure de niveau d'eau à Rivesaltes est correcte. En effet, il y a deux appareils de mesure sur le site, ils ont tous les deux enregistré les mêmes niveaux d'eau. Il semble ainsi que les niveaux hauts ont été maintenus « artificiellement », peut-être du fait d'un embâcle dans le cours d'eau à l'aval de la station de mesure ou l'avancée d'un banc de sable à proximité de la station de mesure. D'après le SPC, cette éventualité est fort probable. Une reconstitution de l'allure générale de l'hydrogramme à Rivesaltes, avec des débits revus à la baisse et un pic de plus courte durée, est ainsi proposé dans l'Illustration 98, en accord avec l'analyse des différents hydrogrammes sur le BV.

4.14.2 ReX sur la gestion de crise « temps réel »

Lundi 20 janvier 2020, Météo-France prévoit la remontée vers le département des Pyrénées-Orientales de la tempête Gloria, responsable en Espagne d'importantes inondations. À 14 h, le SMBVA contacte le BRGM pour savoir si une évaluation de l'impact de cette tempête sur le territoire de l'Agly est possible, dans le cadre de la présente étude.

Cet épisode qui a débuté le 21 janvier 2020 a été caractérisé par 2 périodes de précipitations successives, avec un cumul compris selon les sous bassins-versants entre 50 et 80 mm le 21 janvier 2020 et entre 40 et 180 mm le 22 janvier 2020. Météo-France annonçait dès le 20 janvier 2020 une prévision pour l'épisode du 21 janvier de 50 mm avec des intensités comprises entre 5 et 10 mm/h. Pour le 22, le cumul attendu était de 100 mm au minimum avec la même gamme d'intensité. Dès le 20 janvier, le BRGM après échange avec le SPC a pu informer le SMBVA que le premier épisode saturerait les différents horizons et que le second génèrerait une crue importante. Le débit maximal à Rivesaltes avait ainsi été évalué entre 600 m³/s à 900 m³/s selon l'intensité. Les seuils d'alerte orange ou rouge devraient alors être franchis selon l'intensité de la pluie.

L'abaque a été utilisé avec en entrée, des pluies comprises entre 100 et 125 mm (information Météo-France : pluies minimum attendues de 100 mm) et une intensité comprise entre 5 et 10 mm/h. Le débit à Rivesaltes fourni par l'abaque est ainsi compris entre 670 et 1 100 m³/s (Illustration 99).



Illustration 99 : Utilisation de l'abaque en temps réél.

Cette prévision s'est ainsi révélée correcte. En effet, le débit au pic de crue a été de l'ordre de 900 à 1 000 m³/s à Rivesaltes franchissant le seuil de vigilance rouge. Finalement, la pluie moyenne sur le BV de l'Agly à Rivesaltes a atteint 100 mm avec une intensité moyenne de 7 mm/h.

4.14.3 Retour d'expérience, utilisation des abaques

Le Retour d'Expérience (REX) réalisé sur les différents sous-bassins est fourni dans les abaques (Illustrations 100 à 104). Le 21 janvier, le paramètre HU était égal à 65 % et parallèlement les niveaux d'eau dans le karst à Estagel indiquaient un niveau proche de la saturation. D'après l'analyse de la valeur de HU en relation avec la capacité de rétention, cette dernière était comprise entre 0 et 60 mm (voir Illustration 94).

L'épisode du 21 janvier avec des précipitations comprises entre 50 et 80 mm selon les sous BV a eu pour effet la recharge du système, le 22 janvier il n'y a plus de capacités de rétention.

Le 22 janvier, les précipitations sur le bassin-versant de l'Agly à Rivesaltes (code Météo-France MO 77) a atteint 100 mm en 14 h soit une intensité de 7 mm/h. L'abaque fournit alors un débit compris entre 750 et 910 m³/s (Illustration 104). Le seuil de vigilance rouge à 800 m³/s est dépassé. Les abaques ont été complétés pour cet épisode sur les 5 stations (CARAMANY entrant, CARAMANY sortant, TAUTAVEL, ESTAGEL et RIVESALTES), les résultats graphiques sont présentés dans les Illustrations 100 à 104. L'incertitude de +/-10 % sur le débit obtenu est également présentée. Les données de précipitations utilisées sont les suivantes :

- BV Caramany : 160 mm en 17 h, soit I = 9,4 mm/h ;
- BV Tautavel : 75 mm en 12 h, soit I = 6,2 mm/h ;
- BV Estagel : 115 mm en 15 h, soit I = 7,7 mm/h ;
- BV Rivesaltes : 100 mm en 14 h, soit I = 7 mm/h.



Illustration 100 : REX épisode 22 janvier 2020 à Caramany entrant.



Illustration 101 : REX épisode 22/01/2020 à Caramany sortant.



Illustration 102 : REX épisode 22/01/2020 à Tautavel.



Illustration 104 : REX épisode 22/01/2020 à Rivesaltes.

Cumul précipitations (mm)

4.14.4 Utilisation du modèle en mode prévisionnel

Par la suite, la modélisation a été reprise sur la période récente à savoir 01 janvier 2019 -31 décembre 2020, afin de simuler la crue de janvier 2020. Les résultats graphiques pour cette crue sont fournis Illustration 105.

Crues karstiques Agly



Illustration 105 : Résultats de la modélisation en mode validation pour la crue de janvier 2020.

Les valeurs de débit obtenues à partir de l'abaque et du modèle sont fournis ci-après pour chaque station :

4.14.5 Caramany entrant

Observé : 917 m³/s Abaque : 530 à 650 m³/s Modélisation : 635 m³/s, soit entre 570 et 700 m³/s en prenant en compte la gamme d'incertitude liée au précipitations (+/-10 %).

4.14.6 Caramany sortant

Observé : 590 m³/s ; Abaque : 350 à 420 m³/s ; Modélisation : 397 m³/s, soit entre 360 et 440 m³/s.

4.14.7 Tautavel

Observé : 290 m³/s Abaque : 260 à 320 m³/s Modélisation : 327 m³/s, soit entre 290 et 360 m³/s.

4.14.8 Estagel

Observé : Q = 620 m³/s mais sous-estimé Q reconstitué évalué à 750 m³/s Abaque : 720 à 880 m³/s Modélisation : 830 m³/s, soit entre 750 et 910 m³/s.

4.14.9 Rivesaltes

Observé : $800 < Q < 1000 m^3/s$ Abaque : 750 à 910 m³/s Modélisation : 880 m³/s, soit entre 790 et 1000 m³/s.

Ainsi, les débits simulés et évalués par l'abaque sont sous-estimés à la station Caramany entrant et sortant. À Tautavel, Estagel et Rivesaltes les résultats sont proches de la mesure, compris dans la gamme d'incertitude du modèle.

Lors du retour d'expérience réalisé par le SPC, la prévision réalisée à partir de l'abaque BRGM a été validé. Le SPC a considéré que l'outil était robuste et adapté et qu'il avait permis de réaliser une prévision en temps réel de bonne qualité.

4.15 CONCLUSION MODÉLISATION SEMI-DISTRIBUÉE (MODELE VENSIM) ET OUTIL MIS EN PLACE POUR LA PRÉVISION

La modélisation mise en œuvre permet dans l'ensemble une bonne simulation du débit du pic de crue pour les épisodes de crue majeurs. Les résultats de ce modèle utilisés dans la grille de vigilance du SPC fournissent des résultats conformes à l'observation.

Le modèle utilisé en mode prévisionnel à partir de différents scénarios de pluie a permis de réaliser un outil de type abaque facilement utilisable en période de vigilance. Cet outil apporte des résultats satisfaisants dans l'ensemble, bien que moins bons que le modèle. Cette différence provient de la difficulté d'évaluation de l'état hydrique initial du modèle et également l'utilisation de scénarios de pluie « homogènes » sur la durée. L'abaque utilisé lors de la crue récente majeure de janvier 2020 a fourni une bonne prévision.

En vue d'établir la prévision il est conseillé d'utiliser conjointement le modèle et l'abaque. Le modèle utilisé en temps réel présente également l'avantage de caractériser les capacités initiales de rétention. La structure de ce dernier a été fournie au SPC en vue de son intégration dans la plateforme numérique de prévision.

À l'issue de ce travail de modélisation réalisé, une approche complémentaire a été testée. Basée sur le développement de modèles globaux, intégrés à une plateforme de simulation temps réel, elle pourrait constituer une approche complémentaire. Elle est présentée dans la partie ci-après.
5. Approche modéles globaux : GARDENIA - EROS

En vue de l'intégration de modèle pour la prévision, une modélisation globale à l'aide des outils BRGM a été réalisée (logiciels GARDENIA et EROS). En effet, le BRGM a récemment développé une plateforme numérique opérationnelle, nommée « MétéEAU des nappes ». Elle permet de suivre en temps réel les niveaux piézométriques et également de réaliser des prévisions de niveau à partir de scénarii météorologiques. Dans le cas où les logiciels BRGM permettraient de réaliser une simulation convenable des débits, il pourrait-être envisagé dans le futur d'intégrer ces modèles dans l'outil temps réel de prévision « MétéEAU des nappes ».

