

**École Nationale Supérieure d'Électrotechnique, d'Électronique,
d'Informatique, d'Hydraulique et des télécommunications**

Département de formation hydraulique – mécanique des fluides

Mastère spécialisé hydraulique

**Mise en place d'un prototype d'assimilation
de données pour le modèle Mascaret
« Marne Amont Global »**

Johan Habert

Responsable CERFACS : Sophie Ricci, Docteur

Responsable SCHAPI : Etienne Le Pape, Chargé d'étude – Prévisionniste

ENSEEIH

2, rue Charles Camichel
B.P. 7122
31071 Toulouse Cedex 7

CERFACS

42, avenue Gaspard Coriolis
B.P. 7122
31057 Toulouse Cedex 1

SCHAPI

42, avenue Gaspard Coriolis
B.P. 7122
31057 Toulouse Cedex 1



2010 - 2011

Table des matières

INTRODUCTION	6
1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE ET TRAVAUX PRÉPARATOIRES	7
1.1 LOCALISATION GÉOGRAPHIQUE.....	7
1.2 LIMITES DE LA ZONE D'ÉTUDE	7
1.3 LES AFFLUENTS RENCONTRÉS.....	9
1.4 GÉOLOGIE DU BASSIN VERSANT.....	11
1.5 RECUEIL DE DONNÉES.....	12
1.5.1 <i>Données hydrologiques</i>	12
1.5.2 <i>Données topographiques</i>	13
1.6 LA PRISE EN COMPTE DES APPORTS INTERMÉDIAIRES	14
1.6.1 <i>Constat</i>	14
1.6.2 <i>Solutions envisagées : transposition et multiplication des hydrogrammes</i>	15
1.6.3 <i>Détermination des coefficients multiplicatifs A_i</i>	16
2 MODÉLISATION	18
2.1 PARAMÉTRAGE DU MODÈLE.....	18
2.1.1 <i>Géométrie du réseau hydraulique</i>	18
2.1.1.1 Biefs et confluences	18
2.1.1.2 Traitement des confluences.....	20
2.1.2 <i>Conditions aux limites et points de sortie du modèle</i>	20
2.1.3 <i>Pas de temps de calcul</i>	21
2.1.4 <i>Divers</i>	21
2.2 CALAGE DU MODÈLE	21
2.2.1 <i>Méthodologie</i>	21
2.2.2 <i>Résultats du calage des coefficients de Strickler K_s</i>	22
2.2.3 <i>Résultats du calage du maillage</i>	23
2.2.4 <i>Résultats du calage du planimétrage</i>	23
2.2.5 <i>Seuillage des lois amont</i>	23
2.3 VALIDATION DU CALAGE	24
2.3.1 <i>Résultats</i>	25
2.3.2 <i>Conclusion de la validation du calage</i>	27
2.4 VALIDATION OPÉRATIONNELLE ET RECALAGE.....	27
2.4.1 <i>Méthodologie</i>	28
2.4.1.1 Choix du délai de prévision.....	28
2.4.1.2 Construction des hydrogrammes temps réel.....	28
2.4.1.3 Ajustement temps réel.....	29
2.4.2 <i>Résultats des prévisions temps réel et du recalage</i>	30
2.4.3 <i>Conclusion du test opérationnel</i>	32
3 MISE EN PLACE DU PROTOTYPE D'ASSIMILATION DE DONNÉES MAD (MACSARET AVEC ASSIMILATION DE DONNÉES)	33
3.1 EXEMPLE D'ENCHAÎNEMENT DES ÉTAPES D'ASSIMILATION DE DONNÉES.....	34
3.2 PRINCIPES MATHÉMATIQUES	35
3.2.1 <i>Correction des lois amont</i>	35
3.2.2 <i>Correction de la ligne d'eau</i>	36
3.3 PRÉSENTATION DE LA MAQUETTE.....	36
3.4 APPLICATION DU PROTOTYPE AU MODÈLE MAG.....	39
3.4.1 <i>Configuration initiale de test</i>	39
3.4.2 <i>Temps caractéristiques et erreurs d'observation</i>	41
3.4.3 <i>Test de l'ASSIM</i>	41
3.4.4 <i>Test du CALAGE</i>	44
3.4.4.1 Choix du vecteur d'observation	44
3.4.4.2 Correction basée sur les hydrogrammes d'apports transposés	46
3.4.4.3 Correction basée sur un débit d'apport constant	48
3.4.4.4 Conclusion	50
3.4.5 <i>Test du CALAGEASSIM</i>	50

3.4.6	<i>Configuration finale retenue</i>	52
3.5	RÉSULTATS FINAUX : L'APPORT DE L'ASSIMILATION DE DONNÉES	53
	CONCLUSION	56
	BIBLIOGRAPHIE	57
	ANNEXE 1 : DÉTAILS DU FICHIER PARAMETRESMASCARETASSIM.CAS	58
	ANNEXE 2 : RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION ET DE L'ASSIMILATION DE DONNÉES	62

Table des tableaux

TABLEAU 1 : STATIONS HYDROMÉTRIQUES UTILISÉES POUR LA MODÉLISATION	12
TABLEAU 2 : ÉVÉNEMENTS UTILISÉS POUR LE CALAGE ET LA VALIDATION	13
TABLEAU 3 : RÉSULTATS DE L'ANALYSE HYDROLOGIQUE.....	18
TABLEAU 4 : CARACTÉRISTIQUES DES BIEFS DE LA ZONE D'ÉTUDE.....	20
TABLEAU 5 : CARACTÉRISTIQUES DES POINTS DE SORTIE DU MODÈLE.....	21
TABLEAU 6 : COEFFICIENTS DE STRICKLER MOYENS RETENUS	22
TABLEAU 7 : MAILLAGE RETENU (PK= POINT KILOMÉTRIQUE).....	23
TABLEAU 8 : PLANIMÉTRAGE RETENU	23
TABLEAU 9 : SEUILS MINIMUMS ET MAXIMUMS DES LOIS AMONT	24
TABLEAU 10 : EFFICIENCES OBTENUES AUX STATIONS DE SORTIE EN HAUTEUR ET DÉBIT POUR LES DIX CRUES DE VALIDATION	25
TABLEAU 11 : EFFICIENCES OBTENUES DES PRÉVISIONS BRUTES ET RECALÉES	30
TABLEAU 12 : PERSISTANCES OBTENUES DES PRÉVISIONS BRUTES ET RECALÉES	31
TABLEAU 13 : MOYENNES SUR L'ENSEMBLE DES CRUES DE VALIDATION DES EFFICIENCES ET PERSISTANCES OBTENUES DES PRÉVISIONS BRUTES ET RECALÉES.....	32
TABLEAU 14 : QUALITÉ DES RÉSULTATS OBTENUS APRÈS ASSIMILATION LINÉIQUE.....	44
TABLEAU 15 : DÉBITS MOYENS CONSTANTS INJECTÉS EN CHAQUE POINT D'APPORT	49
TABLEAU 16 : EFFICIENCES OBTENUES DES PRÉVISIONS BRUTES ET CORRIGÉES PAR ASSIMILATION DE DONNÉES.....	53
TABLEAU 17 : PERSISTANCES OBTENUES DES PRÉVISIONS BRUTES ET CORRIGÉES PAR ASSIMILATION DE DONNÉES.....	54
TABLEAU 18 : MOYENNES SUR L'ENSEMBLE DES CRUES DE VALIDATION ET POUR TOUTES LES STATIONS DES EFFICIENCES ET PERSISTANCES OBTENUES DES PRÉVISIONS BRUTES ET CORRIGÉES PAR L'ASSIMILATION DE DONNÉES	55

Table des figures

FIGURE 1 : LOCALISATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	7
FIGURE 2 : LES MODÈLES PRÉEXISTANTS MARNE AMONT ET MARNE VALLAGE	8
FIGURE 3 : LOCALISATION DES PRINCIPAUX AFFLUENTS ET DES ZONES KARSTIQUES	10
FIGURE 4 : RÉSURGENCE DE LA MANOISE, AFFLUENT DU ROGNON	11
FIGURE 5 : GÉOLOGIE DU SECTEUR D'ÉTUDE	11
FIGURE 6 : COMPARAISON DES DÉBITS OBSERVÉS À CONDES À LA SOMME DES DÉBITS AMONT	14
FIGURE 7 : PRISE EN COMPTE DES APPORTS INTERMÉDIAIRES À LA STATION DE CHAMOUILLEY	15
FIGURE 8 : LOCALISATION DES APPORTS INTERMÉDIAIRES.....	17
FIGURE 9 : SCHÉMA DU MODÈLE MAG SOUS MASCARET.....	19
FIGURE 10 : COMPARAISON DES DÉBITS OBSERVÉS ET MODÉLISÉS À CONDES DE LA CRUE DE VALIDATION 2.....	26
FIGURE 11 : COMPARAISON DES HAUTEURS ET DES DÉBITS MODÉLISÉS À MUSSEY DE LA CRUE DE VALIDATION 5.....	26
FIGURE 12 : COMPARAISON DES HAUTEURS ET DES DÉBITS MODÉLISÉS À CHAMOUILLEY DE LA CRUE DE VALIDATION 18.....	27
FIGURE 13 : HYDROGRAMME D'ENTRÉE TEMPS RÉEL	29
FIGURE 14 : PRÉVISIONS BRUTES ET RECALÉES À CONDES À 6H EN DÉBIT	32
FIGURE 15 : ENCHAÎNEMENT DES DEUX TYPE D'ASSIMILATION	34
FIGURE 16 : CONSTRUCTION DES HYDROGRAMMES D'ENTRÉE POUR CHAQUE PAS DE TEMPS.....	37
FIGURE 17 : CONSTRUCTION DE L'HYDROGRAMME PRÉVU À Tp	38
FIGURE 18 : COMPOSITION ET FONCTIONNEMENT DE LA MAQUETTE MAD	39
FIGURE 19 : APPLICATION DU PROTOTYPE MAD AU MODÈLE HYDRAULIQUE MASCARET MAG	40
FIGURE 20 : RÉSULTATS EN HAUTEURS DE L'ASSIMILATION LINÉIQUE À CHAMOUILLEY À 0 ET +21H, CRUE 14	42
FIGURE 21 : RÉSULTATS EN DÉBITS DE L'ASSIMILATION LINÉIQUE À CHAMOUILLEY À 0 ET +21H, CRUE 14.....	43
FIGURE 22 : PRÉVISIONS DE HAUTEUR D'EAU ET DE DÉBIT À MUSSEY À +12H	45
FIGURE 23 : PRÉVISIONS DE HAUTEUR D'EAU À JOINVILLE À +13H.....	45
FIGURE 24 : PRÉVISIONS EN DÉBITS À MUSSEY ET JOINVILLE À +12H ET +13H.....	46
FIGURE 25 : RÉSULTATS EN DÉBITS DU CALAGE À CONDES À +6H, CRUE 16.....	47
FIGURE 26 : RÉSULTATS EN DÉBITS DU CALAGE À SAUCOURT À +10H, CRUE 16	47
FIGURE 27 : RÉSULTATS EN DÉBITS DU CALAGE À CHAMOUILLEY À 0H ET +10H, CRUE 14	48
FIGURE 28 : COMPARAISONS DES MÉTHODES DÉBITS CONSTANTS ET HYDROGRAMMES TRANPOSÉS À CHAMOUILLEY À +21H, CRUE 5	49
FIGURE 29 : COMPARAISONS DES HAUTEURS PRÉVUES DES MÉTHODES ASSIM, CALAGE ET CALAGEASSIM À SAUCOURT À +10H, CRUE 16	50
FIGURE 30 : COMPARAISON DES HAUTEURS ET DES DÉBITS PRÉVUS À +12H À MUSSEY, CRUE 5.....	51
FIGURE 31 : APPLICATION DU PROTOTYPE MAD AU MODÈLE HYDRAULIQUE MASCARET MAG	52
FIGURE 32 : RÉSULTATS DES PRÉVISIONS LE 3 MARS 2007 À 10H À CONDES	56

Introduction

Les inondations dramatiques que la France a connues ces dernières années (Gard, Aude, Somme) ont conduit l'État à moderniser sa politique de gestion des inondations en accordant une place plus importante à la connaissance des phénomènes, à l'anticipation des événements majeurs et à l'information directe des populations. C'est le Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), rattaché au Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, en lien avec les 22 Services de Prévision des Crues (SPC), qui assure une vigilance et une prévision des crues sur plus de 20 000 km de cours d'eau métropolitains. Cette vigilance est matérialisée par l'émission quotidienne d'une carte de vigilance à destination des services de la sécurité civile et du grand public (<http://www.vigicrues.gouv.fr/>).

Mon stage de fin de Mastère spécialisé hydraulique s'est déroulé au sein du SCHAPI. Auparavant, j'ai travaillé en tant que prévisionniste au SPC Seine Amont Marne Amont (SAMA) basé à Châlons-en-Champagne. Durant ces quatre années j'ai notamment participé à l'élaboration de deux modèles de prévision des crues sur la rivière Marne dans le département de la Haute-Marne (52) à partir du code de simulation hydraulique 1D MASCARET développé par le LNHE (EDF R&D) et le CETMEF.

Les incertitudes sur ces modèles proviennent des conditions aux limites (hydrologiques et météorologiques) et des simplifications et paramétrisations de la physique (paramètres numériques, géométriques, hydrauliques). En résolvant un problème inverse, l'algorithme d'assimilation combine les informations issues de l'observation et de la simulation (McLauhlin, 1995) pour estimer des paramètres du modèle.

Dans ce contexte, le CERFACS (Centre Européen de recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique), le SCHAPI, le CETMEF et le LNHE (EDFR&D) collaborent à la mise en œuvre de méthodes d'assimilation de données avec le code d'hydraulique 1D MASCARET. Pour accroître le temps de prévision du SPC SAMA sur la rivière Marne, les deux modèles préexistants ont été fusionnés obtenant ainsi un Modèle global appelé Marne Amont Global (MAG). Les incertitudes sur l'estimation des apports intermédiaires devenant problématiques, le second objectif de mon stage a été de mettre en place le prototype d'assimilation de données développé par le CERFACS afin de corriger l'état hydraulique (hauteur et débit) et ainsi réduire l'incertitude sur la simulation et la prévision.

Ainsi nous verrons dans la première partie, le contexte hydrologique régional du bassin. Puis nous traiterons du calage du modèle Marne Amont Global dans la seconde. Enfin, dans la troisième partie nous testerons l'application du prototype d'assimilation de données au modèle MAG.

1 Présentation de la zone d'étude et travaux préparatoires

1.1 Localisation géographique

L'étude hydraulique réalisée se localise sur le territoire du Service de Prévision des Crues Seine Amont Marne Amont (SPC SAMA), sur le bassin de la Marne haut-marnaise, sur le tronçon¹ Marne Amont.

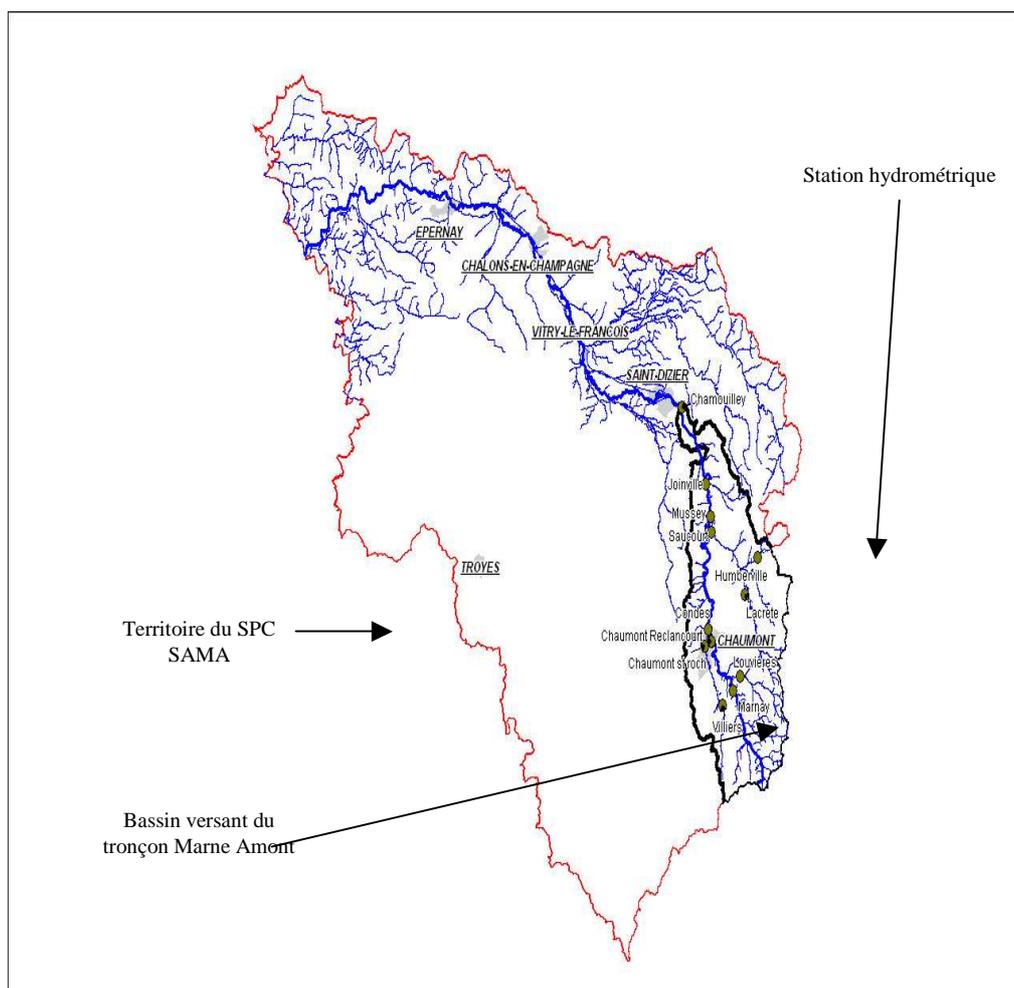


Figure 1 : localisation de la zone d'étude

1.2 Limites de la zone d'étude

Le modèle Marne Amont Global (MAG) résulte de la fusion de deux modèles préexistants : le modèle Marne Vallage (linéaire de la Marne débutant à Condes et s'achevant à Chamouilley) créé en 2007 et mis à jour en 2010 et le modèle Marne Amont (linéaire de la Marne entre Marnay-sur-Marne et Condes) conçu en 2008.

¹ La vigilance « crues » est affichée par « tronçons » : cf. http://www.vigicrues.gouv.fr/niv_spc.php?idspc=6

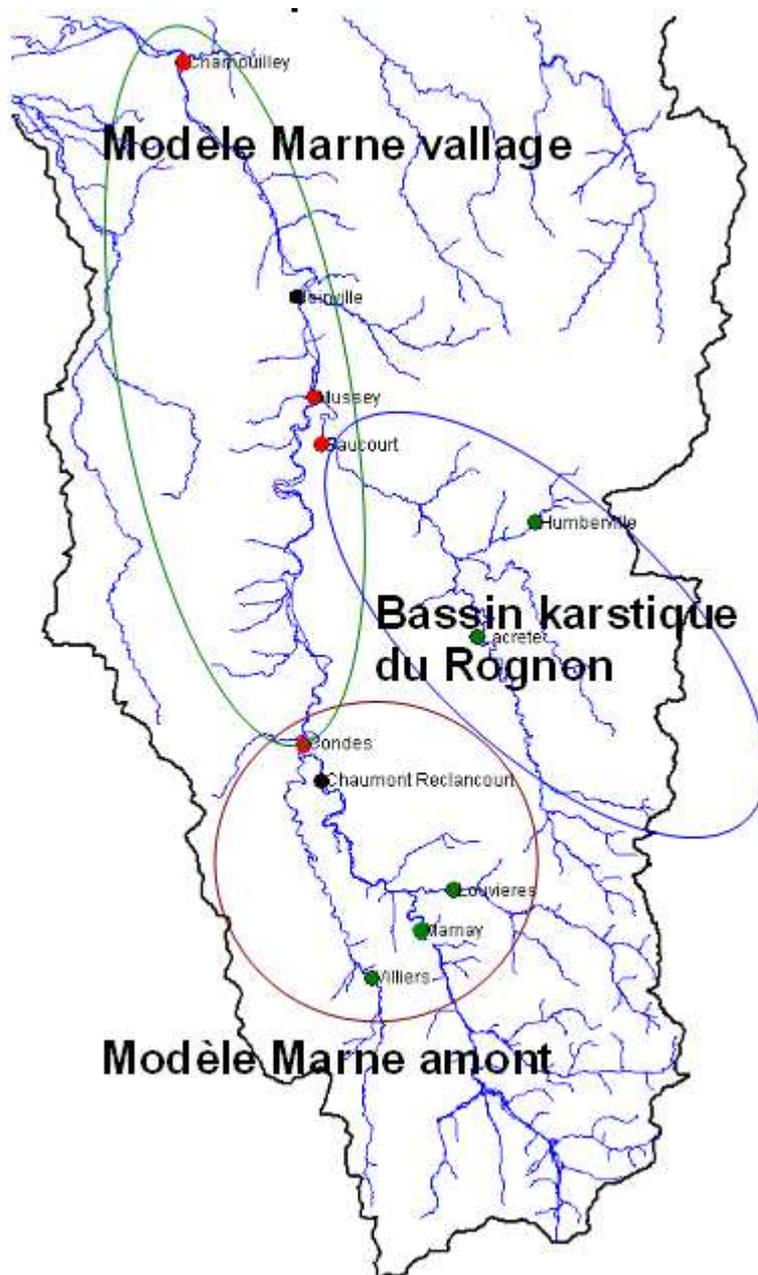


Figure 2 : les modèles préexistants Marne Amont et Marne Vallage

Afin d'accroître le temps de prévision du modèle à l'aval de Mussey, le bassin karstique du Rognon en amont de la station de Saucourt a été modélisé.

La zone modélisée est limitée en amont par les stations hydrométriques de Marnay-sur-Marne, Villiers, Louviers, Lacrête et Humberville (stations d'entrée du modèle, en vert sur la Figure 2, ci-dessus). Les stations de Chaumont, Condes, Saucourt, Mussey, Joinville et Chamouilley sont des stations de prévisions (stations de sorties du modèle, en rouge sur la Figure 2, ci-dessus, pour les stations où la correspondance hauteur-débit est considéré comme fiable, en noir pour celle où il l'est moins). Cette dernière constitue la limite aval de la zone d'étude.

1.3 Les affluents rencontrés

Dans le secteur d'étude trois affluents majeurs contribuent à l'augmentation du régime hydraulique de la Marne :

- La Traire : Ce cours d'eau est pris en compte dans l'étude, des profils en travers ont été levés et une station hydrométrique (Louvières) permet le suivi en temps réel de la Traire. Son comportement est semblable à celui de la Marne, les hydrogrammes de Louvières ont globalement la même forme que celui de Marnay-sur-Marne mais en moyenne inférieur de 30% à celui-ci.

- La Suize : Son comportement est celui d'un cours d'eau karstique, avec des montées lentes et des décrues soutenues. Ses réactions à la pluie sont hétérogènes cependant nous disposons d'une station assez représentative du bassin en amont des principales pertes, Villiers-sur-Suize. Après jaugeage, le département d'hydrométrie estime que le débit de la Suize au niveau de la confluence de la Marne est en moyenne deux fois celui de Villiers-sur-Suize, 30 km en amont. Nous disposons d'un profil quelques centaines de mètres avant la confluence avec la Marne.

- Le Rognon : ce bassin versant est pris en compte dans cette étude grâce aux données de la station hydrométrique de Saucourt et à des levées topographiques entre Saucourt et la confluence du Rognon avec la Marne. Avec la fusion des deux modèles, la station hydrométrique de Saucourt, à l'aval du Rognon, est devenue "limitante" en terme de temps de prévision. Le Rognon peut apporter en crue autant de débit que la Marne, sa modélisation est essentielle mais délicate. En modélisant le bassin versant en amont de Saucourt, on estime qu'il est possible d'accroître le temps de prévision à la station de Saucourt en passant d'une échéance maximale de prévision de 15 heures à une échéance de 21 heures. Le bassin versant du Rognon est karstique, outre Saucourt la cellule d'hydrométrie de la DREAL Champagne-Ardenne gère 3 stations très en amont du bassin, sur chacun des sous bassins amont du Rognon : la station de Lacrête sur le Rognon amont, la station de Humberville sur la Manoise et la station de Rimaucourt sur la Sueurre. Cependant, la station de Rimaucourt est à sec lorsqu'il ne pleut pas, donc inutilisable pour la modélisation hydraulique, et la somme des débits des deux autres stations (Lacrête et Humberville) ne représente pas la moitié du débit à Saucourt. D'autre part, on ne dispose que de peu de profils en travers en amont de Saucourt. Dernière difficulté, les réactions peuvent être violentes à Humberville, cette station se situe sur la Manoise en aval de la résurgence dite du « cul du cerf ».

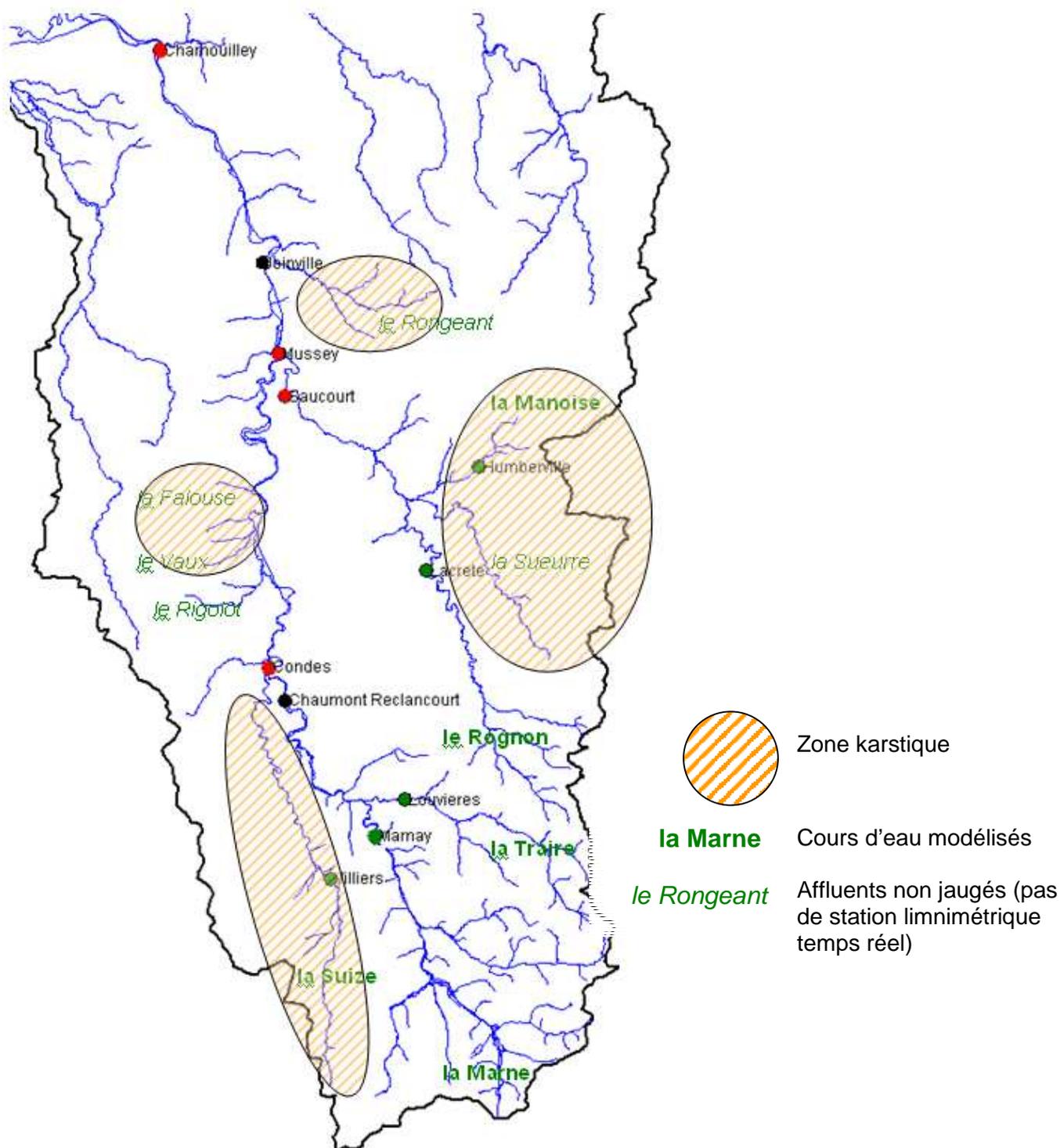


Figure 3 : localisation des principaux affluents et des zones karstiques

Entre la station de Condes et la confluence de la Marne et du Rognon, trois ruisseaux viennent augmenter le débit de la Marne : le Rigolot, la Falouse et le Vaux. A l'aval de la confluence de la Marne et du Rognon, on a le Rongeant qui se jette dans la Marne à l'aval de Joinville. L'apport du Rongeant n'est pas négligeable, c'est un cours d'eau karstique qui peut apporter selon nos estimations entre 10 et 15 m³/s en crue mais il n'est ni jaugé ni suivi par la cellule d'hydrométrie.



Figure 4 : Résurgence de la Manoise, affluent du Rognon

1.4 Géologie du bassin versant

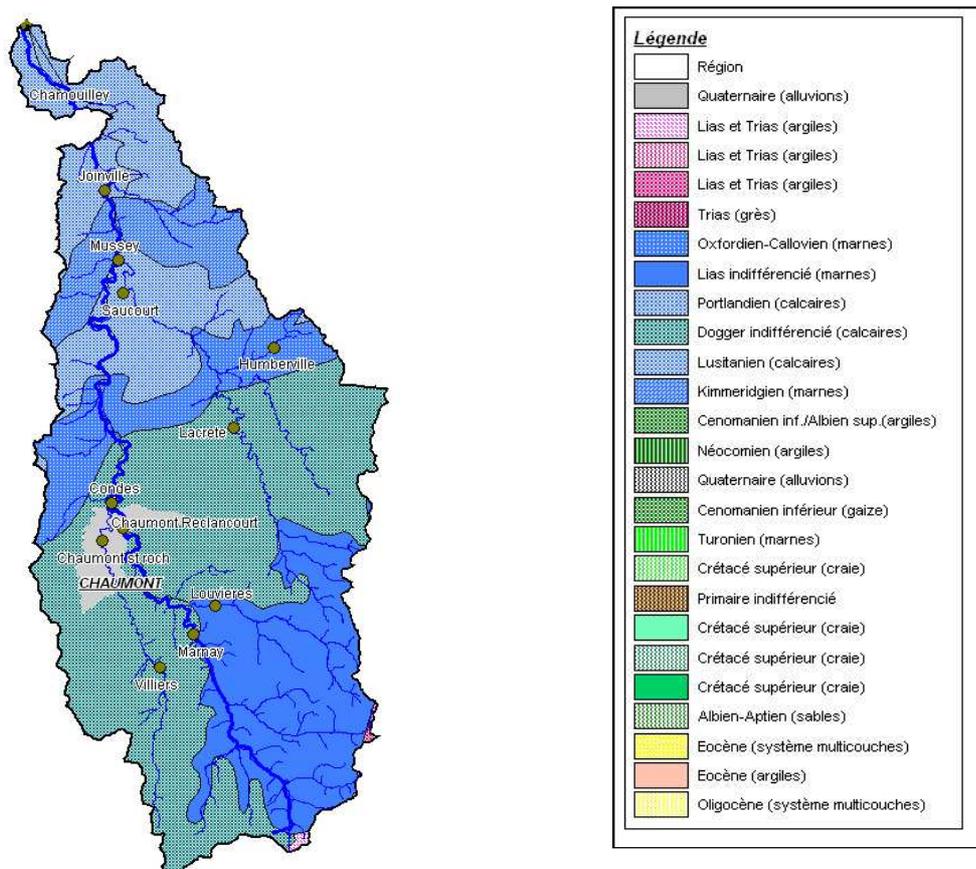


Figure 5 : géologie du secteur d'étude

La majeure partie du bassin versant est calcaire d'où l'importance des phénomènes karstiques. La zone située au sud-est est plus argileuse ce qui explique la forte densité de cours d'eau.

1.5 Recueil de données

1.5.1 Données hydrologiques

Les stations utilisées pour réaliser cette étude (stations d'entrée et stations de prévision) sont toutes gérées par la DREAL Champagne-Ardenne (cellule d'Hydrométrie). Les données hydrologiques ont été extraites du logiciel SACHA (logiciel développé par la DIREN Rhône-Alpes qui permet notamment de stocker les événements hydrométéorologiques). Ces données proviennent d'importations successives depuis DP ou SOPHIE.

Les données (hauteurs et/ou débits) sont horodatées en heure TU (mais cela a peu d'importance pour cette étude ; l'essentiel étant que les dates de début d'événement soient identiques), et au pas de temps horaire.

Stations	Cours d'eau	Référence horaire	Pas de temps des données	Données utilisées
Marnay	Marne	TU	1 h	Débits
Louvières	Traire	TU	1 h	Débits
Villiers	Suize	TU	1 h	Débits
Condes	Marne	TU	1 h	Hauteurs/Débits
Chaumont	Marne	TU	1 h	Hauteurs
Lacrête	Rognon	TU	1 h	Débits
Humberville	Rognon	TU	1 h	Débits
Saucourt	Rognon	TU	1 h	Hauteurs/Débits
Mussey	Marne	TU	1 h	Hauteurs/Débits
Joinville	Marne	TU	1 h	Hauteurs
Chamouilley	Marne	TU	1 h	Hauteurs/Débits

Tableau 1 : stations hydrométriques utilisées pour la modélisation

Les hauteurs observées sont transformées en débits via des courbes de tarage mises à jour régulièrement par la cellule hydrométrie. Nous disposons de ces courbes pour les stations de Chaumont et Joinville mais tout le débit ne passant pas au droit de ces stations (présence d'un bief secondaire avec seuil) nous utiliserons les hauteurs en référence.

La modélisation, le calage et la validation se fondent sur plusieurs épisodes de crues caractéristiques : on dispose de dix crues de calage et dix crues pour valider la modélisation (les couleurs jaunes et oranges du tableau 2 correspondent au dépassement de seuils de vigilance aux stations de prévisions).

numéro	année	date début	date fin	Débit maximum à Condes (m ³ /s)	Débit maximum à Mussey (m ³ /s)	Débit maximum à Chamouilley (m ³ /s)	utilité
1	2001	11-mars	17-mars	70	160	200	calage
2	2001	08-avr	18-avr	70	160	210	validation
3	2001	04-mai	09-mai	50	105	135	calage
4	2002	17-mars	26-mars	30	100	140	validation
5	2004	10-janv	19-janv	90	210	300	validation
6	2004	07-mai	14-mai	10	50	70	validation
7	2004	17-déc	22-déc	60	120	130	calage
8	2006	13-févr	20-févr	55	130	160	calage
9	2006	02-mars	07-mars	50	95	120	validation
10	2006	07-mars	13-mars	90	200	260	calage
11	2006	02-oct	07-oct	110	200	220	calage
12	2006	23-oct	27-oct	55	60	65	calage
13	2007	10-févr	19-févr	65	115	165	validation
14	2007	27-févr	08-mars	90	190	250	validation
15	2007	01-déc	07-déc	50	95	115	calage
16	2007	06-déc	14-déc	70	130	220	validation
17	2008	20-mars	26-mars	70	160	190	calage
18	2008	02-déc	09-déc	35	100	130	validation
19	2009	22-janv	27-janv	50	120	110	validation
20	2009	06-févr	14-févr	45	120	120	calage

Tableau 2 : événements utilisés pour le calage et la validation

Aucune autre donnée hydrométéorologique n'a été nécessaire pour réaliser cette étude.

1.5.2 Données topographiques

Les données topographiques proviennent des documents capitalisés par le SPC et produites par :

- l'Entente Marne dans la cadre du PAPI du bassin de la Marne pour le secteur Marnay-sur-Marne – Louvières – Luzy-sur-Marne (partie amont),
- la DDE 52 pour le PPRI de Chaumont pour le secteur Luzy-sur-Marne – Condes (partie aval).

Les données se composent de profils en travers géoréférencés en lit mineur et en lit majeur. Toutefois, et parce que l'objectif de cette étude est de réaliser des prévisions à six stations hydrométriques, tous les profils à disposition n'ont pas été nécessaires. Le parti pris était de s'affranchir des singularités localisées dans les communes. De nombreux profils ont été levés dans les communes bordant la Marne mais celles-ci ont généralement un bief secondaire de la Marne en leur sein alimentant un moulin ou une usine. Ces singularités compliquent la modélisation et lorsqu'elles sont suffisamment éloignées des points de sorties du modèle, leur description fine n'apporte pas de gain de précision au résultat final qui se veut global.

Ainsi, seuls les profils ne faisant pas apparaître de bras secondaires ont été retenus, le calage des coefficients de Strickler doit permettre de rattraper les défauts de représentation de la géométrie du cours d'eau.

En ce qui concerne la Suize, nous ne disposons que d'un profil situé quelques centaines de mètres en amont de la confluence avec la Marne. Nous avons donc créé des profils théoriques entre la station d'entrée de Villiers-sur-Suize et notre profil réel à partir de logiciel de SIG et de visites sur le terrain. Ce procédé est certes simpliste mais nous n'avons pas le choix, la distance entre la station d'entrée et le profil réel a été respectée ainsi que les largeurs des lits mineurs et majeurs.

Nous avons fait de même à plus grande échelle sur le bassin versant du Rognon.

1.6 La prise en compte des apports intermédiaires

1.6.1 Constat

La somme des surfaces des bassins versants des stations d'entrée du modèle est de 755.5 km². Or, la surface contrôlée par la station de Chamouilley à l'aval avoisine les 2250 km², près du triple de la somme des cinq stations d'entrée. Le fonctionnement hydrologique de la zone d'étude étant relativement homogène, la non prise en compte des apports intermédiaires dans le modèle va engendrer un déficit des débits modélisés croissant de l'amont vers l'aval. Si l'on désirait obtenir des prévisions de hauteur d'eau à partir de débits sous-estimés, il faudrait agir fortement sur les coefficients de Strickler pour augmenter artificiellement la hauteur d'eau. Mais cela ne permet pas d'obtenir des résultats complètement satisfaisants.

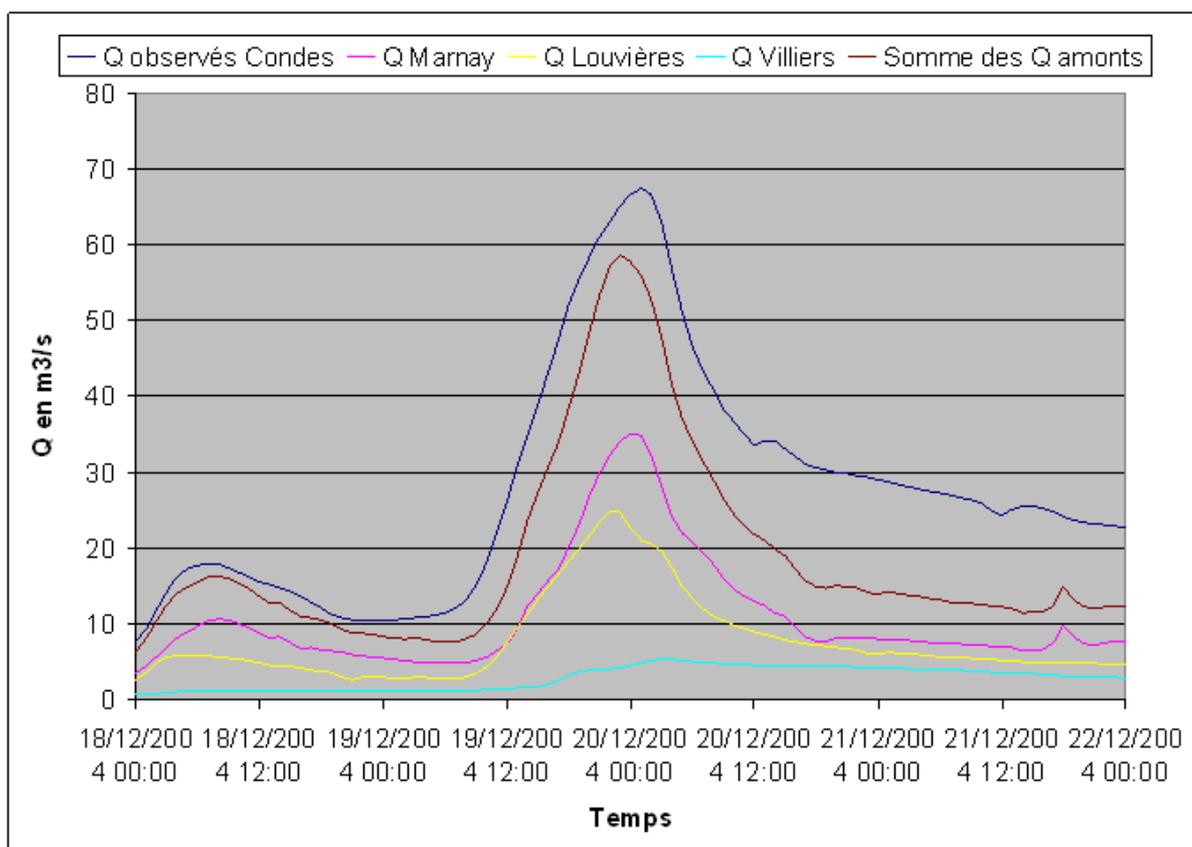


Figure 6 : comparaison des débits observés à Condes à la somme des débits amont

On obtient les résultats suivants : en moyenne, les débits observés sont supérieurs de 46% à Condes, 240% à Saucourt, 30% à Mussey et 27% à Chamouilley à la somme des débits des stations amont. De nombreuses résurgences (dont celle de la Sueurre) viennent augmenter le débit du Rognon en amont de Saucourt ce qui explique l'importance des apports intermédiaires entre cette station et ses deux stations amont sont très importants, On observe un déficit de débits moyen de 10 m³/s à Condes, 23 m³/s à Saucourt, 18 m³/s à Mussey et 23 m³/s à Chamouilley.

Afin de modéliser le plus physiquement possible la Marne et ses affluents (et ainsi obtenir logiquement de bons résultats), les apports intermédiaires doivent être pris en compte dans le modèle Mascaret Marne Amont Global.

1.6.2 Solutions envisagées : transposition et multiplication des hydrogrammes

Le modèle est développé pour effectuer des prévisions de débits et de hauteurs d'eau en temps réel. Le SPC, pour faire ses prévisions doit injecter un hydrogramme dans le modèle Mascaret pour simuler ses apports intermédiaires. Plusieurs solutions s'offrent à nous :

- injecter au niveau des cours d'eau non jaugés des modèles pluie-débit (couplage modèle hydrologie-hydraulique), cette solution respecte la physique et pourrait accroître le temps de prévision mais il faut les créer et les caler. Cela implique de disposer des données de pluie et alourdit la chaîne de calcul (il faudrait lancer les modèles pluie-débit au préalable du calcul Mascaret).

- injecter un débit moyen constant, déterminé par l'analyse hydrologique (cf. 1.6.1), les résultats seront moyens, surestimés en basse-eaux, sous-estimés en crue.

- injecter un débit dynamique issu d'une station au comportement hydrologique comparable à un hydrogramme d'apport intermédiaire. En soustrayant les débits d'une station amont aux débits d'une station aval (en tenant compte du temps de propagation), on obtient un hydrogramme d'apport intermédiaire. Suite à l'analyse hydrologique, on constate que la forme de ces hydrogrammes est comparable à ceux de la station de Villers sur la Suize, la montée n'est pas brutale et la décrue lente. La Suize est un affluent karstique situé en tête du bassin de la Marne en amont de la station de Condes. Dans le modèle Mascaret Marne amont préexistant, on multipliait les débits de cette station par 3 en moyenne pour simuler les apports et ainsi améliorer les résultats à Condes.

