

Lire  
la première partie  
de la thèse

## Chapitre 5

# Application opérationnelle

### Sommaire

---

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>5.1</b> | <b>Au SPC SAMA</b>  | <b>154</b> |
| 5.1.1      | La maquette DAMP et l'outil opérationnel TOAD                             | 154        |
| 5.1.2      | Le modèle Marne Amont Global avec assimilation de données                 | 156        |
| 5.1.3      | Le modèle Marne Moyenne avec assimilation de données                      | 159        |
| 5.1.4      | L'enchaînement GRP - Mascaret   | 161        |
| <b>5.2</b> | <b>Au SCHAPI avec la Plate-forme Opérationnelle de Modélisation (POM)</b> | <b>165</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Perspectives d'évolution</b>   | <b>168</b> |
| 5.3.1      | De la maquette DAMP   | 168        |
| 5.3.2      | De la prévision des crues au SCHAPI                                       | 168        |
| 5.3.3      | De la prévision des crues au SPC SAMA                                     | 169        |

---

Une des volontés de la DREAL, lorsqu'elle s'est engagée à financer cette thèse, était de mettre rapidement ces travaux en pratique en opérationnel au sein du SPC. Les modèles MAG et MM avec assimilation de données ont été intégrés à la chaîne opérationnel du SPC, respectivement en décembre 2013 et en janvier 2015, avec l'outil TOAD et plus récemment au sein de la chaîne opérationnelle du SCHAPI durant l'été 2015 via la POM. Des travaux complémentaires comme l'enchaînement des modèles GRP et Mascaret ainsi que l'estimation des incertitudes de prévision ont aussi fait l'objet d'une application opérationnelle.

## 5.1 Au SPC SAMA

### 5.1.1 La maquette DAMP et l'outil opérationnel TOAD

La maquette DAMP est fournie au SPC sous forme d'une machine virtuelle Linux. Une machine virtuelle peut contenir un logiciel isolé capable d'exécuter son système d'exploitation et ses applications ; cette machine virtuelle Linux a donc pu être installée facilement sur un PC Windows du SPC SAMA. Le prévisionniste souhaite connaître les valeurs prévues aux stations de la Chaussée, Châlons-en-Champagne et Damery par le modèle Mascaret MM avec l'enchaînement des trois corrections décrit dans le Chapitre 4.

On utilise en opérationnel, au SPC SAMA, la première version de DAMP (DAMP1) pour corriger :

- les forçages amont et les  $K_s$  du modèle MAG ;
- l'enchaînement des corrections du forçage amont, des  $K_s$  et de l'état hydraulique du modèle MM.

La maquette DAMP, pour être fonctionnelle, a besoin des données relatives :

- au modèle Mascaret contenant la description géométrique, les paramètres du modèle, la condition initiale du modèle et les conditions limites (respectivement, les fichiers *.geo*, *.cas*, *.lig* et *.loi*) ;
- à l'assimilation de données contenant les observations à assimiler (*.dat*), les paramètres relatifs à l'assimilation (*parametresassim.cas*) et les données utiles au script de lancement de DAMP appelé *pilote* (paramètres temporels et le mot-clé).

Pour une utilisation opérationnelle d'un modèle Mascaret avec assimilation de données, on identifie comme **statiques** les fichiers *.geo*, *.cas*, *parametresassim.cas* et les données utiles au *pilote*. On considère comme **dynamiques** les fichiers *.loi* représentant les conditions limites amont, *.dat* et *.lig*. Cela impose que ces fichiers doivent être mis à jour au fil des cycles temporels pour intégrer les dernières observations (conditions limites amont et observations à assimiler) et l'évolution de la condition initiale. Les fichiers *.loi* représentant par exemple une loi de seuil, un apport constant ou une courbe de tarage (condition limite aval des modèles MAG et MM) peuvent être considérés comme statiques. Pour un modèle hydraulique estuarien, le fichier *.loi* constituant le marégramme doit lui aussi être mis à jour. La Figure 5.1 présente les différentes étapes

(que l'on nommera tâche) de l'implémentation opérationnelle de DAMP pour le modèle MM. Les données *in situ* relevées aux stations sont concentrées automatiquement quatre fois par jour. Les hauteurs d'eau observées sont converties en débits pour les stations disposant d'une courbe de tarage puis stockées dans une base de données (tâche 1 et 2 de la Figure 5.1).