Les travaux ont porté sur des modélisations globales individualisées à l'aide des logiciels GARDENIA et EROS, sur différents bassins versants d'intérêt. Ces modèles sont généralement utilisés pour simuler les débits de crue et/ou des niveaux piézométriques, mais également les différents termes du bilan hydrologique.

Ces modèles sont intégrables au sein de la plateforme numérique « MétéEAU des nappes » récemment développée par le BRGM. Cette dernière permet sur les systèmes présentant un modèle, de réaliser un suivi en temps réel des niveaux piézométriques d'aquifères et de proposer des prévisions de l'évolution des niveaux de nappes selon différents scénarii météorologiques. À ce jour, seules les simulations et prévisions des niveaux piézométriques sont intégrées, les débits ne sont pas pris en charge. Toutefois, il serait ainsi envisageable de réaliser des développements spécifiques dans la plateforme pour intégrer la simulation des débits du BV de l'Agly au pas de temps horaire. Dans ce cadre le bassin de l'Agly pourrait-être intégré à la plateforme MétéEAU des nappes.

Les codes de calcul utilisés au pas de temps horaire mettent en œuvre dans chaque sous-bassin un schéma hydrologique GARDENIA (Thiéry 2009, 2013, 2014, 2015a) qui réalise une séparation non-linéaire entre ruissellement et infiltration.

Le schéma GARDENIA (modèle Global À Réservoirs pour la simulation des DÉbits et des NIveaux Aquifères) est un modèle hydro climatique global à réservoirs. Il simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, écoulement) par des lois physiques simplifiées. Ces lois physiques simplifiées correspondent à un écoulement à travers une succession de réservoirs.

Le code de calcul EROS (Ensemble de Rivières Organisées en Sous bassins) est un modèle hydrologique global « pluie – débit _ niveau » spatialisé dédié à la simulation de grands bassins. Il permet la modélisation des débits des cours d'eau et des niveaux piézométriques des aquifères de bassins versants hétérogènes (différences de pluviométrie et d'ETP, d'occupation du sol, de taux de ruissellement et donc d'infiltration, de débits d'échanges, etc.) par une grappe de modèles hydrologiques globaux emboîtés modélisant chacun un sous bassin versant (Thiéry, 2018).

Chaque sous-bassin peut ainsi posséder ses paramètres propres selon ses caractéristiques physiques et hydrologiques. Il convient de souligner qu'il est également possible de prendre en considération des exportations de flux (prélèvements d'eau) ou importations (injection de flux) avec des débits modulés dans le temps, en rivière ou en nappe dans chaque sous bassin modélisé.

Bien que conçu pour modéliser avec une approche semi-spatialisé globale des bassins versants organisés en sous bassins, le modèle EROS peut également modéliser des bassins versants indépendants. L'intérêt d'utiliser EROS est alors de permettre facilement la modélisation simultanée d'un grand nombre de bassins.

Les différents modèles ont été réalisés individuellement avec les deux codes de calcul.

Le chapitre suivant décrit le schéma de calcul GARDENIA. Pour des informations plus détaillées sur les codes de calcul GARDENIA et EROS du BRGM le lecteur est invité à se rendre sur le sites : <u>http://GARDENIA.brgm.fr/</u> et <u>http://eros.brgm.fr/</u>.

5.1 LE SCHÉMA DE CALCUL GARDÉNIA

GARDÉNIA est un modèle hydrologique global de bassins versants (Thiéry D, 2003). Il en réalise le bilan hydrologique à partir d'une chronique, représentative à l'échelle du bassin, de pluies et d'évapotranspiration potentielle (ETP). Une fois calé sur les observations disponibles, il permet de calculer le débit à l'exutoire et/ou le niveau piézométrique en un point de la nappe sous-jacente.

Comme explicité sur l'Illustration 106, GARDÉNIA (Thiéry, 2014 ; Thiéry, 2015) simule les principaux mécanismes du cycle de l'eau dans un bassin versant (pluie, évapotranspiration, infiltration, ruissellement) par une succession de 3 à 4 réservoirs en cascade qui représentent respectivement :

- les premières dizaines de centimètres du sol dans lesquelles se produit l'évapotranspiration (zone d'influence des racines de la végétation) ;
- une zone intermédiaire qui produit un écoulement rapide ;
- une ou deux zones aquifères qui produisent l'écoulement lent.

Les transferts d'un réservoir à l'autre sont :

- régis par des lois simples ou fonctions de transfert non linéaires (particulières à chaque réservoir) ;
- contrôlés par les paramètres des modèles (réserve utile, temps de transferts, seuils de débordement, etc.).



Illustration 106 : Schéma de fonctionnement du modèle GARDENIA pour un sous bassin.

Dans ce type de modèle, on prend en compte implicitement mais globalement, par le biais du débit global des rivières, les apports par les principaux aquifères contributifs aux débits des cours d'eau.

Le modèle GARDÉNIA comprend 3 ou 4 réservoirs ou un réservoir double pour le réservoir souterrain selon la complexité des sous-bassins (Illustration 107). Il réalise un bilan entre les apports (précipitations) et les sorties (écoulements ou évapotranspiration) pour chacun des pas de calcul.

Un réservoir à deux exutoires peut simuler une cote de débordement ou bien simplement représenter le fait qu'une courbe de tarissement descende plus rapidement au début, quand les deux exutoires débitent simultanément, qu'à la fin quand seul l'exutoire le plus profond est actif. Dans un tel cas on observe que le niveau de la nappe n'augmente plus ou quasiment plus à partir d'un certain niveau. Ce schéma peut aussi permettre de prendre en compte l'effet de fractures ou bien une augmentation de la perméabilité près de la surface.



Illustration 107. Schéma de fonctionnement pour un réservoir souterrain (à gauche) ou un réservoir souterrain à deux orifices (à droite) (Thiéry, 2018).

Des prélèvements ou des injections ou encore des échanges (pertes ou apports) de débits peuvent être fournis en tant que données d'entrée. Les apports sont indiqués en signe positif, les pertes en négatif. L'accumulation et la fonte de neige peuvent être prises en compte dans les bassins concernés.

Le code de calcul EROS v6.0 a été adapté pour améliorer la simulation des débits des bassins karstiques. En effet, les premiers essais d'utilisation du code de calcul EROS ont montré des difficultés pour simuler les débits journaliers de certains systèmes karstiques. En réaction à de forts épisodes de pluie, la simulation présentait de très fortes pointes de débits qui n'apparaissaient pas dans les séries observées. Une nouvelle version a alors été élaborée : EROS v7.1 (Thiéry, 2018) avec de nouvelles fonctionnalités pour permettre une meilleure simulation des systèmes karstiques. Un seuil de ruissellement a été introduit. Il permet selon les cas de diriger l'excédent de débit vers l'extérieur du système (le karst ne pouvant absorber ces forts épisodes de pluie efficace), ou bien d'infiltrer rapidement cet excédent vers la composante souterraines (alimentation par des lapiaz par exemple). Cette nouvelle fonctionnalité a également été introduite dans GARDENIA v8.6.

5.2 LE SCHÉMA DE CALCUL EROS

Les modèles Gardenia et Eros ont la même architecture. Ainsi, Gardenia est utilisé pour la modélisation d'un bassin unique et Eros pour la modélisation de plusieurs sous-bassins connectés entre eux ou pas, dans ce dernier cas Eros permet de lancer simultanément plusieurs simulations en parallèle.

Dans cette étude, une option existante dans Gardenia mais pas dans Eros est utilisée. Le fait d'utiliser un seuil pour le calage des débits.

Enfin, en mode prévisionnel, contrairement à GARDENIA, EROS ne corrige pas l'écart éventuel de débit à la date de la prévision.

5.3 INITIALISATION

La période d'initialisation (non utilisée pour le calage) dépend de l'inertie du système hydrologique ; plus le système a de la « mémoire » plus la période doit être longue.

Par ailleurs, avant la série d'initialisation, le modèle est placé en équilibre hydrologique en début de calcul, c'est-à-dire que le niveau piézométrique correspond à la pluie efficace entrante.

5.4 CALAGE

Le calage consiste à ajuster les paramètres du modèle, de telle sorte qu'ils permettent de calculer des niveaux piézométriques et/ ou des débits aussi proches que possible des valeurs observées.

Les données nécessaires au calage sont :

- des séries ininterrompues d'« entrées » du modèle : pluie et évapotranspiration ;
- une série d'observations, chroniques piézométriques et/ou chroniques de débits, non nécessairement continues, mais pour une période concomitante aux séries précédentes. Cette série sera comparée avec la « sortie » du modèle.