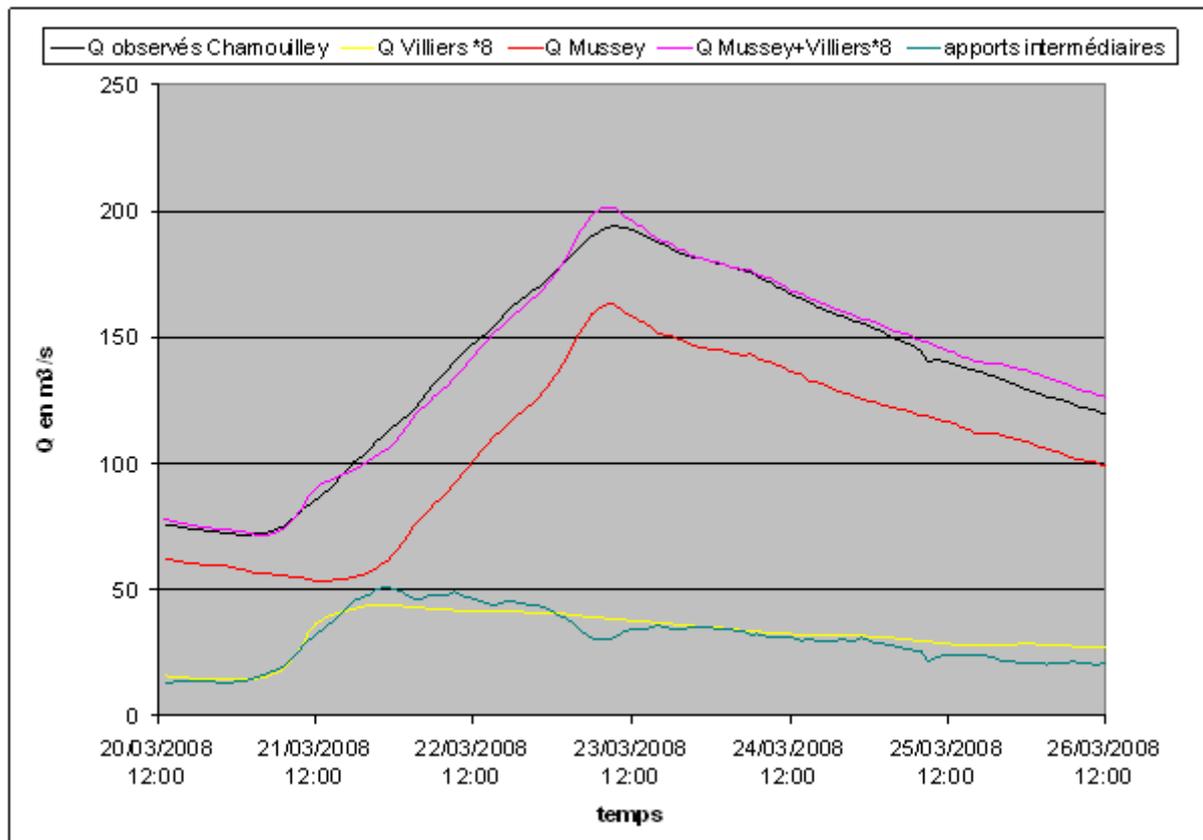


Figure 7 : prise en compte des apports intermédiaires à la station de Chamouilley

La majorité des crues résultant du passage d'un épisode pluvieux océanique d'ouest assez homogène sur le tronçon Marne Amont, l'hydrogramme de Villiers peut être injecté en apport intermédiaire sans le décaler dans le temps sur ce bassin versant. En transposant les débits de Villiers multiplié par un coefficient A_i on arrive à simuler correctement les apports intermédiaires à Condes, Saucourt, Mussey et Chamouilley.

1.6.3 Détermination des coefficients multiplicatifs A_i

Pour les apports intermédiaires de bassins non instrumentés, on utilise les observations des stations de Villiers-sur-Suize ou Louvières pour injecter des débits aux points d'apports. Ensuite on multiplie ces apports ainsi que certaines conditions limites amont par des coefficients A_i déterminés à partir des données des dix crues de calage. Le calage des coefficients multiplicatifs a été réalisé à la main, graphiquement, crue par crue, de manière à ce que la somme des débits aux conditions limites (décalés) permette de se rapprocher au mieux des observations aux stations de Condes, Saucourt, Mussey, et Chamouilley. Au final, nous retiendrons la moyenne des dix coefficients de chaque zone d'apport intermédiaire.

Pour simuler les apports intermédiaires à l'amont de Condes sur la Marne, on a multiplié les débits de la station de Villiers située en amont sur la Suize (entrée « Q_a »).

Pour simuler les apports intermédiaires à l'amont de Saucourt sur le Rognon :

- on a multiplié les débits de la station de Villiers, et on les a injecté au niveau de la résurgence de la Sueurre (entrée « Q_e »).

- on a multiplié les débits de la station d'Humberville située sur le bassin karstique de la Manoise (entrée « Q_f »). Cela permet de contrecarrer le côté non-physique de la transposition d'hydrogramme d'un bassin versant à l'autre, mais le coefficient multiplicatif n'a pas été choisi trop important car les réactions karstiques de la Manoise peuvent être violentes.

A l'amont de Mussey sur la Marne, on a identifié deux zones d'apports où plusieurs cours d'eau non jaugés viennent se jeter dans la Marne. La première correspond à la confluence de la Marne et du Rigolot (entrée « Q_c »), on est sur un substrat marneux (datant de l'oxfordien) donc hydrologiquement dynamique. On a injecté l'hydrogramme de la station de Louvières sur la Traire (elle aussi située sur des roches marneuses datant du Lias) qui est une station assez réactive à la pluie. La seconde zone d'apport se situe une dizaine de kilomètre en aval de la précédente au niveau de la confluence de la Marne, de la Falouse et du ruisseau de Vaux (entrée « Q_b »). L'hydrogramme de Villiers y a été injecté.

Enfin, pour tenir compte de l'apport du Rongean, en amont de Chamouilley (entrée « Q_d ») on a une fois de plus utilisé la station de Villiers.

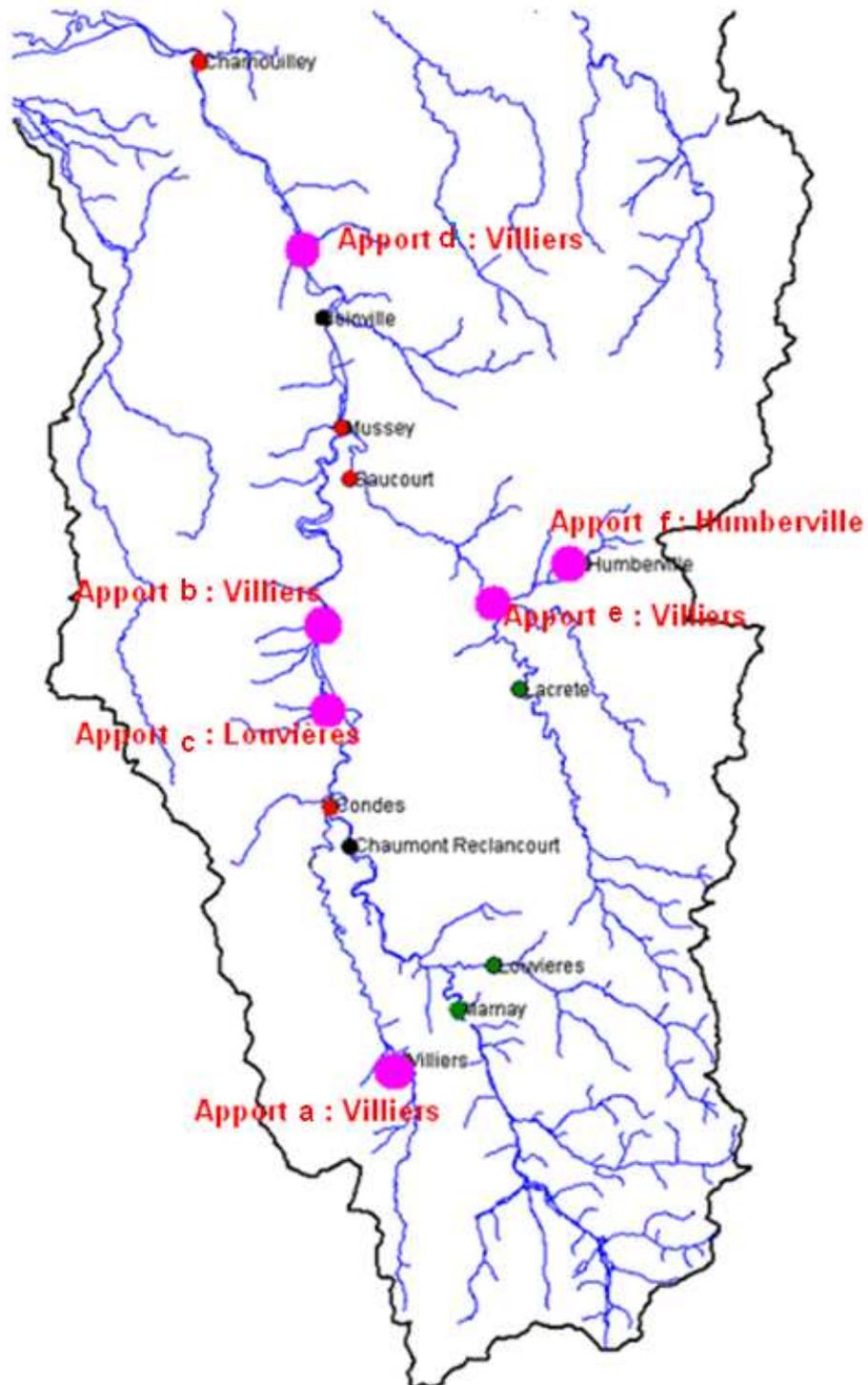


Figure 8 : localisation des apports intermédiaires

Suite à l'analyse hydrologique, pour les dix crues de calage, on obtient pour les apports Q_a , Q_b , Q_c , Q_d , Q_e , et Q_f les coefficients multiplicatifs moyens et les écarts types suivants :

stations	apports	hydrogramme multiplié	coefficients multiplicatifs moyens A_i	écarts types A_i
Condes	Qa	Villiers	3	0.8
Saucourt	Qe	Villiers	4	1.3
	Qf	Humberville	3	1.8
Mussey	Qb	Villiers	2.5	1.4
	Qc	Louvières	1	0
Chamouilley	Qd	Villiers	5.5	2

Tableau 3 : Résultats de l'analyse hydrologique

2 Modélisation

Le code retenu pour la modélisation est le code de calcul MASCARET (version 7.0) et son interface FUDAA (version 3.1.2). Ce logiciel est utilisé pour la simulation numérique d'écoulements à surface libre unidimensionnels. Développé depuis plus de 20 ans par EDF R&D et le Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF), le logiciel MASCARET est un code de modélisation hydraulique monodimensionnelle à surface libre, basé sur les équations de Saint-Venant (le guide de prise en main est téléchargeable sur <http://innovation.edf.com>).

2.1 Paramétrage du modèle

2.1.1 Géométrie du réseau hydraulique

2.1.1.1 Biefs et confluences

Le modèle se compose de neuf biefs et de quatre confluences :

- **Bief 1** : Marnay - amont confluence Traire/Marne
- **Bief 2** : Aval confluence Traire/Marne - amont confluence Suize/Marne
- **Bief 3** : Aval confluence Suize/Marne - amont confluence Rognon/Marne
- **Bief 4** : Aval confluence Rognon/Marne - Chamouilley
- **Bief 5** : Louvières - amont confluence Traire/Marne
- **Bief 6** : Villers - amont confluence Suize/Marne
- **Bief 7** : Humberville – amont confluence Manoise/Rognon
- **Bief 8** : Aval confluence Manoise/Rognon - amont confluence Rognon/Marne
- **Bief 9** : Lacrête - amont confluence Manoise/Rognon
- **Confluence 1** : Traire/Marne,
- **Confluence 2** : Suize/Marne.
- **Confluence 3** : Rognon/Marne
- **Confluence 4** : Manoise/Rognon

Modèle hydraulique Mascaret Marne Amont Global

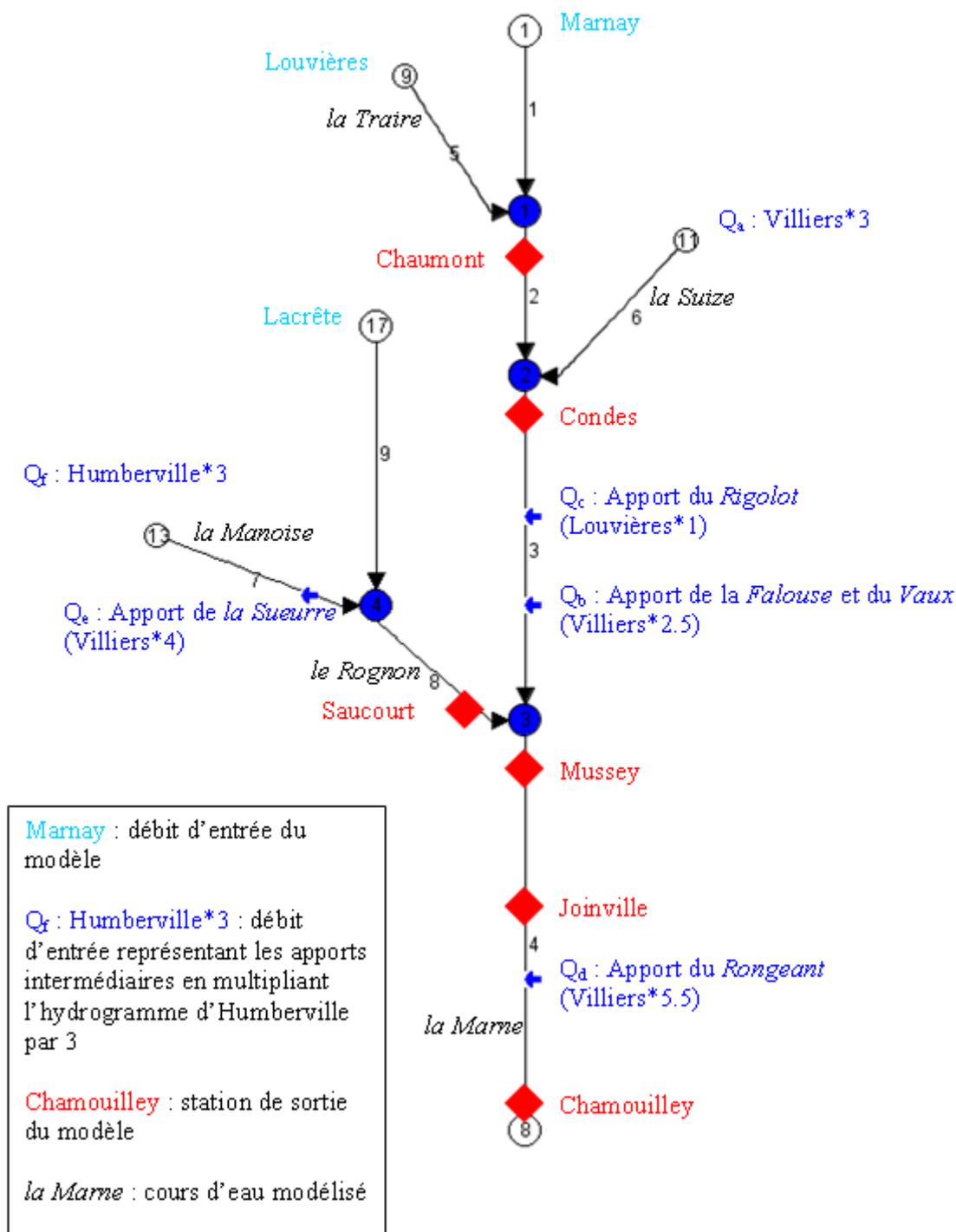


Figure 9 : schéma du modèle MAG sous Mascaret

Pour chaque profil, les limites lit mineur/lit majeur correspondent aux hauts de berges. Elles ont été fixées une par une par le modélisateur.

	bief	limite amont	limite aval	PK amont (m)	PK aval (m)	longueur (m)	nombre de profils
modèle Marne Amont Global	1	Marnay	confluence Traire-Marne	0	5172	5172	7
	2	confluence Traire-Marne	confluence Suize-Marne	5217	26970	21753	25
	3	confluence Suize-Marne	confluence Rognon-Marne	27740	73243	45503	27
	4	confluence Rognon-Marne	condition limite aval	73433	108883	35450	27
	5	Louvières	confluence Traire-Marne	108884	113033	4149	6
	6	Villiers	confluence Suize-Marne	113034	140134	27100	4
	7	Humberville	confluence Manoise-Rognon	140135	147635	7500	4
	8	confluence Manoise-Rognon	confluence Rognon-Marne	147735	170180	22445	8
	9	Lacrête	confluence Manoise-Rognon	170181	181000	10819	4

Tableau 4 : caractéristiques des biefs de la zone d'étude

2.1.1.2 Traitement des confluences

Les profils en travers utilisés ne permettaient pas de traiter correctement la confluence de la Marne avec la Traire et la Suize. En effet, la distance des profils à la confluence était trop grande et le dénivelé entre les profils trop importants. Or Mascaret fait les hypothèses d'égalité des côtes amont/aval et du fond au droit de la confluence. Le dénivelé trop grand rendait impossible la validation de cette hypothèse.

Pour résoudre ce problème, les trois profils les plus proches de la confluence ont été dupliqués à proximité immédiate de celle-ci permettant à Mascaret de traiter la confluence (la duplication des profils a permis de satisfaire les hypothèses faites par le code de calcul).

Cette technique a été appliquée aux autres confluences afin d'éviter les plantages du modèle (passage en écoulement torrentiel ou section à sec).

2.1.2 Conditions aux limites et points de sortie du modèle

Le modèle comporte dix conditions aux limites qui sont :

- 5 stations amont (Louvières, Marnay, Villiers, Humberville et Lacrête) : hydrogramme $Q(t)$. Les hydrogrammes de Villiers et d'Humberville ont été multipliés par les coefficients déterminés dans le tableau 3 (apports Q_a et Q_f).
- 4 apports ponctuels correspondant aux apports intermédiaires Q_b , Q_c , Q_d , Q_e identifiés figure 9 : hydrogramme $Q(t)$.
- 1 condition limite aval : un limnigramme $H(t)$ en régime permanent et une courbe de tarage $Q(h)$ en régime non-permanent. Afin de limiter l'influence de la condition limite aval à la station de prévision de Chamouilley, le parti pris a été de dupliquer le dernier profil en travers (correspondant à celui au droit de cette station) 700 m en aval et d'abaisser son altitude en respectant la pente moyenne local du cours d'eau. La courbe de targe de Chamouilley d'origine à elle aussi été modifiée en fonction de cette pente moyenne. Cette astuce permet, notamment en régime non-permanent, de limiter les effets de la courbe de tarage.
- Le modèle comporte six sorties correspondant aux stations de Chaumont, Condes, Mussey, Joinville Chamouilley et Saucourt.

Stations de sorties	Cote du Zéro de l'échelle (en m NGF)	Seuil de vigilance						Modèle Marne Amont Global	
		Seuil jaune		Seuil orange		Seuil rouge		Point kilométrique (en m)	Cote de fond (en m NGF)
		H (en m)	Q (en m ³ /s)	H (en m)	Q (en m ³ /s)	H (en m)	Q (en m ³ /s)		
Chaumont	251.1	1.4	45	2.15	101	2.45	140	24652	250.89
Condes	245.94	1.48	60	2.46	120	3.18	170	28044	245.74
Mussey	193.16	1.96	110	2.86	200	5.19	500	73438	192.5
Joinville	182.68	1.8	119	2.6	208	3.1	278	82063	181.42
Chamouilley	149.95	2.01	170	3.1	370	3.6	500	108183	149.3
Saucourt	205.74	non disponible						168135	204.94

Tableau 5 : caractéristiques des points de sortie du modèle

2.1.3 Pas de temps de calcul

Nous raisonnons au SPC au pas de temps horraire, le pas de temps des hydrogrammes d'entrée est donc de 1 heure. Le pas de temps de calcul est donc de 1 heure afin de reproduire au mieux les conditions réelles de travail.

2.1.4 Divers

- Pas de débordement progressif.
- Non conservation des frottements sur les parois verticales.
- Non pertes de charge automatiques aux confluent.

2.2 Calage du modèle

Cette étape constitue la première étape pour la mise en place d'un modèle opérationnel de prévision.

2.2.1 Méthodologie

Le principal objectif de cette étape est de déterminer les coefficients de frottement ou coefficient de Strickler (K_s) en lit mineur et en lit majeur de la zone d'étude en :

- ajustant graphiquement, en régime non permanent pour chacun des événements hydrologiques retenus, les coefficients lit mineur et lit majeur de telle manière que les débits et les hauteurs obtenus aux points de sorties du modèle soient les plus semblables possibles aux hydrogrammes et limnigrammes réels. De plus le déphasage temporel doit être minimum. Lors de cette phase de calage, on a utilisé en guise d'apports intermédiaires les hydrogrammes Q_a , Q_b , Q_c , Q_d , Q_e et Q_f multipliés par le coefficient multiplicatif A_i optimal pour chaque crue de calage déterminé lors de l'analyse hydrologique (cf. 1.6).

- puis en déterminant des coefficients moyens pour l'ensemble des événements.

Etant donné que les apports intermédiaires ont été pris en compte, le calage a été effectué dans un premier temps en débit, en comparant les hydrogrammes réels et modélisés des stations de sortie de l'amont vers l'aval puis affinés en hauteur dans un second temps au voisinage des points de sortie du modèle. Cette modification très locale des coefficients de Strickler impacte fortement les hauteurs d'eau mais n'influe quasiment pas sur les résultats en débit car les hauteurs sont une variable non-conservative, à la différence des débits.

Le second objectif est de définir les maillages et les planimétrages optimaux afin de réduire le temps de calcul sans dégrader les résultats. De plus, ces paramètres ont été localement affinés pour éviter les passages en régime torrentiel.

Les événements retenus pour le calage sont ceux déterminés dans le tableau 2 (cf.1.5.1).

2.2.2 Résultats du calage des coefficients de Strickler Ks

Biefs	Portions	PK début	PK fin	Ks mineur	Ks majeur
1	1	0	5172	24	12
2	1	5217	24599	24	12
	2	24600	24900	24	12
	3	24901	26970	25	12
3	1	27740	28400	34	30
	2	28401	34000	23	33
	3	34001	73243	24	14
4	1	73433	73600	20	13
	2	73601	82000	24	18
	3	82201	82500	14	10
	4	82501	108000	22	15
	5	108001	108883	18	26
5	1	108884	113033	24	12
6	1	113034	140134	16	12
7	1	140135	147635	10	7
8	1	147735	164000	9	7
	2	164001	164500	13	6
	3	164501	170180	11	9
9	1	170181	181000	9	7

Tableau 6 : coefficients de Strickler moyens retenus

Remarque :

- La portion 2 du bief 2 correspond au voisinage de la station de Chaumont.
- La portion 1 du bief 3 correspond au voisinage de la station de Condes.
- La portion 1 du bief 4 correspond au voisinage de la station de Mussey.
- La portion 3 du bief 4 correspond au voisinage de la station de Joinville.
- La portion 5 du bief 4 correspond au voisinage de la station de Chamouilley.
- La portion 2 du bief 8 correspond au voisinage de la station de Saucourt.

2.2.3 Résultats du calage du maillage

Biefs	PK début	PK fin	m maillage (m)
1	0	5172	50
2	5217	26970	25
3	27740	73243	50
4	73433	108883	50
5	108884	113033	50
6	113034	140134	50
7	140135	147635	50
8	147735	170180	50
9	170181	181000	50

Tableau 7 : maillage retenu (PK= point kilométrique)

Le maillage est défini section par section avec un pas de 50 m, 25 m pour le bief 2. Ce dernier est fin malgré la faible interdistance moyenne entre deux profils (900 m environ) du fait de la pente assez élevée (nous sommes en tête de bassin). Ce maillage évite ainsi le passage non désiré en régime torrentiel.

2.2.4 Résultats du calage du planimétrage

Le planimétrage consiste en un découpage en tranche horizontale (pas) des profils en travers. Un pas de planimétrage de 0.1 m signifie que les calculs vont être effectués par tranche de 10 cm.

Biefs	Portions	PK début	PK fin	planimétrage (m)
1	1	0	5172	0.1
2	1	5217	24000	0.05
	2	24001	26970	0.1
3	1	27740	30303	0.5
	2	30304	73243	0.1
4	1	73433	108883	0.25
5	1	108884	113033	0.1
6	1	113034	140134	0.1
7	1	140135	147635	0.1
8	1	147735	170180	0.1
9	1	170181	181000	0.1

Tableau 8 : planimétrage retenu

Il est de 0.1 m pour une majeure partie du modèle ce qui correspond à une valeur usuelle de calage, 0.05 m pour le bief 2 pour les mêmes raisons cités dans le paragraphe ci-dessus. Le pas de planimétrage est de 0.5 pour la portion 1 du bief 3 au voisinage de la station de Condes, cette valeur élevée permet d'éviter des oscillations récurrentes des résultats du modèle. Pour le bief 4, l'augmentation du pas de planimétrage permet de réduire le temps de calcul en ne dégradant pas les résultats.

2.2.5 Seuillage des lois amont

La phase de calage a aussi été l'occasion de tester la robustesse du modèle aux périodes d'étiage et aux crues extrêmes. Pour chaque station d'entrée du modèle MAG, on a déterminé des débits minimums et maximums en-dessous ou au-delà desquels Mascaret rencontre des sections à sec ou des côtes d'eau dépassant celles des profils en travers.

Stations	débit minimum (m ³ /s)	débit maximum (m ³ /s)
Marnay	2	70
Louvières	1.5	60
Villiers (apport a)	1	60
La Crête	1	60
Humberville (apport f)	1	60
Apport e	1	60
Apport b	1	60
Apport c	1	60
Apport d	1	60

Tableau 9 : seuils minimums et maximums des lois amont

2.3 Validation du calage

Cette étape a pour but de tester les coefficients de Strickler moyens déterminés ci-dessus sur des événements hydrologiques n'ayant pas été utilisés pour le calage. Ces crues de validation sont celles citées dans le tableau 2 (cf.1.5.1). Les crues de validation ont été testées d'une part avec les coefficients A_i d'apports intermédiaires optimisés déterminés lors de l'analyse hydrologique et d'autre part avec les coefficients moyens du tableau 3 qui seront utilisés au final en opérationnel.

Afin de comparer ces résultats, il est nécessaire d'introduire un paramètre objectif, l'efficacité qui permet d'évaluer la qualité du modèle. La formule de l'efficacité est la suivante :

$$1 - \frac{\sum [Q_{obs}(t + \Delta t) - Q_{modèle}(t)]^2}{\sum [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2} * 100$$

A cette comparaison des résultats, s'ajoute une critique graphique visuelle.

2.3.1 Résultats

Crues de validation	Résultats	Efficacités en %													
		Chaumont		Condes		Mussey		Joinville		Chamouilley		Saucourt		Moyennes	
		H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q		
2	apports optimisés			95.6	94	91.4	92.1			88.1	88.7	79.4	90.8	90.0	
	apports moyens			72.2	81.8	88.9	66.6			32.6	28	90.5	43.5	63.0	
4	apports optimisés			91.22	92.1	92.1	99.1			88	98.8	91.4	96.2	93.6	
	apports moyens			91.22	92.1	61.7	20.6			-136	-22	55.5	20	22.9	
5	apports optimisés	86.5	94	92.8	90.3	91.6	93.5	96.4	96.4	94.5	95.9	97.2	97.4	93.0	
	apports moyens	86.5	94	87.4	83.3	92.3	94.4	96.6	96.8	93.4	95.2	98.1	96.4	92.0	
6	apports optimisés	-939	44.8	48.9	43	96.5	95.7	43.6	69	-30	93.2	61.4	98.6	-22.9	
	apports moyens	-939	44.8	23.8	19.1	11.2	0.6	-199	-117	-525	-60.3	16.4	35.8	-140.7	
9	apports optimisés	76.8	82.5	95.8	97.35	94.9	90.8	66.1	81	-54.7	70.9	85.2	68.2	71.2	
	apports moyens	76.8	82.5	95.8	97.35	92.2	92.2	63.1	73.8	-53.3	73.8	71.4	74.7	70.0	
13	apports optimisés	93.7	92.2	90.6	91.4	80.4	90	67.9	77	84.9	88.4	90.3	94.9	86.8	
	apports moyens	93.7	92.2	72.8	60.9	75.6	81	53.9	63.4	51.2	59	87.1	77	72.3	
14	apports optimisés	94.1	94.4	92.4	90.4	90.3	89.9	83.2	91.9	88.4	91.4	92.6	86	90.4	
	apports moyens	94.1	94.4	82.6	78.8	86.3	84.9	73.7	87.1	55.5	67.7	89.9	87	81.8	
16	apports optimisés			87.8	92.9	93.1	94.4			84.2	89	81.7	85.2	88.5	
	apports moyens			81.1	74.6	91.9	71.8			63.1	59.6	53.7	53.8	68.7	
18	apports optimisés	74.1	79	95.3	97.4	96.7	94.9	83.1	93.4	33.7	91.1	93	97.1	85.7	
	apports moyens	74.1	79	83.7	71.8	83.5	63.2	37.4	56.5	-66.1	45.7	80.7	69.2	57.4	
19	apports optimisés	89.5	93.9	96.7	94.8	90.2	76.5	47.6	73	-20.6	83.1	62	90	73.1	
	apports moyens	89.5	93.9	96.7	94.8	77.5	57.8	17	50.1	-66.2	69.7	80.3	60.6	61.0	
Moyennes	apports optimisés	85.8	87.7	93.1	93.4	91.2	91.2	74.1	85.5	54.1	88.6	85.3	89.5	85.0	
	apports moyens	85.8	87.7	84.8	81.7	83.3	70.3	57.0	71.3	-0.6	53.0	78.6	64.7	68.1	

Tableau 10 : efficacités obtenues aux stations de sortie en hauteur et débit pour les dix crues de validation

On obtient les meilleures efficacités pour les quatre crues ayant dépassées les seuils de vigilance jaune à toutes les stations, c'est-à-dire les crues 2, 5, 14 et 16 et la meilleure efficacité pour la crue 5 qui a dépassé le seuil de vigilance orange à Mussey. On obtient la moins bonne efficacité pour l'épisode 6 et 9 où les débits sont les plus faibles, cette non-crue (la 6) n'a pas été prise en compte pour le calcul des efficacités moyennes par station.

La moyenne des efficacités des apports moyens décroît d'amont en aval car les erreurs engendrées par l'estimation des apports intermédiaires par un coefficient A_i s'accroissent.

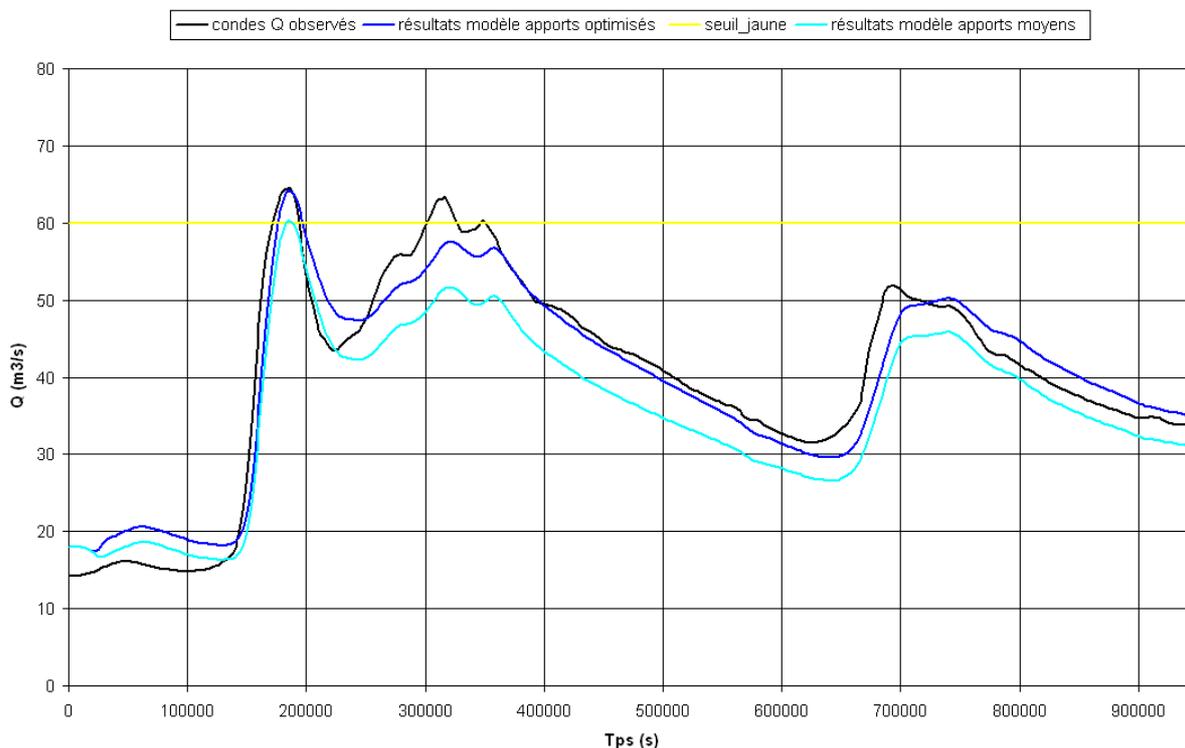


Figure 10 : comparaison des débits observés et modélisés à Condes de la crue de validation 2

Lorsque l'on injecte dans le modèle des apports intermédiaires optimisés (issues de l'analyse hydrologique), on obtient de bons résultats, on observe peu ou pas de décalage temporel entre les hydrogrammes et limnigrammes observés et modélisés (figure 10). Les coefficients de Strickler moyens retenus sont donc bien adaptés aux différents épisodes de crue de validation.

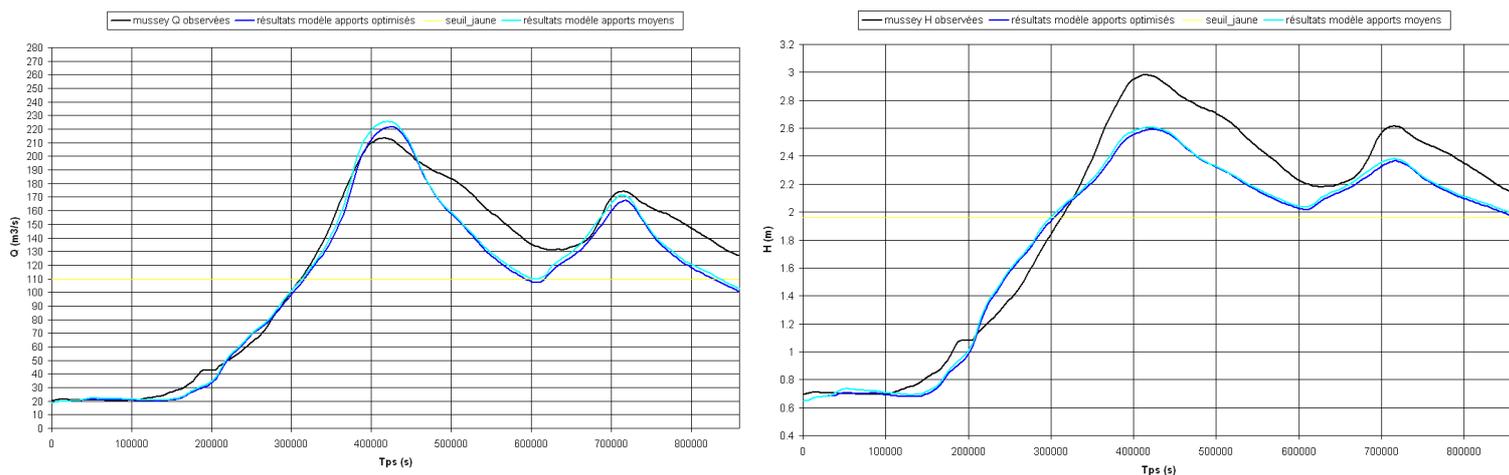


Figure 11 : comparaison des hauteurs et des débits modélisés à Mussey de la crue de validation 5

Ces résultats satisfaisants peuvent être nuancés : ci-dessus (figure 11), on remarque que pour la crue 5, les débits modélisés à Mussey sont meilleurs que les résultats en hauteur. Les coefficients de Strickler au droit de la station de Mussey ne sont pas adaptés à une gamme de débits si élevés (le seuil orange de 200 m³/s est franchi) d'où la sous-estimation des

hauteurs d'eau. On remarque ce phénomène aussi à Chamouilley. Une solution pour remédier à ce problème serait probablement d'affiner la description du lit majeur en ajoutant des profils supplémentaires au voisinage de ces deux stations.

De la même manière, pour une gamme de débit faible, le modèle arrive à retranscrire un hydrogramme modélisé comparable à l'observé (figure 12 ci-dessous) mais les résultats en hauteur sont sous-estimés. La station de Chamouilley se situe au droit d'un pont non décrit dans la géométrie du modèle (par manque de données), on suppose que la cote du radier du pont doit être plus élevée que la cote de fond du profil situé quelques mètres en amont de la station ce qui explique ce déficit de hauteur en bas débit. Si on diminuait les K_s du lit mineur au voisinage de la station de Chamouilley, on pourrait rattraper artificiellement ce manque de hauteur d'eau mais cela aurait aussi pour conséquence de fausser les limnigrammes dans des gammes de débits plus élevés, or ce qui nous intéresse dans un service de prévision des crues, c'est d'anticiper une crue.

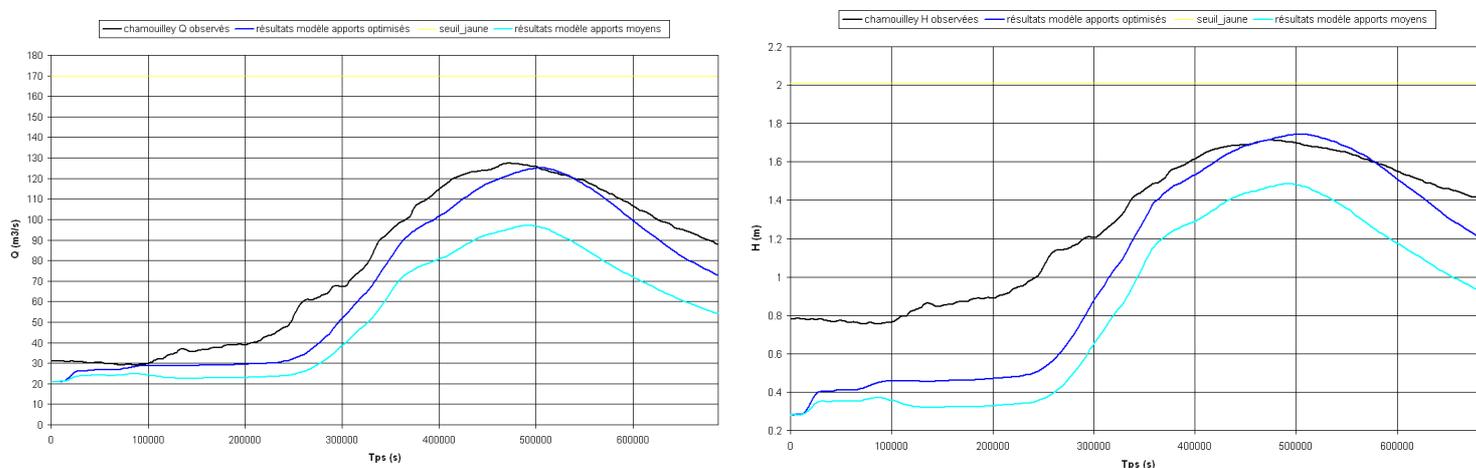


Figure 12 : comparaison des hauteurs et des débits modélisés à Chamouilley de la crue de validation 18

2.3.2 Conclusion de la validation du calage

Lorsque les débits d'entrée du modèle sont correctement estimés, on observe de bons résultats en débit aux six stations de sortie du modèle. Les pics sont correctement représentés sans décalage temporel, il en va de même pour les stations de Chaumont, Condes et Saucourt en hauteur. Pour les stations situées plus à l'aval (Mussey, Joinville et Chamouilley), on observe quelques sous-estimations de hauteurs modélisées dans les gammes de débits extrêmes.

2.4 Validation opérationnelle et recalage

Après la phase de calage, le modèle est testé en conditions temps réel afin d'évaluer sa performance en prévision et de décider de son passage en opérationnel.

Afin de comparer les différents résultats, il est nécessaire d'introduire des paramètres objectifs :

- l'efficacité qui permet d'évaluer la qualité du modèle,
- la persistance qui permet d'évaluer la performance prévisionnelle du modèle, la formule de la persistance est la suivante :

$$1 - \frac{\sum [Q_{\text{modèle}}(t + \Delta t) - Q_{\text{obs}}(t + \Delta t)]^2}{\sum [Q_{\text{obs}}(t) - Q_{\text{obs}}(t + \Delta t)]^2} * 100$$

A cette comparaison des résultats, s'ajoute une critique graphique visuelle.

2.4.1 Méthodologie

La mise en temps réel nécessite de :

- connaître le temps de prévision à chaque station, qui correspond au temps de propagation minimum du système hydraulique,
- construire des hydrogrammes adaptés au test en temps réel,
- ajuster les résultats du modèle afin que ceux-ci soient plus performants en tenant compte des différences entre les prévisions du modèle et les observations. Cela nécessite de mettre au point des règles de recalage des sorties du modèle. Le principe est de mettre en place une règle de recalage temps réel qui améliore les trois paramètres de test.

2.4.1.1 Choix du délai de prévision

Le délai de prévision correspond au temps de propagation minimum du système hydraulique entre les stations les plus en amont et les points de sortie du modèle. Ils sont variables pour toutes les stations de sortie du modèle selon la gamme de débits de l'événement hydrologique. Pour le domaine de la prévision des crues, plus il est élevé, plus on peut anticiper les dépassements de seuil de vigilance mais plus il y a d'incertitudes sur les prévisions.

Ces délais sont connus. Pour une crue dépassant les seuils de vigilance jaune sur le tronçon Marne amont, on estime que les délais de prévision optimum sont de :

- 5h à Chaumont
- 6h à Condes
- 12h à Mussey
- 13h à Joinville
- 21h à Chamouilley
- 10h à Saucourt

2.4.1.2 Construction des hydrogrammes temps réel

Afin de tester au mieux la performance des modèles, la méthodologie adoptée est semblable à celle qu'on peut avoir en utilisant le programme Rejeu de SOPHIE (module permettant de rejouer des crues antérieures dans les conditions réelles). L'hydrogramme prévu est construit heure par heure à chaque station à partir des hydrogrammes d'entrée. Cette opération a été réalisée automatiquement à l'aide du logiciel TRSAMU développé au sein du SPC SAMA.

Pour cela, à un instant t , les hydrogrammes de Marnay, Louvières, Villiers, Lacrête, Humberville et des apports Q_b , Q_c , Q_d , Q_e prolongent la dernière valeur du débit du temps de propagation entre la station d'entrée la plus en amont et le point de sortie le plus en aval, obtenant ainsi un hydrogramme plat sur une durée égale à $t+t_p$ (cf. figure 13 : hydrogramme d'entrée temps réel).

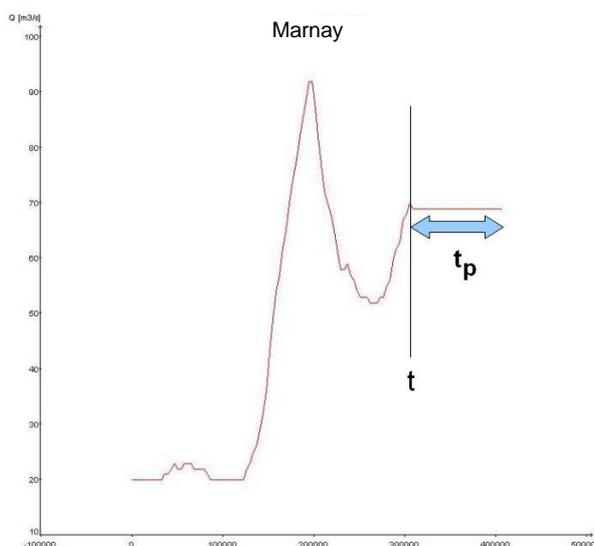


Figure 13 : hydrogramme d'entrée temps réel

On procède comme suit aux pas de temps suivants. A chaque run de Mascaret, les hydrogrammes prévus aux stations de prévision se construisent automatiquement.

2.4.1.3 Ajustement temps réel

La chaîne temps réel Mascaret du logiciel TRSAMU développée par le SPC SAMA intègre un module d'ajustement temps réel à partir des données observées aux stations de prévision. Il permet de construire des prévisions « brutes » du modèle ainsi que des résultats « ajustés » visualisables sur le superviseur SOPHIE.

Le recalage en temps réel des sorties du modèle Mascaret doit améliorer la confiance du prévisionniste dans les résultats de prévision. La validation a fait apparaître des écarts entre les sorties du modèles et les observations, notamment lorsque l'on utilise pour simuler les apports intermédiaires des coefficients multiplicateurs moyens, pénalisant ainsi l'utilisation opérationnelle. Pour atténuer ces erreurs, le parti pris a été de corriger la valeur prévue par le modèle Mascaret à $t+t_p$ de la différence de débit ou de hauteur entre les valeurs prévues et observées à t suivant les règles de recalage suivantes :

$$Q_{\text{recalé}}(t + \Delta) = Q_{\text{mascaret}}(t + \Delta) + \frac{(Q_{\text{observé}}(t) - Q_{\text{mascaret}}(t))}{\alpha}$$

$$H_{\text{recalé}}(t + \Delta) = H_{\text{mascaret}}(t + \Delta) + \frac{(H_{\text{observé}}(t) - H_{\text{mascaret}}(t))}{\alpha}$$

t : instant de la dernière observation

Δ : délai de prévision

α : coefficient de recalage

2.4.2 Résultats des prévisions temps réel et du recalage

Les événements testés sont les dix crues de validation présentées dans le tableau 2 (cf. 1.5.1). Les débits d'apports intermédiaires injectés dans le modèle sont les hydrogrammes des stations déterminés dans l'analyse hydrologique multiplié par un coefficient A_i moyen.