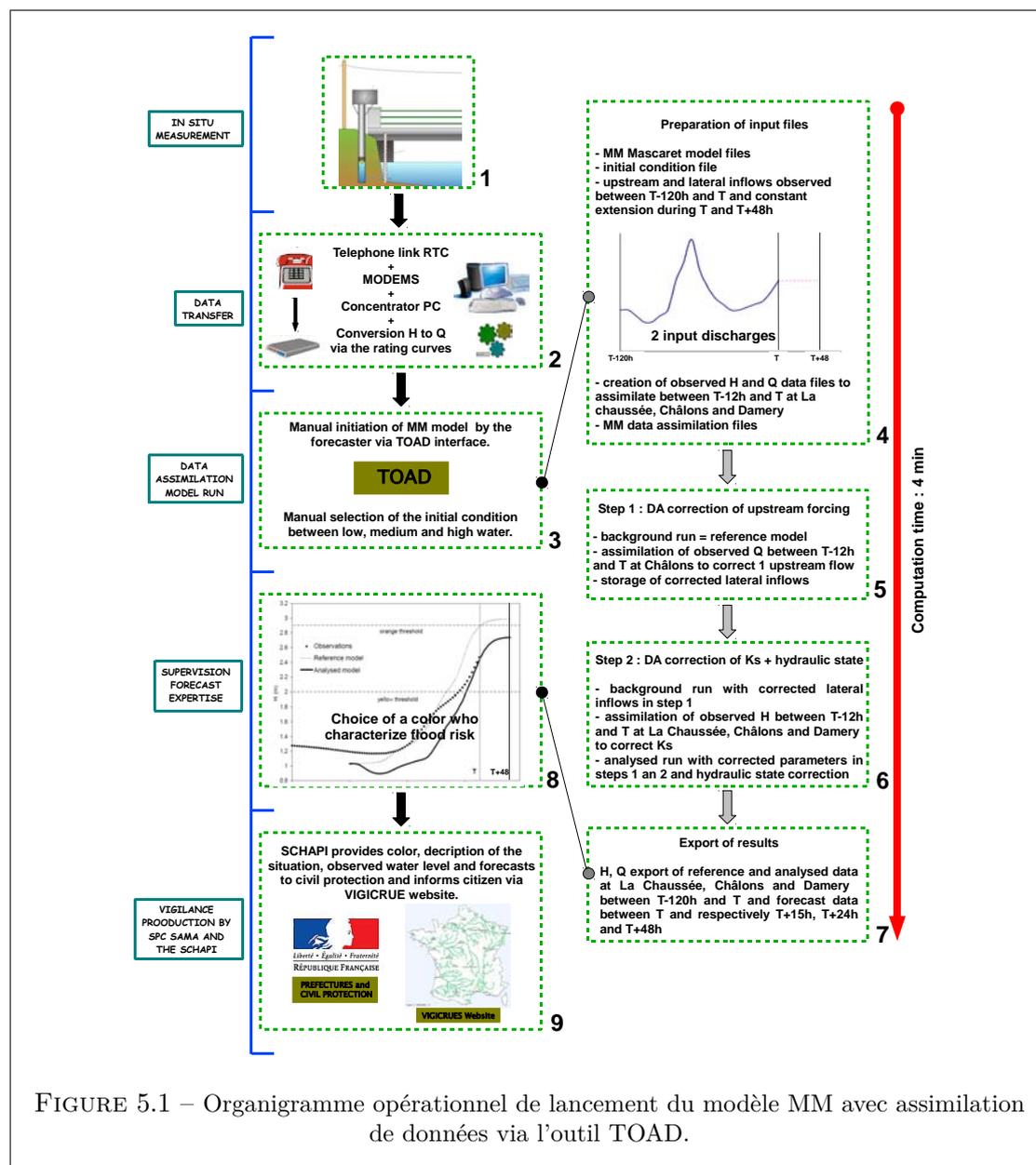


FIGURE 5.1 – Organigramme opérationnel de lancement du modèle MM avec assimilation de données via l'outil TOAD.