Toutes les données d'entrée (données météorologiques, débits d'exportations, débits d'importations) doivent être sans lacune d'observation. Par contre, il est possible d'avoir des lacunes dans les données de sortie (débits des cours d'eau). Cette souplesse permet de prendre en compte de longues périodes de calage donc représentatives des grandes fluctuations interannuelles climatiques (notamment pluviométriques) et des potentialités des aquifères (effet « mémoire »).

Une procédure de calage automatique particulièrement robuste (algorithme de Rosenbrook, 1960) permet d'estimer le jeu de paramètres assurant la meilleure restitution des débits et/ou niveaux mesurés.

Le calage se fait par une méthode d'ajustement semi-automatique à partir d'un jeu de paramètres initiaux. Certains paramètres peuvent ou non être optimisés. Le modèle fait varier ces paramètres (dans une gamme de valeurs définies) et recherche, par un algorithme d'optimisation non-linéaire adapté de la méthode de Rosenbrock (1960), un jeu fournissant les résultats les plus proches possibles de la série d'observations.

Le modèle, une fois calé, est en mesure de simuler au choix des débits, des niveaux piézométriques ou les deux simultanément. Le modèle fournit donc :

- des bilans des différentes composantes de l'écoulement (évapotranspiration réelle, infiltration, écoulement...);
- une représentation graphique permettant de comparer observations et simulations ;
- des critères numériques d'évaluation de la qualité de l'ajustement.

Lorsqu'à la fois les critères numériques d'ajustement et les graphiques de comparaison visuelle sont satisfaisants, on peut considérer que l'on dispose d'un jeu de paramètres représentatif du bassin dans la mesure où les valeurs des paramètres obtenues sont hydrologiquement réalistes.

5.5 PARAMÉTRES HYDROLOGIQUES DU MODÈLE

Ces paramètres hydroclimatiques sont les suivants :

- pluie efficace annuelle moyenne pour démarrage ;
- débit rivière réservé (débit minimum possible) ;

- superficie élémentaire du sous-bassin ;
- niveau de base (si niveau piézométrique) ;
- coefficient d'emmagasinement équivalent (si niveau piézométrique) ;
- correction globale des pluies ;
- correction globale de l'ETP.

Ces deux coefficients correctifs sont destinés à prendre en compte l'éventuelle nonreprésentativité des entrées telles qu'elles ont pu être estimées vis-à-vis des conditions météorologiques qui agissent réellement sur le bassin versant. Ils sont chargés de compenser une mauvaise représentativité des données pluviométriques ou d'ETP issues des observations faites sur des stations dispersées.

- capacité de la réserve superficielle « réserve utile » (mm), ou « réserve disponible pour l'évapotranspiration » ;
- capacité de la réserve superficielle Progressive ;
- hauteur de répartition Ruissellement = Percolation (hauteur dans le réservoir H pour laquelle il y a répartition égale entre écoulement rapide et percolation);
- temps de 1/2 percolation vers la nappe ;
- temps de 1/2 tarissement souterrain n° 1 ;
- temps de 1/2 transfert vers la nappe profonde ;
- seuil d'écoulement souterrain n° 1 (réservoir double) ;
- temps de 1/2 tarissement souterrain n° 2 ;
- temps de réaction (« retard ») du débit de rivière ;
- facteur d'échange souterrain externe.

Dans les bassins versants ayant une composante souterraine conséquente, il est fréquent que des échanges souterrains se produisent avec l'extérieur. Il peut arriver qu'une partie de la composante souterraine ne contribue pas à l'écoulement de surface et ainsi n'apparaissent pas dans le débit mesuré à l'exutoire (à la station de jaugeage de la rivière). Cette partie de l'écoulement souterrain peut se propager dans la nappe souterraine latéralement vers l'extérieur du bassin, ou bien « sous » la section de jaugeage. On a donc une perte de débit (échange souterrain négatif). Ce débit perdu apparaîtra dans un bassin voisin, ou bien dans la mer. À l'opposé, il peut arriver qu'un débit souterrain additionnel provienne d'un bassin versant voisin. On a alors un gain de débit (échange souterrain positif). Dans tous les cas les échanges souterrains affectent la composante souterraine du débit calculé mais n'affectent pas le niveau du réservoir souterrain. Ils n'affectent donc pas le niveau de la nappe calculé.

- temps de propagation du Débit => Bassin aval ;
- seuil de ruissellement par débordement du réservoir hypodermique ;
- perte du débit de Ruissellement par débordement au-dessus du seuil ;
- quand on introduit un seuil de débordement dans le réservoir hypodermique H, il se produit un débit de débordement quand le niveau de ce réservoir dépasse ce seuil ;
- ce paramètre indique alors le devenir de ce débit de débordement du réservoir H :
 - 0 : le débit de débordement s'ajoute au débit souterrain,
 - 1 : le débit de débordement quitte le système. Il ne contribue pas au débit calculé. (Il est « perdu »),
 - 2 : Le débit de débordement est dirigé vers le réservoir souterrain G1Perte du débit de Ruissellement par débordement au-dessus du seuil.

Quand on introduit un seuil de débordement dans le réservoir hypodermique H, il se produit un débit de débordement quand le niveau de ce réservoir dépasse ce seuil. Ce paramètre indique alors le devenir de ce débit de débordement du réservoir H :

- 0 : le débit de débordement s'ajoute au débit souterrain,
- 1 : le débit de débordement quitte le système. Il ne contribue pas au débit calculé (Il est « perdu »),
- 2 : le débit de débordement est dirigé vers le réservoir souterrain G1.

C'est un seuil de débordement dans le réservoir hypodermique H. Quand le niveau de ce réservoir dépasse ce seuil, il se produit un débit de débordement. Selon l'option choisie dans le paragraphe « Options hydroclimatiques d'un sous-bassin », cet éventuel débit de débordement peut s'ajouter au débit souterrain, quitter le système, ou être introduit dans le réservoir souterrain G1. Un tel « Seuil de ruissellement par débordement » peut être utile pour mieux simuler un système karstique : le karst ne pouvant pas absorber de trop forts épisodes de pluie efficace.

- temps de 1/2 ruissellement par débordement ;
- facteur de correction de la superficie du bassin.

Il est cependant possible de calibrer des facteurs correctifs sur la superficie de certains sousbassins, ce qui peut être utile pour des sous-bassins karstiques dont la superficie efficace du bassin d'alimentation est mal connue. Ce paramètre est utilisé uniquement pour le calcul de débit de rivière. C'est un facteur multiplicatif sur la valeur de la « Superficie du sous-bassin versant » introduite plus haut. Ce paramètre peut être optimisé entre une borne minimale et une borne maximale.

Ce facteur de correction de la superficie du sous-bassin versant doit être utilisé uniquement si la superficie du sous-bassin est mal connue : sous-bassin d'alimentation d'une source, pertes dans le sous-bassin (sous-bassin karstique), exutoire du sous-bassin ne contrôlant qu'une partie du débit (exutoires multiples).

- facteur de correction du coefficient d'emmagasinement.

5.6 RÉSULTATS DU CALAGE

La période modélisée s'étend de 2005 à 2019. La crue de janvier 2020 a été simulée après coup pour vérification. La pluie est moyennée sur les sous bassins. L'ETP est la même pour chaque sous bassin modélisé. Les calages sont réalisés uniquement à partir des données de débits. Aucun prélèvement n'est pris en compte.

Les modèles globaux ont été réalisés à Caramany « entrant » (amont du barrage, 409 km²), Caramany « sortant » (aval du barrage), Tautavel (308 km²) et Rivesaltes (1 049 km²). Les différents sous bassins versants ont été présentés (Illustration 1).

Dans chaque paragraphe présentant les résultats du calage, les valeurs des pics de crue et les chroniques des débits simulés et observés sont comparés pour les différents bassins. Les modèles fournissent également des ordres de grandeurs des différents termes du bilan hydrologique sur la période modélisée.

Pour chaque modèle (EROS et GARDENIA), plusieurs configurations ont été testées afin de représenter au mieux le karst dans les bassins où il est présent.

En l'occurrence :

- le fait d'autoriser des échanges souterrains entre bassins par l'intermédiaire d'un facteur d'échange souterrain externe,
- l'introduction d'un seuil de débordement,
- la possibilité de modifier la superficie du bassin versant,
- la configuration d'un réservoir double souterrain.

La qualité du calage a été appréciée par la valeur du coefficient d'ajustement utilisé et du Nash mais également par appréciation visuelle des résultats sur les crues les plus importantes.

Pour les modèles Gardenia, le critère de Nash est calculé sur les débits supérieurs à 100 m³/s, pour Eros sur l'intégralité de la chronique. Afin de comparer ces modèles au modèle conceptuel semidistribué développé dans la partie précédente, le critère de Nash a été recalculé sur les mêmes périodes (2005-2018) ainsi qu'en mode évènementiel à partir des crues de 2013, soit les épisodes 11 à 18. Ces résultats sont fournis dans le paragraphe 5.7.