Pour les dix crues de validation, on a calculé l'efficacité et la persistance aux six stations de sortie (en hauteur et en débit) des prévisions brutes et recalées selon la loi d'ajustement présentée ci-dessus (avec $\alpha=2$).

Crues de validation	Résultats	Efficience (%)											
		Chaumont		Condes		Mussey		Joinville		Chamouilley		Saucourt	
		H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
2	Bruts			-19	36.6	43.7	-19.7			-277.8	-248.1	54.9	-69.5
	Recalés			53.3	70.2	74.3	62.4			-51	-4	83.9	52
4	Bruts			84.7	85.6	-48.3	-140.7			-1183.4	-513.3	-15.2	-112.9
	Recalés			89.8	90	47.2	28.7			-248.7	-88	66.7	40
5	Bruts	79.1	80.4	75.4	71	77.9	87.6	95.2	89.7	79.7	83.65	95.2	91.2
	Recalés	92.5	92.1	91.4	89.7	90.7	91.3	95.9	92.1	88.9	89.4	96.4	93.7
6	Bruts	-2306	27	-44.5	16.4	-595	-467.4	-1386.6	-817.2	-3881	-793.4	-145	-132.5
	Recalés	-558	73.2	31.5	54.2	-100.2	-60.2	-277.3	-137.8	-820.2	-87.3	31.2	35.8
9	Bruts	90.3	84.3	88.4	88.5	-17.8	44	-38.2	-94.6	-106.5	-53	-187.8	-17.9
	Recalés	97.3	94.5	89.3	89.3	-32.7	29	-115.9	-100.8	-1180	-289.9	-103.5	8.8
13	Bruts	91.6	80.5	15.7	-7.7	18.1	30.8	-95.7	-43.3	-130.2	-152.1	59.5	21
	Recalés	95.3	91.2	74.3	68.7	70.3	68	26.5	47.3	-37.1	-6.8	85.3	72.5
14	Bruts	94	92.9	75.9	70.6	76.8	70.2	48.4	75.4	12.2	33.9	85.7	81
	Recalés	97.4	96.2	92.2	90.7	87.9	83.4	75.8	84	54.3	68.6	92.7	88.4
16	Bruts			69	57.3	18.8	7			-23.2	-59.9	-286	-7.5
	Recalés			90.6	87.6	72.2	65.9			57	44.2	-14.2	65.1
18	Bruts	78.6	74.7	77.9	62.3	72.8	40.3	-8.9	27.5	-551.7	-116.6	76.8	57.1
	Recalés	92.5	91.3	92.9	88.6	90.2	80.6	70	78.4	-73.4	15.9	92.5	86.7
19	Bruts	93.6	92.8	94.6	92.5	42.5	-27.8	-140.4	-36.1	-134.5	7	60	-108.6
	Recalés	95.1	93.8	94.4	94.3	53.8	56.6	-31.9	25	-292.5	-19	54.1	15.9
Moyennes	Bruts	-254.1	76.1	51.8	57.3	-31.1	-37.6	-218.0	-114.1	-619.6	-181.2	-20.2	-19.9
	Recalés	1.7	90.3	80.0	82.3	45.4	50.6	-22.4	12.6	-250.3	-27.7	48.5	55.9
Moyennes sans extrêmes	Bruts	86.6	82.5	58.5	61.0	25.8	0.5	-47.0	-14.2	-299.4	-137.8	-1.4	-19.7
	Recalés	94.5	92.6	84.2	84.4	57.9	59.3	4.9	26.8	-176.5	-9.6	61.5	57.1

Tableau 11 : efficacités obtenues des prévisions brutes et recalées

Crues de validation	Résultats	Persistence (%)											
		Chaumont		Condes		Mussey		Joinville		Chamouilley		Saucourt	
		H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
2	Bruts			-46.9	11.7	7.2	-120.7			-182.1	-187.2	16.2	-327
	Recalés			40.2	57.5	51.3	22.2			-47.5	15.4	67	-25.7
4	Bruts			68	74.4	-135.14	-343			-418.2	-207.9	-360.5	-689
	Recalés			78.8	82.2	16.2	-31.2			-69	-4.7	-29.6	-122
5	Bruts	17.2	27.85	-12	-23	29.1	61.8	83.9	74	23	86	72.1	66.2
	Recalés	70.1	70.8	60.9	56.5	69.5	73.2	87.6	80.3	91	90.9	79.8	75.7
6	Bruts	-11439	-254.3	-249	-137.2	-412	-421.7	-1310	-882.9	-2563.4	-523.4	-298.1	-301.6
	Recalés	-3079	-27.8	-64.4	-23	-67.7	-58.9	-259.2	-178.8	-723.2	-49.3	2.4	-11.6
9	Bruts	68	66.2	88.2	88.1	61.8	75.3	46.5	39.4	82.7	89.3	-31.1	43.1
	Recalés	91.2	88.5	89.3	88.9	63.2	73.6	48.1	44.5	-95.6	61.3	9.6	57.8
13	Bruts	77.6	57.4	-92	-144.6	-50.2	-45.7	-217.6	-180.6	-29.7	-68.5	-79	-213.8
	Recalés	87.6	80.5	39.9	27.6	45.7	32.8	-18.1	-4.3	-2.1	28	34.7	-12.3
14	Bruts	71.2	71.6	-0.9	15.5	31.4	12.8	-46.9	31.5	-21	14.5	35.9	48.3
	Recalés	87.5	84.9	67.5	63.3	64.1	51.2	30.3	55.5	44.3	56.8	67.3	68.8
16	Bruts			-8	-49.7	-58.2	-87.2			-4.3	-37.9	-202.2	-90.8
	Recalés			67	56.3	44.9	31.9			59.2	53.1	12	36.6
18	Bruts	-89.8	-90.5	-82.2	-199.1	-22.4	-151.5	-371.4	-209.1	-449.3	-137.3	-131.2	-289.2
	Recalés	37.9	34.8	41.3	10.1	55.7	18.2	-30.4	7.8	-31.6	22.6	31.4	-20.2
19	Bruts	83.2	85.69	87	83.7	65.3	28.3	-4.3	32.8	40.1	75.6	56	68.6
	Recalés	89.4	87.9	87.5	87.3	75.4	72.2	49.4	64.9	-112.6	60.5	54.2	28.2
Moyennes	Bruts	-1601.7	-5.2	-24.8	-28.0	-48.3	-99.2	-260.0	-156.4	-352.2	-89.7	-92.2	-168.5
	Recalés	-373.6	59.9	50.8	50.7	41.8	28.5	-13.2	10.0	-88.7	33.5	32.9	7.5
Moyennes sans extrêmes	Bruts	28.8	26.5	-10.9	-21.2	-17.1	-80.7	-118.7	-57.2	-130.2	-57.8	-79.2	-132.8
	Recalés	74.5	71.8	60.4	55.1	51.3	33.8	15.9	33.7	-31.9	36.6	34.8	15.2

Tableau 12 : persistances obtenues des prévisions brutes et recalées

Les approximations faites par l'injection dans le modèle d'apport intermédiaires ayant le même coefficient multiplicateur s'accumulant, les efficacités et les persistances décroissent de l'amont vers l'aval. Les stations de Condes, Chaumont et Saucourt donnent des prévisions fiables mais à des échéances courtes, respectivement 5, 6 et 10h. Pour les stations de Mussey, Joinville et Chamouilley, les efficacités sont moins bonnes mais en terme de persistance les résultats sont corrects, on observe peu de décalage temporels entre les hydrogrammes prévus et observés.

Pour les événements hydrologiques de moindre importance, la station de Villiers ne réagit pas forcément, il faut une certaine quantité de pluie pour mettre en charge les karsts. Or cette station est injectée 14 fois dans le modèle (lorsque l'on somme les coefficients multiplicateurs) ce qui explique que plus les crues ont des débits importants, meilleurs sont les résultats car Villiers devient représentative de la réaction hydrologique du bassin versant du tronçon Marne Amont.

Les prévisions en débit donnent en général de meilleurs résultats que les hauteurs prévues notamment aux stations de Mussey et Chamouilley. Comme expliqué dans la validation du calage, les Ks au droit de ces stations sont adaptés pour des débits de crues moyennes.

		Efficience (%)				Persistence (%)			
		Résultats	H	Q			Résultats	H	Q
Moyennes	Bruts		-181.9	-36.6	Moyennes	Bruts		-396.5	-91.2
	Recalés		-16.2	44.0		Recalés		-58.3	31.7
Moyennes sans extrêmes	Bruts		-29.5	-4.6	Moyennes sans extrêmes	Bruts		-54.5	-53.9
	Recalés		21.1	51.8		Recalés		34.2	41.0

Tableau 13 : moyennes sur l'ensemble des crues de validation des efficacités et persistances obtenues des prévisions brutes et recalées

La loi de recalage des données brutes par rapport à l'observation améliore les prévisions en termes d'efficience et de persistance. Ces scores pourraient être largement améliorés en diminuant la valeur d' α . En tenant totalement compte de la différence entre la valeur observée et modélisée à t , les prévisions à $t+t_p$ sont excellentes lorsque la variation entre t et $t+t_p$ des hauteurs ou des débits est faible, autrement dit quand la différence est stable. Or en montée ou à l'approche du pic de crue, la règle de recalage peut dégrader les prévisions en les surestimant ce qui explique qu'on lui applique un coefficient α égal à 2 (figure 14).

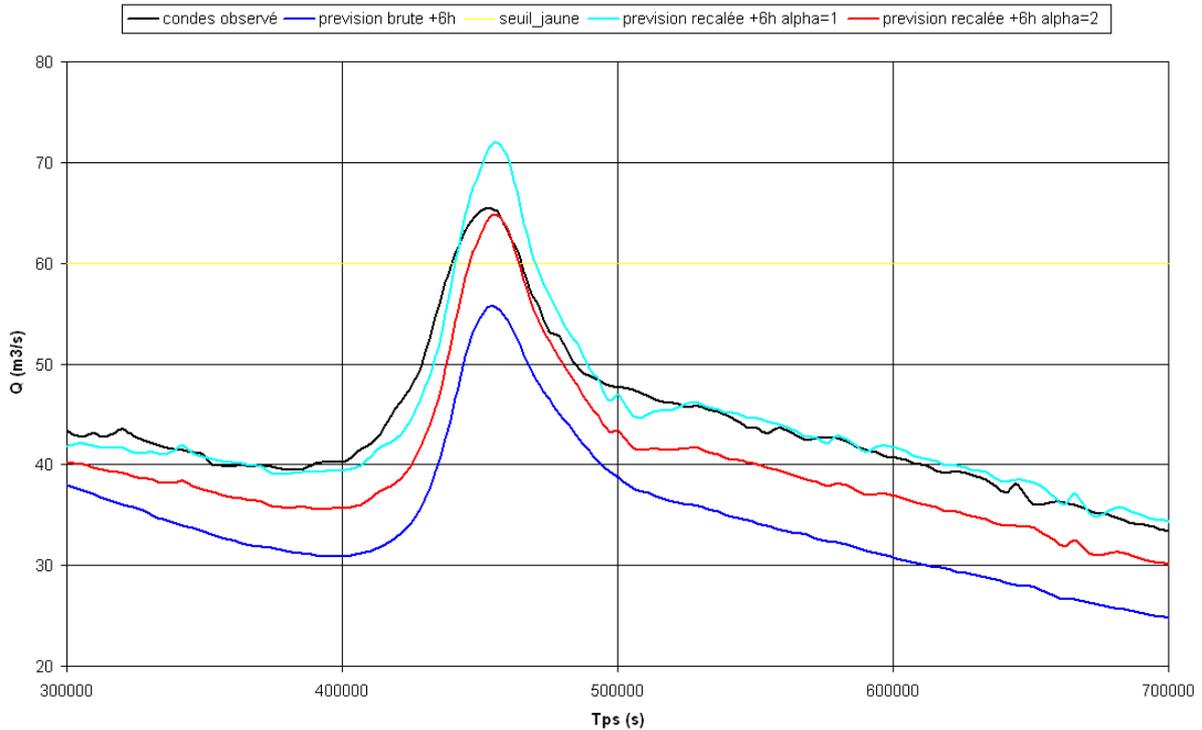


Figure 14 : prévisions brutes et recalées à Condes à 6h en débit

2.4.3 Conclusion du test opérationnel

Le modèle MAG est capable de fournir des prévisions de hauteurs d'eau et de débits aux stations de Chaumont, Condes, Saucourt, Mussey, Joinville et Chamouille à respectivement 5, 6, 10, 12, 13 et 21h. La fusion des deux modèles Mascaret d'origine et l'intégration du bassin versant du Rognon au modèle MAG a permis d'accroître les temps de prévisions de ces trois dernières et de disposer de prévisions en hauteur et en débit à la station de Saucourt. Au vu de ses performances, le modèle MAG est validé et peut dès à présent être mis en opérationnel au SPC SAMA pour la saison hydrologique hivernale 2011-2012.

Toutefois, le modèle MAG peut être amélioré en retravaillant ou en ajoutant des profils en travers afin d'améliorer les résultats en hauteur au droit des stations de sortie notamment

au niveau de la description des bassins versants de la Suize et du Rognon (qui sont formés en partie de profils théoriques), de la confluence du Rognon et de la Marne à la station de Mussey et enfin de la station de Chamouilley en ajoutant le profil topographique du pont sous lequel cette station est implantée.

Malgré la règle de recalage, les résultats aux stations de Mussey, Joinville et Chamouilley peuvent être sous-estimés du fait de la non-réaction de la station karstique de Villiers qui contribue majoritairement à la prise en compte des apports intermédiaires. Pouvoir modifier en temps réel les coefficients multiplicateurs des débits d'apports pourrait atténuer ce phénomène ce qu'est en mesure de réaliser le prototype d'assimilation de données développé par le CERFACS.

3 Mise en place du prototype d'assimilation de données MAD (MACSARET avec Assimilation de Données)

L'assimilation de données est une technique mathématique qui combine diverses informations sur un système afin d'améliorer la description de ce système. Ces techniques historiquement appliquées en météorologie et en océanographie sont actuellement appliquées à l'hydraulique. Le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique) en collaboration avec le LNHE (EDF R&D), le CETMEF et le SCHAPI a développé un prototype d'assimilation de données appliqué au code de simulation numérique d'hydraulique Mascaret appelé MAD (Mascaret avec Assimilation de Données) décrit dans Piacentini *et al.*, 2011.

L'algorithme d'assimilation de données BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) permet de combiner des informations simulées et observées en tenant compte de leurs incertitudes afin de se rapprocher de l'état hydraulique réel de la rivière.

Les incertitudes peuvent être liées aux observations :

- erreurs de mesures des hauteurs d'eau ou à la modélisation.
- erreurs liées à la levée des profils topographiques
- incertitudes sur les débits issus de la transformation des hauteurs par une courbe de tarage

Elles peuvent aussi être liées à la modélisation :

- incertitudes sur l'estimation des apports intermédiaires
- erreurs sur les coefficients de Strickler
- les approximations du modèle Mascaret

A partir de cet algorithme, le CERFACS a créé une plate-forme informatique permettant de corriger d'une part les lois hydrauliques imposées aux extrémités libres, les débits d'entrée du modèle dans notre cas et d'autre part l'état initial du modèle en modifiant la ligne d'eau initiale, les deux approches pouvant être enchaînées. Les détails algorithmiques et l'implémentation de cette technique sont donnés dans Ricci *et al.*, 2011. Les principes mathématiques et la présentation de la maquette sont décrits dans la partie 3.2 et 3.3. L'application au modèle MAG et les résultats finaux sont présentés en partie 3.4 et 3.5. Nous allons dans un premier temps décrire en quoi consiste concrètement le prototype d'assimilation de données MAD.

3.1 Exemple d'enchaînement des étapes d'assimilation de données

La maquette actuelle permet de tester les effets de l'assimilation de données sur des événements passés en rejouant la crue (mode réanalyse) mais aussi d'effectuer sur la base de ces événements passés des prévisions corrigées pour chaque pas de temps comme en situation opérationnelle temps réel (mode prévision).

Le schéma ci-dessous (figure 15) présente les deux étapes d'assimilation de données, la correction des lois amont (étape 1), la correction de l'état initial (étape 2), puis l'enchaînement des deux.

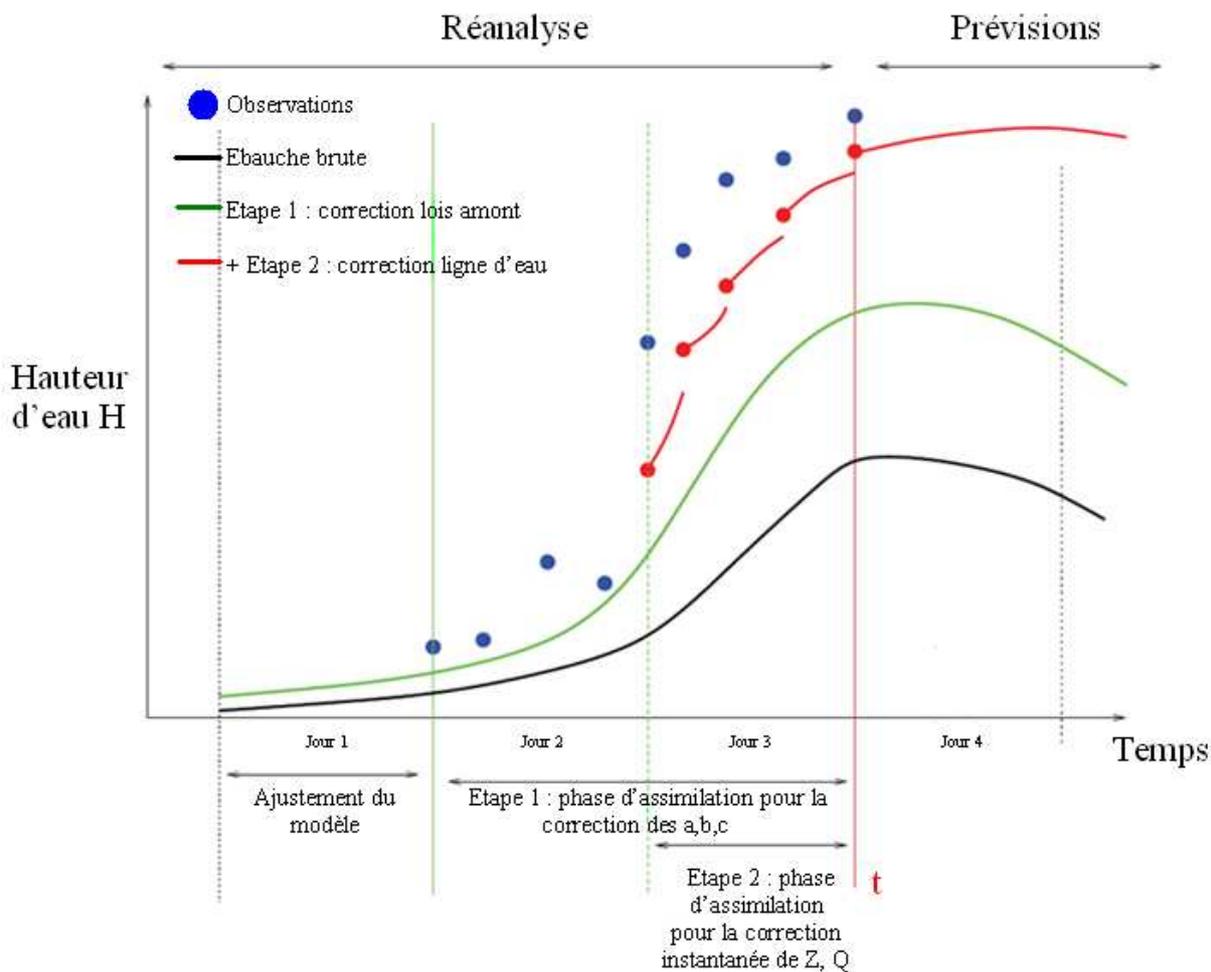


Figure 15 : enchaînement des deux type d'assimilation

L'analyse est faite sur une fenêtre glissante de 4 jours, 3 jours en réanalyse, 1 jour en prévision. A l'instant t , on dispose d'observations et d'une ébauche. On assimile les hauteurs d'eau sur les jours 2 et 3 pour corriger les lois amont, sur le jour 3 pour corriger la ligne d'eau. On observe un manque de hauteur d'eau sur les jours 2 et 3, MAD lance des simulations avec des vecteurs de contrôle (lois amont) perturbés par des coefficients a , b et c . En fonction des écart-types des erreurs d'observation et d'ébauche, des résultats aux perturbations, on identifie les valeurs analysés de a , b , c qui permettent de modifier les lois amont pour obtenir des hauteurs d'eau modélisées plus proches de celles observées, c'est la phase de CALAGE (courbe verte).

Puis, on corrige instantanément la ligne d'eau initiale du modèle en fonction des observations en tenant compte des erreurs durant le jour 3 pour chaque pas de temps d'observation. Lancée seule, cette analyse est appelée ASSIM. Dans l'exemple ci-dessus, la correction de la ligne d'eau initiale vient s'ajouter à la correction apportée par le calage (CALAGEASSIM, en rouge).

3.2 Principes mathématiques

3.2.1 Correction des lois amont

La première étape d'assimilation implémente une méthode de type BLUE (Bouttier et Courtier, 1999) pour corriger les lois hydrauliques imposées aux extrémités libres à partir des observations aux stations de mesure en hauteur d'eau ou en débit sur un intervalle de temps précédant le temps de début de la prévision (processus appelé CALAGE).

Si l'on voulait contrôler les valeurs des lois de forçage en débit à tout instant on obtiendrait un vecteur de contrôle de taille égale au nombre des lois fois le nombre de pas de temps du modèle ce qui est décidément excessif. Pour cette raison nous avons restreint les transformations des lois à des transformations linéaires de type $loi_j(t) = a_j * loi_j(t - c_j) + b_j$. Il s'agit donc de déterminer seulement au maximum 3 coefficients par loi. Le paramètre a_j correspond à un coefficient multiplicateur des débits, b_j à un ajout constant de débit et le paramètre c_j équivaut à un décalage temporel de l'hydrogramme d'apports. La taille du contrôle sera donc au plus 3 fois le nombre de lois.

Le vecteur de contrôle dans cette étape est constitué des vecteurs a, b, c pour chaque station $x_i = (a_1, b_1, c_1, \dots, a_s, b_s, c_s)$ ou S est le nombre de stations de forçage.

Il est nécessaire de se fixer un intervalle temporel sur lequel comparer les résultats du modèle et les observations comme critère pour le calage de quelques paramètres du modèle comme les coefficients de Strickler, une condition limite de type marégraphe ou comme dans notre cas d'étude certains débits d'entrée du modèle.

On définit un opérateur d'observation généralisé \mathbf{G} qui relie les variations du contrôle aux variations des valeurs observées sur l'intervalle choisi. On utilisera ensuite sa version linéarisée au voisinage de l'ébauche $\underline{\mathbf{G}}$. En définissant les matrices des variances/covariances d'erreur sur les observations ($\underline{\mathbf{R}}$) et sur l'ébauche du contrôle ($\underline{\mathbf{B}}$), le contrôle issu de l'assimilation sera

$$\underline{\mathbf{x}}^a = \underline{\mathbf{x}}^b + (\underline{\mathbf{B}}^{-1} + \underline{\mathbf{G}}^T \underline{\mathbf{R}}^{-1} \underline{\mathbf{G}})^{-1} \underline{\mathbf{G}}^T \underline{\mathbf{R}}^{-1} \underline{\mathbf{d}}$$

où $\underline{\mathbf{d}}$ est le vecteur d'innovation ou misfit (écart maximum avant rejet) sur l'intervalle choisi $\underline{\mathbf{d}} = \underline{\mathbf{y}}^o - \underline{\mathbf{G}}(\underline{\mathbf{x}}^b)$.

L'opérateur \mathbf{G} représente la composition de deux opérations mathématiques : l'une représentant l'intégration du modèle numérique sur la période d'assimilation et l'autre la sélection des champs simulés aux points d'observations.

Dans les faits, on va observer les effets aux stations d'observations des perturbations des coefficients a, b et c des lois amont que l'on veut contrôler. L'opérateur d'observation non linéaire \mathbf{G} relie les éléments du vecteur de contrôle (donc un jeu de coefficients a_j, b_j, c_j) aux observations en correspondance des stations de mesure. Pour estimer la matrice $\underline{\mathbf{G}}$, il faudra effectuer une seule simulation de référence pour l'ébauche et autant de simulation perturbées que de coefficients à contrôler. La variance des erreurs d'ébauches (matrice $\underline{\mathbf{B}}$) sera spécifiée pour chaque coefficient a, b, c .

Dans l'implémentation actuelle, les lois amont peuvent être corrigées à partir d'ébauches et d'observations en hauteur d'eau ou en débit. Dans ce dernier cas, l'unité de la matrice $\underline{\mathbf{R}}$ des variances des erreurs d'ébauches sera le m^3/s et nom le m .

Vu qu'une perturbation d'une loi amont peut avoir des répercussions sur plusieurs stations d'observations, il est possible de contrôler les paramètres a, b, c d'une station d'entrée à partir des hauteurs d'eau ou des débits de plusieurs stations d'observations.

3.2.2 Correction de la ligne d'eau

La seconde étape d'assimilation implémente une méthode de type BLUE pour la correction dynamique de la ligne d'eau en hauteur puis en débit (processus nommé ASSIM). Mascaret représente une ligne d'eau par les valeurs de la hauteur d'eau Z et du débit Q sur chacune des n sections du maillage qui discrétise le domaine modélisé. Cette correction est séquentielle, pour corriger la ligne d'eau à un instant donné il faut donc contrôler les n valeurs de Z et les n valeurs de Q. Par rapport à la chaîne d'assimilation précédente, il n'est pas nécessaire de se fixer un intervalle temporel sur lequel comparer l'ébauche et les observations. Nous voulons ici modifier progressivement l'état du système en y apportant systématiquement une correction additive séquentielle pur chaque temps d'observation.

On considère que \underline{x} est l'état hydraulique (x est de taille $2N$ ou N est la taille du domaine), si à un instant donné le modèle a fourni une ébauche \underline{x}^b de la quantité que nous voulons contrôler et que nous disposons d'observations \underline{y}^o du système au même instant, nous corrigeons \underline{x} avec un incrément obtenu linéairement de \underline{y}^o

$$\underline{x}^a = \underline{x}^b + \underline{Kd} \text{ où } \underline{d} = (\underline{y}^o - \underline{Hx}^b) \text{ et } \underline{K} = \underline{BH}^T(\underline{HBH}^T + \underline{R})^{-1}$$

\underline{H} représente un opérateur qui permet de passer des quantités modélisées aux quantités observées. L'opérateur d'observation H est une matrice de dimension $P \times 2N$ où P est le nombre d'observation au temps d'analyse. \underline{R} est la matrice des variances/covariances des erreurs associées aux hauteurs d'eau observées (vecteur d'observation Z), les variances seront spécifiées pour chaque station d'observation en mètre. \underline{B} est la matrice des variances/covariances des erreurs associées à l'ébauche c'est-à-dire les hauteurs modélisées), les variances seront spécifiées pour chaque point de sortie du modèle en mètre.

Dans Mascaret, à chaque pas de temps, la ligne d'eau est composée des hauteurs et des débits sur chacune des sections du maillage. Une modification de la hauteur d'eau seule peut entraîner des désaccords avec la physique du modèle. La correction des débits Q est calculée à partir de la correction calculée sur la variable observée Z via les courbes de tarage renseignées aux stations d'observations.

Les corrections apportées à chaque pas de temps à la ligne d'eau au droit de chaque station d'observation doivent être réparties spatialement en amont et en aval afin d'éviter les changements brusques de hauteurs d'eau et de débits entre deux sections de maillage, ces distances sont appelées longueur de corrélation.

3.3 Présentation de la maquette

Le prototype MAD fonctionne avec un système d'exploitation UNIX. Le logiciel d'hydraulique Mascaret est utilisé sans son interface Fudaa. Les informations propres au modèle MAG sont inscrites dans le fichier mascaret.cas. Pour effectuer une simulation hydraulique Mascaret, on doit lancer l'exécutable mascaret.exe accompagné du fichier .cas ainsi que d'un fichier .geo (topographie et bathymétrie), d'un fichier .lig (ligne d'eau initiale) et d'autant de fichier .loi que de conditions limites amont ou aval (débits d'entrée, courbe de tarage).

Pour être enrichi du module d'assimilation de données, le code source de Mascaret a du être modifié et couplé au logiciel PALM selon le type d'assimilation choisi. PALM (Projet d'Assimilation par Logiciel Multiméthode) est un coupleur développé par le CERFACS utilisé

par la communauté scientifique dans des domaines variés comme l'assimilation de données, le couplage de modèles parallèles, l'emboîtement de modèles. C'est un coupleur dynamique (un composant peut être lancé au cours de la simulation et rendre ses ressources lorsqu'il a terminé) et parallèle (PALM attribue le nombre de processus nécessaires à chaque unité de calcul et autorise un parallélisme de tâche). Il offre ainsi une très grande souplesse pour essayer différentes tactiques de couplage et équilibrer les charges sur un ordinateur. La programmation des applications PALM se fait au travers d'une interface graphique utilisateur (IHM PrePALM). Dans cette interface, on s'applique dans un premier temps à définir l'algorithme de couplage : nombre de composants (une sous-routine Fortran par exemple comme l'algorithme d'assimilation BLUE), organisation séquentielle ou parallèle, codage des boucles autour des composants, gestion des ressources. Dans un second temps les communications effectives entre les composants sont décrites. Tous les mécanismes de synchronisation, de gestion de la mémoire, inhérents au calcul parallèle sont présents à ce niveau pour programmer des applications fonctionnelles et efficaces.

Pour effectuer l'analyse BLUE, en plus du modèle Mascaret (et ses fichiers qui le composent) on doit disposer des données observées (limnigrammes ou hydrogrammes) et d'un fichier décrivant les paramètres de l'assimilation, le fichier ParametresMascaretAssim.cas (cf annexe 1). A ce stade, il est possible de lancer une simulation Mascaret avec assimilation pour un temps de base.

Afin de tester au mieux les performances de l'assimilation, l'hydrogramme prévu est construit heure par heure à chaque station d'observation. Pour cela, les hydrogrammes d'entrée doivent être construits pour chaque pas de temps en prolongeant la dernière valeur du débit du temps de prévision (T_p) obtenant ainsi des hydrogrammes constants (figure 16). Pour chaque simulation de Mascaret, on obtient alors une prévision à un temps donné. Mises bout à bout les prévisions obtenues forment un hydrogramme prévu pour chaque stations de sortie (figure 17).

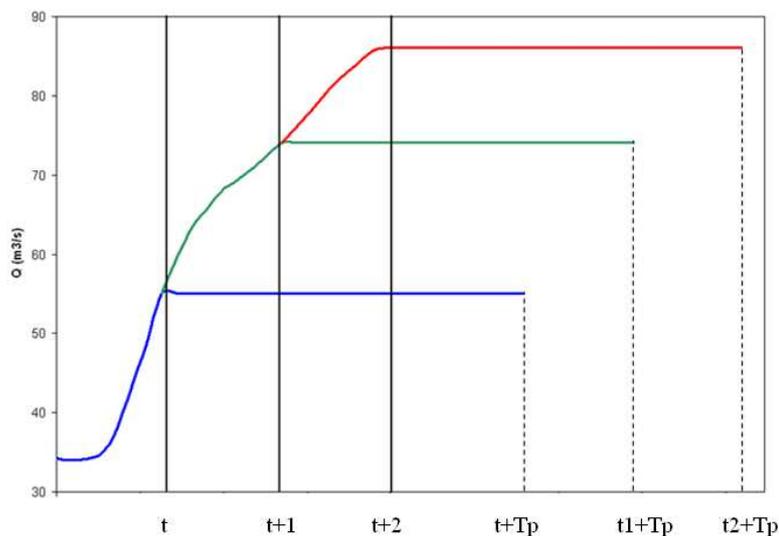


Figure 16 : construction des hydrogrammes d'entrée pour chaque pas de temps

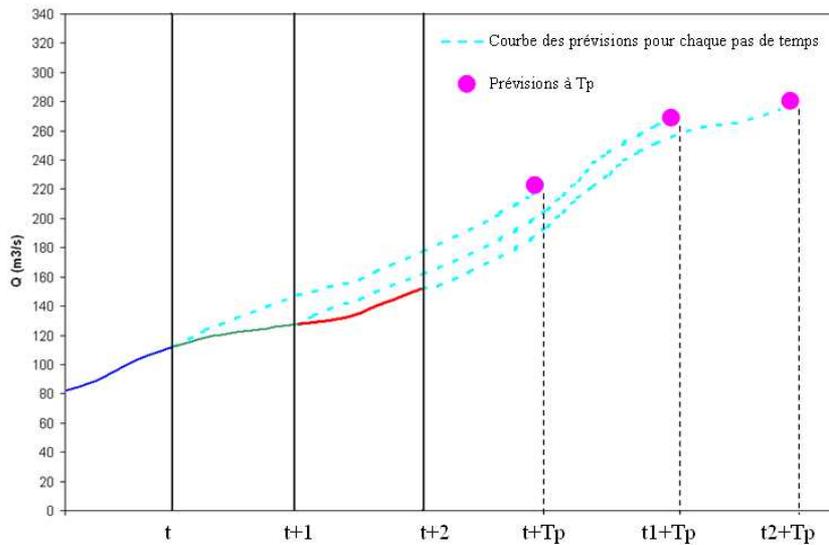


Figure 17 : construction de l'hydrogramme prévu à T_p

Ces contraintes de cyclage sont gérées automatiquement par un script UNIX qui pilote les différentes tâches ainsi que les enchaînements induits par le type d'assimilation choisi : on a l'ASSIM qui correspond à la correction de la ligne d'eau initiale, le CALAGE qui consiste à modifier les lois amonts et enfin le CALAGEASSIM qui est l'enchaînement du CALAGE et de l'ASSIM. On doit renseigner au PILOTE, un temps de début de prévision (premier temps de base), un temps de fin (dernier temps de base), le pas de temps des prévisions (décalage entre deux temps de base), le temps de simulation avant le temps de base (spinup) et enfin la durée de prévision après le temps de base. Le spinup comprend le temps d'équilibrage et la période d'assimilation. En fonction du type d'assimilation choisi, le PILOTE enchaîne les tâches suivantes (cf figure 18) :

- DRYRUN : il s'agit d'un calcul Mascaret standard, sans assimilation de données. Le PILOTE renseigne dans le fichier mascaret.cas le temps de début et de fin de la simulation et lance l'exécutable de Mascaret en construisant les hydrogrammes d'entrées pour chaque pas de temps.
- ASSIM : les codes sources de Mascaret ont été modifiés pour intégrer le recalage de la ligne d'eau initiale à chaque pas de temps en fonction des incertitudes et des écarts observés entre les hauteurs d'eau modélisées et observées. En plus des données relatives au modèle MAG, Mascaret va lire le fichier mascaretassim.cas contenant entre autre les écart-type des erreurs d'observations et d'ébauches, les longueurs de corrélation et les courbes de tarage pour retranscrire la modification apportées aux hauteurs d'eau en débits, données indispensables pour l'assimilation linéique.
- CALAGE et CALAGEASSIM : à la différence de l'ASSIM, MAD fait appel au coupleur PALM pour lancer autant de simulations perturbées que de coefficients a, b, c à contrôler. Dans un premier temps, un DRYRUN est lancé en guise d'ébauche. En fonction des incertitudes et des écarts observés entre les hauteurs d'eau ou les débits observés et modélisés sur la période d'assimilation, on obtient une valeur (Z ou Q) vers laquelle l'assimilation doit tendre. Puis Palm effectue une série de simulations perturbées avec des coefficients a, b, c appliqués à la loi amont que l'on veut contrôler. En fonction des variations engendrées aux stations d'observation, MAD va choisir les coefficients a, b, c optimaux et simuler une nouvelle ébauche assimilée. Pour le CALAGEAASSIM, on ajoute à cette phase de CALAGE, la correction de la ligne d'eau (ASSIM) mais avec des écart-types d'erreur d'ébauche

divisés par deux afin de tenir compte de l'amélioration des résultats apportée par la correction des lois amont.

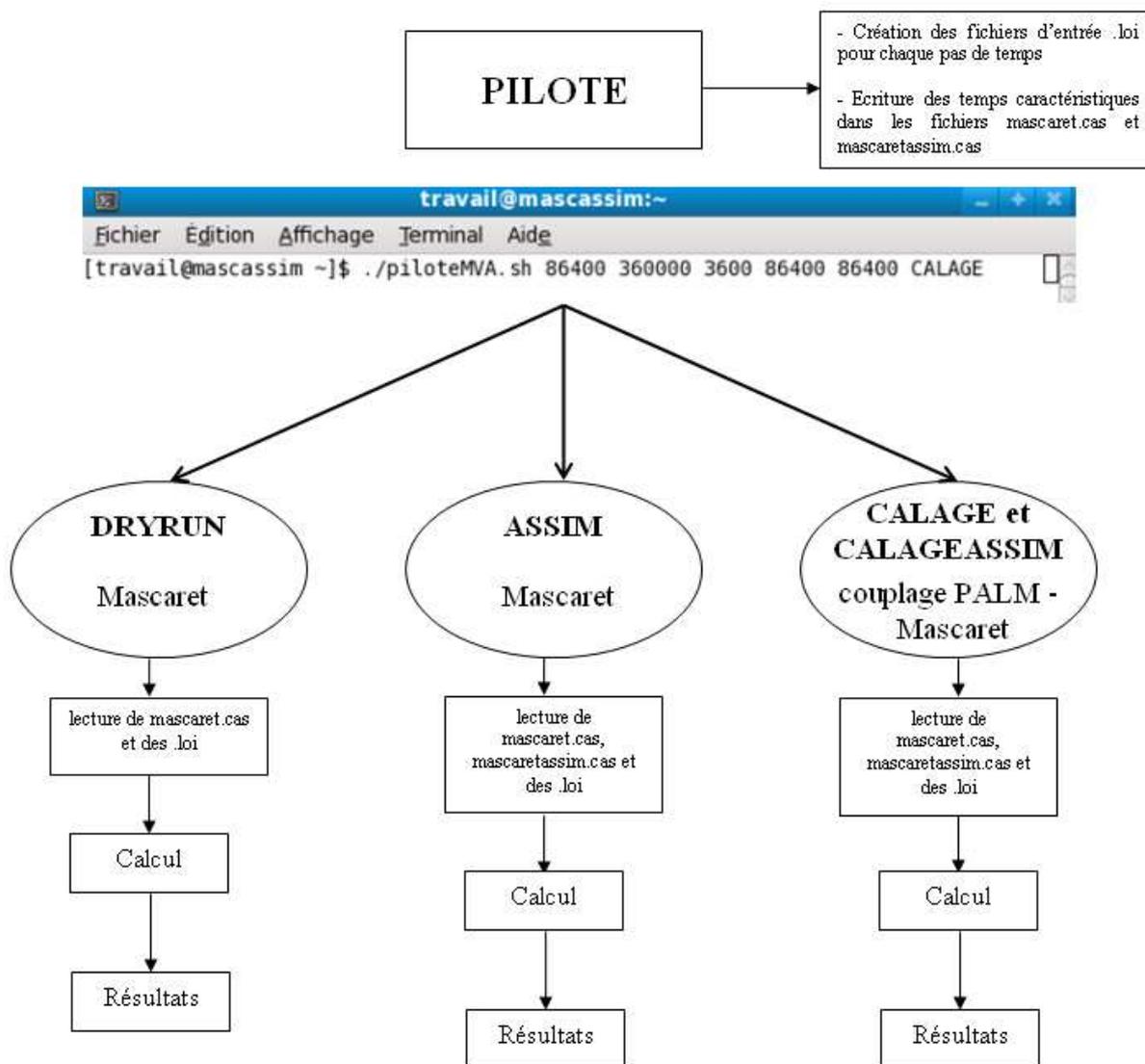


Figure 18 : Composition et fonctionnement de la maquette MAD

3.4 Application du prototype au modèle MAG

3.4.1 Configuration initiale de test

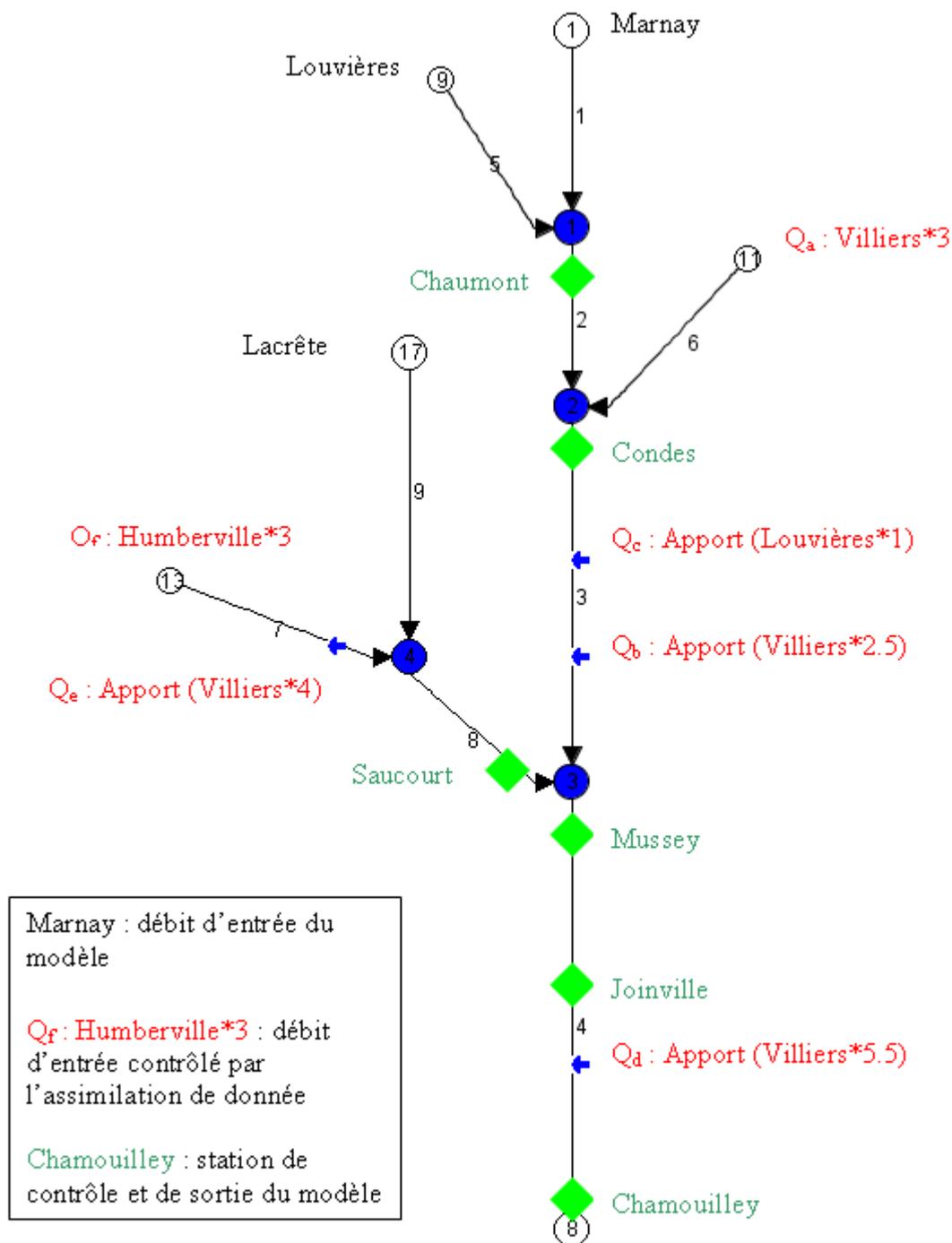


Figure 19 : application du prototype MAD au modèle hydraulique Mascaret MAG

On dispose de six stations d'observation de sortie et neuf stations d'entrée dont six tiennent compte des apports intermédiaires en multipliant leurs débits par un coefficient moyen. La chaîne d'assimilation CALAGE permet de modifier en temps réel ces coefficients en fonction des hauteurs ou en débits observés aux stations de sortie. L'ASSIM peut améliorer les résultats aux stations de sortie en corrigeant la ligne d'eau initiale.

Nous allons, dans un premier temps, tester la chaîne d'assimilation de la ligne d'eau, puis celle pour le calage en temps réel des lois aux extrémités libres et enfin la combinaison des deux étapes d'assimilation.