L'outil TOAD est dédié à l'acquisition et à la mise à jour des fichiers dynamiques au fil des cycles temporels d'application de DAMP. Il s'agit d'un script codé en

Java développé au SPC SAMA (par Antoine Herman). Le prévisionniste sélectionne dans l'exécutable TOAD le modèle MM avec assimilation de données et choisit une condition initiale (tâche 3) parmi trois préalablement calculées (basses-eaux, moyennes-eaux et hautes-eaux). Les fichiers **statiques** et **dynamiques** sont exportés vers la machine virtuelle DAMP. TOAD applique au préalable et si-besoin différents traitements aux fichiers dynamiques *.loi* (interpolation des débits manquants, multiplication par un coefficient *A*) et *.dat* (interpolation des observations manquantes). Le *pilote* est automatiquement lancé. Une fois l'analyse terminée, les valeurs simulées et prévues sont exportées vers le superviseur SOPHIE (tâche 7). SOPHIE est un des superviseurs utilisés dans les SPC qui permet aussi de lancer et d'enchaîner divers modèles conceptuels comme des relations linéaires ou certains modèles pluies - débits. Le temps de calcul, inférieur à 4 minutes, est compatible avec le processus de caractérisation du risque hydrologique en temps réel. TOAD intègre son propre outil de supervision permettant d'afficher les fourchettes d'incertitudes à 80% (*cf* Figure 5.2) de la méthode *a posteriori* (*cf* Partie 4.1.1). TOAD permet aussi de lancer les modèles hydrologiques GRP et de piloter l'enchaînement des modèles GRP - Mascaret présenté dans la Partie 5.1.4.

### 5.1.2 Le modèle Marne Amont Global avec assimilation de données

Les modèles Mascaret Marne Amont et Marne Valage sont utilisés en opérationnel depuis 2007 et 2008 au SPC SAMA. Ils ont été fusionnés en 2011 pour devenir le modèle MAG. La version avec assimilation de données (correction des forçages amont) a été intégrée à la chaîne opérationnelle du SPC en décembre 2013. La version comportant la correction complémentaire des  $K_s$  situés au droit de la station de Joinville est opérationnelle depuis octobre 2014.

#### Étape 1 : correction des forçages amont

L'outil TOAD lance pour un temps de base le *pilote* de la maquette DAMP avec les paramètres temporels (qui correspondent de gauche à droite au premier temps de base, au dernier temps de base, au pas de temps du cyclage de l'analyse, à la durée de la simulation avant le temps de base, l'échéance de prévision) et le mot-clé suivant (commande 5.1.2) :

$$\boxed{428400 \ 428400 \ 3600 \ 428400 \ 75600 \ CTL\_LOI} . \quad (5.1)$$

La fenêtre temporelle dure 5 jours et 21h. La simulation débute 5 jours avant le temps de base (428400s). L'analyse est effectuée à un seul temps de base, la paramètre relatif au pas de temps du cyclage (3600 s) n'est donc pas utilisé. Le mot-clé *CTL\_LOI* indique à la maquette DAMP que l'on corrige les forçages amont. Les débits des neuf forçages amont du modèle MAG au temps de base sont prolongés durant 21h (75600s) afin d'obtenir une prévision à une échéance maximale de 21h à Chamouilley. Les débits observés aux stations de Condes, Mussey, Chamouilley et Saucourt sont assimilés

entre  $T-6h$  et  $T$  pour corriger les débits des forçages amont  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  et  $Q_5$  (au préalable multipliés par les coefficients  $A^i$  du Tableau 1.3) avec les paramètres  $a^i$  analysés comme illustré dans la Figure 1 de l'article SIMHYDRO 2012 (*cf* Partie 3.1). Les valeurs de la perturbation des forçages amont,  $\sigma^b$  et  $\sigma^o$  sont de respectivement 1.05, 0.05 et  $2 \text{ m}^3/s$ .