Afin de mieux représenter les crues, un seuil sur les débits a été utilisé pour le calage. Cette option n'est présente que dans GARDENIA à l'heure actuelle. Ce seuil a été fixé à 100 m³/s, c'est la valeur minimale du débit de rivière observé prise en compte pour le calage. C'est-à-dire que nous nous intéressons aux crues supérieures à 100 m³/s pour tous les bassins modélisés.

5.6.1 Caramany entrant

Pour le sous bassin à Caramany « entrant », à l'amont du barrage, les meilleurs résultats de modélisation sont obtenus :

- en utilisant un facteur d'échange souterrain externe pour le modèle GARDENIA, on obtient un coefficient d'ajustement (coef_correl) de 0,89 et un coefficient de Nash (Nash) de 0,79 ;
- avec la configuration d'un réservoir double souterrain pour le modèle EROS, coefficient de corrélation = 0,92 et Nash = 0,84.

Sont reportés sur l'Illustration 110, un tableau contenant les valeurs des pics de crue observés et simulés pour les événements majeurs depuis 2005 ainsi que le décalage temporelle induit (en heures) et un graphique représentant les corrélations entre les pics de crue observés et simulés. On constate que les ajustements linéaires obtenus sont très proches pour les deux modèles.

Sur l'Illustration 111, les chroniques des débits observés et simulés sont comparées pour ces mêmes événements. On observe que GARDENIA apporte de meilleurs résultats dans la globalité.

Le tableau (Illustration 108) indique les valeurs des différents termes du bilan hydrologique en mm/an pour le calage obtenu avec le modèle GARDENIA. Un facteur d'échange permettant de caractériser les échanges en souterrain a été pris en considération afin d'optimiser le calage de ce modèle.

	Pluie	ETR	PI_Effic	Q_rapide	QRuis_Débo	Q_souterr1	Q_souterr2	Q_échange	Dif_Stock	Alim_sout1
Gardenia	769	473	298	37	0	195	0	-66	-2	261
Vensim	755	410	345							

Illustration 108 : Différents termes du bilan hydrologique (en mm/an) obtenu après calage avec le modèle GARDENIA et Vensim à Caramany entrant.

Le tableau (Illustration 109) apporte les pourcentages des différentes contributions (infiltration vers le compartiment souterrain, échange avec l'extérieur ou la part du ruissellement) au débit total pour les deux modèles EROS et GARDENIA. La part des eaux souterraines représente environ 80 % pour les 2 modèles. Elle est un peu plus forte pour GARDENIA et une partie de ce flux part vers l'extérieur du bassin. Une valeur négative, attestant de fuites non négligeables en souterrain, a été obtenue pour ce paramètre. Cette perte représente environ 20 % de la pluie efficace du sous-bassin.

	%Q_souterr	%Q_échange	%Q_rapide
GARDENIA	84	-22	12
EROS	79	0	21

Illustration 109 : Comparaison des différentes contributions (en %) au débit total ; respectivement la part des eaux souterraines, des échanges extérieurs et du ruissellement.

Les débits au pic de crue simulés par ces deux modèles sont fournis dans l'Illustration 110.

		Q entrant CARAMANY								
n° crue	date	Observé (m³/s)	GARDENIA (m3/s)	décalage pic (h)	Eros (m³/s)	décalage pic (h)				
1	15/11/2005	131.8	150.9	-2	88.5	-2				
7	11/10/2010	273.4	254.3	-2	234	0				
8	15/03/2011	475	329.2	0	344	-1				
10	21/11/2011	23								
11	06/03/2013	325.6	255.6	1	279	2				
12	18/11/2013	179.2	151.5	-2	99.8	-2				
13	30/11/2014	486	494.5	1	526.6	0				
14	22/03/2015	155	228.3	-1	158.3	-1				
15	14/02/2017	10								
16	25/03/2017	171.3	190	-3	116.4	-4				
17	11/04/2018									
18	15/10/2018	344	290.9	-3	200.4	-4				
19	22/01/2020	916.9	732.3	-1	780.7	-1				

Ajustement des pics de crue à CARAMANY entrant



Illustration 110 : Comparaison des pics de crue observés et simulés des modèles EROS et GARDENIA retenus à Caramany entrant.

Les hydrogrammes des principales crues sont fournis dans l'Illustration 111. Les résultats des 3 simulations (GARDENIA, EROS et Vensim) sont présentés. L'objectif est ainsi de comparer les résultats de la modélisation globale avec la modélisation semi-distribuée mise en œuvre. Les hydrogrammes de crue sont ainsi assez proches.



Illustration 111 : Comparaison des débits observés et simulés pour EROS et GARDENIA à Caramany entrant pour les principales crues.

5.6.2 Caramany sortant

Pour le sous bassin à Caramany « sortant », à l'aval du barrage, les meilleurs résultats de modélisation sont obtenus :

- en utilisant un facteur d'échange souterrain externe pour le modèle GARDENIA, on obtient un coefficient d'ajustement de 0,87 et Nash = 0,75 ;
- avec un réservoir double et un facteur d'échange souterrain externe pour le modèle EROS, le coefficient de corrélation est de 0,9 et Nash = 0,81.

D'après le graphique d'ajustement des pics de crue de l'Illustration 114, on voit que GARDENIA apporte de meilleurs résultats pour ce bassin. Le fait de contraindre le calage au débits supérieurs à 100 m³/s a un impact significatif sur ce bassin.

Sur l'Illustration 115, les chroniques des débits observés et simulés sont comparés pour ces mêmes événements. On observe que les débits simulés avec GARDENIA sont systématiquement supérieurs à ceux simulés avec EROS. Les événements avec des pics de crue supérieurs à 200 m³/s sont mieux représentés avec GARDENIA.

Le tableau (Illustration 122) indique les valeurs des différents termes du bilan hydrologique en mm/an pour le calage obtenu avec le modèle GARDENIA.

	Pluie	ETR	PI_Effic	Q_rapide	QRuis_Débo	Q_souterr1	Q_souterr2	Q_échange	Dif_Stock	Alim_sout1
Gardenia	769	461	308	30	0	154	0	-124	-1	279
Vensim	755	410	345							

Illustration 112 : Différents termes du bilan hydrologique (en mm/an) obtenus après calage avec le modèle GARDENIA et Vensim à Caramany sortant.

Le tableau (Illustration 113) apporte les pourcentages des différentes contributions (infiltration vers le compartiment souterrain, échange avec l'extérieur ou la part du ruissellement) au débit total pour les deux modèles EROS et GARDENIA. La proportion des eaux infiltrées représente environ 85 % pour les 2 modèles. Une partie de ces eaux d'infiltration sort du système et les pertes vers l'extérieur sont estimées entre 30 % (pour EROS) et 40 % (GARDENIA) de la pluie efficace du sous-bassin. Cette perte du système représente conceptuellement l'alimentation du karst pas les pertes sur le cours d'eau. Dans le modèle Vensim, l'infiltration en souterrain représentait 31 % de la pluie efficace contribuant au ruissellement. Ces valeurs sont ainsi en accord entre elles.

Pour le modèle GARDENIA, le pourcentage évalué des eaux infiltrées en souterrain est le même à l'entrée et la sortie du barrage. Par contre, le pourcentage de perte passe de 20 % à 40 % entre l'entrée et la sortie du barrage. Cette augmentation des pertes peut représenter la part des eaux qui sont stockées au niveau du barrage.

	%Q_souterr	%Q_échange	%Q_rapide
GARDENIA	84	-40	10
EROS	86	-32	10

Illustration 113 : Comparaison des différentes contributions (en %) au débit total ; respectivement la part des eaux infiltrées en souterrain, des échanges vers l'extérieur et du ruissellement à Caramany sortant.

			Q sortant CARAMANY								
n° crue	date	Observé (m³/s)	GARDENIA (m3/s)	décalage pic (h)	Eros (m³/s)	décalage pic (h)					
1	15/11/2005										
7	11/10/2010	148.9	187.4	-3	135.4	-2					
8	15/03/2011	262.8	223.9	1	165.8	0					
10	21/11/2011	22									
11	06/03/2013	242	195.3	2	161.4	2					
12	18/11/2013	66									
13	30/11/2014	251.5	357.5	1	291.5	0					
14	22/03/2015	56									
15	14/02/2017	1									
16	25/03/2017	29									
17	11/04/2018										
18	15/10/2018	47									
19	22/01/2020	590.4	534.2	-2	448.5	-3					

Les débits au pic de crue simulés par ces deux modèles sont fournis dans l'Illustration 114.





Illustration 114 : Comparaison des pics de crue observés et simulés des modèles EROS et GARDENIA retenus à Caramany sortant.