3.4.2 Temps caractéristiques et erreurs d'observation

Pour un événement débutant au temps de base $t=0$ (en heure), nous allons assimiler les données pendant 8h entre $t+16$ et $t+24$. Entre t et $t+16$, on laisse le modèle s'équilibrer pour éviter d'assimiler des résultats influencés par la ligne d'eau initiale (le temps de spinup est donc de 24h). L'instant de la première analyse est $t+24$, les prévisions seront effectuées sur les 24h suivantes (temps de prolongation des débits constants des hydrogrammes d'entrée), jusqu'à $t+48$.

Les 8h d'assimilation correspondent au temps de propagation moyen entre les stations d'entrée du modèle contrôlée par assimilation et leur première station de contrôle située à l'aval (ce temps ne peut être différencié pour chaque station).

Les 24h de prévision sont justifiées par le temps de propagation maximum connu entre la station de Marnay (la plus en amont) et la station de sortie de Chamouilley, la condition limite aval du modèle MAG. Ces temps caractéristiques peuvent être modifiés dans le fichier ParametresMascaretAssim.cas.

Il est difficile pour nous d'estimer les écarts-types d'erreurs d'observation. En effet, dans le métier de prévisionniste, on les considère comme fiable (sauf problèmes ponctuels dans les données temps réel faisant ensuite l'objet d'une critique temps différée). Néanmoins, les incertitudes au niveau des hauteurs d'eau et des débits observés sont fondées : dérèglement du capteur pression, transformation des hauteurs en débits par une courbe de tarage. On estime pour les six stations d'observation les écarts-types d'erreurs à 0.05 m pour les hauteurs d'eau et à 5 m³/s pour les observations en débits. Afin de restreindre l'assimilation de données à des gammes de hauteurs d'eau ou de débit où le modèle MAG donne des résultats satisfaisants, un seuil minimum de rejet des observations a été fixé. MAD n'assimile pas les hauteurs d'eau inférieures à 0.8m, 0.8m, 0.8m, 0.6m, 0.4 m, 0.6m et les débits en deçà de 20 m³/s, 20 m³/s, 30 m³/s, 30 m³/s, 20 m³/s, 10 m³/s respectivement aux stations de Chaumont, Condes, Mussey, Joinville, Chamouilley et Saucourt.

3.4.3 Test de l'ASSIM

Les écart-types d'erreur d'ébauche ont été déterminés en calculant en moyenne sur les dix crues de validation du modèle MAG la différence entre les hauteurs d'eau observées et modélisées. En moyenne, pour les six stations d'observations on a un écart-type d'erreur d'ébauche de 0.1m.

La ligne d'eau initiale est composée des hauteurs et des débits sur chacune des sections du maillage. Pour éviter les plantages, la correction de la hauteur d'eau doit être retranscrite en débit via les courbes de tarage renseignées aux stations d'observations. Celles-ci sont renseignées dans le fichier mascaretassim.cas. Elles sont de la forme $Q=aZ^r+b$. Les courbes de tarage déterminées par le service d'hydrométrie sont de la même forme mais spécifiques à des gammes de hauteur d'eau particulières, elles sont composées en générale de trois équations de type $Q=aZ^r+b$. Le parti pris a été de déterminer par régression linéaire une courbe simplifiée de type $Q=aZ+b$ pour chaque station d'observation.

Les corrections en Z et en Q apportées à chaque pas de temps au droit de chaque station d'observation doivent être réparties spatialement en amont et en aval afin d'éviter les modifications brusques de ligne d'eau entre deux sections de maillage. Ces distances appelées longueur de corrélation ont été maximisées afin d'éviter les plantages. La distance aval de corrélation pour chacune des stations est de 4000m, elle correspond en régime fluvial en moyenne pour le modèle MAG à la distance aval maximum où une perturbation de la ligne d'eau se répercute à la station située en amont. La longueur amont a par la suite été maximisée en fonction de la distance restante entre le premier profil du modèle ou la station située en amont retranchée des 4000m. Il s'est avéré après test que plus la longueur de corrélation est grande plus la correction est persistante.

Pour éviter de faire des corrections aberrantes, il est possible de rejeter l'observation lorsque l'écart entre la hauteur observée et l'ébauche (le misfit) dépasse un multiple donné de l'écart-type d'erreur d'ébauche. Nous avons choisis une valeur de multiple élevée, 20, afin de ne pas limiter les corrections. Les écart-types d'erreurs d'ébauches sont égale à 0.1m, soit un seuil de rejet de 2m. Lorsque le misfit est supérieur à 2m, les observations ne sont pas assimilées.

A Chamouilley à +21h (figure20), les résultats en réanalyse sont excellents (courbe bleu ciel), pour chaque pas de temps la ligne d'eau initiale est corrigée du delta calculé entre la hauteur observée et l'ébauche (et des diverses incertitudes). Plus on augmente le temps de prévision aux stations d'observations, moins les effets de l'assimilation linéique se font ressentir car les modifications de Z ou de Q entre t et t+t_p peuvent être plus fortes (courbe rouge). De la même manière, l'effet de l'assimilation linéique croit des stations amont vers l'aval car les réactions hydrologiques deviennent moins brutales donc les deltas Z et deltas Q diminuent.

L'ASSIM améliore les prévisions aux stations de Mussey, Joinville et Chamouilley et dans une moindre mesure celles à Saucourt. A Chaumont, la station la plus en amont, la modification de la ligne d'eau initiale engendre des plantages du modèle MAG section à sec), on ne l'applique donc pas à cette station. A Condes, à +6h, on ne ressent plus les résultats du recalage de ligne d'eau initiale.

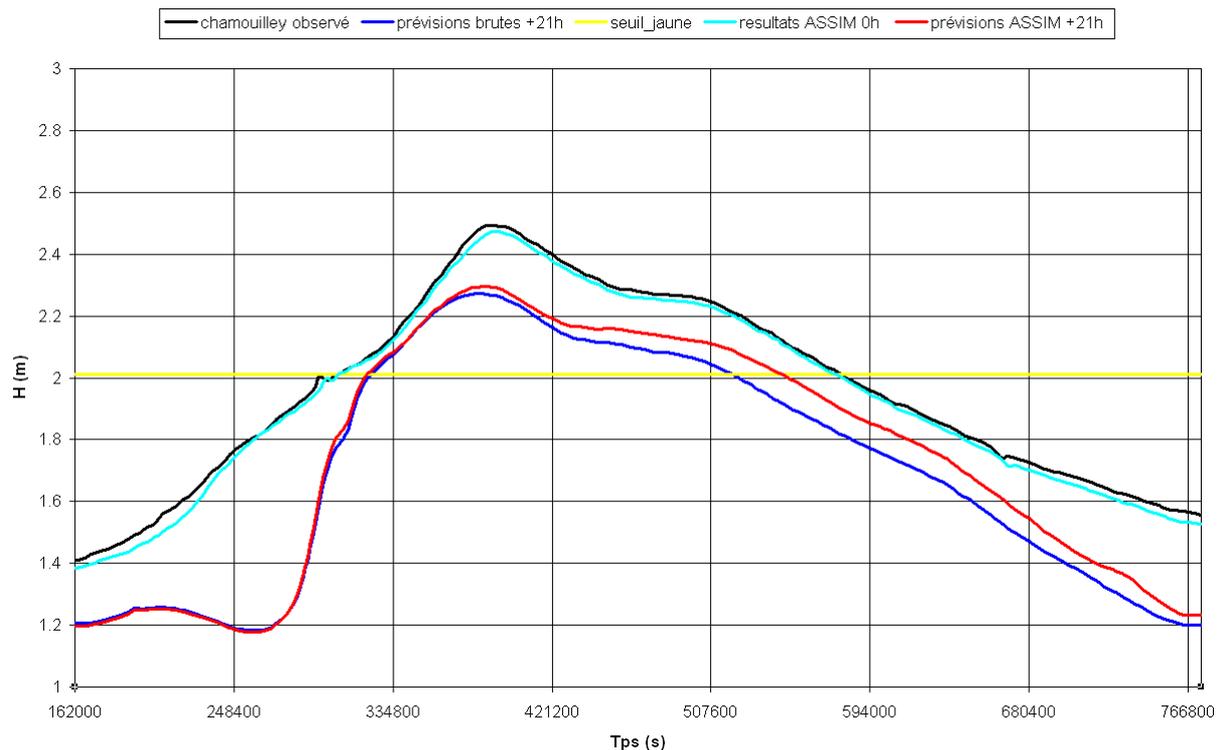


Figure 20 : résultats en hauteurs de l'assimilation linéique à Chamouilley à 0 et +21h, crue 14

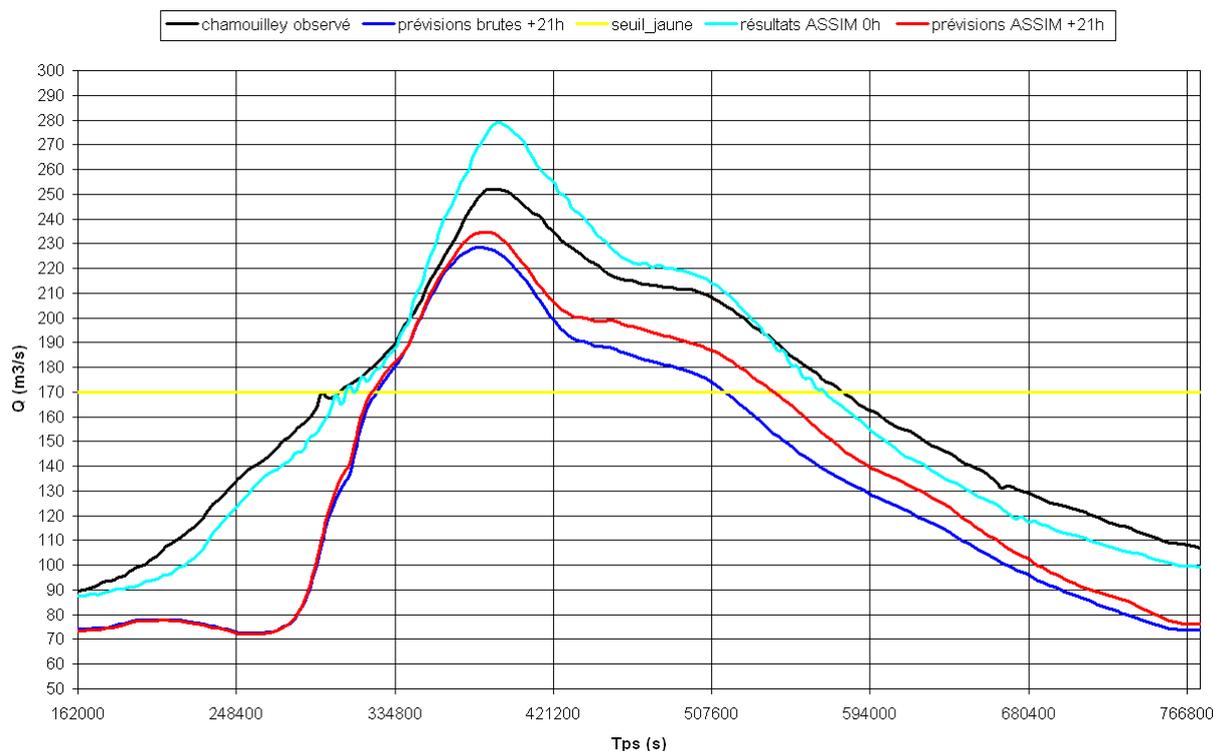


Figure 21 : résultats en débits de l'assimilation linéique à Chamouilley à 0 et +21h, crue 14

En comparant les deux graphiques ci-dessus, on observe les limites de la simplification de la transformation de la correction des hauteurs d'eau en débits. L'utilisation d'une courbe de tarage linéaire sans distinction de gamme de débits transforme correctement la courbe des prévisions (+21h) des hauteurs d'eau en débits. Mais, dans une gamme de hauteurs d'eau plus importantes (à 0h, courbe bleue ciel), on atteint les limites de la linéarité de la courbe de tarage, la correction des débits est surestimée par rapport à celle des hauteurs d'eau.

Actuellement, le prototype MAD n'est capable que d'assimiler des hauteurs d'eau pour le recalage de la ligne d'eau initiale, son développement est prévu.

Conclusions :

- les effets de l'assimilation linéique sont excellents en réanalyse. Plus on va chercher une prévision lointaine à une station d'observation, moins les effets de l'ASSIM se font ressentir.
- en prévision, les résultats aux stations d'observations croissent de façons bénéfiques de l'amont vers l'aval.
- globalement, la transformation de la correction des hauteurs en débits est correcte. Cependant, pouvoir renseigner la courbe de targe de plusieurs équations selon les gammes de hauteurs d'eau pourrait améliorer les débits initiaux.
- l'assimilation linéique ne sera pas appliquée à la station de Chaumont.

Stations d'observations	Délai de prévision	Résultats obtenus	
Chaumont	+5h	plantage	-
Condes	+6h	pas d'effet	0
Mussey	+12h	positif	++
Joinville	+13h	positif	++
Chamouilley	+21h	positif	++
Saucourt	+10h	légerement positif	+

Tableau 14 : Qualité des résultats obtenus après assimilation linéique

3.4.4 Test du CALAGE

Le prototype MAD permet de contrôler des paramètres du modèle à partir de la comparaison des observations et des résultats du modèle. La prise en compte des apports intermédiaires par transposition et multiplication des hydrogrammes par un coefficient moyen a montré ses limites lors de la phase de validation du modèle MAG notamment lorsque les réactions hydrologiques n'étaient pas homogènes sur l'ensemble du bassin versant modélisé. Il est possible de contrôler ces débits d'apports via l'assimilation de données, en corrigeant certains fichiers d'entrée .loi en fonction des incertitudes et des écarts observées entre les données observées et modélisées à une ou plusieurs station de sortie.

Deux techniques de contrôle des apports peuvent être mises en place :

- le recalage peut porter sur les hydrogrammes d'apports multipliés par un coefficient moyen comme dans la configuration actuelle du modèle MAG, le contrôle s'effectuera alors en grande partie via ce coefficient multiplicateur correspondant au coefficient a_j de l'équation $loi_j(t) = a_j * loi_j(t - c_j) + b_j$.
- il est aussi possible de corriger un hydrogramme d'apport au débit constant, le contrôle s'effectuant par le coefficient a_j ou b_j .

Le prototype d'assimilation de données permet d'assimiler en phase de CALAGE soit des hauteurs d'eau, soit des débits. Avant d'analyser les résultats de ces différents choix de prise en compte des apports intermédiaires, il est nécessaire de savoir quelles données l'on va analyser.

3.4.4.1 Choix du vecteur d'observation

On a choisi d'assimiler des débits d'une part pour être cohérent avec notre démarche de calage du modèle qui a été dans un premier temps réalisé en débit (puis affiné en hauteur) et d'autre part car le débit à l'avantage d'être une donnée conservative c'est-à-dire qu'une modification locale du débit se répercutera à l'aval, ce qui n'est pas forcément le cas pour les hauteurs d'eau.

Dans l'exemple suivant (figure 20), l'erreur sur les débits n'est pas du même signe que l'erreur sur les hauteurs. Si on assimile des hauteurs d'eau, l'augmentation des débits en amont de Mussey pour rattraper le manque de hauteur va dégrader les débits à Mussey et inversement, si on assimile des débits, la baisse des débits en amont de Mussey va dégrader les résultats en hauteur d'eau. Que l'on assimile des hauteurs d'eau ou des débits, dans ce cas, on ne pourra pas améliorer les deux variables Z et Q à la station de Mussey.

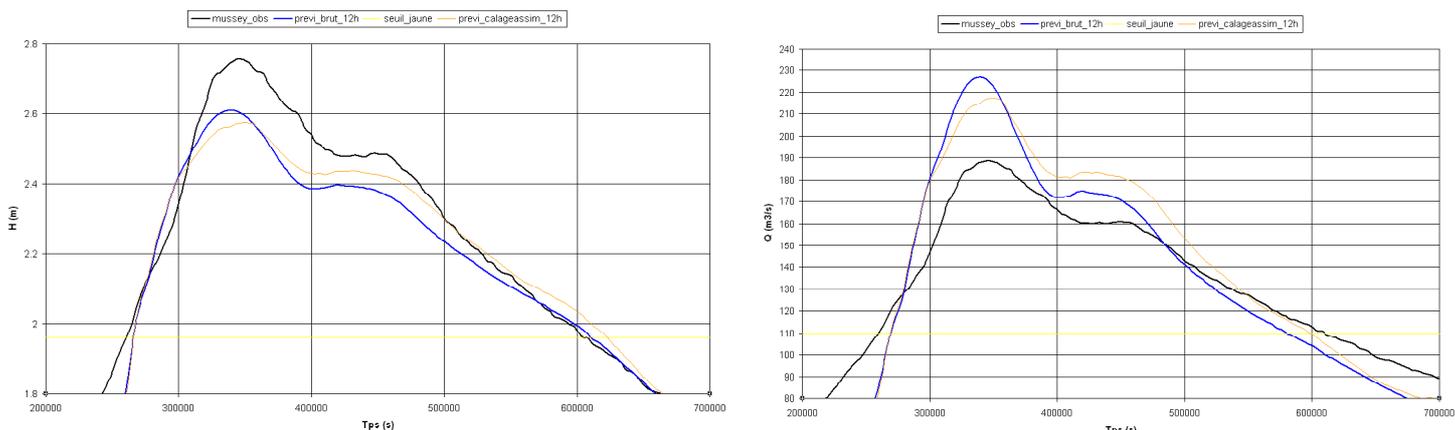


Figure 22 : prévisions de hauteur d'eau et de débit à Mussey à +12h

Mais pour la même crue à l'aval à Joinville (figure 22 ci-dessous) la sortie brute du modèle en hauteur est correcte (courbe bleu). En assimilant des hauteurs d'eau, l'augmentation des débits d'apport pour combler le déficit des hauteurs à Mussey va dégrader les hauteurs à Joinville à l'aval (courbe orange).

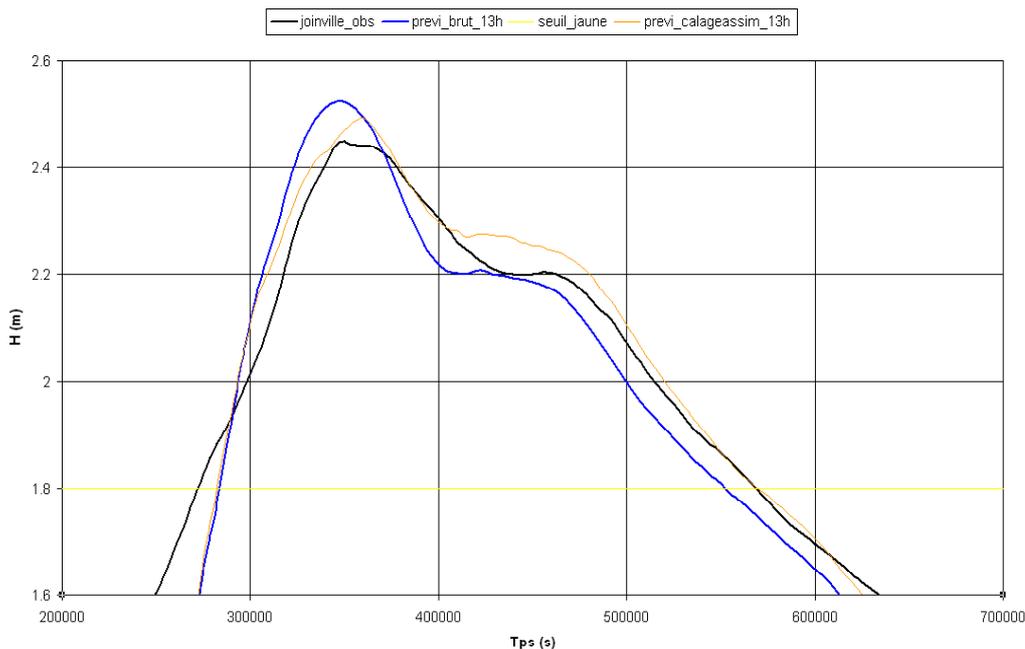


Figure 23 : prévisions de hauteur d'eau à Joinville à +13h

Forcer des débits d'apports pour améliorer les hauteurs d'eau en un point est bénéfique. Mais lorsque localement, dans certaines gammes de hauteur d'eau, le lit de la rivière n'est pas correctement modélisé, le prototype d'assimilation de données va modifier les apports pour rattraper une hauteur fautive dégradant ainsi les résultats des stations situées à l'aval. La vraie solution serait d'affiner encore la description du lit de la rivière.

Pour remédier à ce problème, on a décidé d'assimiler les observations de débits et non les hauteurs d'eau. Les problèmes d'erreurs de signes différents entre les hauteurs et les débits ne seraient pas résolus mais le modèle propagerait une information en débit cohérente avec les stations situées à l'aval comme on peut le constater dans l'hydrogramme ci-dessous. Les hydrogrammes observés et prévus à Mussey et Joinville ont la même forme, en assimilant les débits à Mussey, on améliorera les résultats aux deux stations.

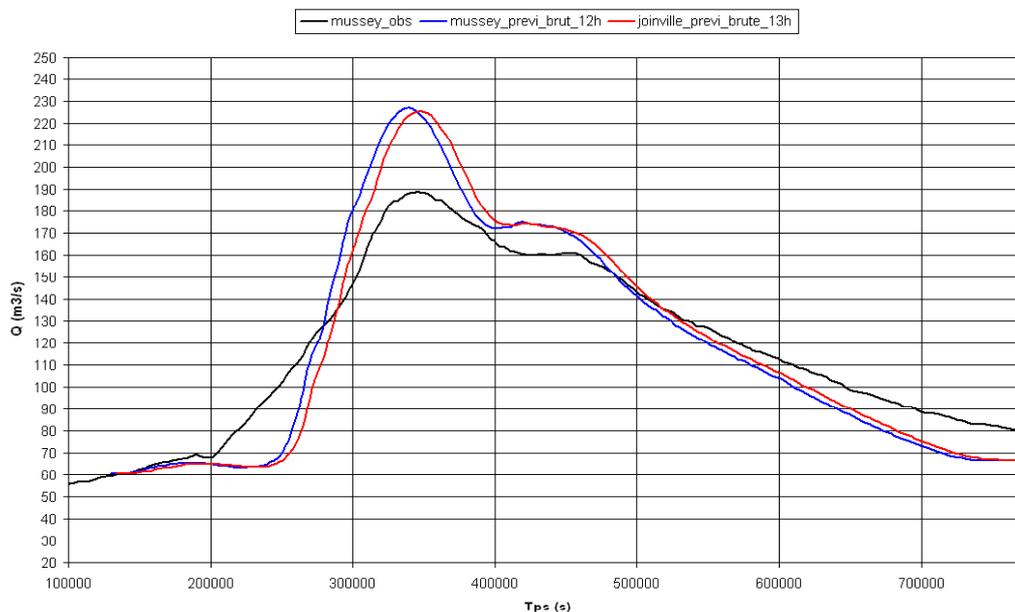


Figure 24 : prévisions en débits à Mussey et Joinville à +12h et +13h

3.4.4.2 Correction basée sur les hydrogrammes d'apports transposés

On a identifié six stations d'apport intermédiaire (Q_a , Q_b , Q_c , Q_d , Q_e et Q_f) potentiellement contrôlables par six stations d'observation (cf figure 19). Il faut toutefois veiller à ne pas corriger un apport sur la base de données assimilées à une station d'observation située en amont ou sur un autre bassin versant. Ainsi, l'apport Q_a sera contrôlé par les stations de Condes et Mussey, Q_e et Q_f par Saucourt et Mussey, Q_b par Mussey et Chamouilley et enfin Q_d seulement par Chamouilley car c'est la seule station située en aval de cet apport. La station d'observation de Chamouilley ne participe pas au recalage des hydrogrammes d'apport Q_a , Q_e et Q_f car le décalage temporel entre ces stations est supérieur (environ 20h) à la période d'assimilation (8h). L'apport Q_c représentant le débit apporté par le ruisseau le Rigolot n'est pas contrôlé par assimilation de donnée car après test il s'est avéré que les résultats sont meilleurs lorsque l'on corrige juste l'apport Q_b situé quelques kilomètres en aval. Chaumont étant placé en amont du premier apport contrôlé par assimilation de données, elle n'est pas prise en compte par le CALAGE. Joinville se situe à moins d'une dizaine de kilomètre à l'aval de Mussey, leurs débits étant très proches, les données à la station de Joinville ne sont pas assimilées.

La correction des apports intermédiaires se résume à des transformations linéaires de type $loi_j(t) = a_j * loi_i(t - c_j) + b_j$. Nous avons déterminé lors de l'analyse hydrologique des coefficients multiplicateurs moyens. Nous cherchons à pouvoir adapter en temps réel ces coefficients en fonction des erreurs aux stations d'observations. Nous allons donc jouer principalement sur le paramètre a_j (coefficient multiplicateur) et sur b_j (constante) dans une moindre mesure. Le paramètre c_j équivaut à un décalage temporel des débits d'apports, après test les résultats ne sont pas probants. Le prototype MAD ne permet pas pour le moment de spécifier un coefficient de perturbation et un écart-type pour a_j et b_j propres à chaque loi d'apport que l'on souhaite corriger. On a choisi pour a_j , un écart-type de 0.4 correspondant à la moyenne des écart-types déterminé lors de l'analyse hydrologique (remis sur une base 1 car les hydrogrammes d'apports sont déjà multipliés par le coefficient moyen pour calculer l'ébauche) et un coefficient de perturbation de 1.2 déterminé à la suite de test de sensibilité. Par la suite pour réduire quelque peu l'effet du CALAGE (qui entraînait parfois des surestimations au niveau des pics de crue, on a réduit l'écart-type à 0.2. Pour b_j , on perturbe la loi d'apport en y ajoutant $5m^3/s$ et on a renseigné un écart-type faible de $5m^3/s$ afin de privilégier le recalage de la loi par le coefficient a_j .

Afin d'éviter des plantages de Mascaret (section à sec ou passage en régime torrentiel), on impose des valeurs minimum et maximum pour les apports après correction (cf tableau 9). Comme pour l'ASSIM, pour éviter de faire des corrections aberrantes, il est possible de stopper l'assimilation lorsque la différence entre le débit observé et l'ébauche (le misfit) dépasse un certain pourcentage de cette ébauche. Nous avons choisi une valeur élevée (100%) afin de ne pas limiter les corrections. Lorsque la différence entre l'observation et l'ébauche est supérieure à l'ébauche, les observations ne sont pas assimilées.

On obtient les résultats suivants :

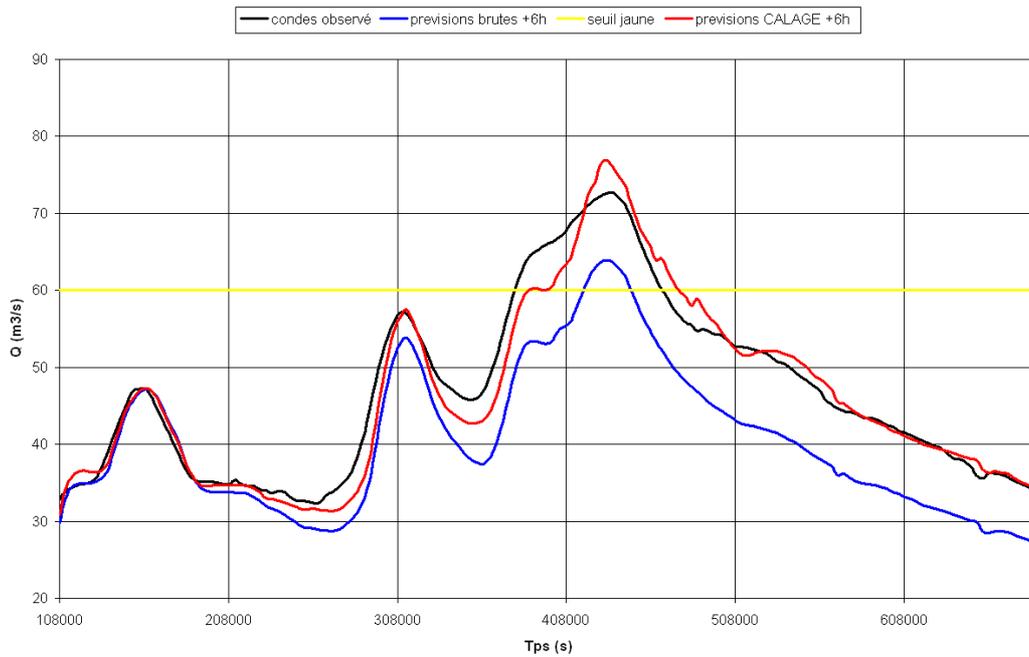


Figure 25 : résultats en débits du CALAGE à Condes à +6h, crue 16

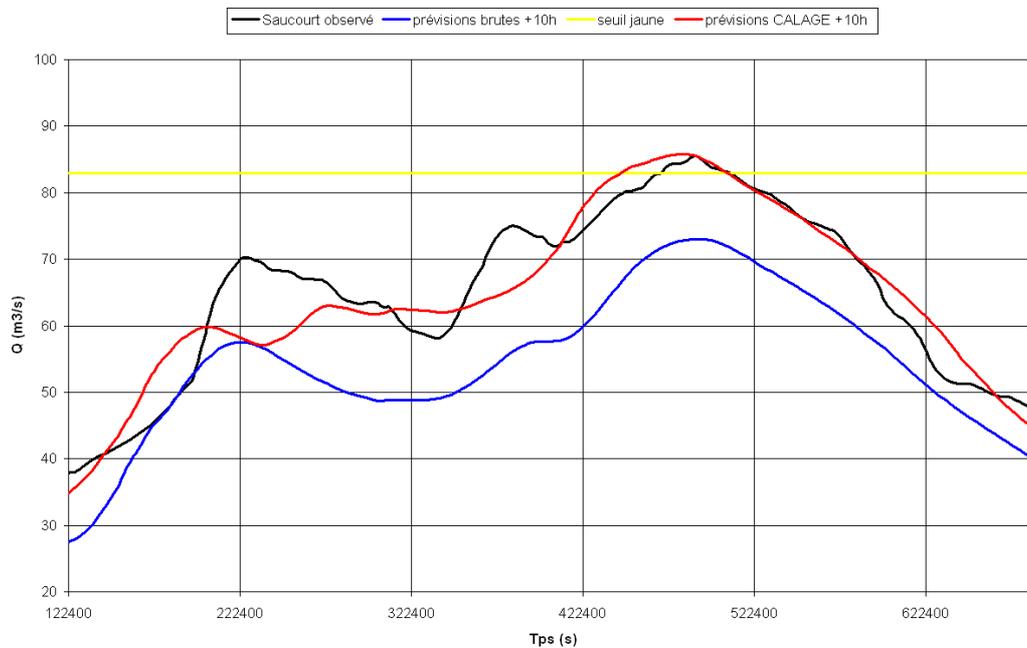


Figure 26 : résultats en débits du CALAGE à Saucourt à +10h, crue 16

A Condes et Saucourt, les résultats du CALAGE sont positifs, l'assimilation de données permet de rattraper les déficits de débits engendrés par l'injection d'hydrogrammes d'apports intermédiaires multipliés par un coefficient moyen.

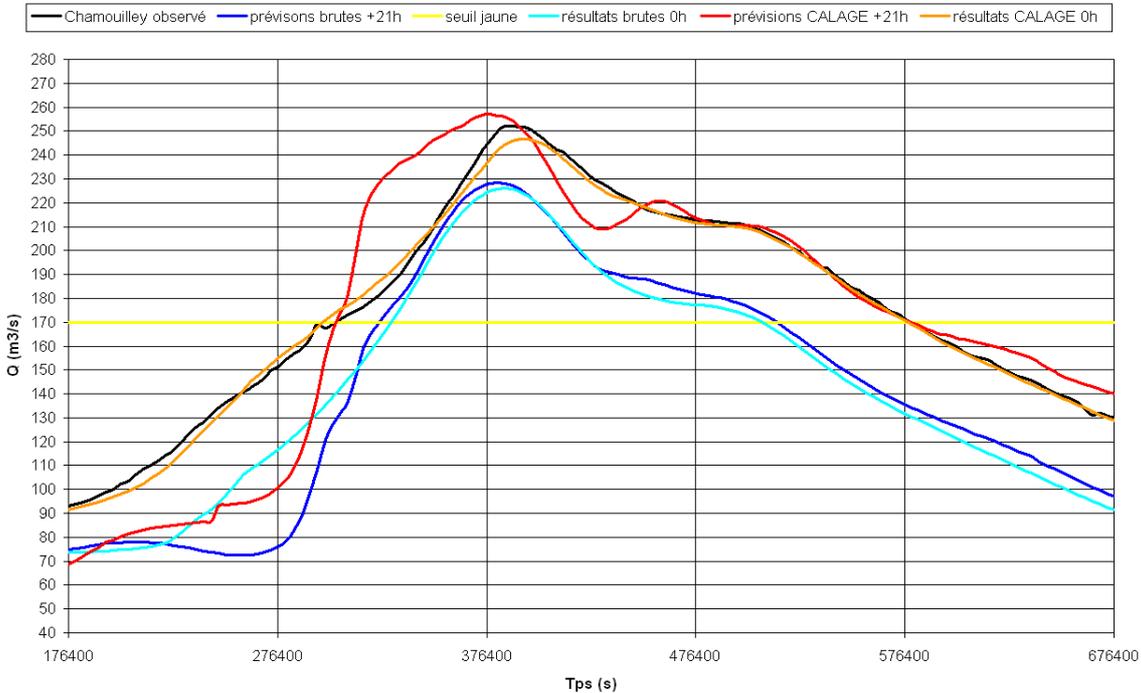


Figure 27 : résultats en débits du CALAGE à Chamouilley à 0h et +10h, crue 14

Plus à l'aval, à Mussey, Joinville et Chamouilley, la procédure de CALAGE améliore les prévisions mais dans une moindre mesure. Ci-dessus, en comparant le résultat brut à 0h (réanalyse, courbe bleu ciel) et la prévision brute à +21 (courbe bleu), on remarque que l'ébauche à +21h se dégrade au démarrage de la crue en dessous de 150m³/s. Dans cette gamme de débit, le temps de propagation de la crue est inférieur à 21h ce qui engendre un retard de la prévision brute à +21h. Pour combler ce déficit de débit, l'assimilation de données va fortement multiplier le débit de l'apport d' situé une vingtaine de kilomètres en amont de Chamouilley. Le temps que l'information se propage jusqu'à Chamouilley (environ 5h) et que le prototype se rend compte de la surestimation des débits (on assimile les débits sur 8h glissante), les prévisions issues du CALAGE à +21h (courbe rouge) détériorent les résultats par rapport à l'ébauche. Les résultats bruts du CALAGE à 0h sont eux excellents (courbe orange) ce qui prouve que l'assimilation de donnée est efficace, c'est le processus d'effectuer des prévisions qui dégradent les résultats comme expliqué ci-dessus, ce phénomène étant renforcé par la propagation pour chaque pas de calcul d'un débit constant (figure 16), contrainte indispensable pour effectuer des prévisions en temps réel.

3.4.4.3 Correction basée sur un débit d'apport constant

Il est aussi possible d'injecter à la place d'un hydrogramme transposé, un débit d'apport constant moyen. Lors de l'analyse hydrologique, on a déterminé à combien s'élevaient en moyenne sur les dix crues étudiées les apports intermédiaires.

stations	moyenne sur 10 crues des apports intermédiaires (m3/s)	nom de l'apport	quantité injectée en chaque point (m3/s)
Condes	10	a	10
Mussey	18	b	13
		c	5
Chamouilley	23	d	23
Saucourt	23	e	13
		f	10

Tableau 15 : Débits moyens constants injectés en chaque point d'apport

Ces débits moyens constants ont été injectés dans le modèle Mascaret. Afin de tester l'effet du CALAGE dans cette configuration, il a fallu apporter des modifications dans le fichier relatif à l'assimilation de donnée MascaretAssim.cas. La correction des apports intermédiaires se résume à des transformations linéaires de type $loi_j(t) = a_j * loi_j(t - c_j) + b_j$. Etant donné que ce débit est constant, le paramètre c_j relatif au décalage temporel de l'hydrogramme devient inutile. Pour a_j et b_j , que l'on multiplie une valeur constante ou que l'on ajoute du débit, le résultat est le même. Nous avons conservé le paramètre a_j avec un coefficient de perturbation de 1.5 (1.2 auparavant) et un écart-type élevé 1 (0.2 auparavant) car les débits d'apports étant moyens et constants, les écarts entre l'ébauche et les débits observés vont être accrus (idem pour le misfit qui est passé de 100 à 200%).

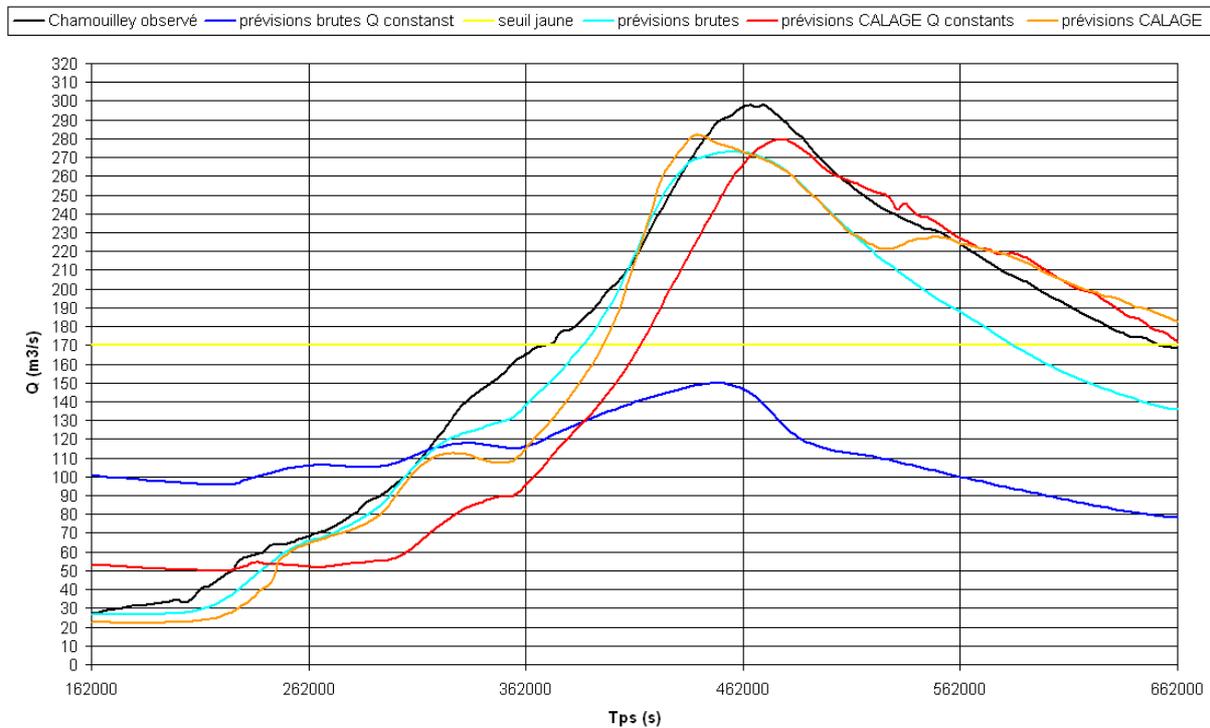


Figure 28 : comparaisons des méthodes débits constants et hydrogrammes transposés à Chamouilley à +21h, crue 5

L'ébauche au débit constant est moyenne (courbe bleue), elle surestime les débits en basses-eaux et les sous-estime en crue. Partant d'une ébauche moins bonne, l'assimilation

de données arrive tout de même à combler ces écarts (courbe rouge) mais en fait les prévisions restent tout de même moins bonnes que la méthode des hydrogrammes transposés d'autant plus que pour cette crue l'ébauche de cette dernière méthode est satisfaisante, les prévisions issues du CALAGE n'améliorant pas les résultats (courbe orange).

3.4.4 Conclusion

La méthode d'assimilation des débits pour recalculer les lois d'apport s'avère efficace et fiable. Nous retiendrons la méthode basée sur la transposition d'hydrogramme pour la prise en compte des apports intermédiaires comme pour la phase de calage. Les données des stations de Chaumont et Joinville ne seront pas utilisées pour la procédure de CALAGE mais les prévisions à Joinville seront tout de même impactées par les recalages des lois amont du fait de sa position à l'aval du modèle MAG.

3.4.5 Test du CALAGEASSIM

Afin de profiter des effets positifs des deux étapes d'assimilation, il est possible de les enchaîner en activant l'étape d'assimilation linéique (ASSIM) au cours du run final après le recalage des lois d'apport (CALAGE). L'implémentation des deux chaînes est compatible, tout se fait dans une seule exécution de la chaîne sous PALM.

La phase CALAGE améliorant déjà les résultats qui serviront d'ébauche pour la phase ASSIM, les écarts-type d'erreur d'ébauche de l'assimilation linéique ont été divisés par deux.

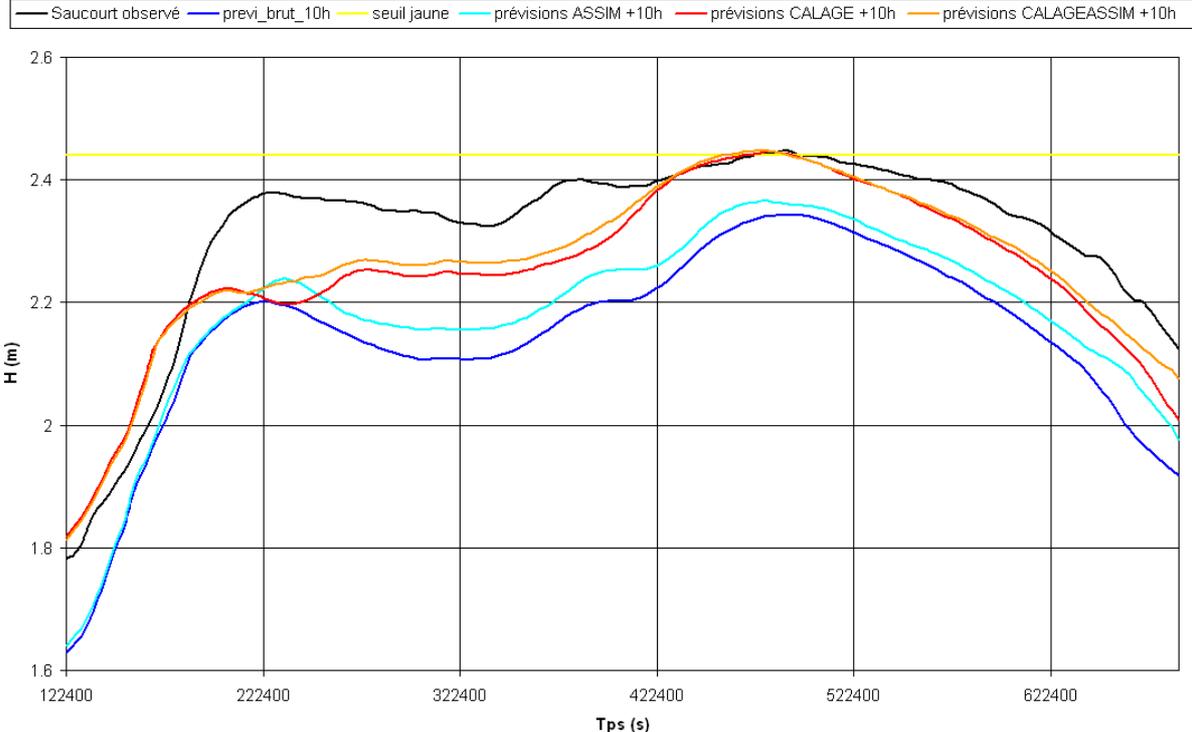


Figure 29 : comparaisons des hauteurs prévues des méthodes ASSIM, CALAGE et CALAGEASSIM à Saucourt à +10h, crue 16

L'enchaînement des deux phases est bénéfique, dans l'exemple ci-dessus (figure 29), lors de la phase de CALAGE l'assimilation des débits révèle une sous-estimation des apports intermédiaires, les apports que contrôle la station de Saucourt sont augmentés, les écarts entre débits et les hauteurs d'eau prévus et observés sont réduits (courbe rouge).

Pour chaque pas de temps, l'ASSIM modifie la ligne d'eau initiale en fonction des écarts entre les hauteurs observées et prévues par l'ébauche (courbe bleu), dans notre exemple la hauteur d'eau initiale est relevée, on obtient alors la courbe ASSIM (bleu clair). Pour la phase de CALAGEASSIM, on applique l'ASSIM en utilisant en guise d'ébauche les prévisions issues du CALAGE, on obtient alors la courbe des prévisions CALAGEASSIM (en orange). Le gain de hauteur d'eau entre les courbes rouges et oranges est inférieur au gain apporté entre les courbes bleu et bleu ciel du fait que les écarts-types d'erreurs d'ébauches de l'assimilation linéique sont réduits de moitié.