## Étape 2 : correction des $K_s$ locaux à Joinville

L'outil TOAD lance dans un second temps le *pilote* de la maquette DAMP avec les paramètres temporels et le mot-clé suivant :

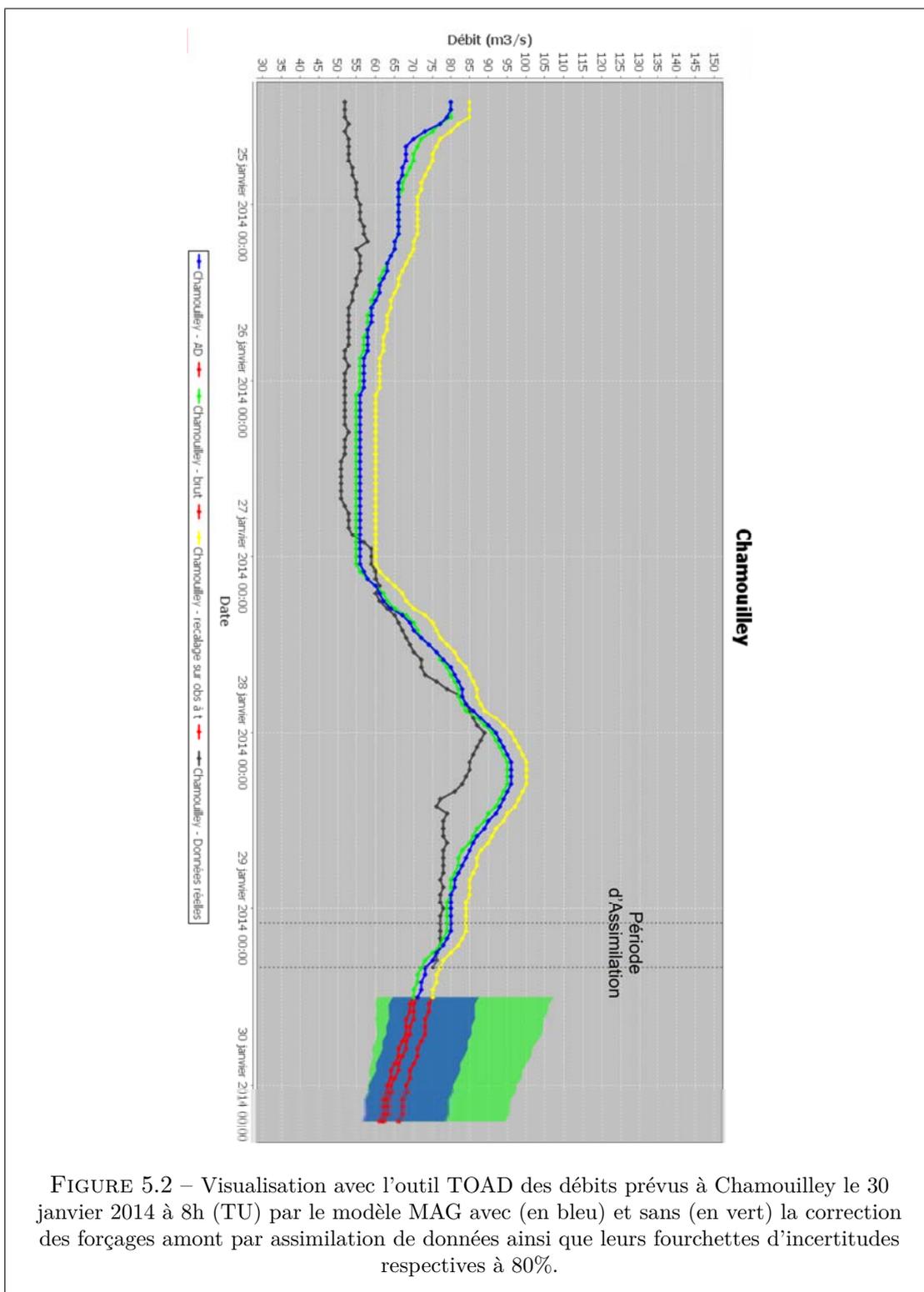
$$\boxed{428400 \ 428400 \ 3600 \ 428400 \ 75600 \ CTL\_KS}, \quad (5.2)$$