Les hydrogrammes des principales crues sont fournis ci-après (Illustration 115). Les résultats des modèles globaux (GARDENIA, EROS) sont meilleurs que ceux du modèle semi-distribué Vensim.



Illustration 115 : Comparaison des débits observés et simulés pour EROS et GARDENIA à Caramany sortant pour les principales crues.

5.6.3 Tautavel

Pour le sous-bassin à Tautavel, les meilleurs résultats de modélisation sont obtenus :

- en optimisant la superficie du bassin versant pour le modèle GARDENIA, le bassin d'alimentation est réduit à 200 km² (au lieu de 308 km²). On obtient un coefficient d'ajustement de 0,87 et Nash = 0,76 ;
- avec un facteur d'échange souterrain externe pour le modèle EROS, le coefficient de corrélation = 0,95 et Nash = 0,91.

D'après le graphique d'ajustement des pics de crue de l'Illustration 118, on constate que l'ajustement des pics de crue est proche pour les deux modèles.

De même, sur l'Illustration 118 comparant les chroniques des débits observés et simulés, on constate que les débits simulés avec les deux modèles sont très similaires avec un léger avantage pour GARDENIA.

Le tableau (Illustration 116) indique les valeurs des différents termes du bilan hydrologique en mm/an pour le calage obtenu avec le modèle GARDENIA.

	Pluie	ETR	PI_Effic	Q_rapide	QRuis_Débo	Q_souterr1	Q_souterr2	Q_échange	Dif_Stock	Alim_sout1
Gardenia	689	422	269	118	0	0	151	0	-1	151
Vensim	680	450	230				75			

Illustration 116 : Différents termes du bilan hydrologique (en mm/an) obtenu après calage avec le modèle GARDENIA et Vensim à Tautavel.

Le tableau (Illustration 117) apporte les pourcentages des différentes contributions (infiltration vers le compartiment souterrain, échange avec l'extérieur ou la part du ruissellement) au débit total pour les deux modèles EROS et GARDENIA. Pour les deux modèles, la partie infiltrée est évaluée à environ 55 %. Un pourcentage non négligeable de flux sort du bassin, près de 50 % de la pluie efficace, pour le modèle EROS. La réduction de la superficie du bassin pour le modèle GARDENIA, diminuant l'impluvium sur le bassin, compense les pertes induites dans EROS.

	%Q_souterr	%Q_échange	%Q_rapide
GARDENIA	56	0	44
EROS	53	-52	22

Illustration 117 : Comparaison des différentes contributions (en %) au débit total ; respectivement la part des eaux infiltrées en souterrain, des échanges vers l'extérieur et du ruissellement à Tautavel.

Les débits au pic de crue simulés par ces deux modèles sont fournis dans l'Illustration 118.

			Q TAUTAVEL								
n° crue	date	Observé (m³/s)	GARDENIA (m3/s)	décalage pic (h)	Eros (m³/s)	décalage pic (h)					
1	15/11/2005	738.2	615.7	-1	618.7	-1					
7	11/10/2010	269	320.1	-1	296.9	-1					
8	15/03/2011	227	221.1	0	176.2	0					
10	21/11/2011	198	266.2	3	235.4	3					
11	06/03/2013	450	423.1	1	410.7	1					
12	18/11/2013	108									
13	30/11/2014	582	574	1	579	1					
14	22/03/2015	50									
15	14/02/2017	196	162.7	-1	127	-1					
16	25/03/2017	57									
17	11/04/2018	72									
18	15/10/2018	473	359.2	-1	341.2	-1					
19	22/01/2020	287.8	288.4	1	253	1					

Ajustement des pics de crue à TAUTAVEL



Illustration 118 : Comparaison des pics de crue observés et simulés des modèles EROS et GARDENIA retenus à Tautavel.



Les hydrogrammes des principales crues sont fournis ci-après (Illustration 119). Les résultats entre les différentes approches sont comparables.

Illustration 119 : Comparaison des débits observés et simulés pour EROS et GARDENIA à Tautavel pour les principales crues.

5.6.4 Rivesaltes

Pour le bassin total à Rivesaltes, les meilleurs résultats de modélisation sont obtenus :

- en utilisant un facteur d'échange souterrain externe pour le modèle GARDENIA. On obtient un coefficient d'ajustement de 0,84 et Nash = 0,7 ;
- avec un facteur d'échange souterrain externe et un seuil de débordement pour le modèle EROS, le coefficient de corrélation est égal à 0.91 et Nash = 0,82.

D'après le graphique d'ajustement des pics de crue de l'Illustration 122, on constate que l'ajustement des pics de crue est proche. Les coefficients d'ajustement linéaire sont meilleurs pour le modèle EROS.

De même, sur l'Illustration 123 comparant les chroniques des débits observés et simulés, on constate que les débits simulés avec les deux modèles sont quasiment équivalents, peut-être un peu meilleurs pour EROS.

Le tableau (Illustration 120) indique les valeurs des différents termes du bilan hydrologique en mm/an pour le calage obtenu avec le modèle GARDENIA.

	Pluie	ETR	PI_Effic	Q_rapide	QRuis_Débo	Q_souterr1	Q_souterr2	Q_échange	Dif_Stock	Alim_sout1
Gardenia	695	450	247	40	0	155	0	-52	-2	207
Vensim	685	420	265			98				

Illustration 120 : Différents termes du bilan hydrologique (en mm/an) obtenu après calage avec le modèle GARDENIA et Vensim à Rivesaltes.

L'Illustration 121 apporte les pourcentages des différentes contributions (infiltration vers le compartiment souterrain, échange avec l'extérieur ou la part du ruissellement) au débit total pour les deux modèles EROS et GARDENIA. La proportion des eaux infiltrées représente environ 80 % pour les 2 modèles. Pour le modèle GARDENIA, une partie de ces eaux d'infiltration sort du système et ces pertes vers l'extérieur sont estimées à 20 % de la pluie efficace du bassin.

	%Q_souterr	%Q_échange	%Q_rapide
GARDENIA	80	-21	16
EROS	78	0	13

Illustration 121 : Comparaison des différentes contributions (en %) au débit total ; respectivement la part des eaux infiltrées en souterrain, des échanges vers l'extérieur et du ruissellement à Rivesaltes.

Les débits au pic de crue simulés par ces deux modèles sont fournis dans l'Illustration 122.

			Q RIVESALTES								
n° crue	date	Observé (m³/s)	GARDENIA (m3/s)	décalage pic (h)	Eros (m³/s)	décalage pic (h)					
1	15/11/2005	767	748.9	-1	779.4	1					
7	11/10/2010	457	429.5	10	420.7	5					
8	15/03/2011	399	434.4	8	395.5	9					
10	21/11/2011	419	339.7	6	351.4	4					
11	06/03/2013	969	760	0	794.1	2					
12	18/11/2013	258	202	6	183	4					
13	30/11/2014	969	885.6	1	953.7	2					
14	22/03/2015	105									
15	14/02/2017	302	137.5	-2	142.1	-1					
16	25/03/2017	115									
17	11/04/2018	199	128.3	-9	132.6	-7					
18	15/10/2018	609	390.3	-4	477.4	-2					
19	22/01/2020	974.3	894.2	-7	914.3	-6					

Ajustement des pics de crue à RIVESALTES



Illustration 122 : Comparaison des pics de crue observés et simulés des modèles EROS et GARDENIA retenus à Rivesaltes.

Les hydrogrammes des principales crues sont fournis ci-après (Illustration 123). Les résultats entre les différents modèles sont à nouveau comparables.



Illustration 123 : Comparaison des débits observés et simulés pour EROS et GARDENIA à Rivesaltes pour les principales crues.

5.7 COMPARAISON DE LA QUALITÉ DES DIFFÉRENTS MODÈLES

Afin de comparer la pertinence pour le bassin de l'Agly des modèles globaux développés lors de cette approche (Gardenia – Eros) et l'approche de la modélisation semi-distribuée (logiciel Vensim), les critères de Nash ont été calculés aux stations de Caramany sortant, Tautavel et Rivesaltes sur des périodes communes. Il s'agit de la chronique complète sur la période 2005-2018 puis en mode évènementiel sur la période post 2013, soit les épisodes 11 à 18. Les résultats sont fournis dans les 2 tableaux (Illustrations 124 et 125).

	Caramany sortant	Tautavel	Rivesaltes
Gardenia	21	76	47
Eros	68	90	68
Vensim	56	65	63

Illustration 124 : Critères de Nash calculés sur la période 2005-2018.

	Caramany sortant	Tautavel	Rivesaltes
Gardenia	21	90	79
Eros	57	93	78
Vensim	64	79	85

Illustration 125 : Critères de Nash calculés en mode évènementiel sur la période post 2013.