Toutefois, il est possible d'observer des incohérences dans l'enchaînement des deux phases. On ne peut assimiler que des hauteurs d'eau pour l'ASSIM et on utilise les débits pour la phase de CALAGE. Lorsque l'erreur sur les débits n'est pas du même signe que l'erreur sur les hauteurs d'eau, les modifications apportées à la ligne d'eau initiale et aux lois amont ont des effets inverses. La solution serait de pouvoir assimiler des observations en débits pour la phase ASSIM pour être en adéquation avec la phase de CALAGE. On observe typiquement ce type d'incohérence lors du CALAGEASSIM à la station de Mussey. Comme expliqué lors de la validation du calage, les coefficients de Strickler ne sont pas adaptés à toutes les gammes de débits.

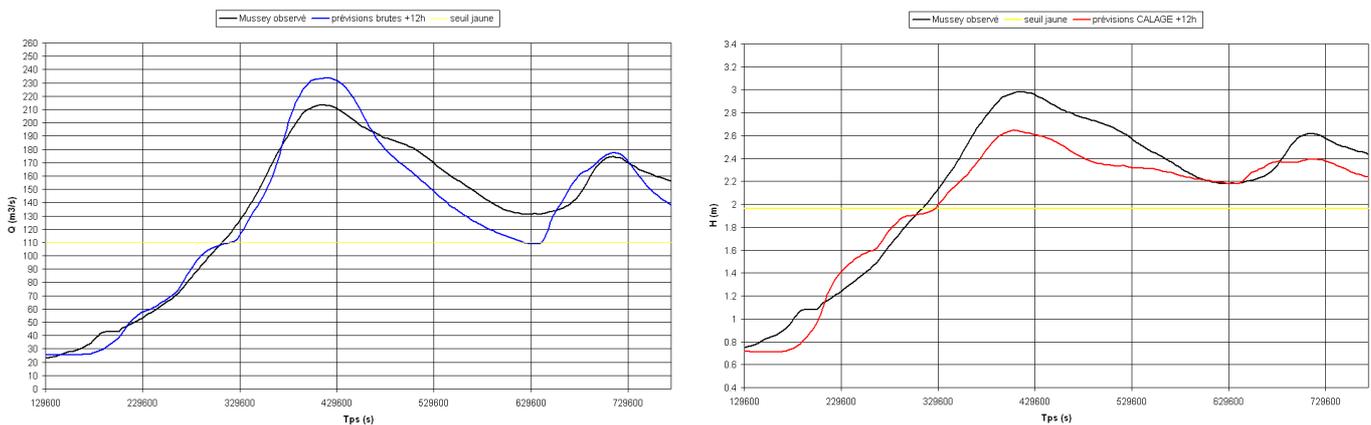


Figure 30 : comparaison des hauteurs et des débits prévus à +12h à Mussey, crue 5

Dans l'exemple ci-dessus, la procédure de CALAGE va tendre vers la réduction des débits au niveau du pic de crue de l'hydrogramme de gauche engendrant ainsi aussi une baisse des hauteurs d'eau au niveau du pic pour le limnigramme de droite (courbe rouge). Par la suite, l'ASSIM pour rattraper le déficit de hauteur d'eau va augmenter la hauteur d'eau initiale et par conséquent les débits. On a donc décidé de réduire très fortement l'écart-type d'erreur d'ébauche de l'assimilation linéique à Mussey (en le passant de 0.1 à 0.01 cm) afin de fortement diminuer l'effet de l'ASSIM lors de l'enchaînement des deux phases.

3.4.6 Configuration finale retenue

Au final, l'enchaînement des deux phases d'assimilation (CALAGEASSIM) sera appliqué aux dix crues de validation dans la configuration suivante. Le fichier mascaretassim.cas, regroupant toutes les données relatives au prototype MAG est consultable dans l'annexe 1.

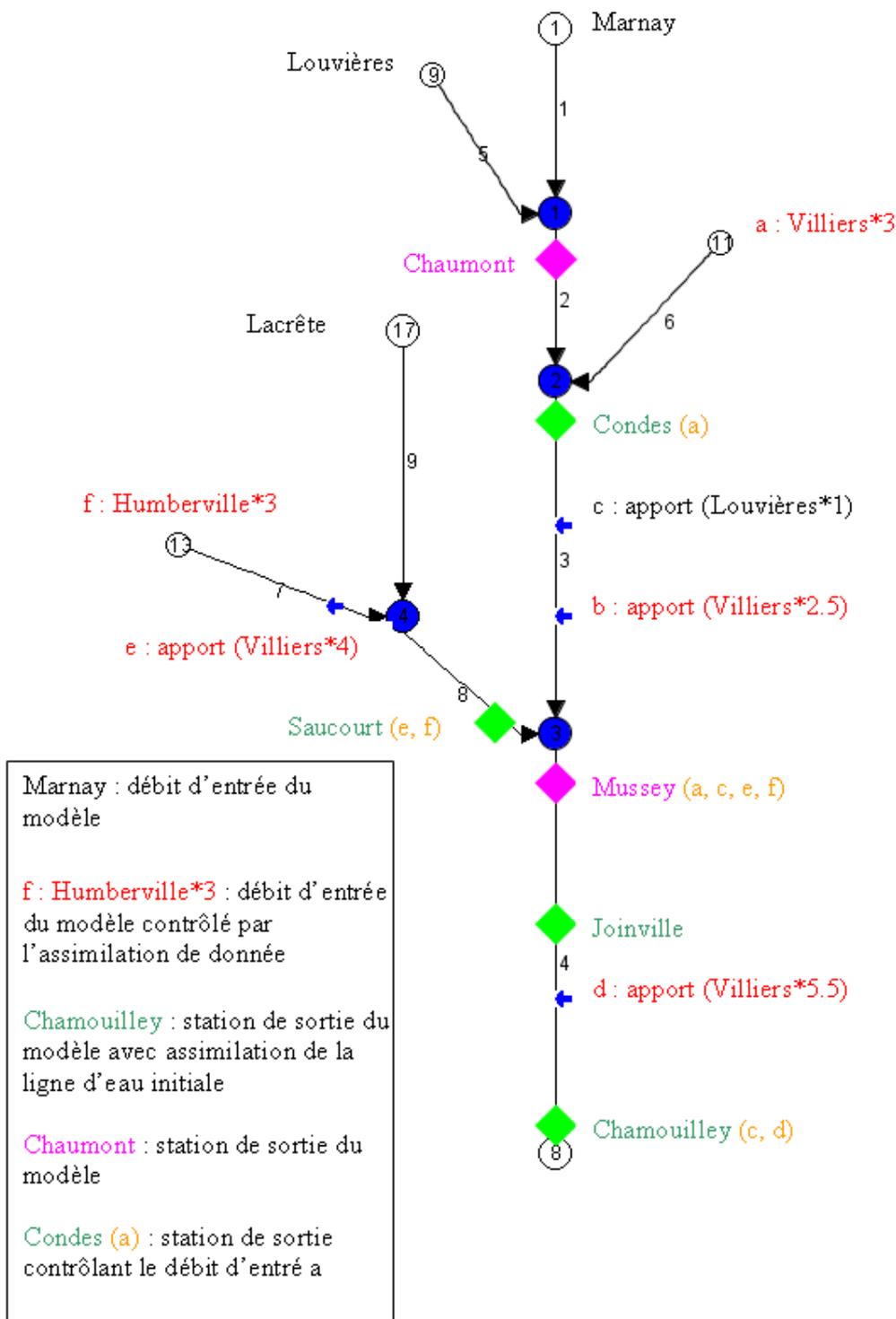


Figure 31 : application du prototype MAD au modèle hydraulique Mascaret MAG

3.5 Résultats finaux : l'apport de l'assimilation de données

Les événements testés sont les dix crues de validation présentées dans le tableau 2 (cf. 1.5.1). Les débits d'apports intermédiaires injectés dans le modèle MAG sont les hydrogrammes des stations déterminés dans l'analyse hydrologique multiplié par un coefficient A_i moyen.

Pour les dix crues de validation, on a calculé l'efficacité et la persistance aux six stations de sortie (en hauteur et en débit) des prévisions brutes et corrigées par l'enchaînement des deux types d'assimilation (CALAGEASSIM).

Les limnigrammes et les hydrogrammes de résultats sont joints dans l'annexe 2.

Crues de validation	Résultats	Efficience (%)											
		Chaumont		Condes		Mussey		Joinville		Chamouilley		Saucourt	
		H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
2	Bruts			-19	36.6	43.7	-19.7			-277.8	-248.1	54.9	-69.5
	calageassim			47.8	69.35	74.85	74			54.7	41.4	72.35	84.67
4	Bruts			84.7	85.6	-48.3	-140.7			-1183.4	-513.3	-15.2	-112.9
	calageassim			73.3	75.2	22.7	68.8			-127.6	-27.3	72.4	79.1
5	Bruts	79.1	80.4	75.4	71	77.9	87.6	95.2	89.7	79.7	83.65	95.2	91.2
	calageassim			96.9	96.2	82.9	91.1	93.2	77.4	77.3	78.1	94.5	91.9
6	Bruts	-2306	27	-44.5	16.4	-595	-467.4	-1386.6	-817.2	-3881	-793.4	-145	-132.5
	calageassim			-66.5	-11.3	-75.3	-1.3	-147	-55.7	-755.5	-114.4	-67.5	76.1
9	Bruts	90.3	84.3	88.4	88.5	-17.8	44	-38.2	-94.6	-106.5	-53	-187.8	-17.9
	calageassim			90.6	90.4	18.4	52.74	28	1	-16.9	31.2	-95.5	12.3
13	Bruts	91.6	80.5	15.7	-7.7	18.1	30.8	-95.7	-43.3	-130.2	-152.1	59.5	21
	calageassim			93.94	88.4	38.8	83.8	10.3	34.7	83.5	77.8	81.7	80.2
14	Bruts	94	92.9	75.9	70.6	76.8	70.2	48.4	75.4	12.2	33.9	85.7	81
	calageassim			96.8	96.8	86.2	89.5	84	88	83.6	60.6	90.6	88.8
16	Bruts			69	57.3	18.8	7			-23.2	-59.9	-286	-7.5
	calageassim			95.9	95.8	73.3	84.3			81.1	78.8	35.3	85.6
18	Bruts	78.6	74.7	77.9	62.3	72.8	40.3	-8.9	27.5	-551.7	-116.6	76.8	57.1
	calageassim			94.8	91.3	83	91.2	65.4	85.7	-98.9	42.1	89.7	95.1
19	Bruts	93.6	92.8	94.6	92.5	42.5	-27.8	-140.4	-36.1	-134.5	7	60	-108.6
	calageassim			88.6	90.1	60.2	81.5	77.7	74	65.1	72.4	32.7	54.3
Moyennes	Bruts	-254.1	76.1	51.8	57.3	-31.1	-37.6	-218.0	-114.1	-619.6	-181.2	-20.2	-19.9
	calageassim			71.2	78.2	46.5	71.6	30.2	43.6	-55.4	34.1	40.6	74.8
Moyennes sans extrêmes	Bruts	86.7	82.5	58.5	61.0	25.8	0.5	-47.0	-14.2	-299.4	-137.8	-1.4	-19.7
	calageassim			84.7	87.1	56.8	78.2	53.1	54.6	14.8	47.0	50.9	80.1

Tableau 16 : efficacités obtenues des prévisions brutes et corrigées par assimilation de données

Crues de validation	Résultats	Persistence (%)											
		Chaumont		Condes		Mussey		Joinville		Chamouilley		Saucourt	
		H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q	H	Q
2	Bruts			-46.9	11.7	7.2	-120.7			-182.1	-187.2	16.2	-327
	calageassim			31.3	56.2	59.5	51.6			55.8	52.5	43.3	59.3
4	Bruts			68	74.4	-135.14	-343			-418.2	-207.9	-360.5	-689
	calageassim			44.2	55.8	-23.1	41.6			0	24.7	-7.5	22.4
5	Bruts	17.2	27.85	-12	-23	29.1	61.8	83.9	74	23	86	72.1	66.2
	calageassim			85.3	83.7	44.4	72.1	78.4	44	81.7	81.2	68.7	68.7
6	Bruts	-11439	-254.3	-249	-137.2	-412	-421.7	-1310	-882.9	-2563.4	-523.4	-298.1	-301.6
	calageassim			-301	-211	-68.3	-11	-287.2	-145.5	-667	-49.3	-137.4	58.3
9	Bruts	68	66.2	88.2	88.1	61.8	75.3	46.5	39.4	82.7	89.3	-31.1	43.1
	calageassim			90.6	90.1	71	78.4	62.2	64	82.1	92.8	13.2	59.4
13	Bruts	77.6	57.4	-92	-144.6	-50.2	-45.7	-217.6	-180.6	-29.7	-68.5	-79	-213.8
	calageassim			82.5	69.6	-14.9	64	-50.4	-31.3	87.7	84.7	18.5	19
14	Bruts	71.2	71.6	-0.9	15.5	31.4	12.8	-46.9	31.5	-21	14.5	35.9	48.3
	calageassim			86.8	87.4	59.2	68.8	49.8	65.9	80	72.37	57.9	70
16	Bruts			-8	-49.7	-58.2	-87.2			-4.3	-37.9	-202.2	-90.8
	calageassim			85.6	85.2	46	68.2			83.9	82.2	36.5	73.8
18	Bruts	-89.8	-90.5	-82.2	-199.1	-22.4	-151.5	-371.4	-209.1	-449.3	-137.3	-131.2	-289.2
	calageassim			56.6	29.7	23.2	61.9	-62	34.6	-50.9	46.8	-14.8	53.1
19	Bruts	83.2	85.69	87	83.7	65.3	28.3	-4.3	32.8	40.1	75.6	56	68.6
	calageassim			79.7	80.5	74.8	80.4	79.2	81.5	81.1	89.3	34.2	53.4
Moyennes	Bruts	-160.17	-5.2	-24.8	-28.0	-48.3	-99.2	-260.0	-156.4	-352.2	-89.7	-92.2	-168.5
	calageassim			34.2	42.7	27.2	57.6	-18.6	16.2	-16.6	57.7	11.3	53.7
Moyennes sans extrêmes	Bruts	28.8	26.5	-10.9	-21.2	-17.1	-80.7	-118.7	-57.2	-130.2	-57.8	-79.2	-133.1
	calageassim			69.0	68.5	33.2	63.3	33.8	35.4	51.7	66.7	22.7	55.6

Tableau 17 : persistances obtenues des prévisions brutes et corrigées par assimilation de données

Le temps de prévision augmentant ainsi que les approximations faites par l'injection dans le modèle d'apport intermédiaire ayant le même coefficient multiplicateur s'accumulant, les efficacités et les persistances des résultats bruts décroissent de l'amont vers l'aval.

La correction des apports intermédiaires par assimilation de données a permis de réduire ces approximations, la qualité des résultats décroît toujours d'amont vers l'aval mais dans une moindre mesure. Les stations de Chaumont, Condes, Mussey et Saucourt donnent des prévisions fiables mais à des échéances courtes, respectivement 5, 6 et 10h, les moyennes sans les extrêmes des efficacités des prévisions en débit au CALAGEASSIM avoisinent les 80%. Pour les stations de Joinville et Chamouilley, les efficacités sont moins bonnes mais en terme de persistance les résultats sont corrects, on observe peu de décalage temporel entre les hydrogrammes prévus et observés.

Pour les événements hydrologiques de faible importance, les seuils minimums des observations de hauteurs d'eau et des débits n'étant pas atteints (cf. 3.4.2), les informations ne sont pas assimilées d'où les faibles améliorations des prévisions issues du CALAGEASSIM pour la crue de validation 6.

Les prévisions en débit donnent de meilleurs résultats que les hauteurs prévues. Comme expliqué lors de la validation du calage (cf. 2.3.1), les coefficients de Strickler étant moyennés, ils ne sont pas adaptés à tous les types de crue. Le choix de coefficients de Strickler locaux impacte fortement les hauteurs d'eau mais n'influe quasiment pas sur les résultats en débit car les hauteurs sont une variable non-conservative. Donc, lorsque ces

coefficients de frottement ne sont pas adaptés, la correction des lois d'apports intermédiaires peut améliorer dans une moindre mesure les résultats en hauteurs d'eau notamment aux stations de Mussey, Chamouilley et Saucourt.

		Efficience (%)					Persistence (%)		
		Résultats	H	Q			Résultats	H	Q
Moyennes sans extrêmes	Bruts		-29.4	-4.6	Moyennes sans extrêmes	Bruts		-54.5	-53.9
	calageassim		52.1	69.4		calageassim		42.1	57.9

Tableau 18 : moyennes sur l'ensemble des crues de validation et pour toutes les stations des efficacités et persistances obtenues des prévisions brutes et corrigées par l'assimilation de données

Sur l'ensemble des 10 crues de validation testées, pour les six stations de sortie on est passé d'une efficacité et d'une persistance moyenne négative pour les prévisions brutes du modèle MAG à des scores positifs après correction par assimilation de données (le score maximum étant 100%), l'enchaînement des deux étapes d'assimilation améliore nettement les prévisions aux stations de Condes, Mussey, Joinville, Chamouilley et Saucourt.

Nous avons effectué les tests de prévision aux échéances maximums. Pour des temps de prévisions plus courts, les efficacités et les persistances des résultats issues de l'assimilation de données sont plus élevées jusqu'à tendre vers les 100% pour des prévisions à une ou deux heures, l'impact du recalage de la ligne d'eau initiale étant maximisé pour des temps de prévisions courts.

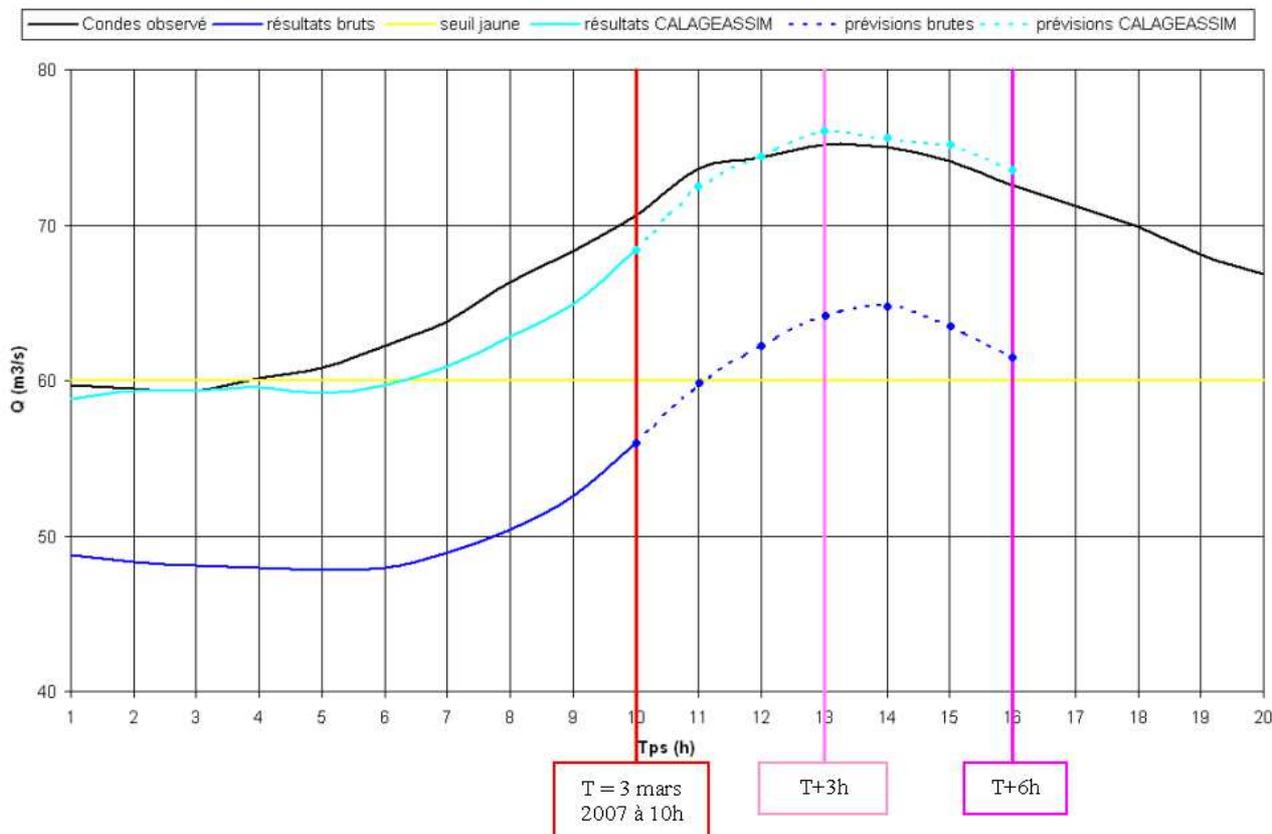


Figure 32 : résultats des prévisions le 3 mars 2007 à 10h à Condes

Concrètement, le prototype d'assimilation de données MAD nous aurait permis lors de la crue de mars 2007 d'améliorer nos prévisions : à 10h, le modèle MAG brut prévoyait le pic de crue à Condes à 14h avec 65 m³/s. Avec l'assimilation de données, on aurait prévu un pic à 13h avec 76 m³/s soit 1 m³/s de plus que le débit observé.

Conclusion

La fusion des deux modèles MASCARET préexistants Marne Amont et Marne Vallage a été possible grâce à la prise en compte des apports intermédiaires. Une analyse hydrologique a permis de les estimer et de déduire que la station hydrométrique de Villiers avait un comportement semblable à plusieurs cours d'eau karstiques non jaugés, son hydrogramme a donc été injecté en plusieurs point du modèle. Le principal atout du modèle Marne Amont Global est l'allongement du temps de prévision maximum, l'échéance maximum de prévision de hauteurs d'eau et de débits à Chamouilley, la station la plus en aval, passant de 15 à 21h. Mais les résultats sont parfois sous-estimés du fait de la non-réaction de la station karstique de Villiers qui contribue majoritairement à la prise en compte des apports intermédiaires. De plus, de nombreuses approximations ont été faites lors de la modélisation comme les coefficients de Strickler qui ont été calés sur plusieurs crues puis moyennés.

L'algorithme d'assimilation de données BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) permet de combiner des informations simulées et observées en tenant compte de leurs incertitudes afin de se rapprocher de l'état hydraulique réel de la rivière. Le prototype d'assimilation de données développé par le CERFACS est en mesure de modifier en temps réel les débits d'apports et de modifier la ligne d'eau initiale. Ce prototype a été appliqué au modèle MAG, calé puis testé sur plusieurs crues. L'enchaînement de la correction apportée aux lois d'apports intermédiaires et à la ligne d'eau initiale via l'assimilation de données a permis d'améliorer les prévisions aux différentes stations de sortie du modèle.

Le SCHAPI travaille actuellement à la mise en place opérationnelle du prototype d'assimilation afin de pouvoir bénéficier de prévisions corrigées par l'assimilation de données pour l'ensemble des modèles de prévisions des crues MASCARET utilisés par les SPC. En attendant, le modèle MAG a été déployé au SPC SAMA afin de bénéficier de prévisions à plus longues échéances.

Le prototype actuel est amené à évoluer afin de pouvoir assimiler en plus des hauteurs d'eau, des débits pour corriger la ligne d'eau initiale et le débit de base. De plus, nous avons rencontré plusieurs fois des incohérences au niveau des coefficients de Strickler. Ceux-ci n'étant pas toujours adaptés pour toutes les gammes de débit, ils pourraient être modifiés en temps réel via l'algorithme d'assimilation BLUE afin de tendre vers l'état hydraulique réel de la rivière.

Bibliographie

Bouttier, F. et P. Courtier, 1999 : Data assimilation and methods.

Piacentini A., S. Ricci, O. Thual, G. Jonville, S. Massart, Ch. Ivanoff, E. Le Pape, N. Goutal et F. Zaoui, 2011 : Convention 2010-2011 CERFACS-SCHAPI-LNHE-CETMEF-SPC Maquette d'assimilation de données avec MASCARET (document téléchargeable sur <http://www.cerfacs.fr>)

Ricci, S., A. Piacentini, O. Thual, E. Le Pape et G. Jonville, 2010 : Correction of upstream flow and hydraulic state with assimilation in the context of flood forecasting.

Annexe 1 : détails du fichier ParametresMascaretAssim.cas

Le fichier ParametresMascaretAssim.cas contient toutes les informations, les données et les paramètres spécifiques au prototype d'assimilation de données MAD adapté au modèle MAG.

```

/* genere par fudaaMascaret le 31/03/09 14:17
/
/IMPRESSON (2)
/
IMPRESSON DES LOIS HYDRAULIQUES = VRAI
/
/DONNEES LOI 5 (3)
/
LOI 5 CALAGE = 'ab'
LOI 5 STATIONS CALAGE = FAUX; VRAI; FAUX; FAUX; VRAI
LOI 5 VALEUR MIN = 1.
/
/DONNEES LOI 6 (3)
/
LOI 6 CALAGE = 'ab'
LOI 6 STATIONS CALAGE = VRAI; VRAI; FAUX; FAUX; FAUX
LOI 6 VALEUR MIN = 1.
/
/DONNEES LOI 7 (3)
/
LOI 7 CALAGE = 'ab'
LOI 7 STATIONS CALAGE = FAUX; VRAI; FAUX; FAUX; VRAI
LOI 7 VALEUR MIN = 1.
/
/DONNEES LOI 9 (3)
/
LOI 9 CALAGE = 'ab'
LOI 9 STATIONS CALAGE = FAUX; FAUX; FAUX; VRAI; FAUX
LOI 9 VALEUR MIN = 1.
/
/DONNEES LOI 10 (3)
/
LOI 10 CALAGE = 'ab'
LOI 10 STATIONS CALAGE = FAUX; VRAI; FAUX; VRAI; FAUX
LOI 10 VALEUR MIN = 1.
/
ACTIVATION DE L'ASSIMILATION = VRAI
/
/RENDU GRAPHIQUE DES RESULTATS
TRACER RESULTATS = FAUX
/
/TEMPS DE DEBUT DE L'ASSIMILATION EN SEC PAR RAPPORT AU DEBUT DE LA SIMULATION
TEMPS DE DEBUT DE L'ASSIMILATION = 57600
/
/TEMPS DE FIN DE L'ASSIMILATION EN SEC PAR RAPPORT AU DEBUT DE LA SIMULATION
TEMPS DE FIN DE L'ASSIMILATION = 86400
/

```

```
/FREQUENCE D'ASSIMILATION EN SEC
FREQUENCE D'ASSIMILATION = 3600.0
/
/TEMPS DE DEBUT DU CALAGE DES DEBITS D'APPORT PAR ASSIMILATION
TEMPS DE DEBUT DU CALAGE PAR ASSIMILATION = 57600
/
/TEMPS DE FIN DU CALAGE DES DEBITS D'APPORT PAR ASSIMILATION
TEMPS DE FIN DU CALAGE PAR ASSIMILATION = 86400
/
/FREQUENCE DES OBS POUR LE CALAGE PAR ASSIMILATION
FREQUENCE DES OBS POUR LE CALAGE = 3600.0
/
NOMBRE DE STATIONS DE MESURE = 5
BRANCHE DE LA STATION =
3;4;4;4;8
ABSCISSE DE LA STATION =
28044.0;73438.0;82063.0;108183.0;164135.0
NOM DE LA STATION =
'Condes'; 'Mussey'; 'Joinville'; 'Chamouilley'; 'Saucourt'
/DECALAGE DE L'ORIGINE DES OBSERVATIONS PAR RAPPORT A LA COTE MARINE EN METRES
DECALAGE DE LA STATION =
245.94;193.16;182.68;149.95;205.74
/
/ FLAG DATA Z (VRAI) OU Q (FAUX) POUR CALAGE
FLAG DATA Z OU Q POUR CALAGE = FAUX
/
/SEUIL DE REJET DES OBS POUR ASSIMILATION ET CALAGE PAR STATION (min en mt)
SEUIL REJET OBSERVATIONS Z =
0.8;0.8;0.6;0.4;0.6
/
/SEUIL DE REJET DES OBS DE DEBIT POUR CALAGE PAR STATION (min en m3/s)
SEUIL REJET OBSERVATIONS Q =
20.;30.;30.;20.;10.
/
/SEUIL REJET MISFIT ASSIM EN NOMBRE D'ECARTS TYPE
SEUIL REJET MISFIT ASSIM EN NOMBRE D'ECARTS TYPE = 20.0
/
/PREFIXE : LES FICHIERS SONT "$PREFIXE$NB_STAT.dat"
PREFIXE FICHIERS OBSERVATIONS = '../..../observations/observations_stat'
/
/FREQUENCE DES DONNEES DANS LE FICHIER D'OBSERVATIONS
FREQUENCE DES DONNEES DANS LE FICHIER D'OBSERVATIONS = 3600.
/
/TAILLE DE LA FENETRE POUR LA MOYENNE GLISSANTE DU LISSAGE DES OBS
TAILLE DE LA FENETRE POUR LE LISSAGE DES OBS = 3600.
/
/ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION EN METRES
ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION DE HAUTEUR A LA STATION =
0.04;0.05;0.04;0.05;0.05
/
/ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION DE DEBIT EN M3/s
ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION DE DEBIT A LA STATION =
5.;5.;5.;5.;5.
/
/ASSIMILATION LIGNE EAU
/
```

```

/ECART TYPE ERREUR D'EBAUCHE AUX POINTS D'OBSERVATION EN METRES
ECART TYPE ERREUR D'EBAUCHE A LA STATION =
0.05;0.01;0.05;0.05;0.05
/
/LONGUEUR DE PORTEE DE L'ERREUR D'EBAUCHE POUR Z EN METRES (AMONT)
LONGUEUR DE PORTEE AMONT POUR Z =
3000.0;20000.0;5000;20000;20000.0
/
/LONGUEUR DE PORTEE DE L'ERREUR D'EBAUCHE POUR Z EN METRES (AVAL)
LONGUEUR DE PORTEE AVAL POUR Z =
3000.0;4000.0;4000;4000;4000.0
/
/LONGUEUR DE PORTEE DE L'ERREUR D'EBAUCHE POUR Q EN METRES (AMONT)
LONGUEUR DE PORTEE AMONT POUR Q =
3000.0;20000.0;5000;20000;20000.0
/
/LONGUEUR DE PORTEE DE L'ERREUR D'EBAUCHE POUR Q EN METRES (AVAL)
LONGUEUR DE PORTEE AVAL POUR Q =
3000.0;4000.0;4000;4000;4000.0
/
/COEFF A COURBE DE TARAGE Q=A*Z^R+B
COEFF A COURBE DE TARAGE =
57.24;85.64;102.76;170.24;108.96
/
/COEFF R COURBE DE TARAGE Q=A*Z^R+B
COEFF R COURBE DE TARAGE =
1.;1.;1.;1.;1.
/
/COEFF B COURBE DE TARAGE Q=A*Z^R+B
COEFF B COURBE DE TARAGE =
-23.32;-55.06;-59.09;-159.34;-157.9
/
/CALAGE
/
/PERTURBATION DU PARAMETRE A POUR LOI DEBIT (adim)
PERTURBATION PARAMETRE A DEBIT = 1.2
/PERTURBATION DU PARAMETRE B POUR LOI DEBIT (m3/sec)
PERTURBATION PARAMETRE B DEBIT = 5
/PERTURBATION DU PARAMETRE C POUR LOI DEBIT (sec)
PERTURBATION PARAMETRE C DEBIT = 7200
/
/PERTURBATION DU PARAMETRE A POUR LOI COTE (adim)
PERTURBATION PARAMETRE A COTE = 1.1
/PERTURBATION DU PARAMETRE B POUR LOI COTE (m)
PERTURBATION PARAMETRE B COTE = 0.5
/PERTURBATION DU PARAMETRE C POUR LOI COTE (sec)
PERTURBATION PARAMETRE C COTE = 7200
/
/ECART TYPE PARAMETRE A POUR LOI DEBIT (adim)
ECART TYPE PARAMETRE A DEBIT = 0.2
/ECART TYPE PARAMETRE B POUR LOI DEBIT (m3/sec)
ECART TYPE PARAMETRE B DEBIT = 5
/ECART TYPE PARAMETRE C POUR LOI DEBIT (sec)
ECART TYPE PARAMETRE C DEBIT = 7200

```

```

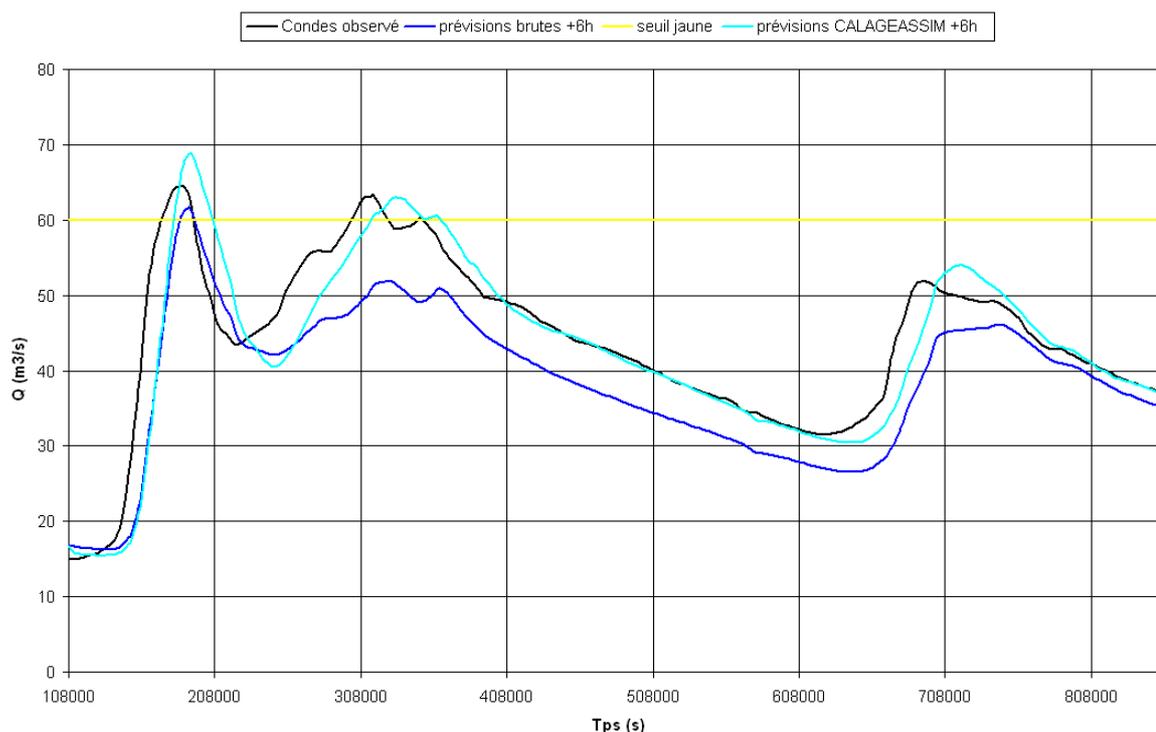
/
/ECART TYPE PARAMETRE A POUR LOI COTE (adim)
ECART TYPE PARAMETRE A COTE = 0.1
/ECART TYPE PARAMETRE B POUR LOI COTE (m)
ECART TYPE PARAMETRE B COTE = 0.5
/ECART TYPE PARAMETRE C POUR LOI COTE (sec)
ECART TYPE PARAMETRE C COTE = 7200
/
/SEUIL DE REJET DES OBS POUR LE CALAGE EN % DE LA VALEUR MODELE
SEUIL REJET MISFIT CALAGE = 100.
/
/ACTIVATION DE LA SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE
ACTIVATION DE LA SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE = VRAI
/
/TEMPS DE SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE (RELATIF AU DEBUT DE LA SIM. secs)
TEMPS DE SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE = 86400
/
/CHEMIN SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE
CHEMIN SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE = '../..//DonneesStat'

```

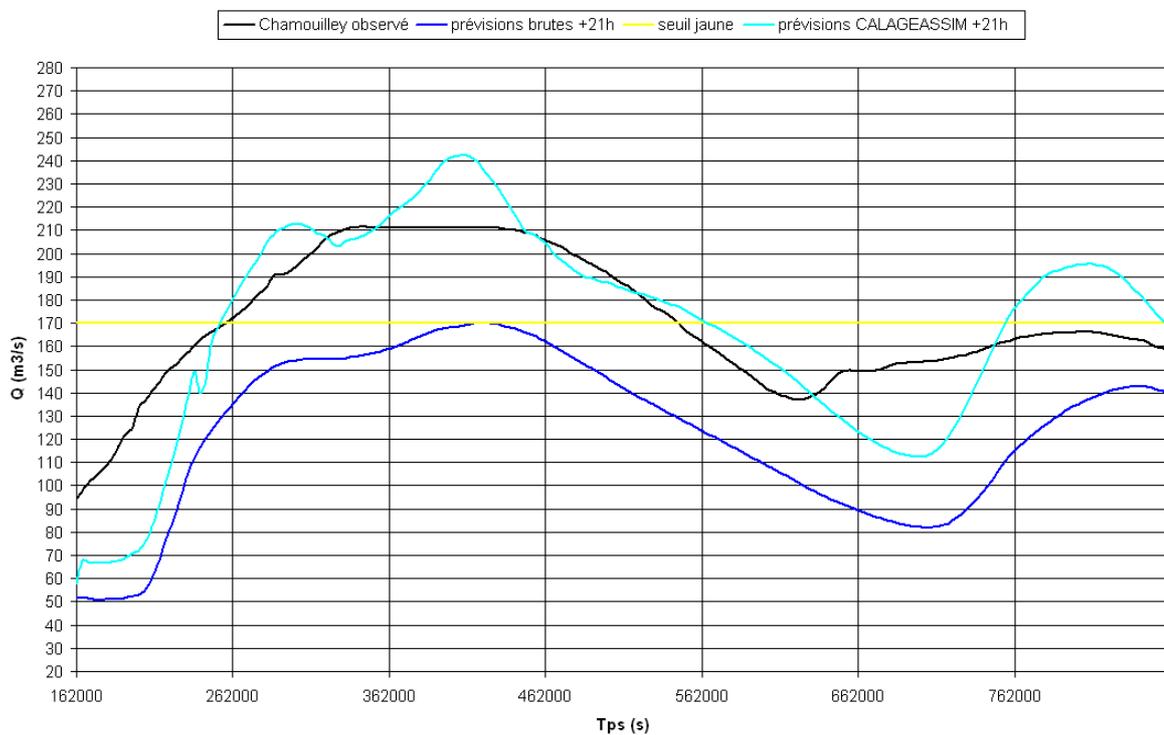
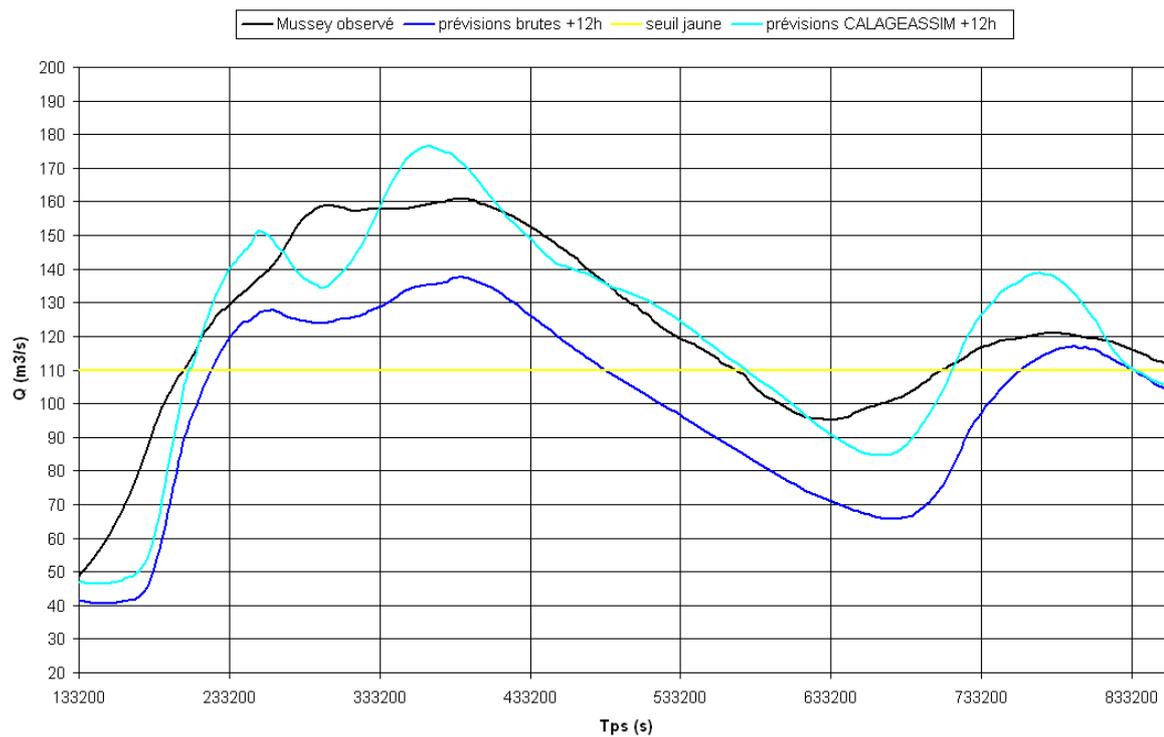
Annexe 2 : Résultats de la modélisation et de l'assimilation de données

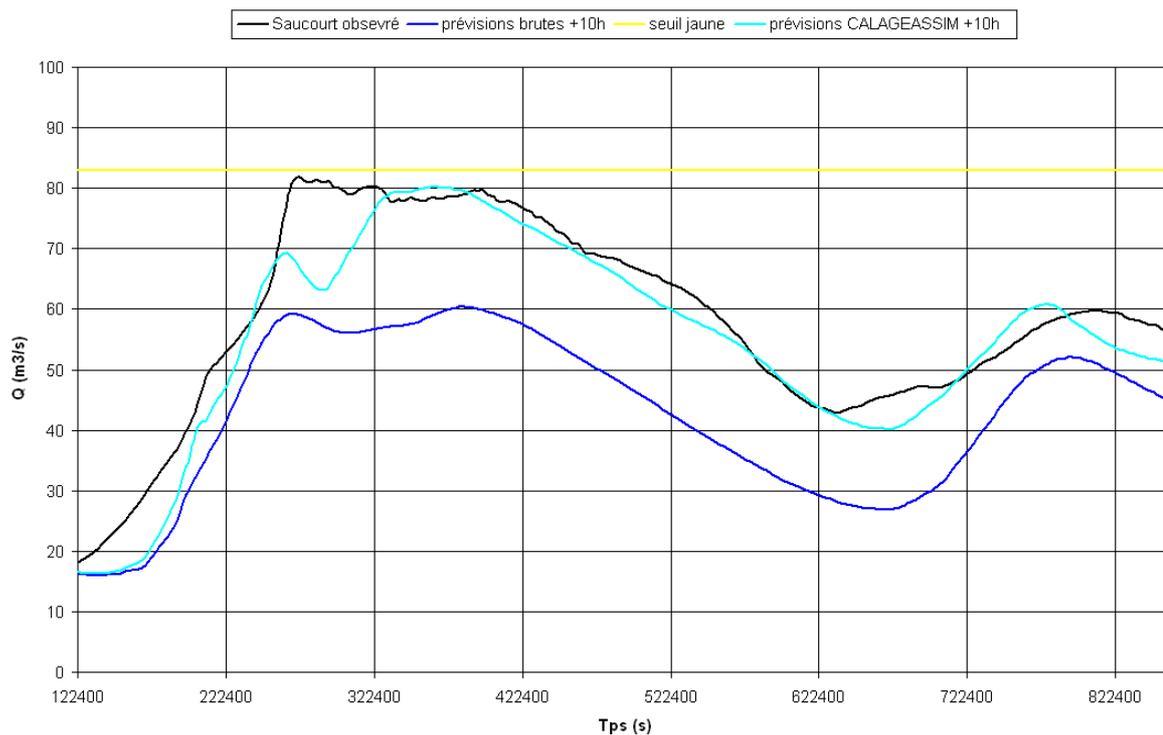
Ci-dessous, sont présentés pour les dix crues de validation les observations aux six stations de sortie (courbe noire), les prévisions brutes du modèle MAG (courbe bleu) et les résultats après assimilation de données (CALAGEASSIM, enchaînement des deux types d'assimilation, courbe bleu ciel). Le seuil jaune correspond au seuil de vigilance opérationnel utilisé au Service de Prévision des Crues Seine Amont Marne Amont, le but étant d'anticiper d'au minimum 24h ce dépassement de seuil aux différentes stations. Lorsqu'ils sont disponibles, les résultats à Chaumont et Joinville seront donnés en hauteur d'eau (limnigramme) à +5h et +13h et en débits pour les stations de Condes, Mussey, Chamouilley et Saucourt