Ainsi, le modèle global Eros est le plus adapté lorsque l'on travaille sur l'ensemble de la chronique. Par contre en mode évènementiel, la fiabilité des simulations avec Eros et Vensim est comparable. Le modèle Gardenia est moins pertinent.

Le modèle Vensim présente en mode évènementiel une meilleure qualité de rendu à Rivesaltes (85 %) que les modèles globaux (inférieurs à 80 %). Ce modèle est ainsi le mieux adapté au présent projet qui vise à caractériser les crues de l'Agly à Rivesaltes. Le modèle Eros est cependant lui aussi bien adapté à la problématique. Le modèle Gardenia fournit de moins bons résultats.

5.8 CONCLUSION

Les modèles globaux réalisés individuellement pour les différents sous-bassins apportent des résultats satisfaisants. Le modèle GARDENIA en fixant un seuil sur les débits pour le calage du modèle améliore significativement l'estimation des pics de crue dans certains cas.

Dans l'ensemble, ces résultats pour les pics de crues principaux, sont comparables à ceux obtenus avec le modèle semi-distribué développé à l'aide du logiciel Vensim. Cette modélisation globale est ainsi validée. Il serait ainsi intéressant dans le futur d'intégrer cette modélisation à la plateforme MétéEAU des nappes. En effet, une fois ces modèles calés, des prévisions basées sur les chroniques de pluie de d'ETP historiques, pourraient être lancées afin d'anticiper certains épisodes de crue. Une adaptation du code doit toutefois être réalisée pour que ces prévisions soient réalisées au pas de temps horaire dans la plateforme « MétéEAU des nappes » et puissent également prendre en compte la simulation des débits.

D'autre part, un premier test de modélisation semi-globale de l'ensemble du bassin avec EROS a été réalisé. Les résultats sont encourageants mais peuvent être encore améliorés par quelques développements du code. Une modélisation semi-globale d'ensemble aurait l'avantage de pouvoir simuler en un seul bloc le fonctionnement global du bassin. Il serait ainsi possible de simuler des macro hétérogénéités par sous bassin-versant modélisé ; ce qui est particulièrement adapté au bassin de l'Agly qui affiche un développement karstique non négligeable.

6. Conclusion

Le bassin versant de l'Agly est un secteur constitué d'une mosaïque de formations géologiques qui comporte notamment un vaste aquifère carbonaté : le karst des Corbières. Le service de Prévision des Crues Méditerranée-Ouest (SPC Med-Ouest) réalise un suivi des niveaux tout au long du fleuve afin d'assurer la vigilance et la prévision des crues et envisager les risques associés. Les prévisionnistes du SPC Med-Ouest ont confirmé les difficultés de prévisions sur ce bassin complexe.

Afin de pallier aux difficultés de prévision des crues sur le bassin de l'Agly, une modélisation semidistribuée au pas de temps horaire, basée sur le modèle conceptuel de fonctionnement, a été mise en œuvre. Ce modèle conceptuel a été défini notamment lors de l'étude BRGM sur le karst des Corbières réalisée entre 2000 et 2012, ainsi que sur l'analyse conduite lors de l'approche débit-débit fournie dans le présent rapport. L'objectif du travail était de développer un outil qui permettrait de reproduire de façon satisfaisante les débits des moyennes et fortes crues. La prévision est aujourd'hui réalisée par le SPC aux stations de Tautavel et Rivesaltes. L'étude s'est ainsi attachée à reproduire au mieux les crues significatives, c'est-à-dire franchissant le seuil de vigilance jaune, sur ces deux stations. Ce seuil défini par le SPC est égal à 210 m³/s à Tautavel et 280 m³/s à Rivesaltes. En dessous de ce seuil de vigilance, le SPC ne prévoit pas de mesures particulières en terme de gestion de crise.

La modélisation intègre les 4 sous bassins-versants (BV) constituant le BV de l'Agly à Rivesaltes, à savoir :

- l'Agly à Caramany ;
- le Verdouble à Tautavel ;
- l'Agly à Estagel ;
- l'Agly à Rivesaltes

Les résultats de la simulation sont ainsi satisfaisant car le modèle reproduit bien les valeurs de débit aux pics de crue des épisodes principaux de crues, à savoir les épisodes ayant atteint le seuil de vigilance jaune. Sur l'ensemble des épisodes de la chronique 2005-2018 les résultats de la simulation à Tautavel et Rivesaltes sont compris dans la gamme d'incertitude du modèle à savoir +/- 10 % liée à l'incertitude sur les précipitations et encore +/- 10 % pour la gamme d'erreur sur la donnée de débit. Les résultats de ce modèle utilisés dans la grille de vigilance du SPC fournissent dans l'ensemble des résultats conformes à l'observation.

Le second objectif était de représenter le fonctionnement de l'aquifère karstique en matière de vidange et saturation. Le piézomètre Estagel permettant de suivre l'évolution du remplissage du karst au niveau des zones de pertes a ainsi été utilisé pour reproduire ce comportement. Les compartiments « karsts » des modèles Tautavel et Estagel permettent ainsi de reproduire ce fonctionnement. Il est donc possible d'évaluer sur chacun des modèles les capacités de rétention. Elles évoluent entre 150 et 200 mm selon le sous BV.

Ce travail de modélisation a été validé par les membres du Comité de Pilotage lors de la réunion intermédiaire du mois d'octobre 2019. Le modèle a été lancé en mode prévisionnel à partir de scénarios de précipitations afin de réaliser un abaque Pluie (cumul - intensité) / Débit. Parallèlement, une relation entre les capacités de rétention calculées par le modèles et le paramètre HU de météo-France qui permet d'évaluer l'état hydriques des systèmes a été définies pour chacun des sous BV.

Cet outil apporte des résultats satisfaisants, bien que moins bon que le modèle. Cette différence provient de la difficulté d'évaluation de l'état hydrique initial du modèle et également l'utilisation de scénarios de pluie « homogènes » sur la durée.

Cet abaque a été testé en temps réel lors de la crue majeure du 22 janvier 2020. Les prévisions proposées par le BRGM le 20 janvier 2020, en accord avec le SPC, au vu des prévisions météorologiques de Météo-France (à savoir plus de 100 mm de pluie avec une intensité comprise entre 5 et 10 mm/h) ont ainsi été en accord avec l'observé.

L'abaque a été utilisé lors d'une phase de Retour d'EXpérience (REX) réalisée par le SPC. La prévision réalisée à partir de l'abaque BRGM a été validée. Le SPC a considéré que l'outil était robuste et adapté et qu'il avait permis de réaliser une prévision en temps réel de bonne qualité.

En vue d'établir la prévision, il est conseillé d'utiliser conjointement le modèle et l'abaque. La structure de ce dernier a été fournie au SPC en vue de son intégration à la plateforme de modélisation du SPC. Le modèle présente l'avantage de définir les capacités initiales de rétention du système et également de suivre l'évolution du débit à partir d'une chronique de pluie réelle. L'abaque intègre quant à lui une valeur moyenne de la pluie (durée, intensité), ce qui peut entrainer un biais dans la prévision.

En complément de ce travail de modélisation, une nouvelle approche a été développée à partir des outils de modélisation du BRGM (GARDENIA et EROS). Le but est de tester ces modèles en vue d'une éventuelle intégration à l'outil de vigilance temps réel actuellement en cours de développement au BRGM. Cette plateforme appelée « MétéEAU des nappes » permettrait aux gestionnaires de suivre en temps réel les débits sur l'Agly et le niveau piézométrique à Estagel, et en période de crise de lancer des prévisions de débit à partir de scénarios climatiques. Ainsi, le modèle EROS se révèle mieux adapté que GARDENIA. La qualité des simulations entre EROS et le modèle semi-distribué basé sur le modèle conceptuel de fonctionnement (Vensim) est comparable, bien que ce modèle conceptuel reproduise mieux les crues à Rivesaltes. À ce jour, le modèle Vensim est le mieux adapté pour la simulation des crues à Rivesaltes, validant son utilisation notamment pour la constitution des abaques. EROS parait pertinent pour une intégration à l'outil de vigilance temps réel MétEAU des nappes. À ce jour cette plateforme réalise des prévisions journalières des niveaux d'eau, des ajustements pour intégrer les débits et passer au pas de temps horaire seront toutefois nécessaires.

7. Bibliographie

BRL DDAF, 1986, Barrage de Cassagnes-Caramany-Ansignan, Étude des pertes de L'Agly, CNARBRL-DDA, Mai 1986.

Charlier, J.-B., Moussa R., Bailly-Comte, V., Danneville, L., Desprats, J.-F., Ladouche, L., Marchandise, A. (2015) - Use of a flood-routing model to assess lateral flows in a karstic stream: implications to the hydrogeological functioning of the Grands Causses area (Tarn River, Southern France), Environmental Earth Sciences, 74: pp. 7605–7616, DOI 10.1007/s12665-015-4704-0.