Crue 2

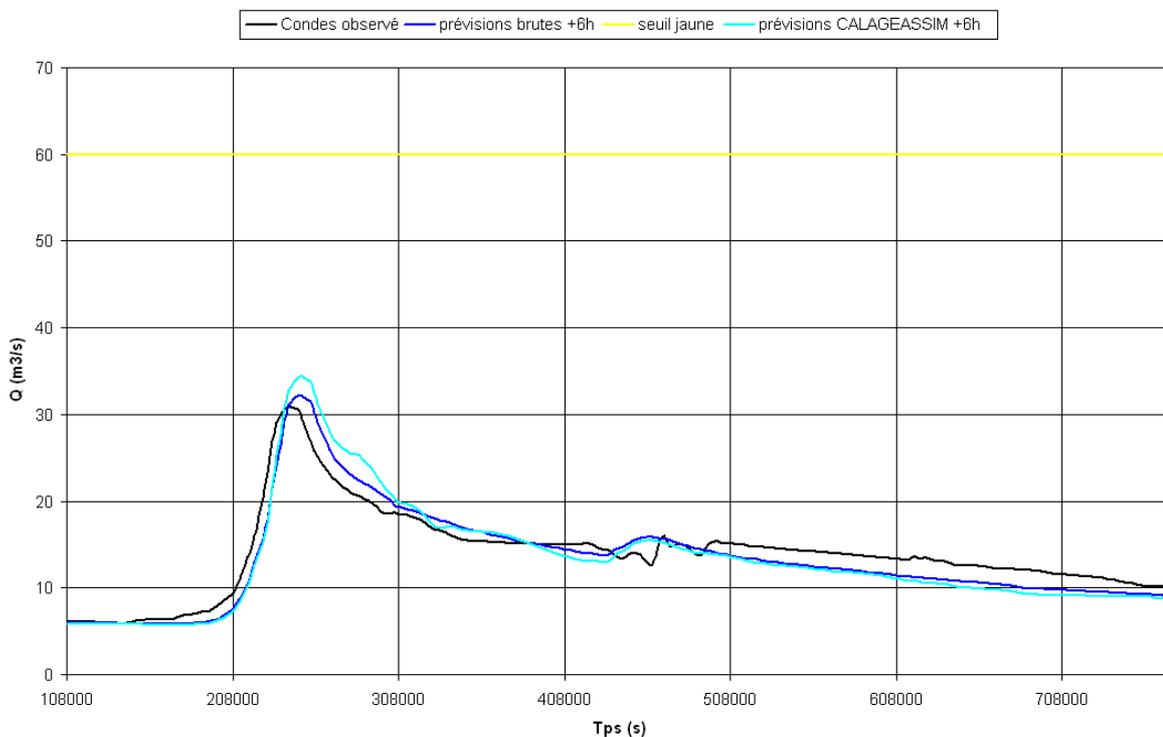


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

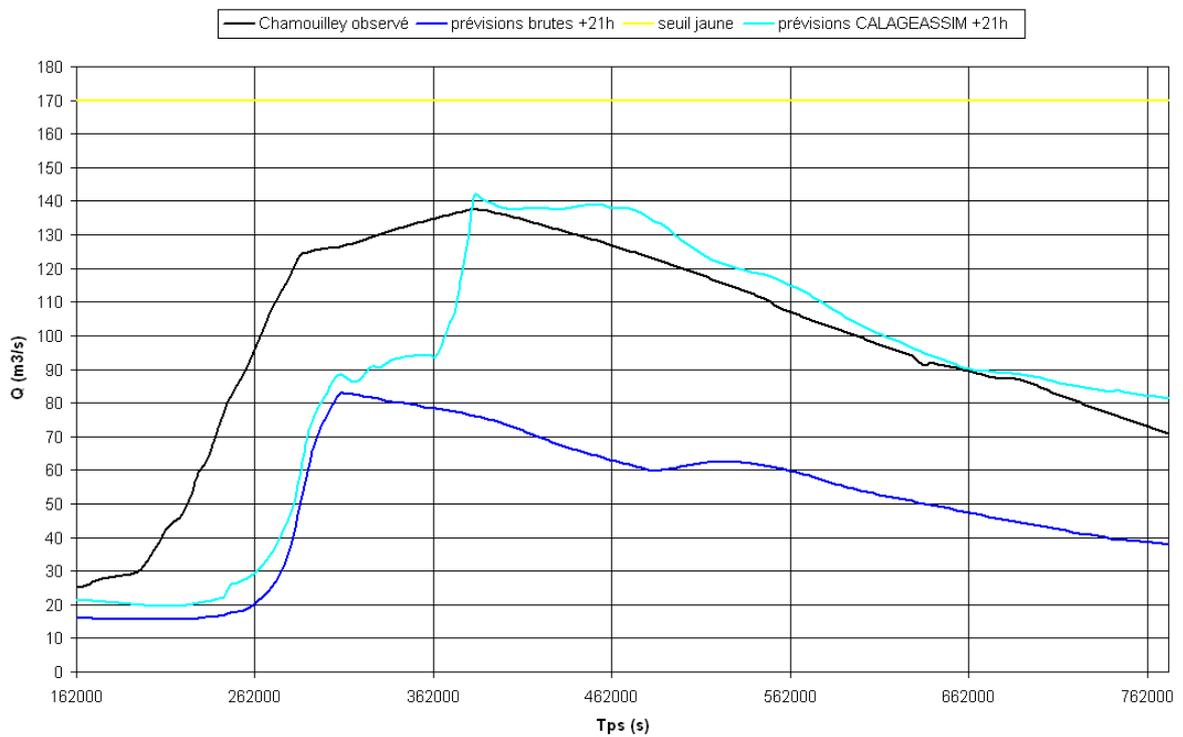
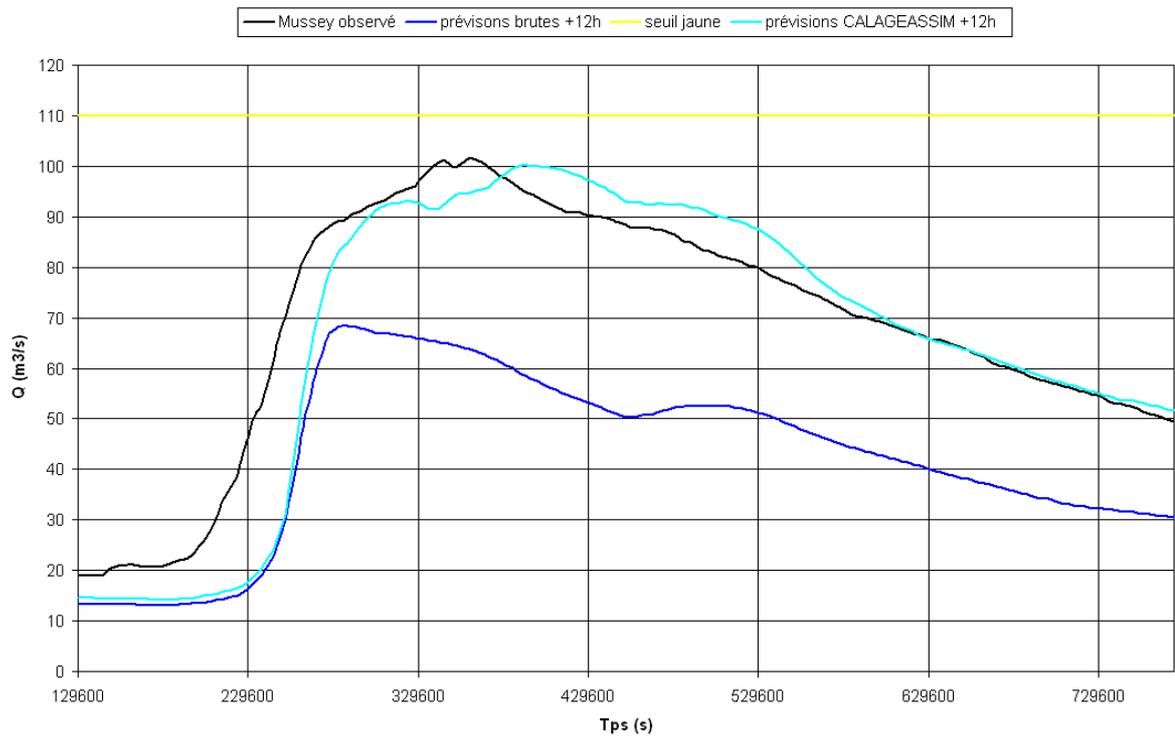


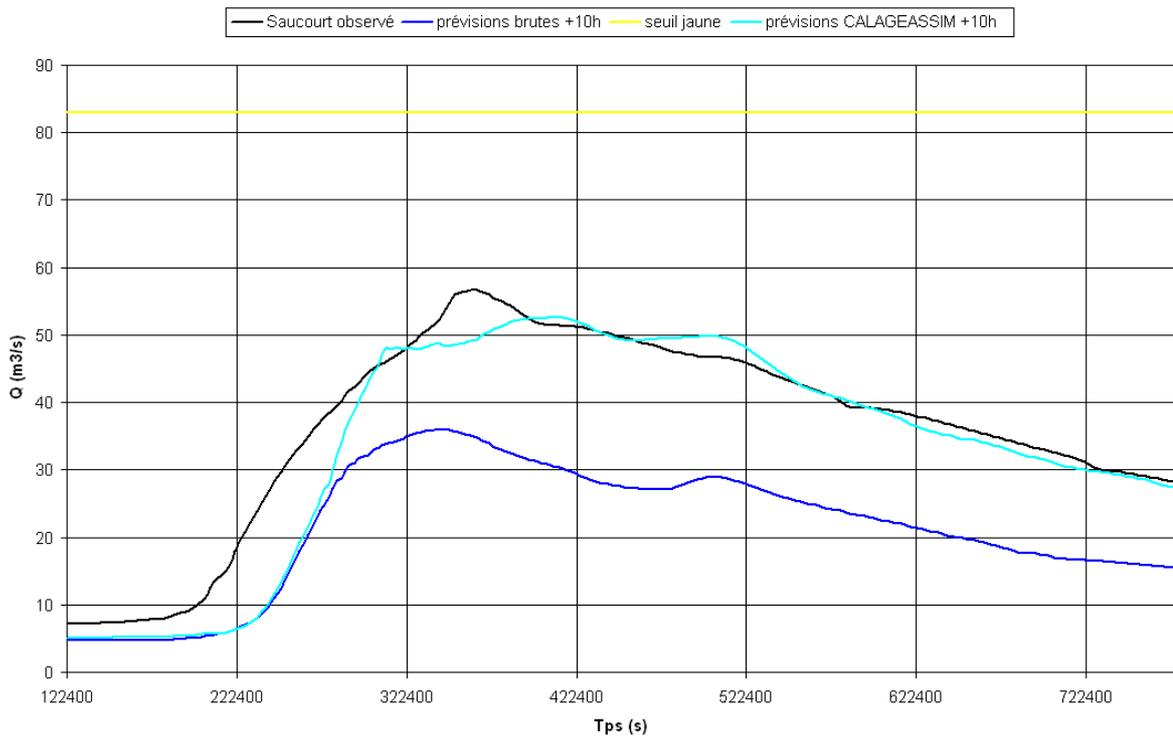


Crue 4

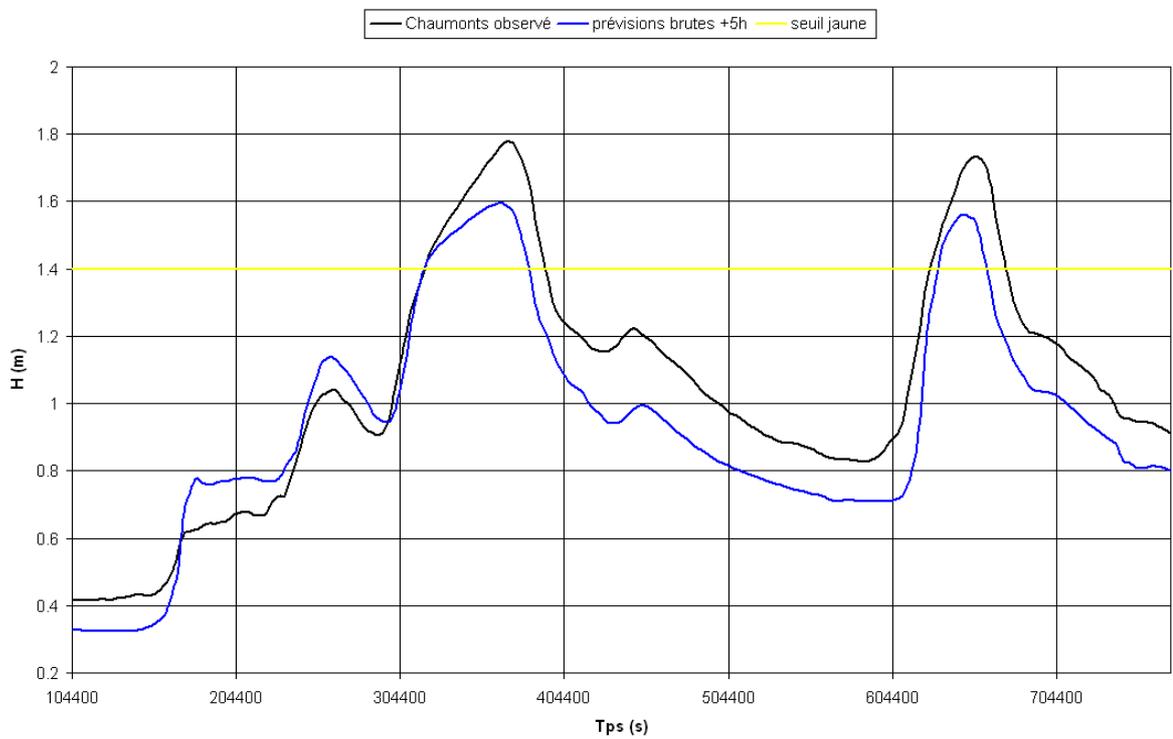


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

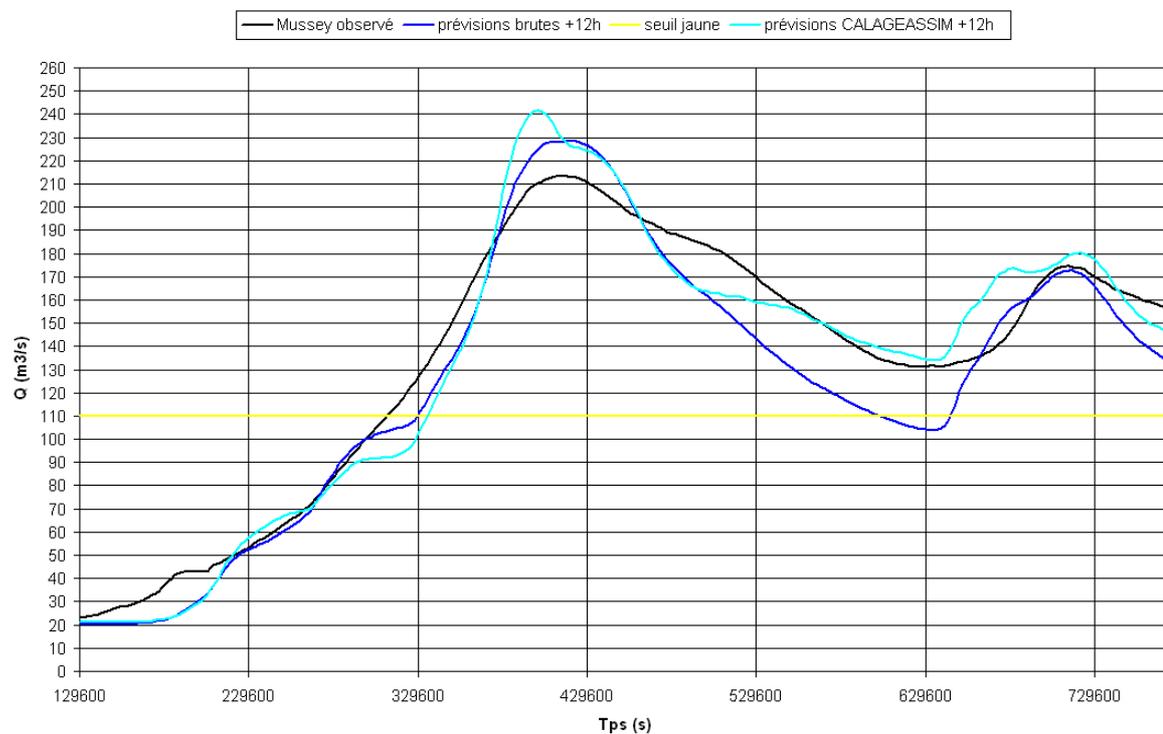
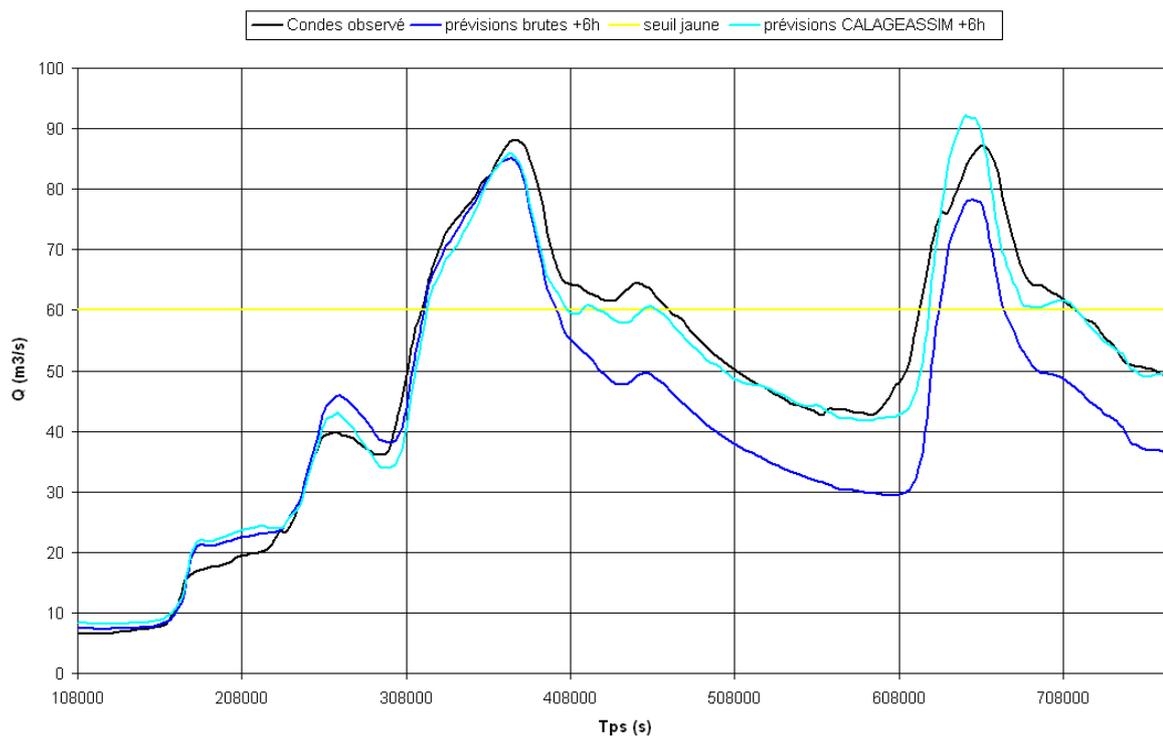




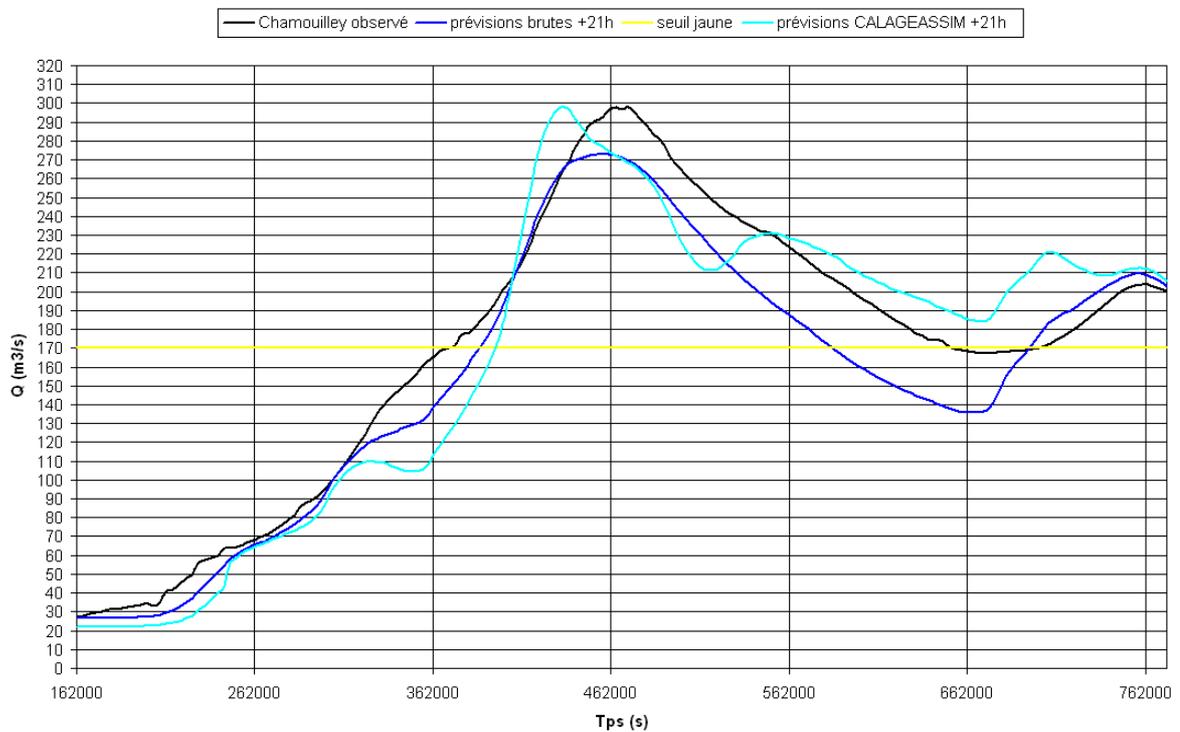
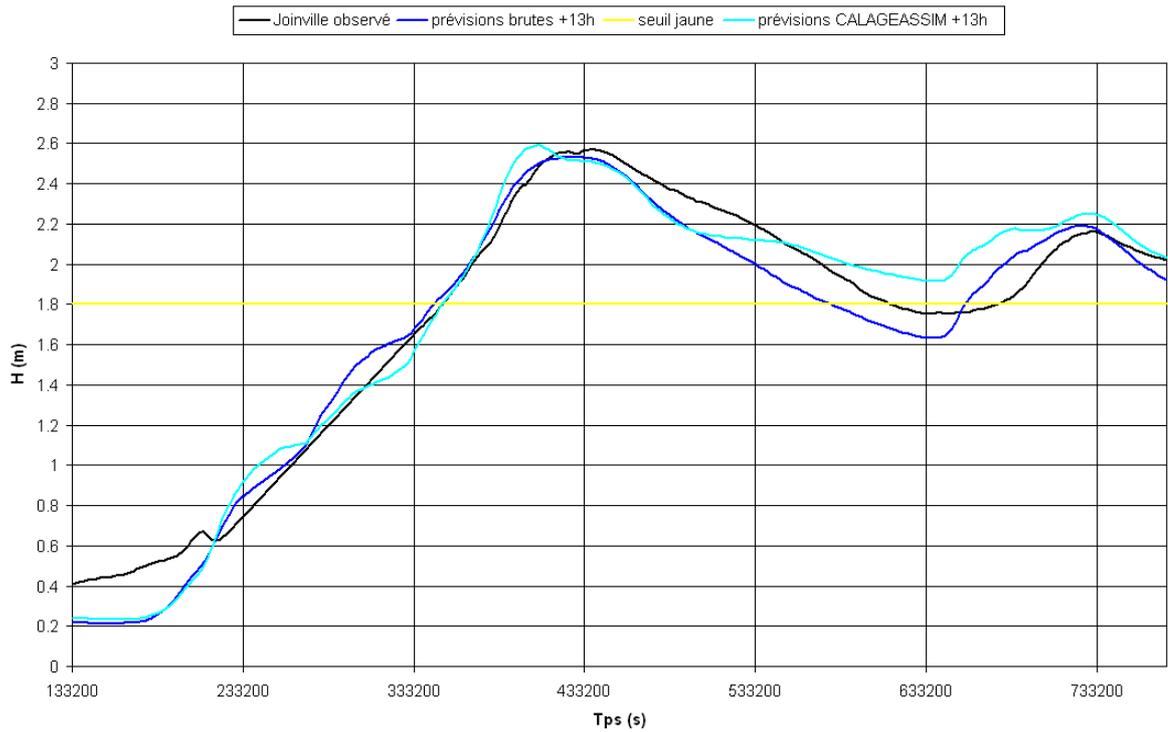
Crue 5

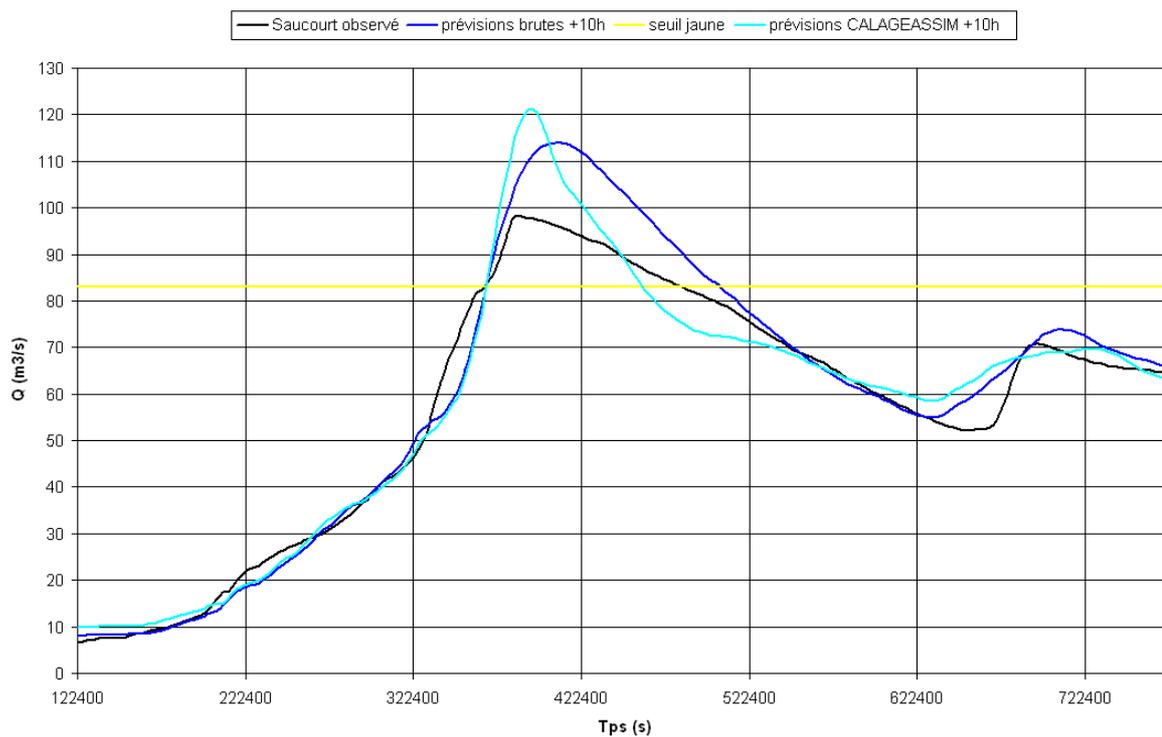


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

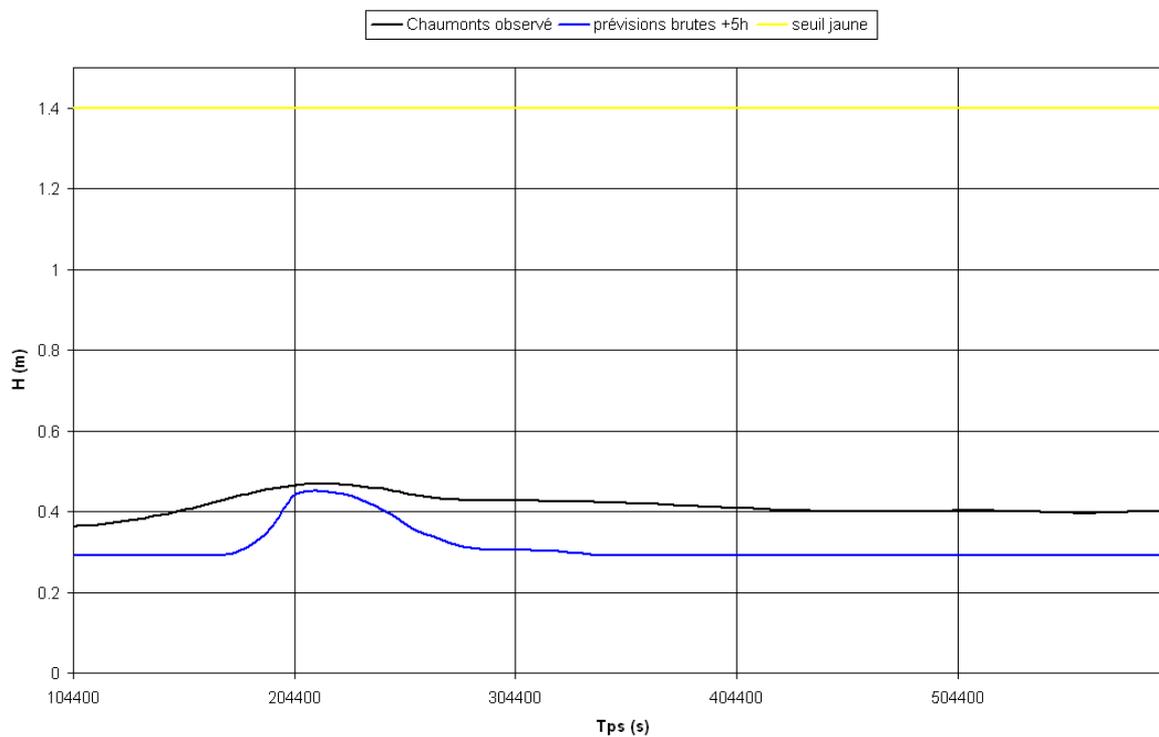


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

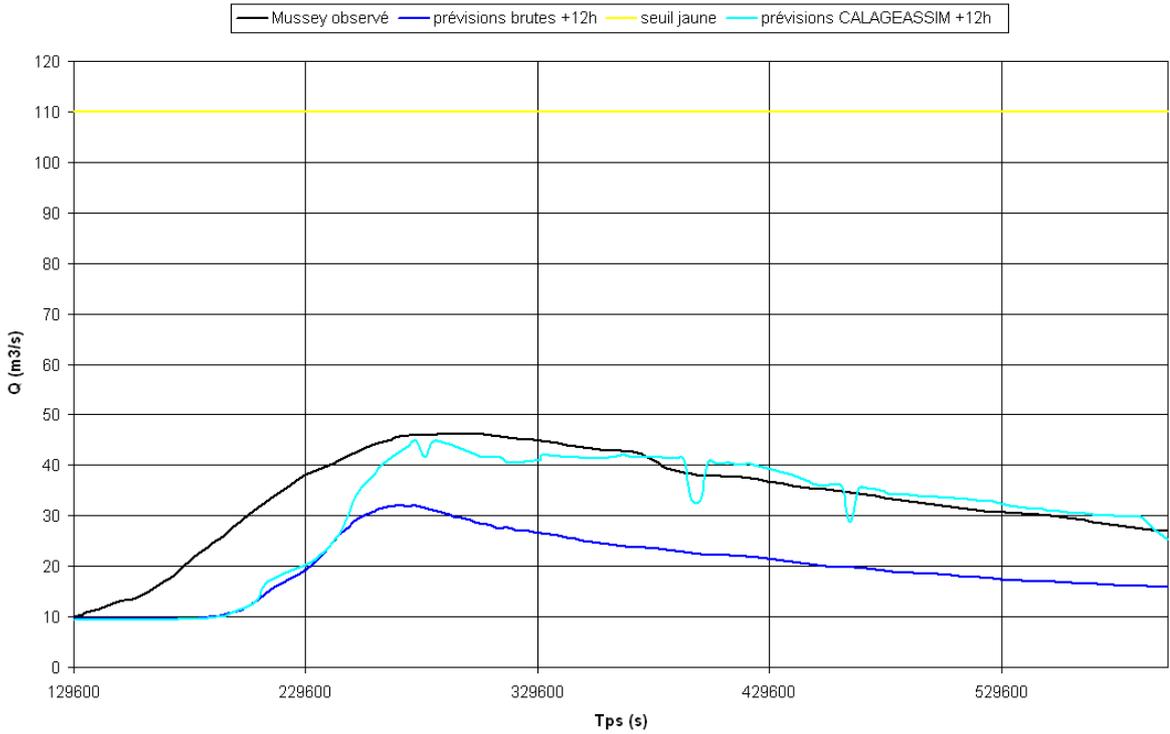
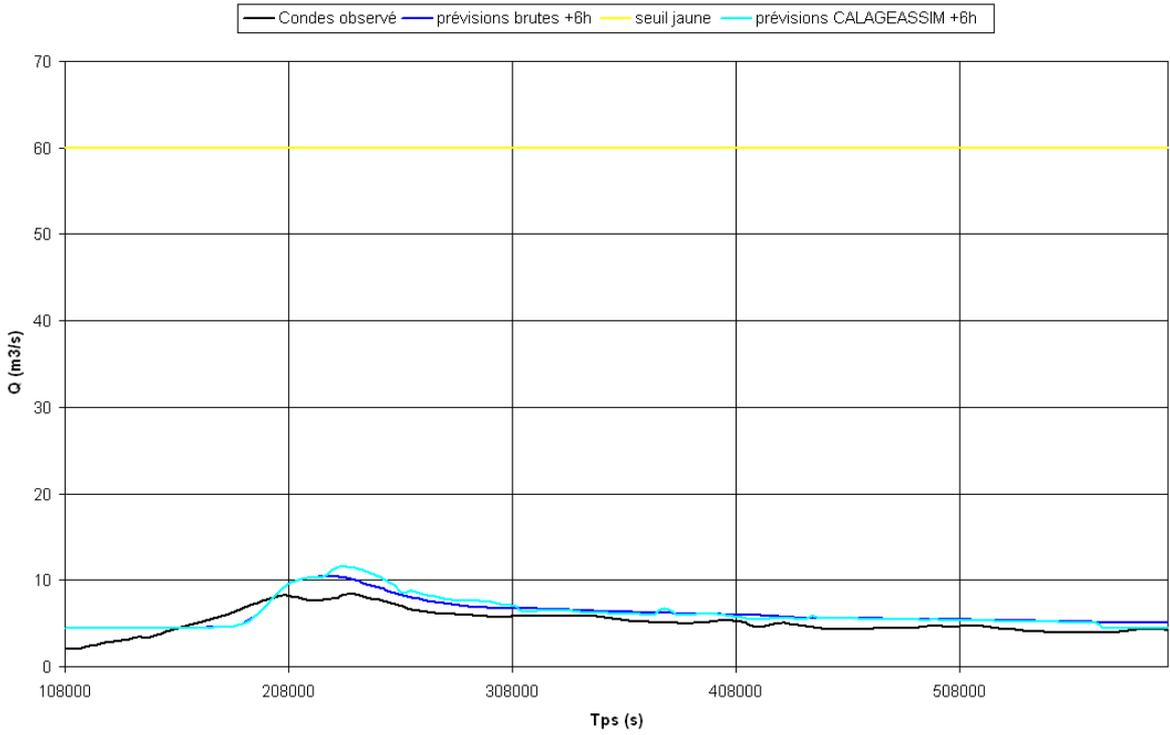




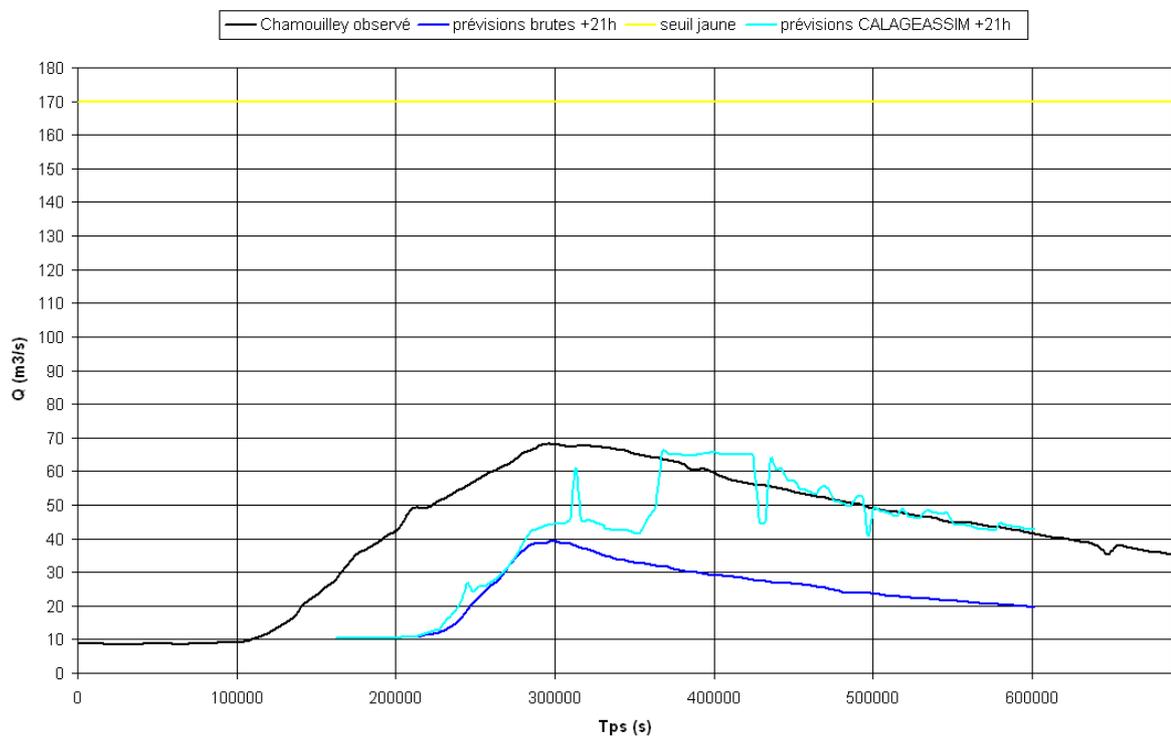
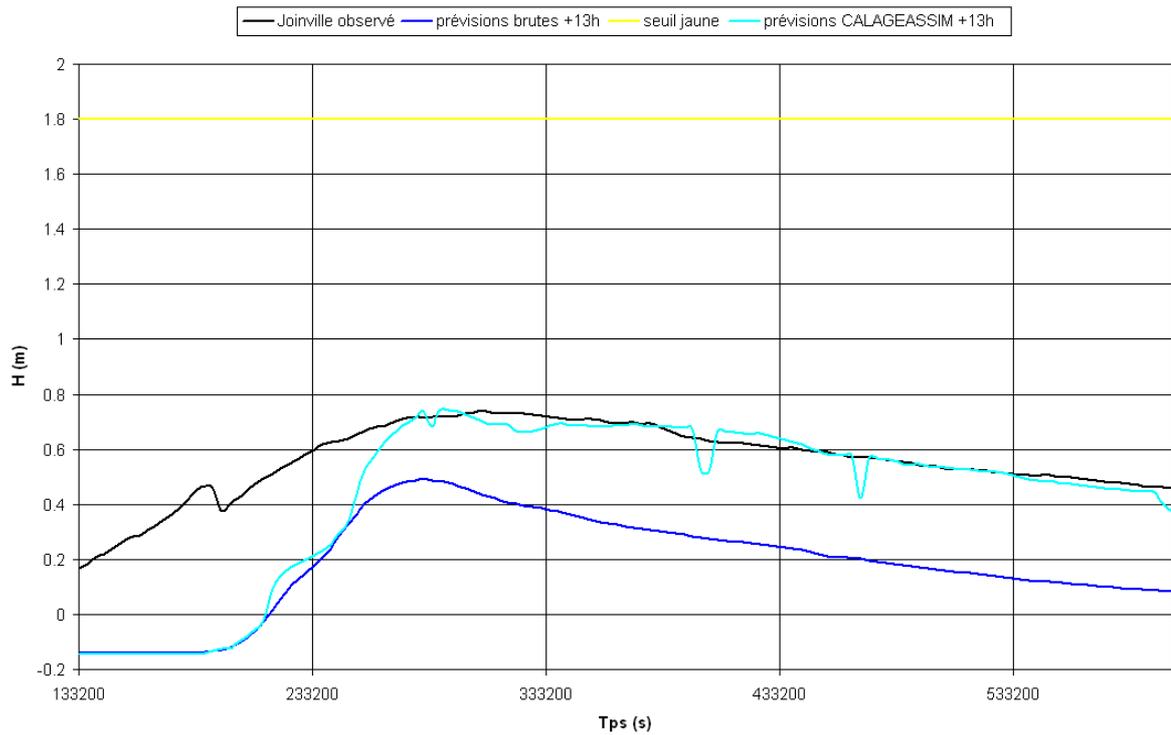
Crue 6