Charlier, J.-B., Moussa, R., David, P.-Y., Desprats, J.-F. (2019) - Quantifying peakflow attenuation/amplification in a karst river using the diffusive wave model with lateral flow, Hydrological Processes, in press.

Dörfliger N., Ladouche B. (2006). Rapport de la phase II du projet Corbières, BRGM RP-54708-FR, 289 pp., 130 ill., 30 Tab., 5 ann.

Faillat, J-P. (1972) - Contribution à l'étude des circulations souterraines dans les formations carbonatées du haut bassin de l'Agly (Ruissellement souterrain et nappes karstiques). Thèse de 3^{ème} cycle, UER Ressources naturelles et aménagement régional. Montpellier, Université des Sciences et Techniques su Languedoc.

Fleury, P., Maréchal, J-C., Ladouche, B. (2013) - Karst flash-flood forecasting in the city of Nîmes (southern France). Engineering Geology, 164, 26–35.

Fleury, P., Borrell Estupina, V., Kong-A-Siou, L., Johannet, A., Darras, T., Pistre, S., Guilhalmenc, M., Maréchal, J-C., Dörfliger, N. (2013) - Crues partie I : Rôle du karst dans les crues du fleuve Lez, Karstologia n°62.

Hayami, S. (1951) - On the propagation of flood waves., Bulletins – Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, pp. 1–16.

ISL, Plasse, C. (2014) - Étude hydrogéologique du bassin versant de l'Agly, Rapport d'étude.

Ladouche, B., Aunay, B. (2011) - Avis hydrogéologique complémentaire sur le forage Notre-Damede-Pène (commune de Cases-de-Pène, Pyrénées-Orientales). Rapport final : BRGM/RP-60457-FR, 35 p.

Ladouche, B., Dörfliger, N.; Izac, J-L., Cubizolles, J., Le Strat, P., Du Couedic, C., Aunay, B., Thomson, P. (2004) - Évaluation des ressources en eau des Corbières. Phase 1 : Synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des Corbières Orientales. Vol. 2 - Caractérisation géologique et hydrogéologique du système karstique du "synclinal du Bas-Agly" Rapport : BRGM/RP-52919-FR, 196 p.

Moussa, R. (1996) - Analytical Hayami Solution for the Diffusive Wave Flood Routing Problem with Lateral Inflow, Hydrol. Process., 10, pp. 1209–1227.

Moussa, R., Bocquillon, C. (1996) - Criteria for the choice of floodrouting methods in natural channels, J. Hydrol., 186, pp 1–30, https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)03045-4.

Moussa, R., and Majdalani S. (2019) - Evaluating lateral flow in an experimental channel using the diffusive wave inverse problem. Advances in Water Resources, in press, https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.03.009.

Thiéry, D. (2009) - Modèles à réservoirs en hydrogéologie. in Traité d'hydraulique environnementale – Volume 4 - Modèles mathématiques en hydraulique maritime et modèles de transport. Tanguy J.M. (Ed.) - Éditions Hermès - Lavoisier. Chapitre 7 pp. 239-249. ISBN 978-2-7462-2006-5.

Thiéry, D. (2013) - Didacticiel du code de calcul Gardénia v8.1. Vos premières modélisations. Rapport BRGM/RP-61720-FR, 130 p., 93 fig.

Thiéry, D. (2014) - Logiciel GARDÉNIA, version 8.2. Guide d'utilisation. Rapport BRGM/RP-62797-FR, 136 p., 66 fig., 2 ann.

Thiéry, D. (2015) - Validation du code de calcul GARDÉNIA par modélisations physiques comparatives. Rapport BRGM/RP-64500-FR, 48 p., 28 fig.

Thiéry, D. (2018) - Modélisation hydrologique globale des débits de 23 sources karstiques avec le logiciel ÉROS. Rapport BRGM/RP-67723-FR, 66 p., 23 fig.

Todini E. (1996) - The ARNO rainfall-runoff model. Journal of Hydrology, 175: 339-382.

Annexe 1

Modélisation des échanges latéraux lors des principales crues de l'Agly



Crue n° 6 : 12/04/2009

Illustration 126 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 12/04/2009.

Crue n° 7 : 04/05/2010



Illustration 127 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 04/05/2010.



Crue n° 8 : 11/10/2010

Illustration 128 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 11/10/2010.



Crue n° 9 : 15/03/2011

Illustration 129 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 15/03/2011.



Crue n° 10 : 28/10/2011

Illustration 130 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 28/10/2011.

Crue n°11 : 21/11/2011



Illustration 131 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 21/11/2011.

Crue n° 12 : 06/03/2013



Illustration 132 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 06/03/2013.

Crue n° 13 : 18/11/2013



Illustration 133 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 18/11/2013.



Crue n° 14 : 30/11/2014

Illustration 134 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 30/11/2014.





Illustration 135 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 23/03/2015.


Crue n° 16 : 14/02/2017

Illustration 136 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 14/02/2017.

Crue n° 17 : 25/03/2017



Illustration 137 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 25/03/2017.



Crue n° 18 : 11/04/2018

Illustration 138 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 11/04/2018.



Crue n° 19 : 15/10/2018

Illustration 139 : Modélisation des échanges latéraux sur la crue du 15/10/2018.

Annexe 2

Résultats graphiques de la modélisation semi-distribuée pour les différents épisodes

Crue n°4 : 27/12/2008 (Illustration 141)

Le modèle « Tautavel » ne parvient pas à simuler cette petite crue pour laquelle le débit est inférieur à 50 m³/s. L'ensemble de la pluie est utilisé pour la recharge des réservoirs sol et karst. À la fin de l'épisode les réservoirs karsts des modèles TAUTAVEL, ESTAGEL et RIVESALTES sont saturés ou proches de la saturation (Illustration 140). Le comportement observé au piézomètre Estagel avec la saturation du karst est donc bien représenté.



Illustration 140 : Saturation du réservoir karst à Tautavel et Estagel pour l'épisode n° 4.

Concernant la simulation des débits issus du BV de l'Agly à Caramany (entrée du barrage), les résultats sont satisfaisants. Le modèle « Caramany » simule en effet un faible débit de l'ordre de 50 m³/s, comparable à l'observé. Le modèle Estagel après que le réservoir karst se soit saturé a généré une petite crue (débit inférieur à 100 m³/s). Il semblerait qu'en réalité toute l'eau a été stockée dans le système. Enfin, il n'y a pas de données à Rivesaltes pour cet épisode. Les résultats de la simulation sur ce sous-BV sont donc fournis à titre indicatif. Le modèle simule ainsi une faible crue (débit inférieur à 100 l/s).



Illustration 141 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n °4.

Crue n° 5 : 12/04/2009 (Illustration 143)

L'épisode se déroule en condition de karst initialement rechargé (Illustration 142).



Illustration 142 : Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée pour l'épisode n° 5.

À Tautavel, la simulation ne produit pas de débit, alors qu'il y a eu une petite crue d'environ 50 m³/s. L'essentiel de la pluie a permis la recharge du réservoir sol du modèle « TAUTAVEL ». La simulation à Caramany et Estagel fourni des débits très faibles. Les débits observés étaient également faibles de quelques dizaines de l/s. Il n'y a pas de données à la station de Rivesaltes, les résultats du modèle sont fournis à titre indicatif. Pour cette crue le débit simulé est également très faible.



Illustration 143 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 5.

Crue n° 6 : 04/05/2010 (Illustration 146)

Le débit mesuré à Tautavel est faible, inférieur à 50 m³/s. Le modèle « Tautavel » ne simule pas de débit, la pluie permet uniquement de recharger le réservoir sol. Le réservoir Karst initialement déprimé ne se recharge pas (Illustration 144).



Illustration 144 : Volume dans le réservoir karst à Tautavel et piézométrie mesurée (Estagel).

Pour cet épisode le module karst du modèle « Estagel » est rechargé (Illustration 145). La pluie permet la recharge du réservoir sol, puis une très légère augmentation du débit. La petite crue de 40 m³/s n'est pas reproduite.



Illustration 145 : Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée (épisode 6).

Il n'y a pas de données mesurées à la station Rivesaltes. Le débit simulé est faible, d'une dizaine de m³/s.



Illustration 146 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 6.

Crue n° 7 : 11/10/2010 (Illustration 148)

L'épisode débute en condition de karst proche de la saturation (volume du réservoir karst à Tautavel égal à 27 Mm³, volume à saturation égal à 30 Mm³, Illustration 147). Les premières précipitations permettent la recharge du réservoir sol, puis celle du réservoir karst et enfin génère un débit dans le cours d'eau.



Illustration 147 : Volume dans le réservoir karst à Tautavel et piézométrie mesurée (Estagel).

Il y a un décalage de quelques heures entre l'hydrogramme mesuré et simulé à Tautavel. Le pic simulé intervient avec 5 h de retard. L'amplitude au pic de crue avec un débit de 270 m³/s est cependant bien représentée.