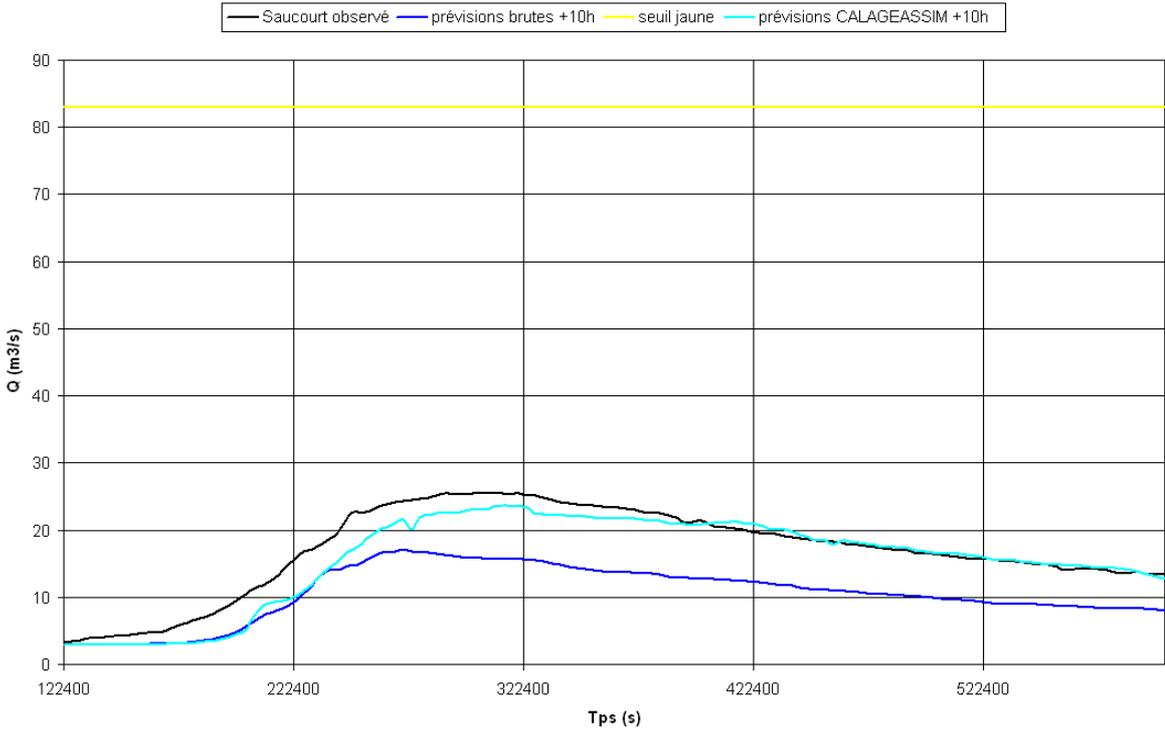


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

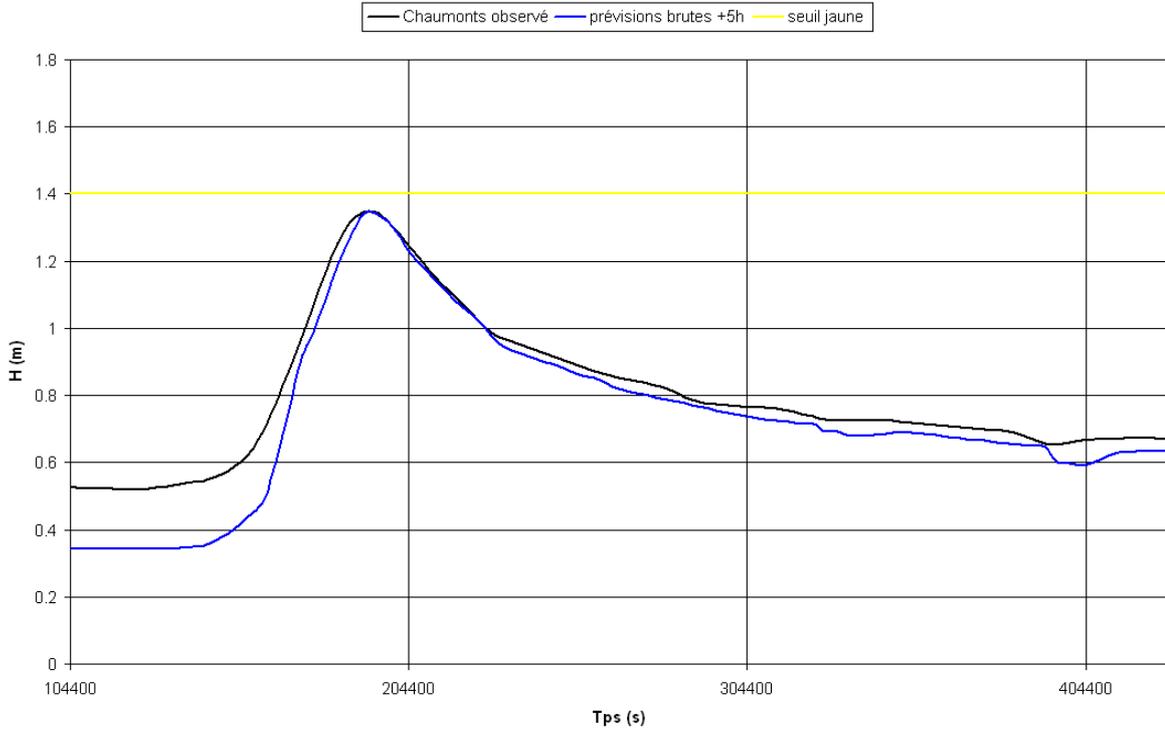


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

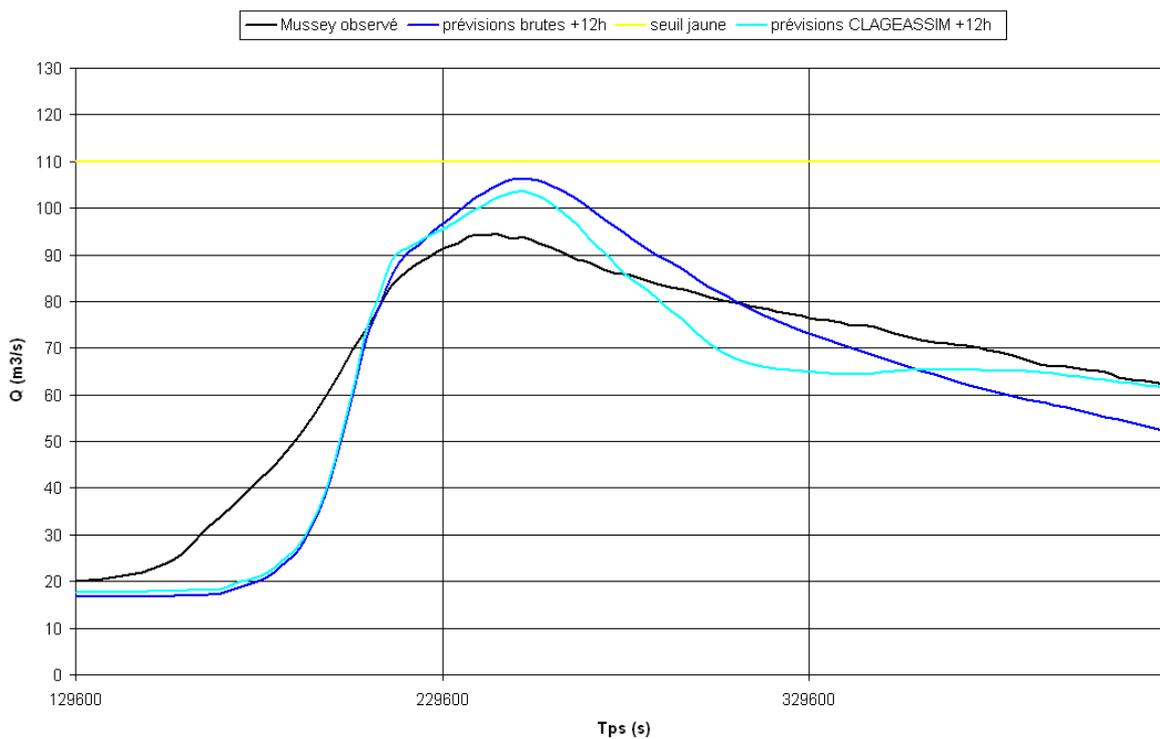
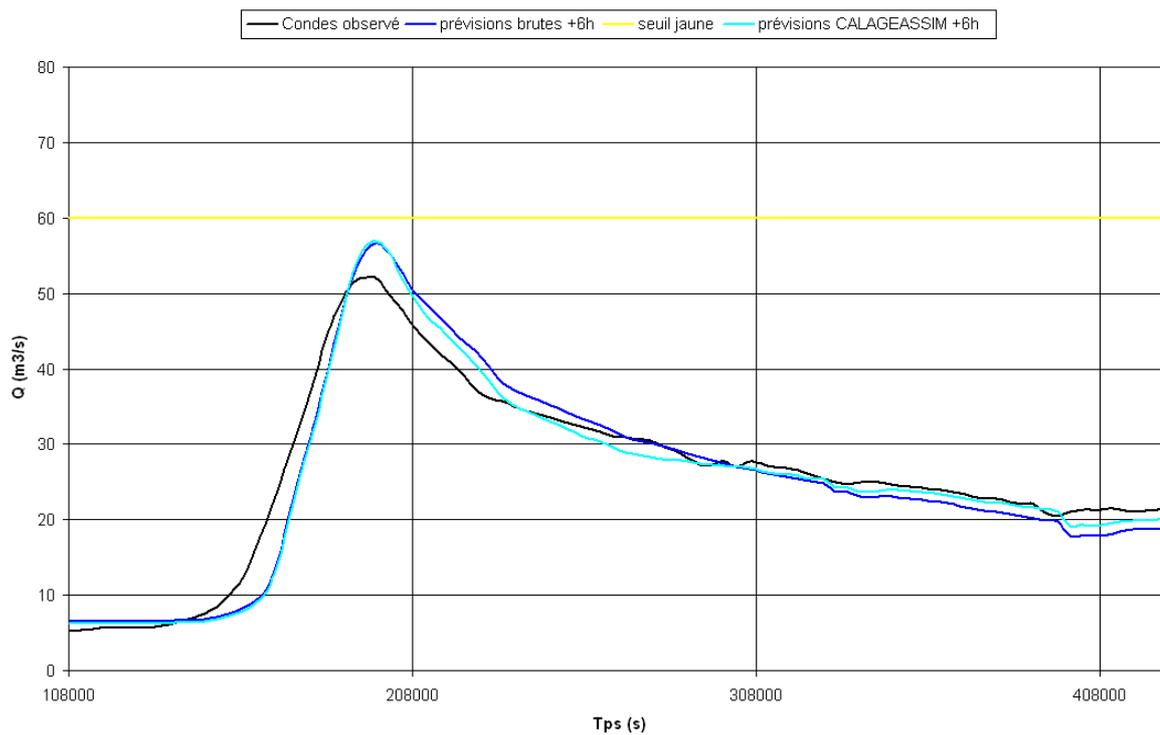




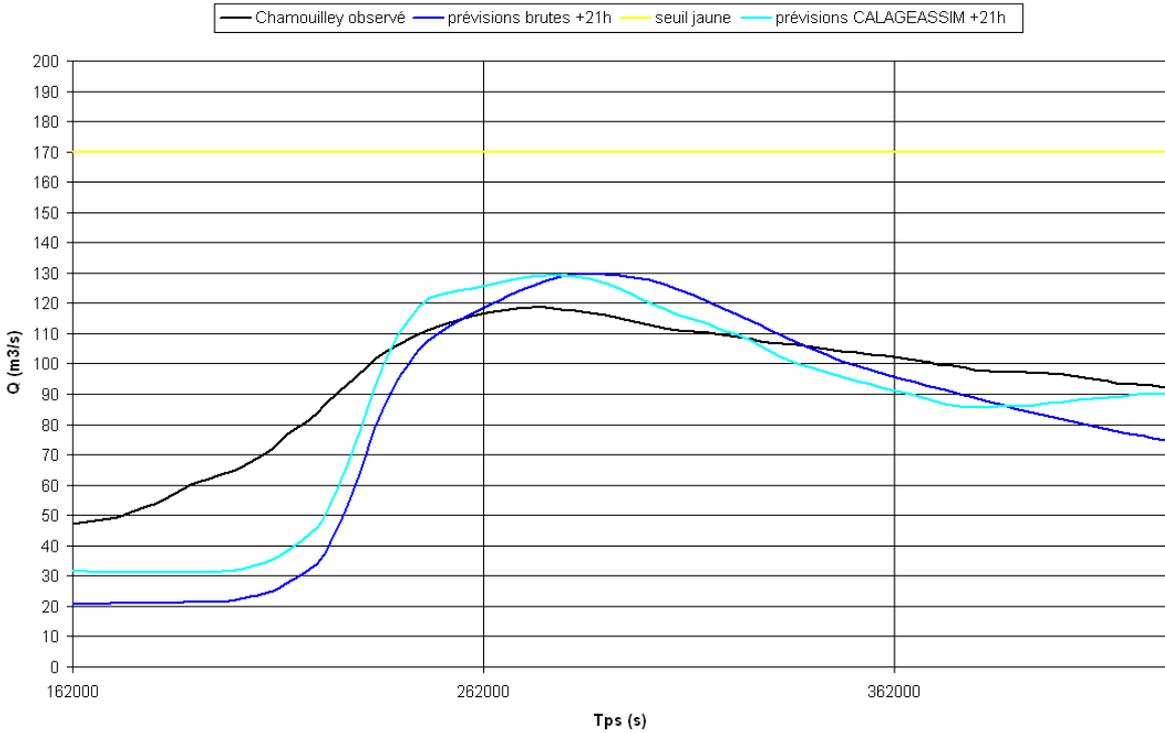
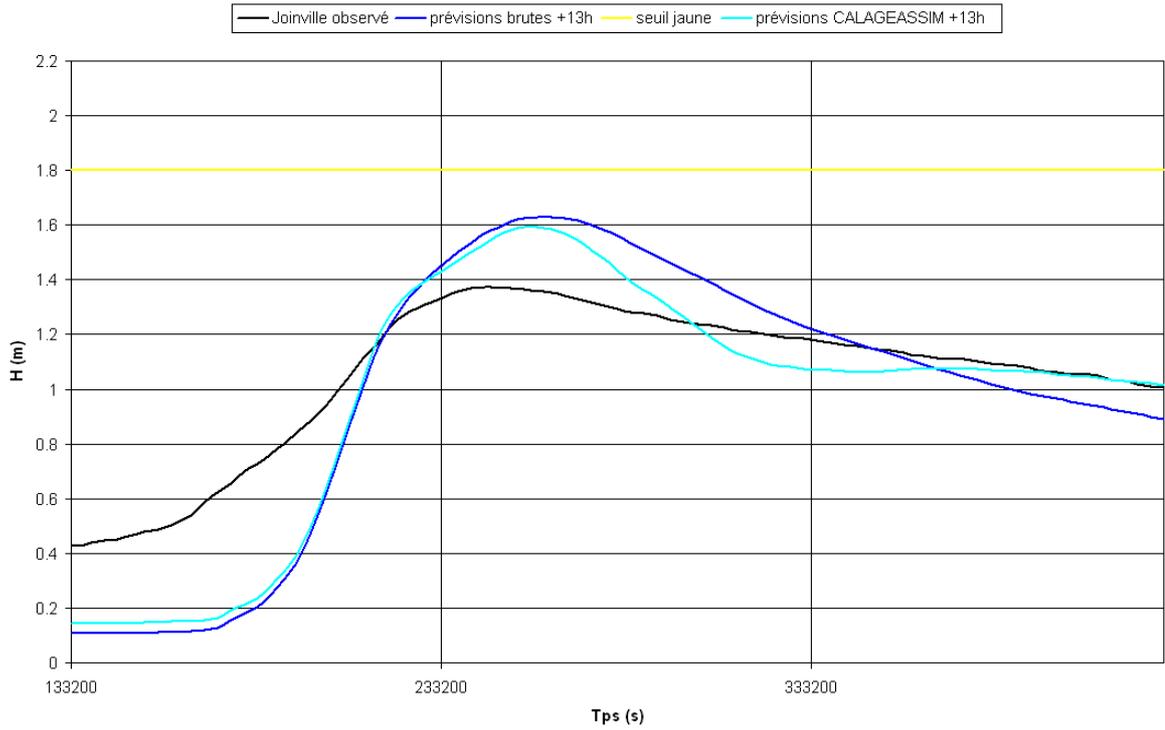
Crue 9

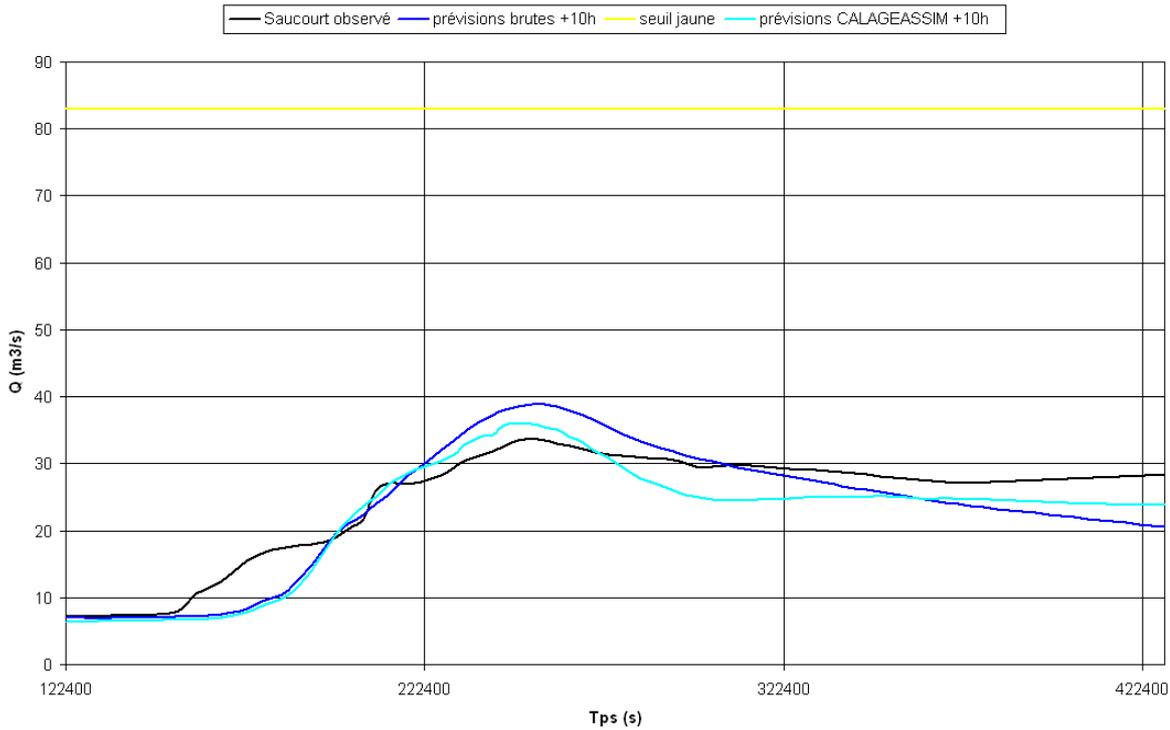


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

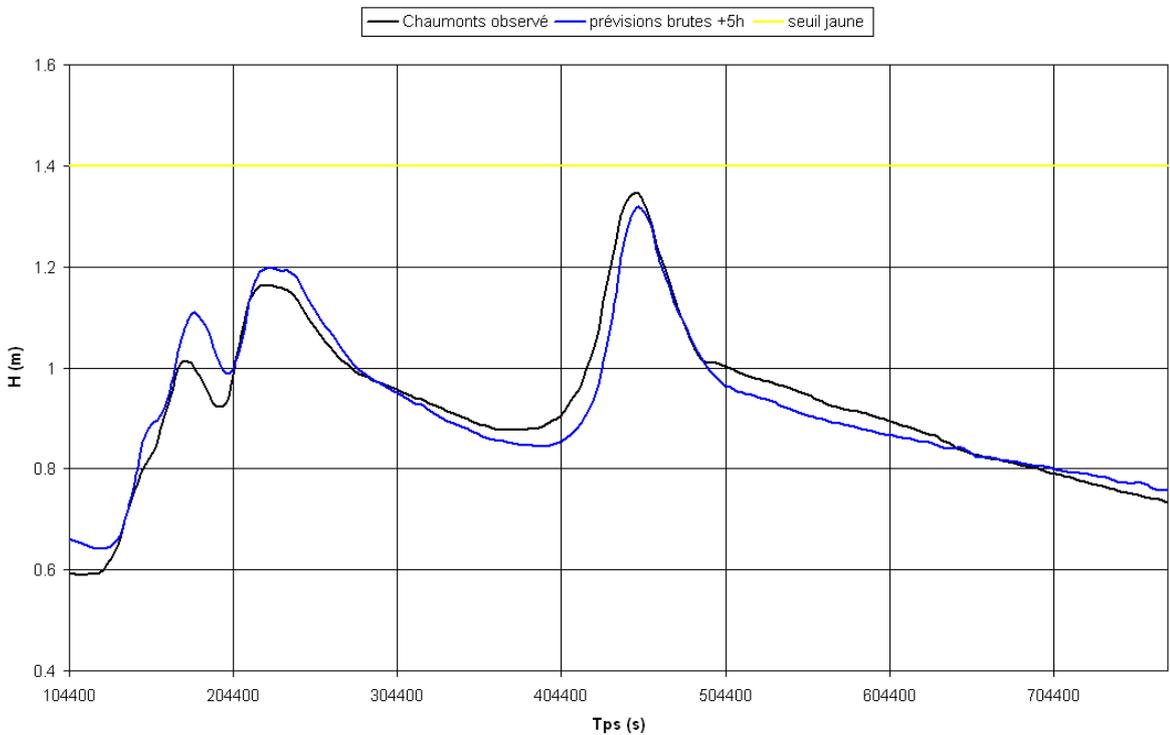


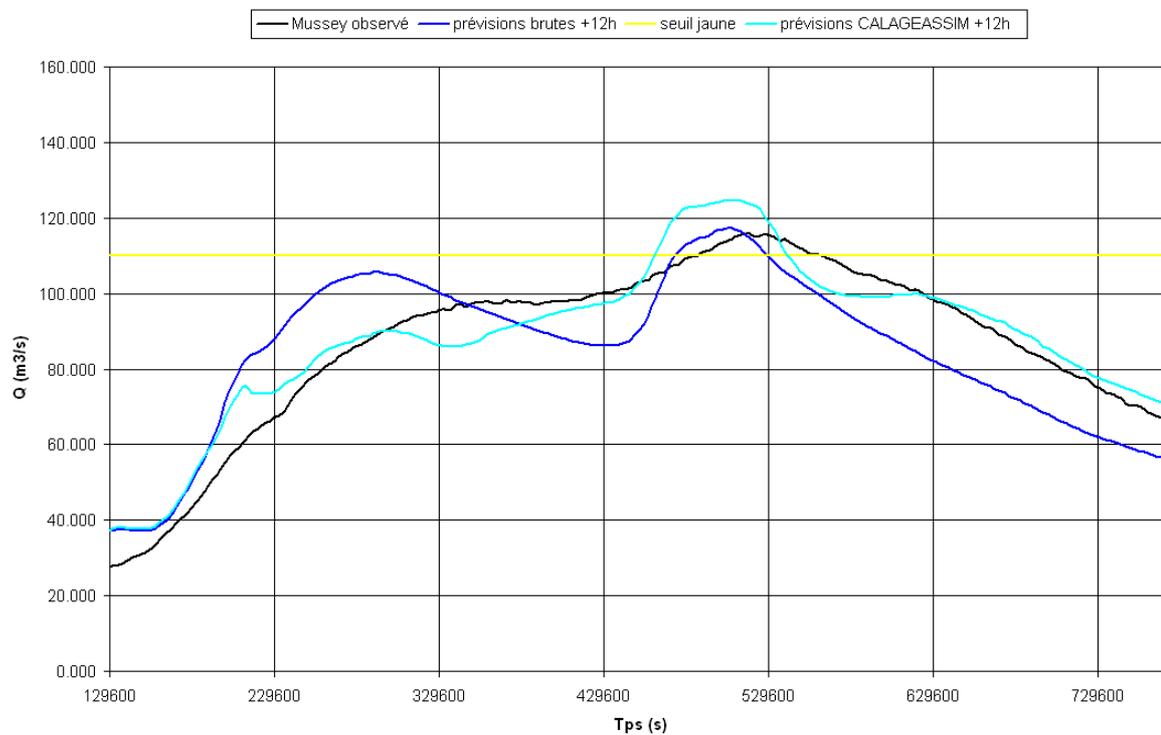
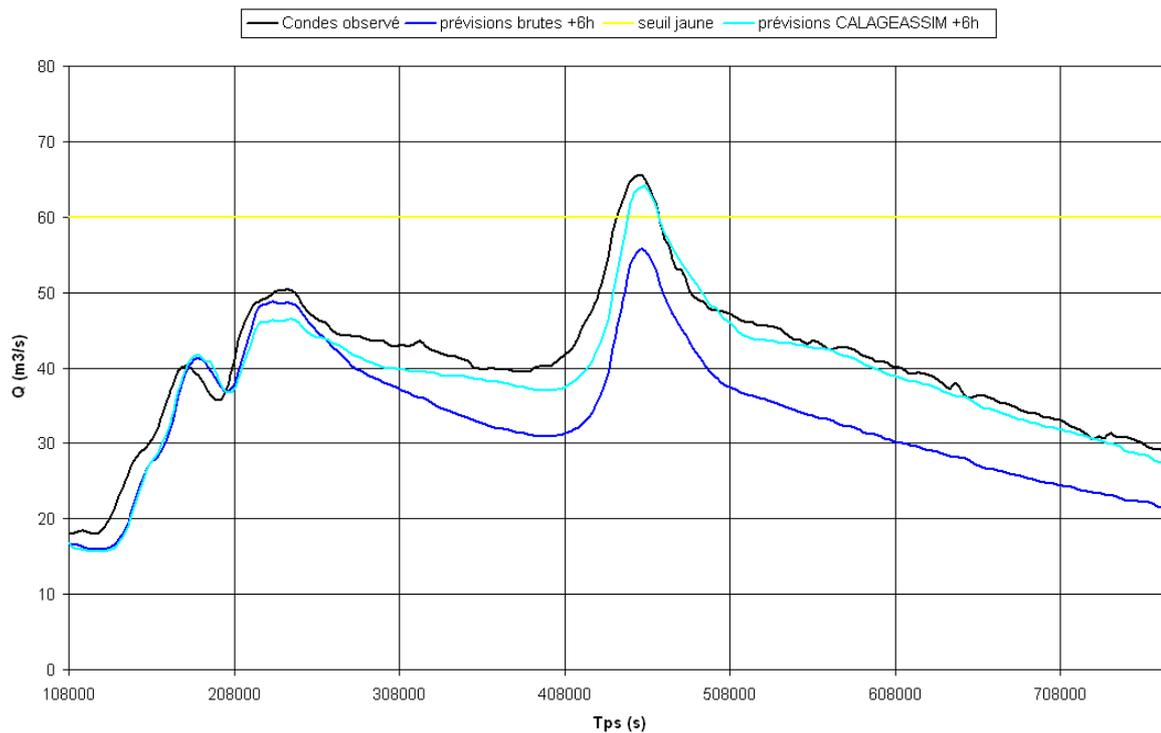
Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »



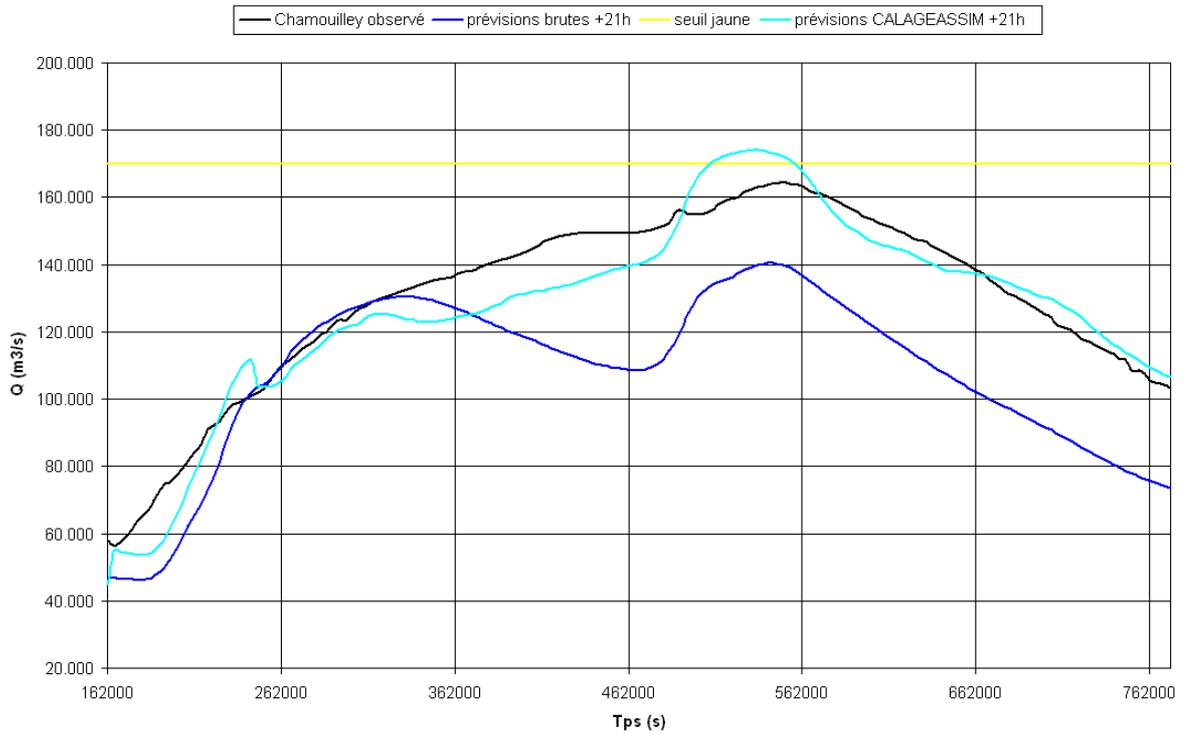
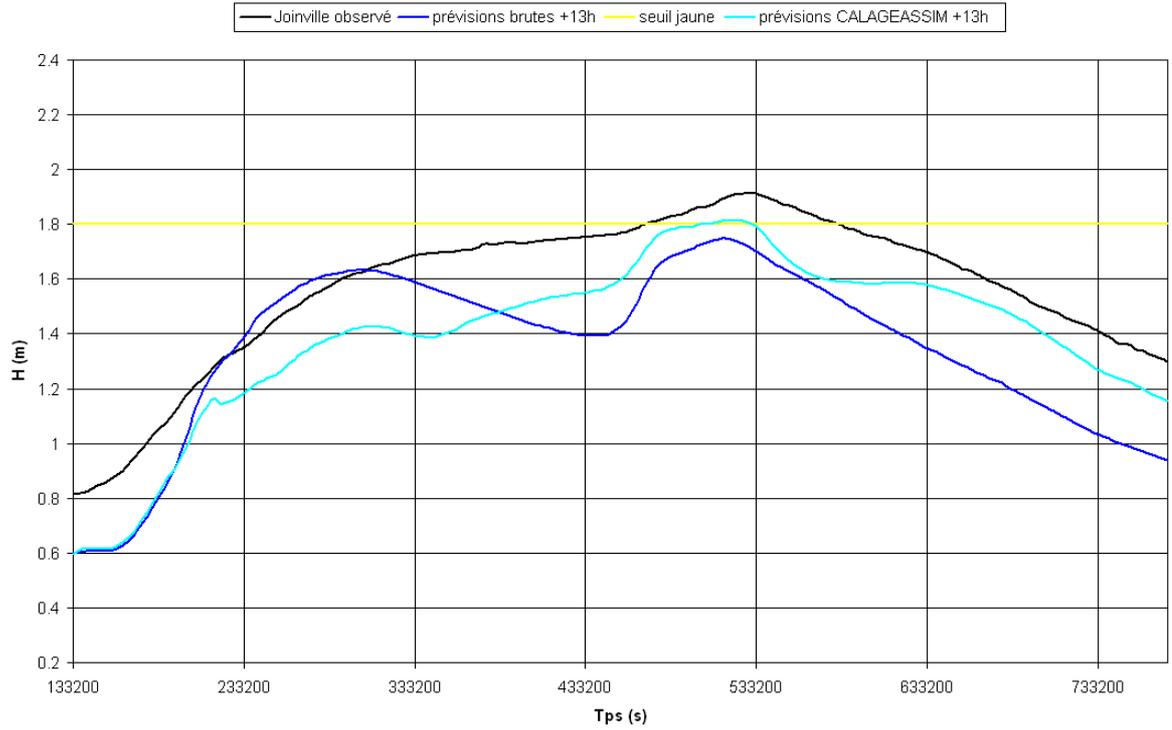


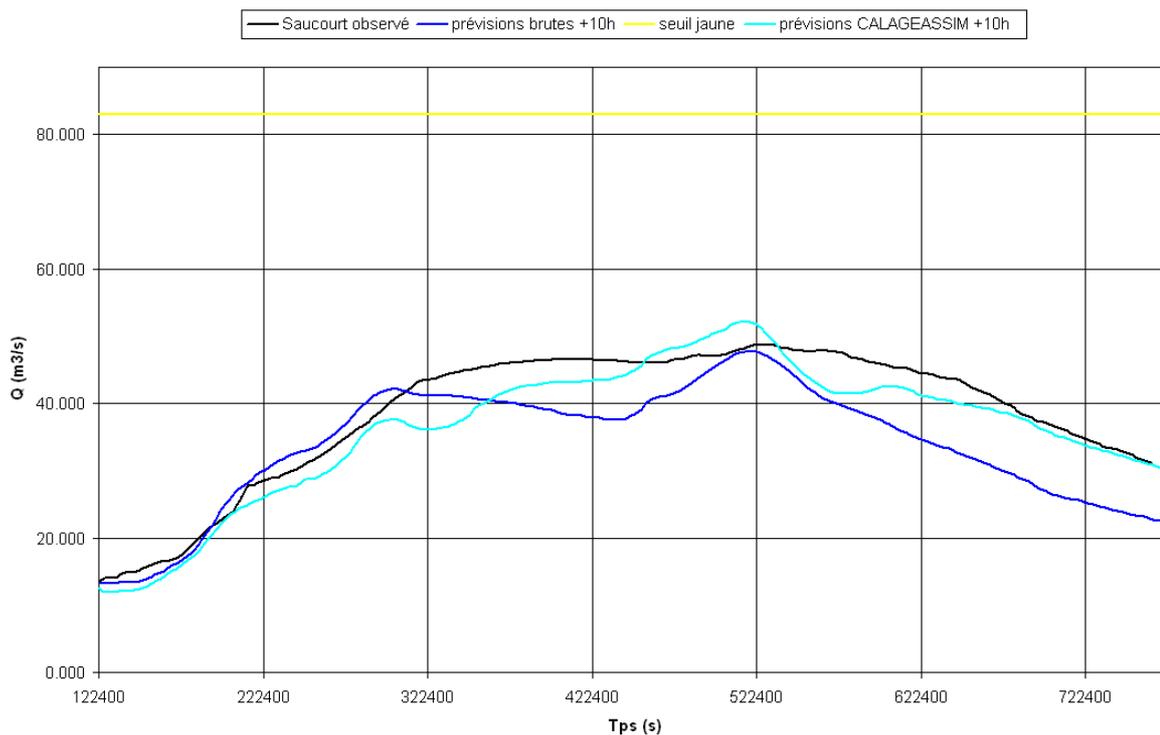
Crue 13



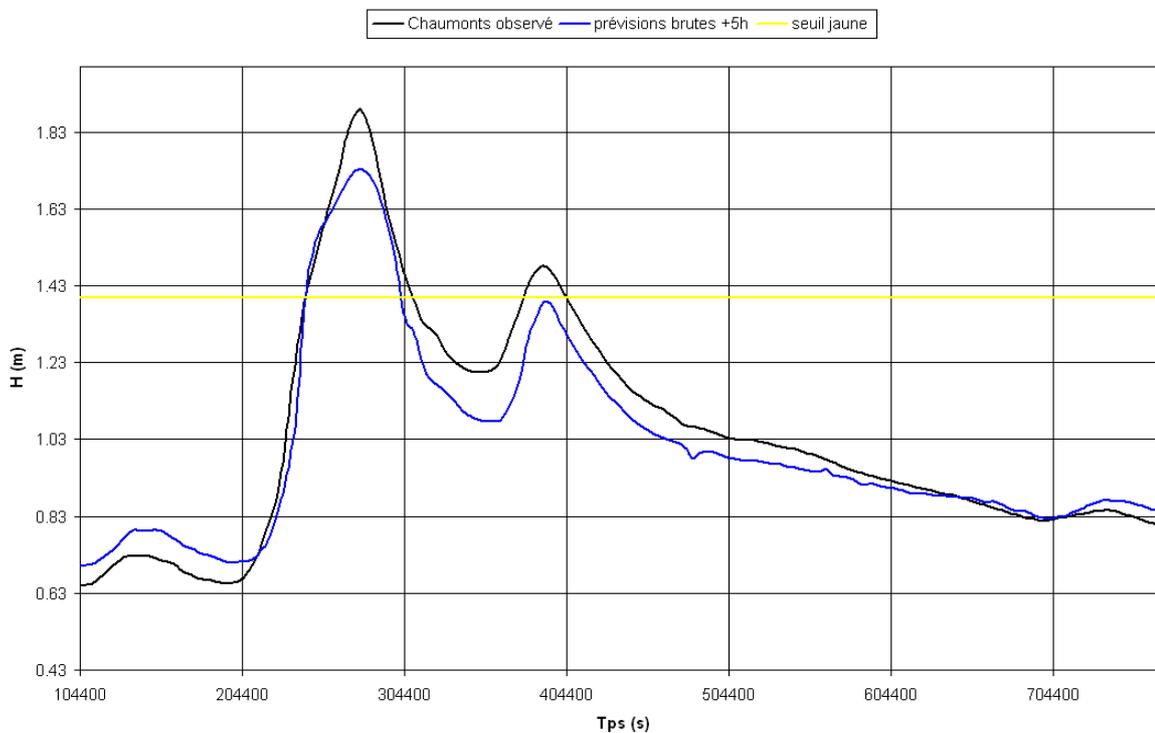


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

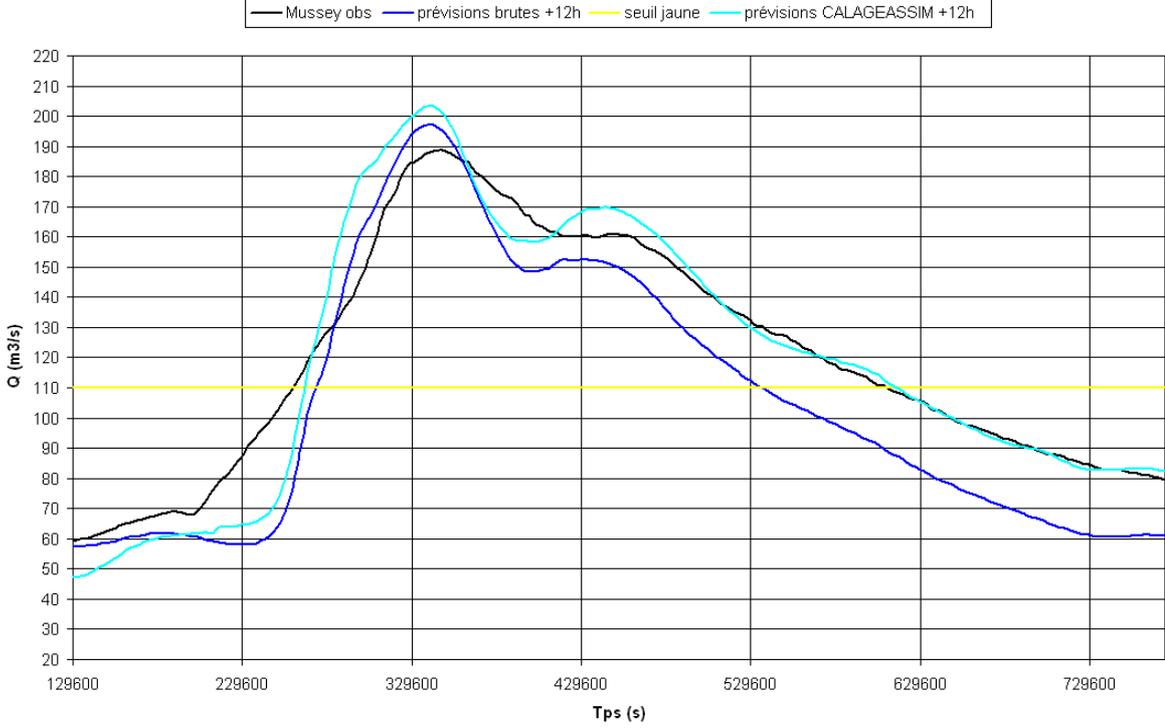
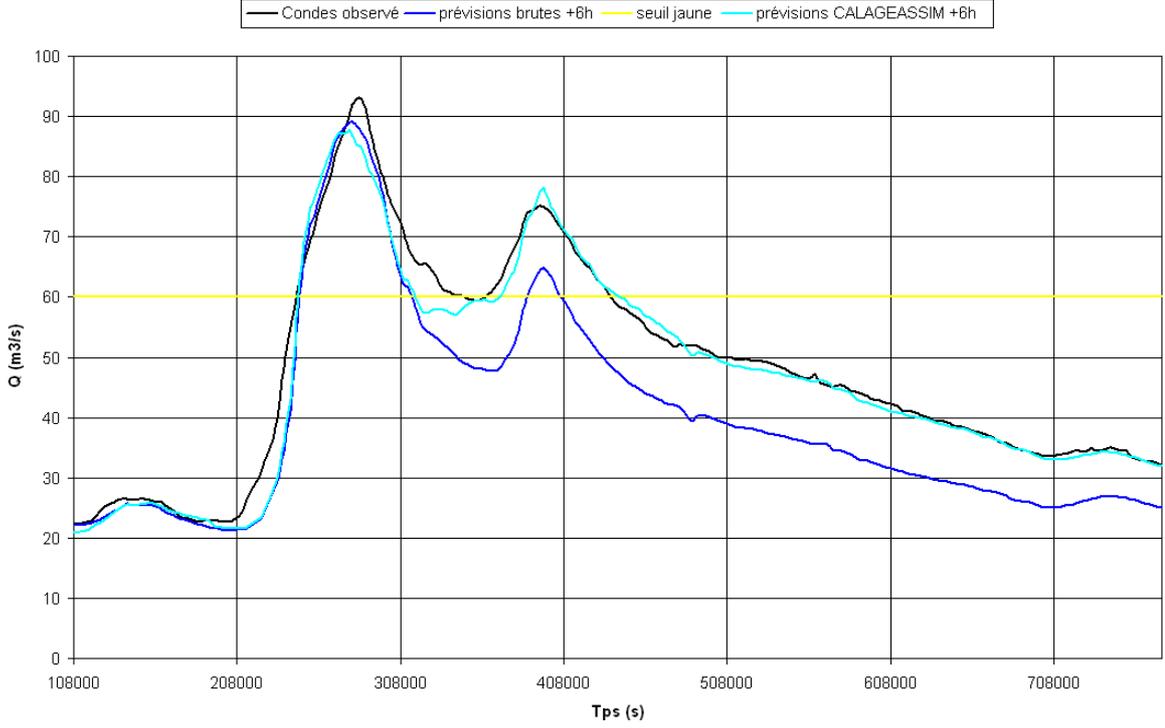




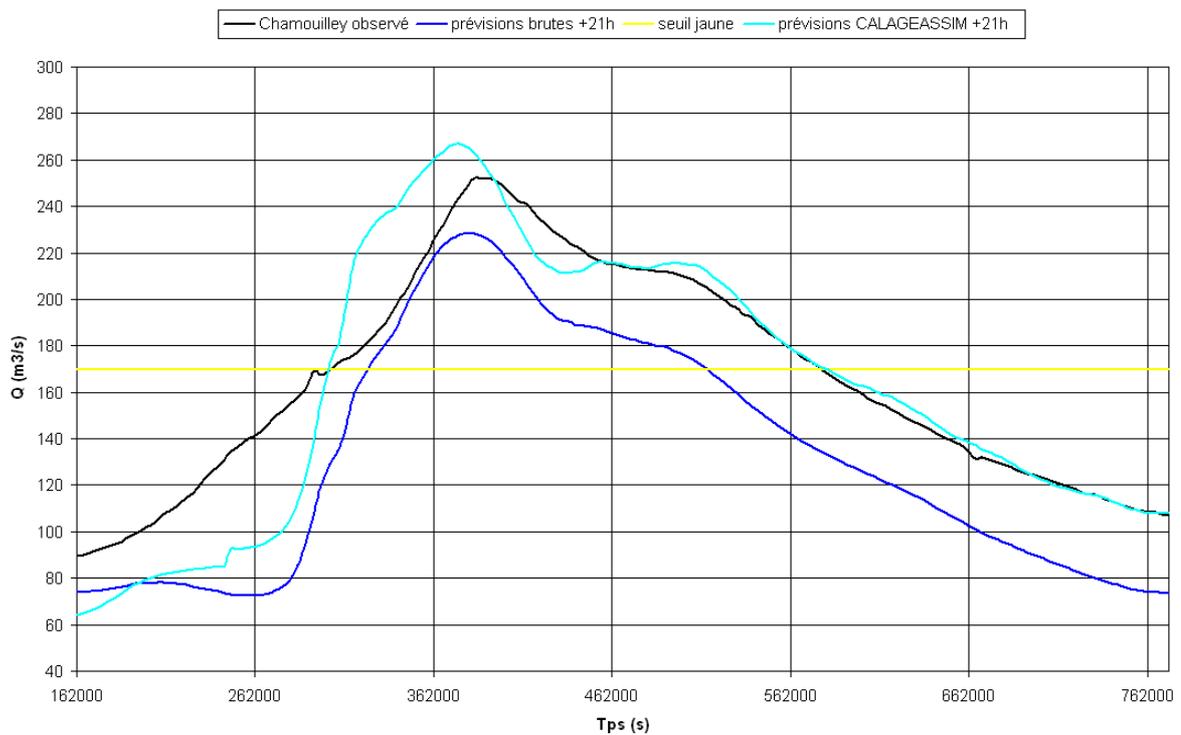
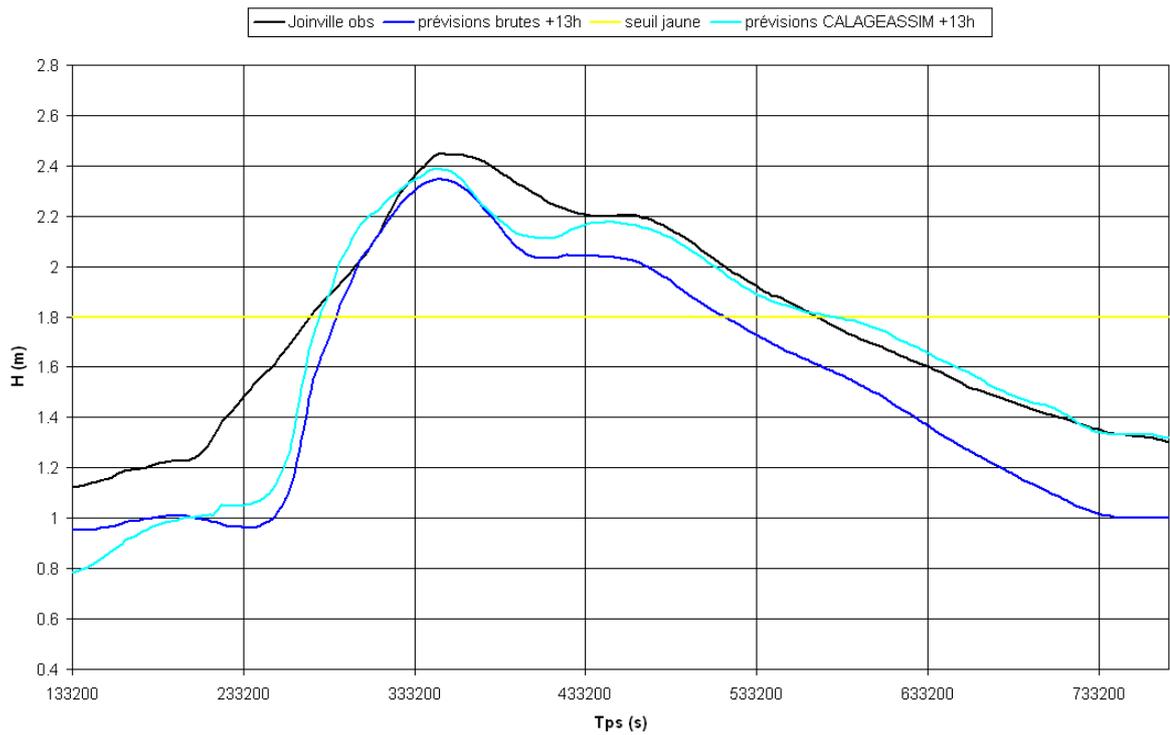
Crue 14