La simulation est correcte à Caramany avec un pic de crue à 320 m³/s.

À Estagel, l'hydrogramme simulé présente également un décalage, il est d'environ 3 h. L'amplitude au pic de crue est proche (440 m³/s simulé au lieu de 470 m³/s).

À Rivesaltes, la chronique mesurée est incomplète, une reconstitution du débit maximum a été proposée dans la partie 2. Présentation des données. Le débit simulé (520 m³/s) est cohérent avec ce débit reconstitué (environ 550 m³/s). Le décalage du pic de crue est également observé, ce qui est cohérent avec la structure du modèle qui propage les débits des stations amont (Tautavel et Caramany) vers les stations de l'aval (Estagel puis Rivesaltes) et que ce décalage ait lieu initialement à TAUTAVEL.



Illustration 148 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 7.

Crue n° 8 : 15/03/2011 (Illustration 150)

Cet épisode débute en condition de karst rechargé (Illustration 149). À Tautavel, le modèle reproduit relativement bien la crue avec toutefois une surestimation du pic de crue à 280 m³/s, au lieu de 230 m³/s pour l'observé.



Illustration 149 : Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée.

Le débit simulé à Caramany est bien plus faible que le débit observé (280 m³/s contre 480 m³/s). Une analyse critique de cet épisode a été conduite dans la partie 2. Présentation des données, tendant à montrer une sous-estimation des précipitations sur le sous BV de l'Agly à Caramany pour cet épisode.

Le débit simulé à Estagel est dans l'ensemble bien reproduit. Le premier pic est surestimé, le second pic est comparable et le troisième pic, celui du 16 mars 2011 est sous-évalué. Ceci est dû à la sous-estimation du débit à Caramany.

Enfin, le modèle reproduit bien dans l'ensemble l'hydrogramme à Rivesaltes, avec toutefois, comme pour Estagel le troisième pic sous-évalué (il manque 150 à 200 m³/s).



Illustration 150 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 8.

Crue n° 9 : 28/10/2011 (Illustration 152)

Dans les modèles TAUTAVEL et ESTAGEL, les réservoirs karsts sont initialement sous saturés. La totalité des pluies rechargent les réservoirs « sol », les réservoirs « karst » ne se rechargent pas, il n'y a pas de débit simulé (Illustration 153). En réalité, il y a eu une petite crue à Tautavel et Estagel qui n'est pas reproduite. Les modèles ne reproduisent ni la recharge du karst ni la crue.



Illustration 151 : Volume dans le réservoir karst à Tautavel et Estagel et piézométrie mesurée (Estagel).

À l'entrée du barrage le débit simulé est très faible en accord avec les observations.

Dans le modèle ESTAGEL, la pluie est utilisée pour recharger les réservoirs sol et karst. Il n'y a pas de débit simulé, contrairement à l'observé où il y a eu une petite crue inférieure à 100 m³/s.

À Rivesaltes, le débit simulé est du même ordre de grandeur (80 m³/s) que le débit observé (100 m³/s).



Illustration 152 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 9.

Crue n° 10 : 21/11/2011 (Illustration 154)

L'épisode débute en condition de karst rechargé, les modèles sont conformes à la réalité (voir Illustration 153 avec les chroniques d'Estagel).



Illustration 153 : Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée.

À Tautavel, la simulation fournit des débits beaucoup trop forts de l'ordre de 320 m³/s alors que le maximum observé n'était que de 200 m³/s, la différence est ainsi supérieure à 100 m³/s. L'analyse sur la validité des données réalisée dans la partie 2. Présentation des données, tend à montrer que la chronique de pluie sur le sous BV de Tautavel est sur-évaluée pour cet épisode, occasionnant une surestimation des débits simulés.

À Caramany le débit faible est bien reproduit.

À Estagel le débit simulé est également surestimé (490 m³/s au lieu de 320 m³/s). L'erreur provient des surestimations de Tautavel et Caramany (+180 m³/s) qui alimente Estagel.

À Rivesaltes, la surestimation se poursuit avec excédent de prêt de 200 m³/s transféré par le modèle vers l'aval. Le débit simulé est ainsi de 600 m³/s au lieu de 400 m³/s.



Illustration 154 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 10.

Crue n° 12 : 18/11/2013 (Illustration 156)

Dans le modèle « Tautavel » le réservoir karst est initialement sous-saturé (Illustration 155). Les pluies permettent d'abord la recharge du réservoir sol puis la recharge du réservoir karst mais sont insuffisantes pour générer du débit. Le modèle pour cet épisode écrête trop, puisqu'en réalité il y a eu une petite crue de surface d'environ 100 m³/s.



Illustration 155 : Volume dans le réservoir karst à Tautavel et piézométrie mesurée (Estagel).

À Caramany, la simulation est correcte avec toutefois un décalage.

À Estagel, le déficit de débit simulé à Tautavel se répercute à l'aval. Aussi, le modèle réagit trop tardivement, une trop grande quantité de pluie sert à recharger les réservoirs sol et karst.

Le décalage observé à Estagel se répercute directement à Rivesaltes, ou le premier pic de crue à 250 m³/s n'est pas simulé.



Illustration 156 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 12.

7.1.1 Crue n°14 : 23/03/2015 (Illustration 158)

Crue n° 14 : 23/03/2015 (Illustration 158)

Les conditions initiales de système rechargé est bien reproduit par les différents modèles (voir Illustration 157 pour l'exemple du réservoir Karst à Estagel).



niustration 157. Volume dans le reservoir karst à Estager et plezonneure mesuree

La simulation à Tautavel est correcte avec une petite crue simulée à environ 50 m³/s.

À Caramany, le débit simulé est faible et ne rend pas compte de la petite crue observée (150 m³/s).

L'hydrogramme à Estagel est également bien reproduit pour cette petite crue. Enfin, à Rivesaltes, le débit simulé est légèrement surestimé (140 m³/s au lieu de 110 m³/s).

Crues karstiques Agly



Illustration 158 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 14.

Crue n° 15 : 14/02/2017 (Illustration 160)

Le karst à Estagel est saturé au début de l'épisode, alors que le modèle présente en début d'épisode un karst sous saturé (voir Illustration 159 exemple sur le modèle Estagel). Les premières précipitations servent ainsi à recharger les réservoirs sol et karst. Un débit est ensuite généré. Les hydrogrammes simulés présentent ainsi un léger retard mais reste cohérents.



Illustration 159 : Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée.

La simulation de l'hydrogramme de Tautavel est correcte, le pic de crue simulé (210 m³/s) est légèrement supérieur au pic mesuré (200 m³/s). À Caramany une petite crue est bien reproduite. À Estagel le débit simulé atteint 220 m³/s, il était d'environ 170 m³/s. À Rivesaltes, la simulation fourni un pic à 280 m³/s au lieu de 300 m³/s, ce qui est satisfaisant.

Crues karstiques Agly



Illustration 160 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 15.

Crue n° 16 : 25/03/2017 (Illustration 162)

Les conditions initiales, à savoir un karst saturé, sont bien reproduites dans le modèle (voir par exemple Estagel dans l'Illustration 161).



Illustration 161 : Volume dans le réservoir karst à Estagel et piézométrie mesurée.

À Tautavel, le modèle surestime les débits (50 au lieu de 100 m³/s), mais reste dans la gamme de crue « petite crue ». À Caramany, la petite crue n'est pas simulée. À Estagel et Rivesaltes, le modèle surestime les débits (100 au lieu de 200 m³/s), mais reste également dans la gamme de crue « petite crue ».



Illustration 162 : Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 16.

Crue n°17 : 11/04/2018 (Illustration 164)

Les conditions initiales, à savoir un karst saturé, sont bien reproduites dans le modèle (voir l'exemple d'Estagel Illustration 163).



Le modèle Tautavel surestime les débits de cette crue (180 au lieu de 70 m³/s), il s'agit toutefois de la même gamme de crue dite « petite crue ».

Les débits simulés à Caramany sont faibles, conformément à l'observé.

Les débits simulés à Estagel et Rivesaltes sont surestimés, ils sont essentiellement liés au pic de crue simulé trop fort à Tautavel qui se propage vers l'aval dans la modélisation.



Illustration 164. Résultats modélisation à Tautavel (haut gauche), entrée barrage (haut droit), Estagel (bas gauche) et Rivesaltes (bas droit) - crue n° 17.

Annexe 3

Abaques aux stations de Caramany et Estagel



Illustration 165 : Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit entrant à Caramany.



Illustration 166 : Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit sortant de Caramany.



Illustration 167 : Abaque Pluie-Débit-Intensité pour le débit à Estagel.



Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr **Direction régionale OCCITANIE** 1039 rue de Pinville 34 000 Montpellier France Tél. : 04 67 15 79 90