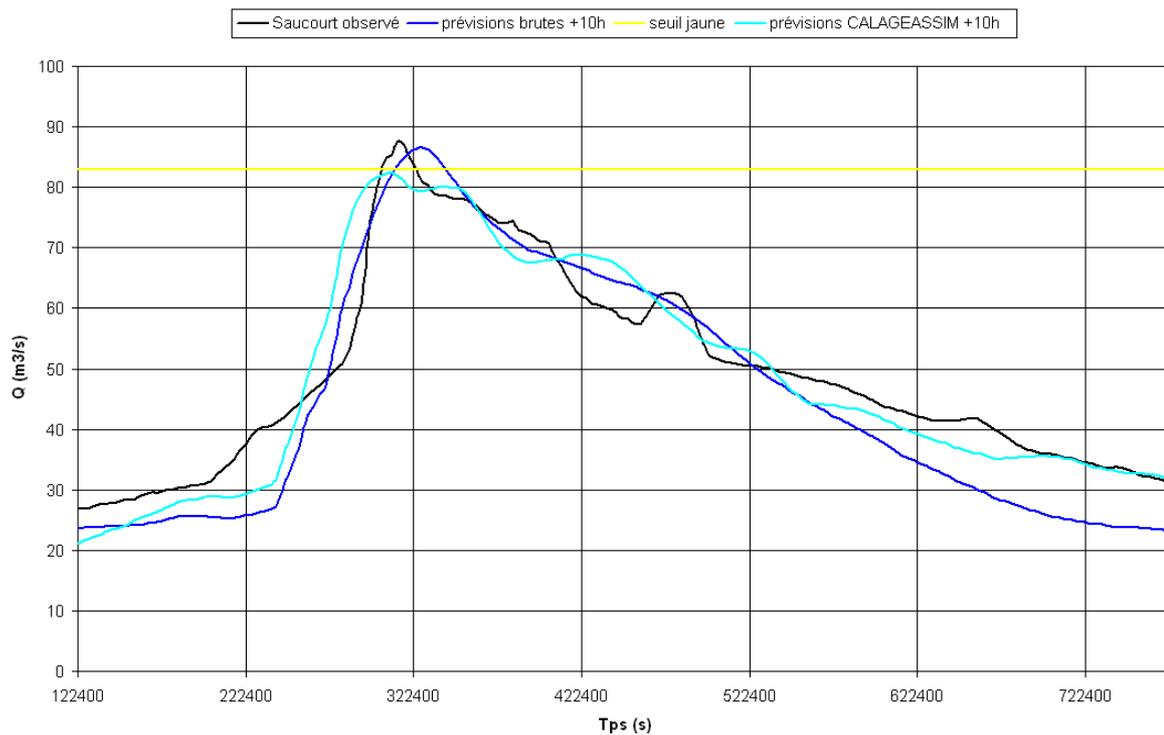


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

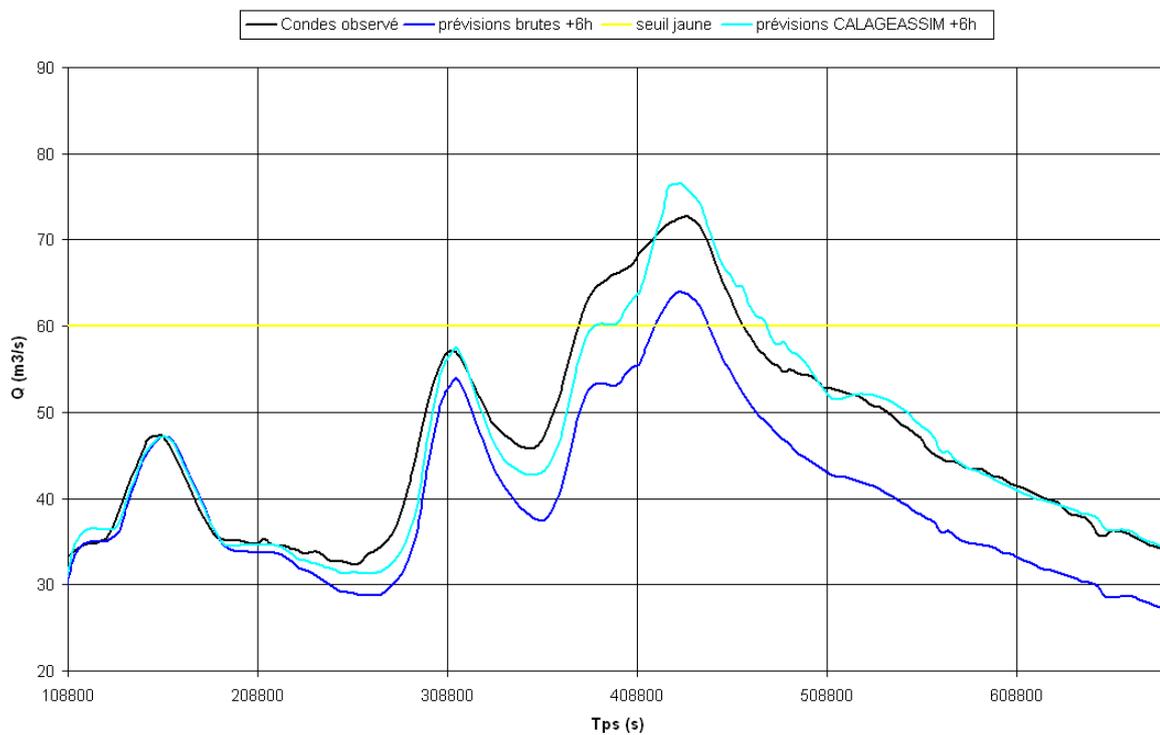


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

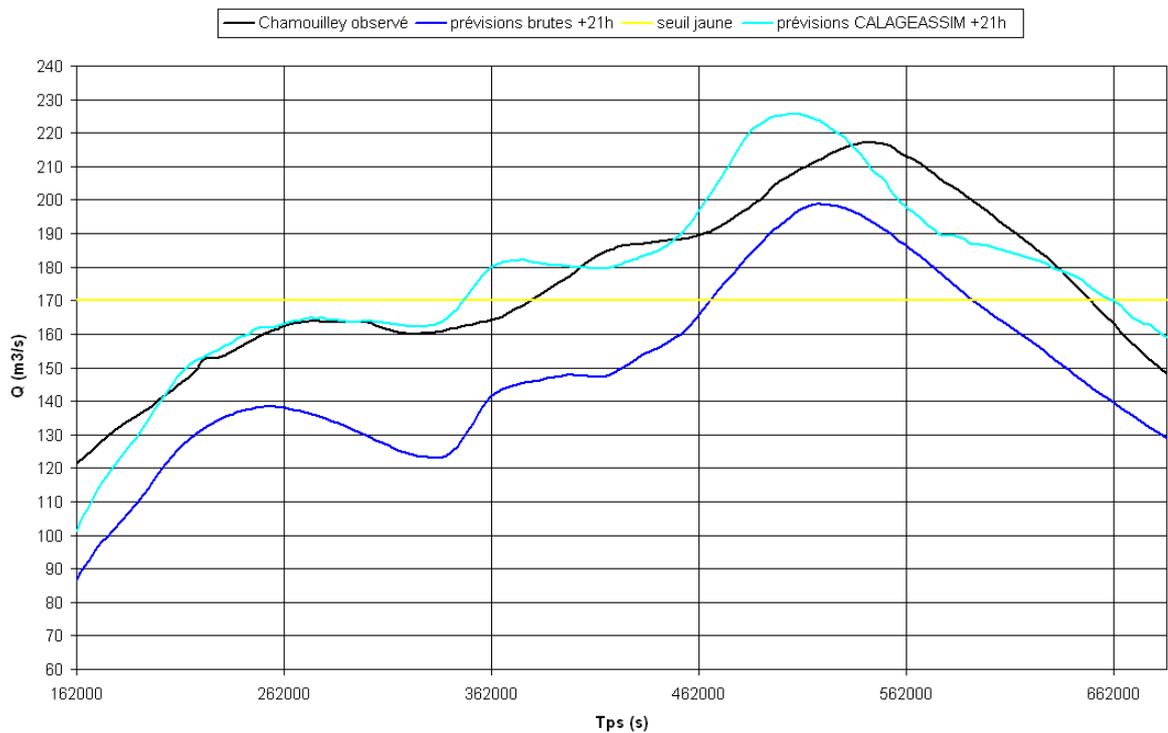
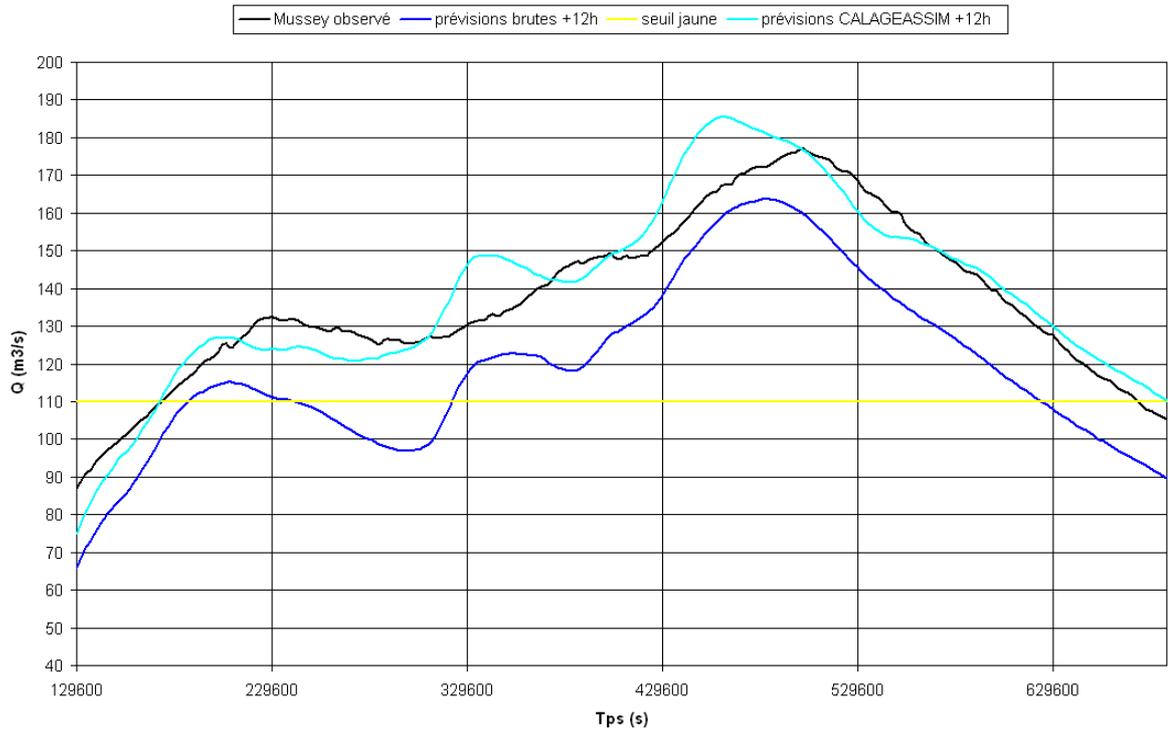


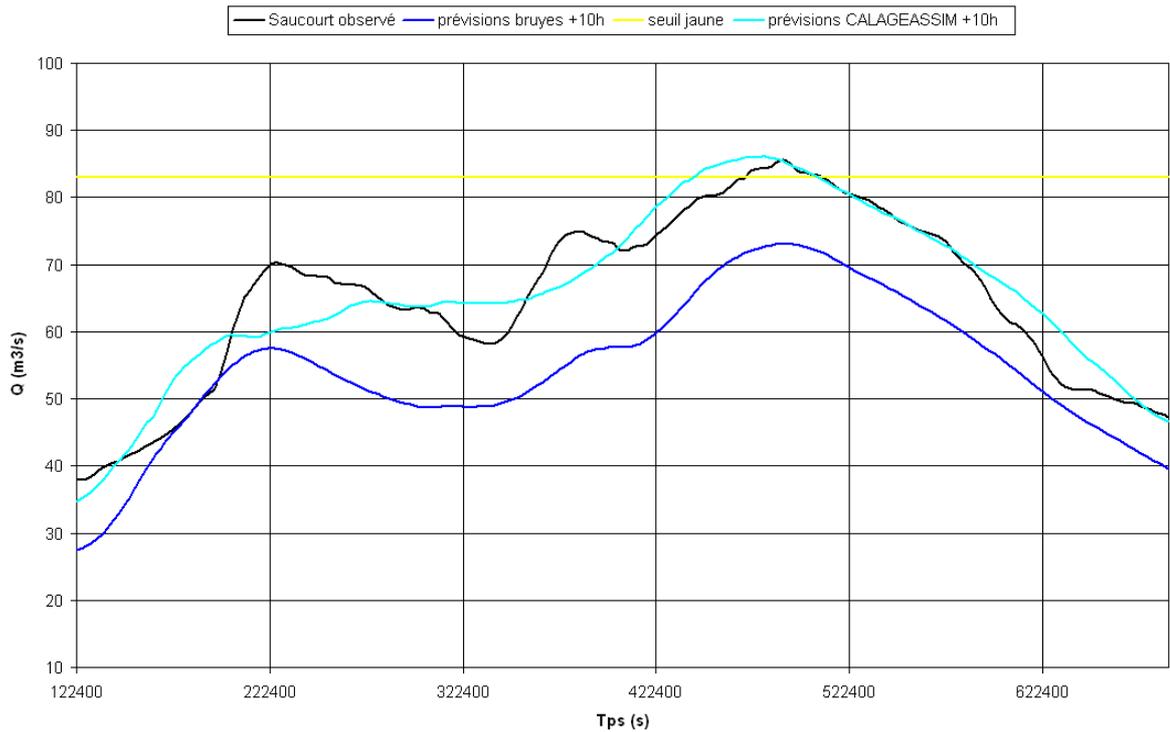


Crue 16

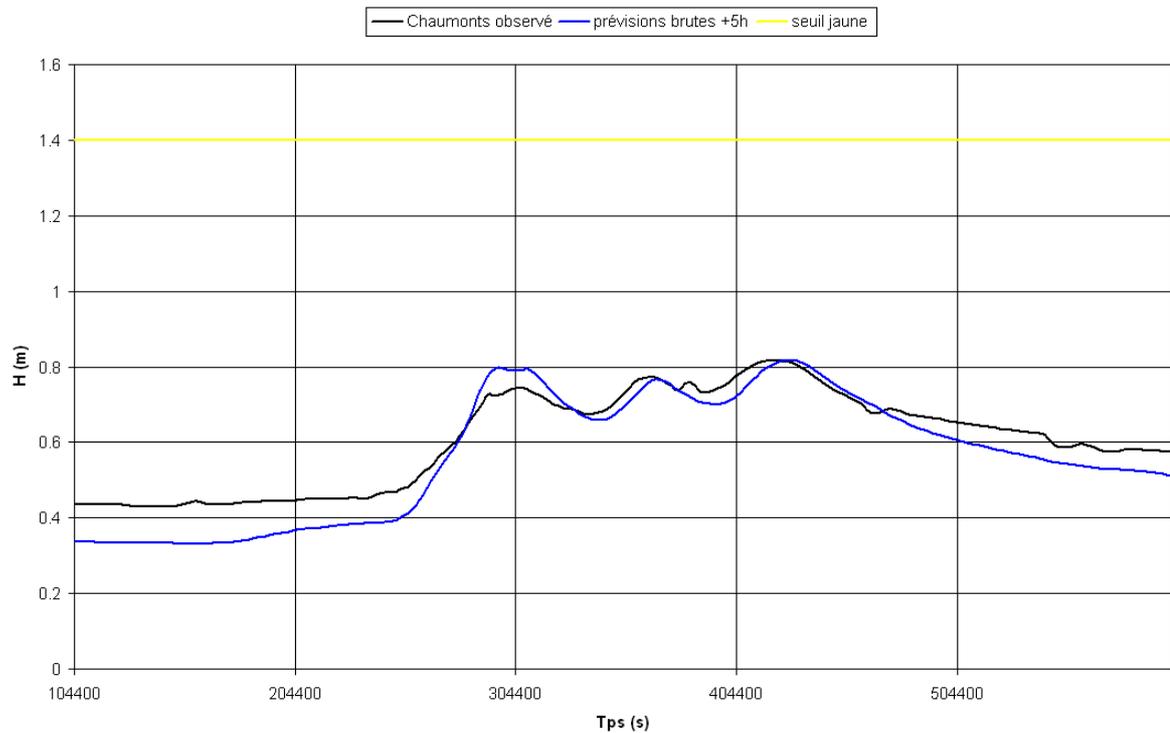


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

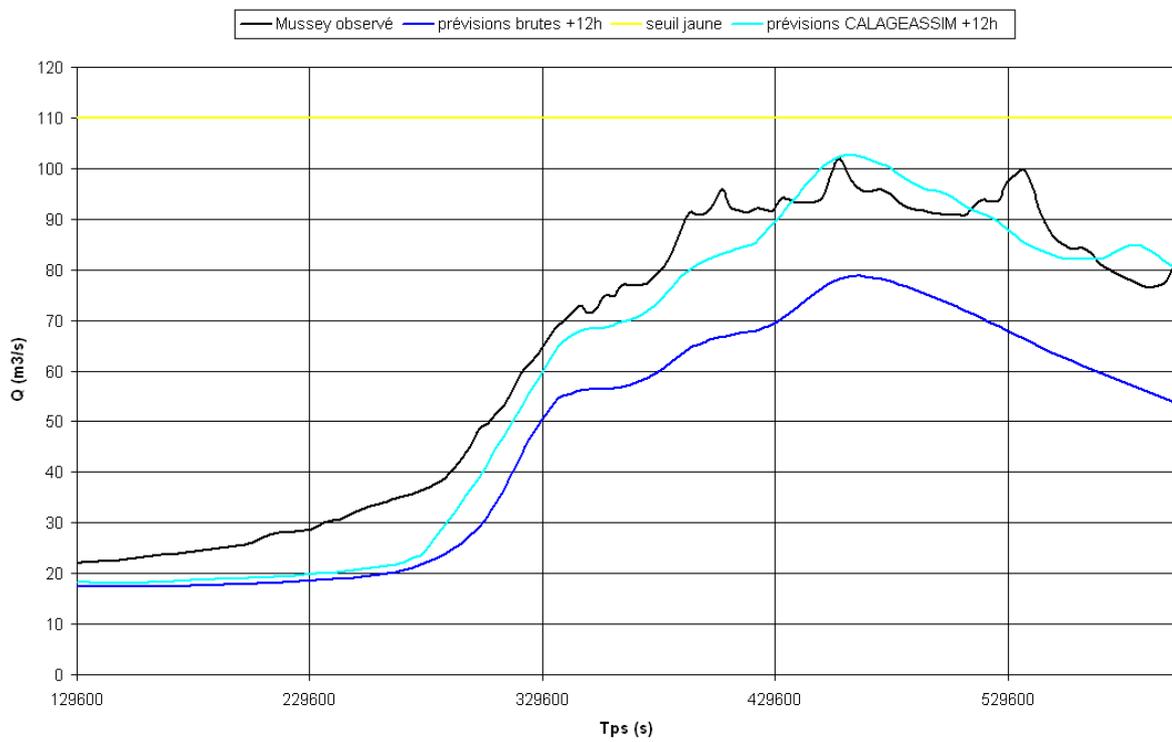
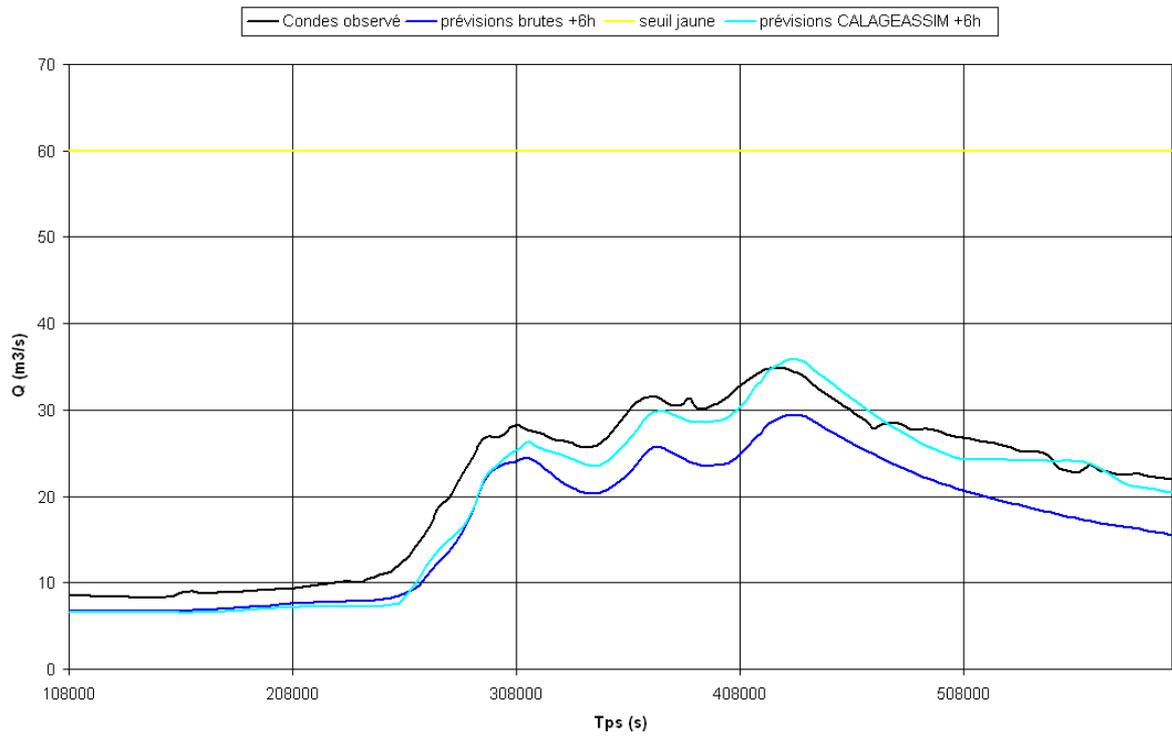




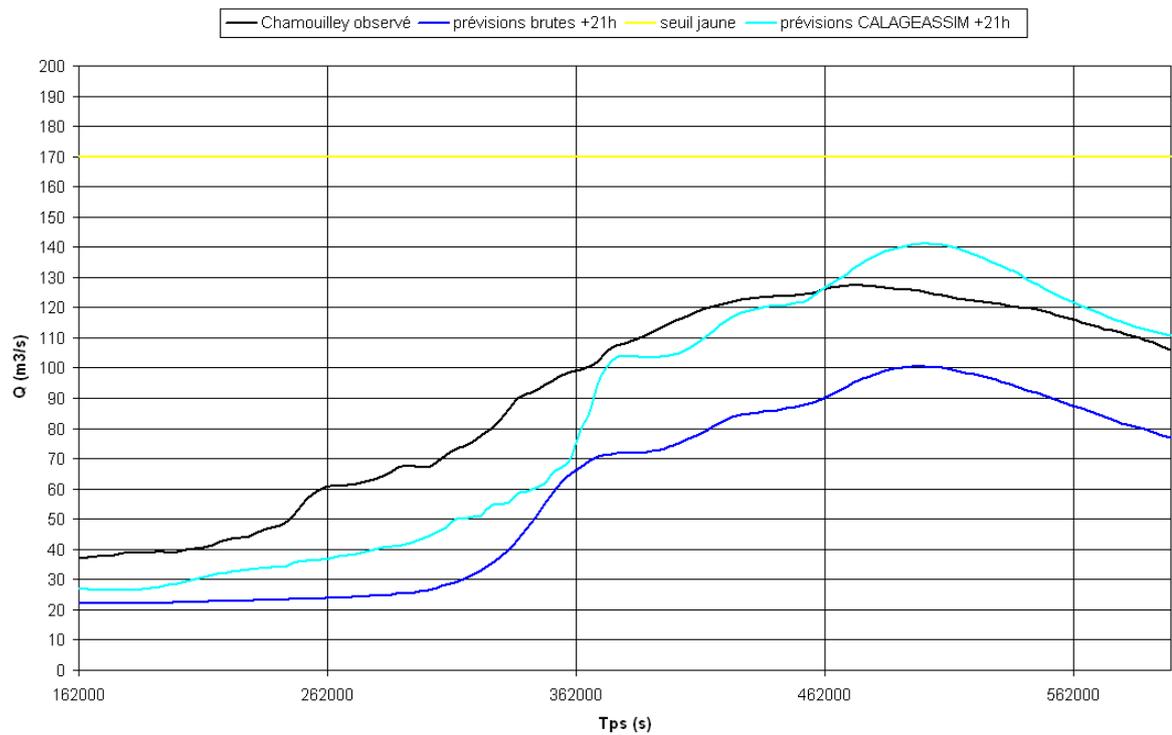
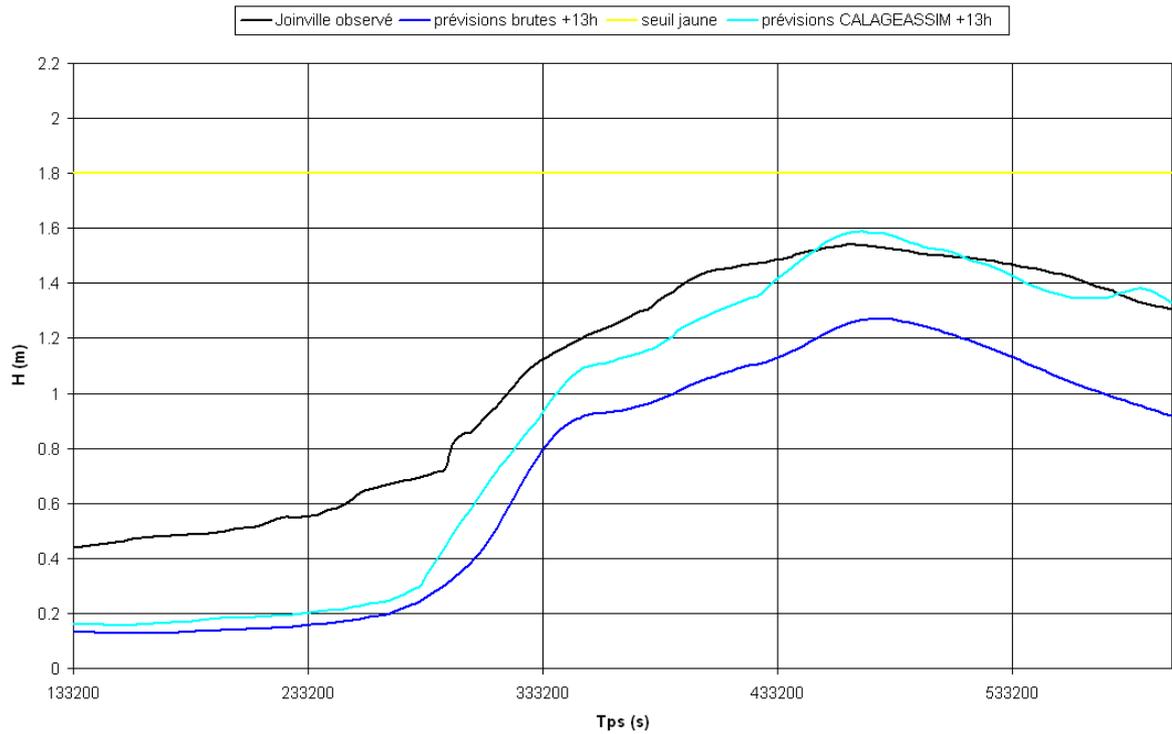
Crue 18

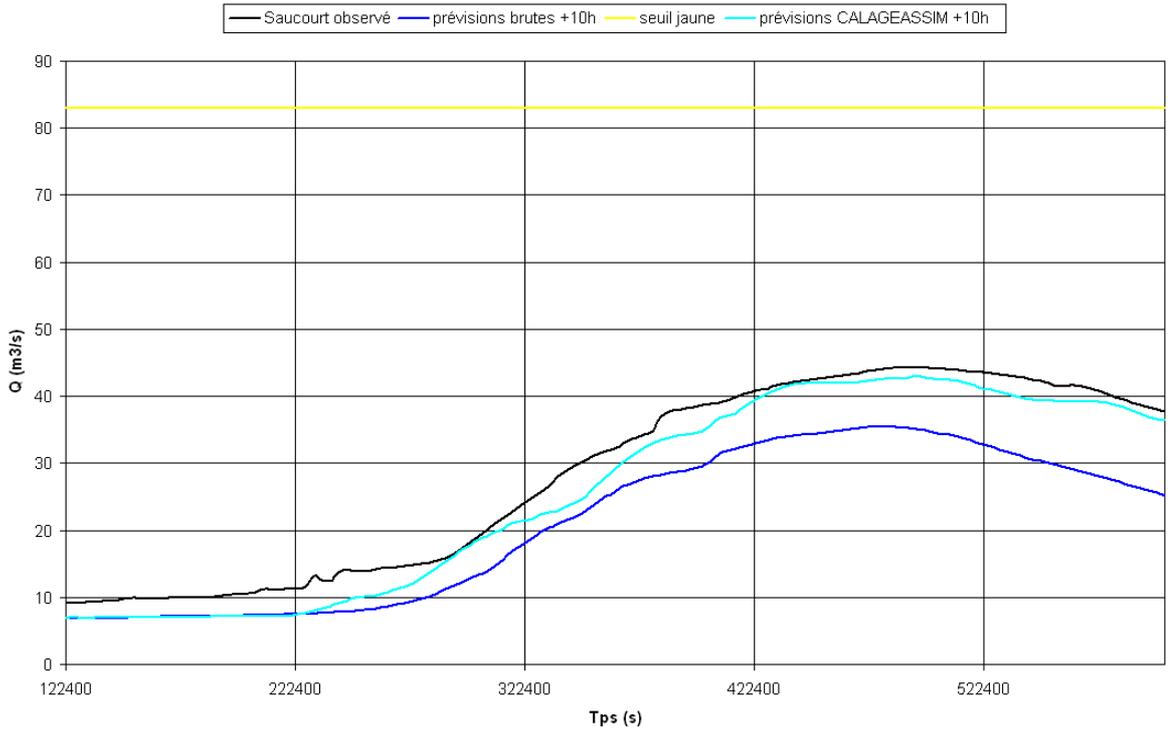


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

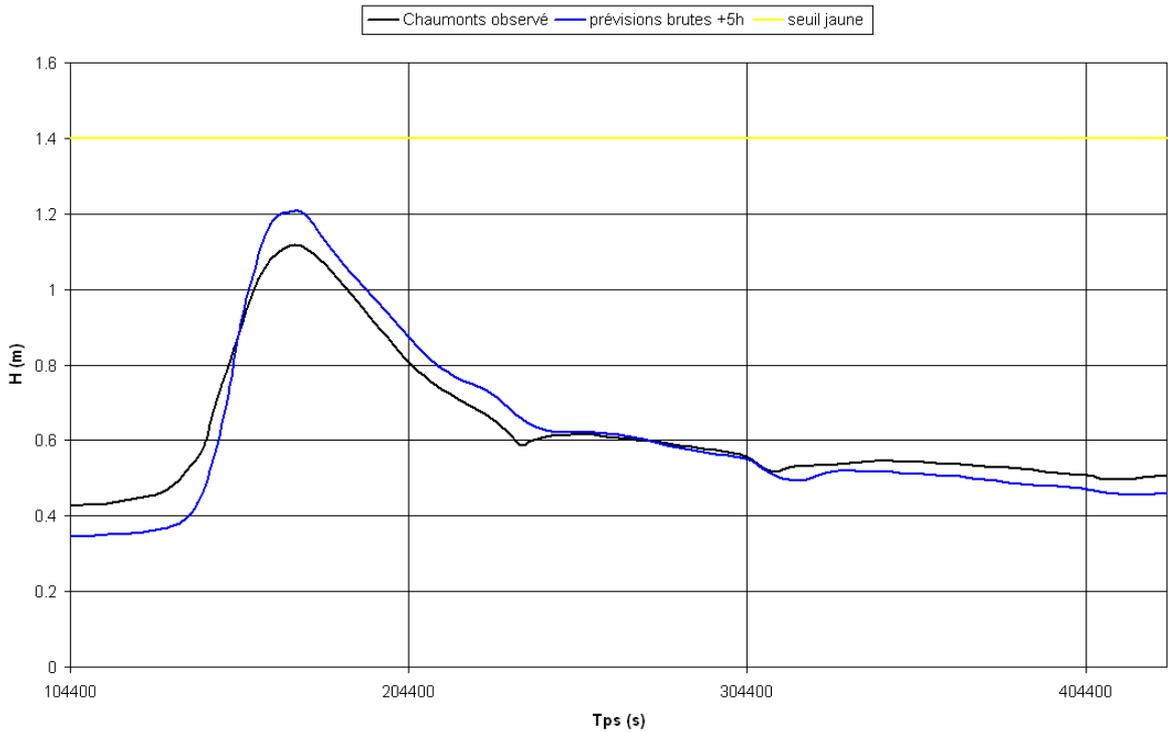


Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

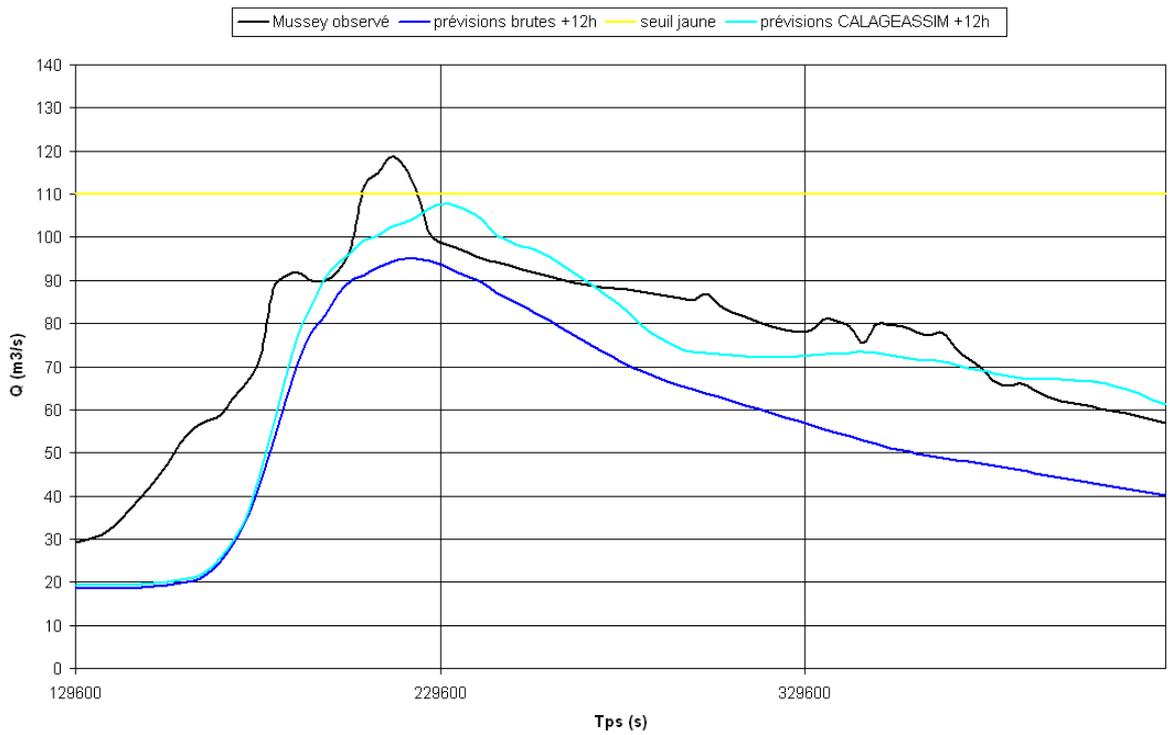
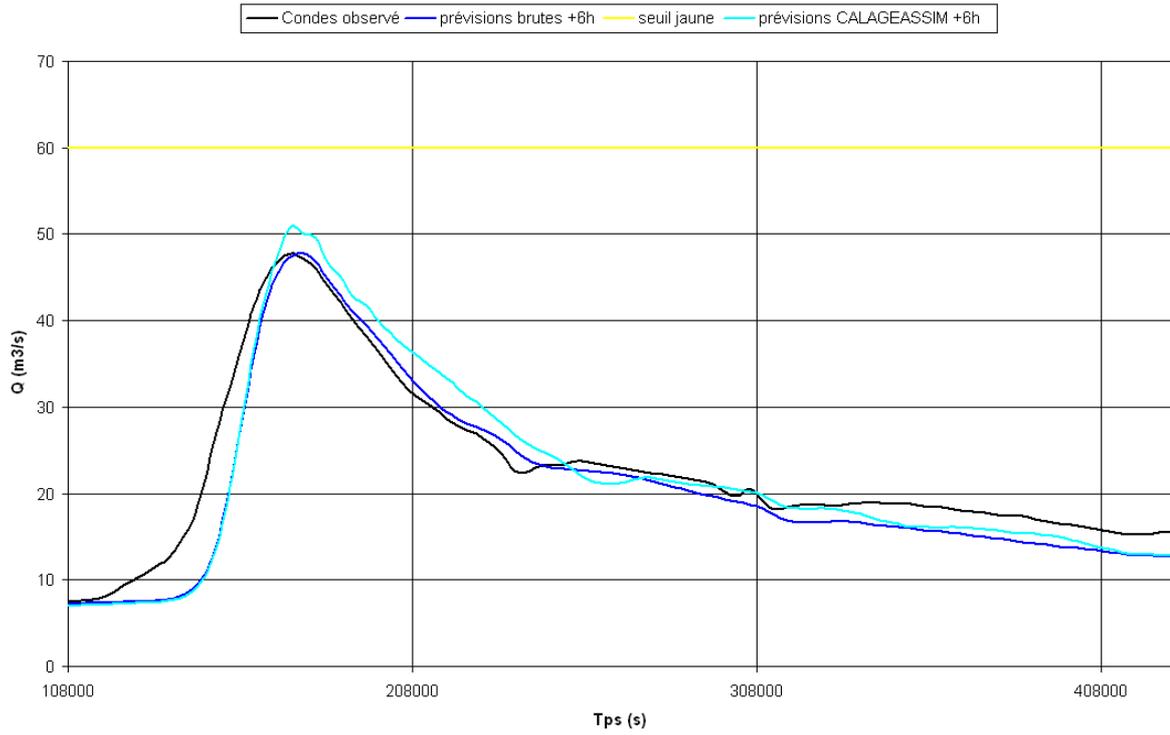




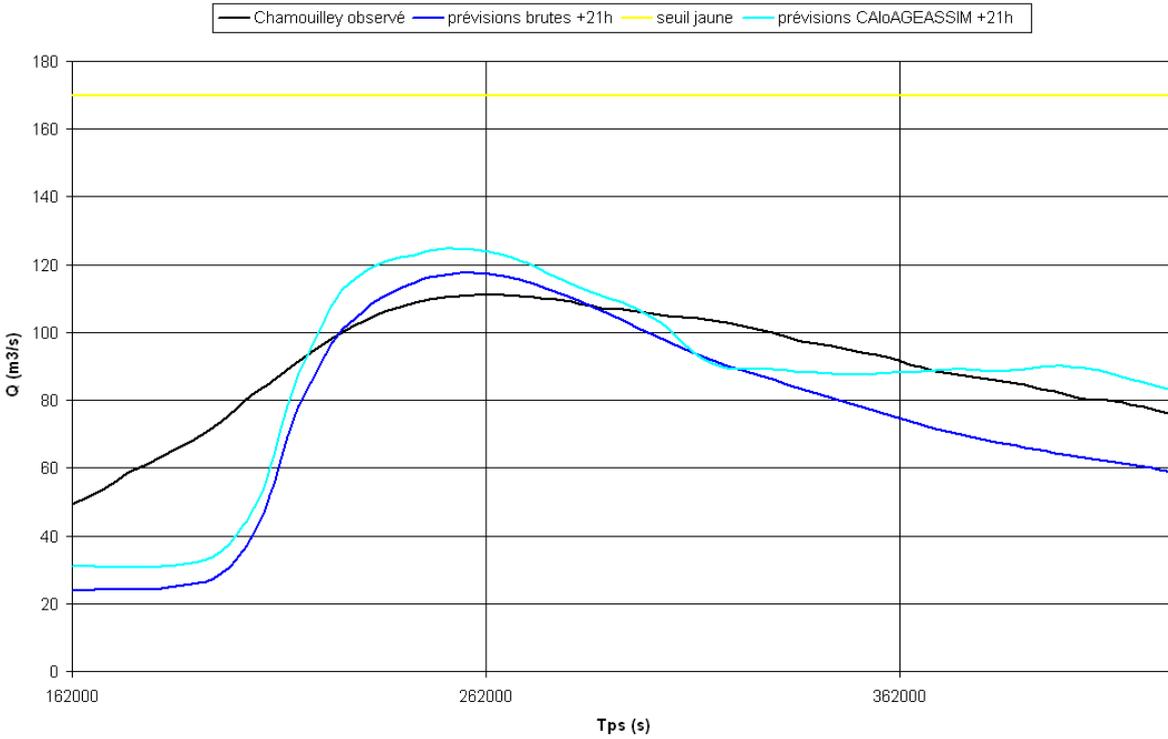
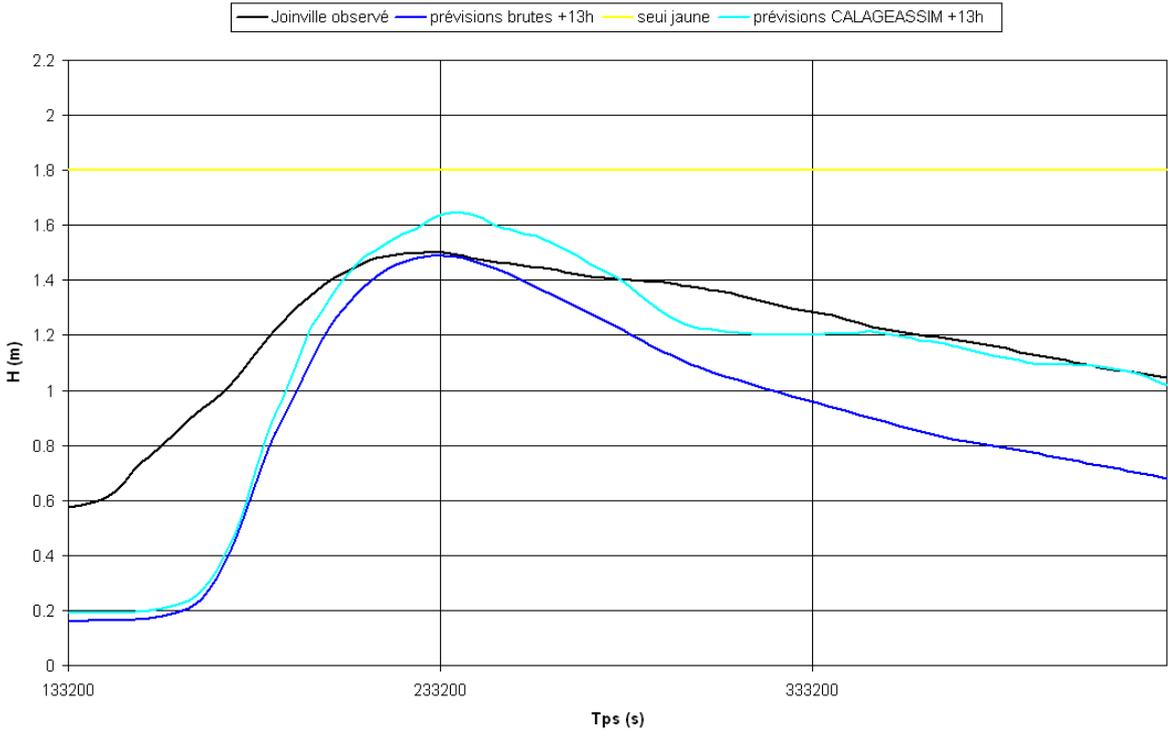
Crue 19



Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »



Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »



Mise en place d'un prototype d'assimilation de données pour le modèle MASCARET « Marne Amont Global »