avec en condition limite amont les forçages ( $Q_i * A^i$ ) multipliés par les coefficients  $a^i$  analysés issus de l'**étape 1**. Le mot-clé *CTL\_KS* indique à la maquette DAMP que l'on corrige les  $K_s$ . Les hauteurs observées à la station de Joinville sont assimilées entre  $T-6h$  et  $T$  pour corriger les  $K_s$  locaux **m** et **n** affectés au droit de cette station comme présenté dans l'article soumis à la revue *Journal of Hydrology* (*cf* Partie 3.2). Les paramètres relatifs à la correction des  $K_s$  pour corriger localement la relation hauteur - débit de la station de Joinville sont consultables dans l'annexe 3, dans le fichier *parametresassim.cas* relatif au modèle MAG utilisé en opérationnel au SPC SAMA.

## Export des résultats et visualisation

Une fois l'analyse avec le mot-clé *CTL\_KS* terminée, les valeurs simulées et prévues entre  $T-5$  jours et  $T+5$ , 6, 12, 13, 21 et  $10h$  à Chaumont, Condes, Mussey, Joinville, Chamouilley et Saucourt sont exportées vers le superviseur SOPHIE. Les résultats sont aussi visualisables directement avec l'outil TOAD comme illustré ci-après dans la Figure 5.2. TOAD offre l'avantage d'afficher les intervalles d'incertitudes à 80% préalablement calculés avec la méthode *a posteriori*. On obtient par exemple les débits simulés à Chamouilley entre le 25 et le 30 janvier 2014 à  $8h$  et prévus jusqu'au 31 janvier à  $5h$  TU (Temps Universel) par le modèle MAG avec et sans assimilation de données où, la plage d'incertitudes du modèle brut est colorée en vert et celle du modèle aux forçages amont corrigés en bleu (les fourchettes d'incertitudes correspondantes aux quatre premières heures ne sont pas affichées). Durant la période d'assimilation (entre  $T-6h$  et  $T$ ), le signe de la différence entre les débits simulés et observés à Chamouilley change ce qui explique les débits analysés (en bleu) diffèrent peu des débits du modèle sans assimilation de données (en vert).

On obtient la courbe jaune en ajoutant aux débits simulés par le modèle brut (en vert), la différence calculée entre le débit simulé et celui observé au temps de base (droite verticale en pointillés). Ce recalage permet une continuité visuelle entre les derniers débits observés et ceux prévus. Les résultats sont excellents à court terme mais bien en deça de ceux obtenus avec assimilation de données pour des échéances plus lointaines.



### 5.1.3 Le modèle Marne Moyenne avec assimilation de données

Le modèle MM est utilisé en opérationnel depuis novembre 2009 au SPC SAMA pour effectuer des prévisions aux stations de La Chaussée, Châlons-en-Champagne et Damery à des échéances de respectivement 15, 24 et 48h. La version du modèle enchaînant la correction du forçage amont, des  $K_s$  et de l'état hydraulique par assimilation de données a été intégrée à la chaîne opérationnelle du SPC en janvier 2015.

#### Étape 1 : correction du forçage amont

L'outil TOAD lance pour un temps de base le *pilote* de la maquette DAMP avec les paramètres temporels et le mot-clé suivant :

$$\boxed{428400 \ 428400 \ 3600 \ 428400 \ 172800 \ CTL\_LOI} . \quad (5.3)$$

La fenêtre temporelle dure 7 jours. La simulation débute 5 jours avant le temps de base (428400s). Les débits des deux forçages amont du modèle MM au temps de base sont prolongés durant 2 jours (172800s) afin d'obtenir une prévision à une échéance maximale de 48h à Damery. Les débits observés à Châlons-en-Champagne sont assimilés entre  $T-12h$  et  $T$  pour corriger les débits de la station de Vitry-en-Perthois (au préalable multipliés par le coefficient  $A^{MM}$  égal à 1.2) avec le paramètre  $a$  analysé. Les valeurs de la perturbation du forçage amont, de  $\sigma^b$  et de  $\sigma^o$  sont ceux présentés dans la Partie 3.3.2.

#### Étape 2 : correction des $K_s$ et de l'état hydraulique

L'outil TOAD lance dans un second temps le *pilote* de la maquette DAMP avec les paramètres temporels et le mot-clé suivant :

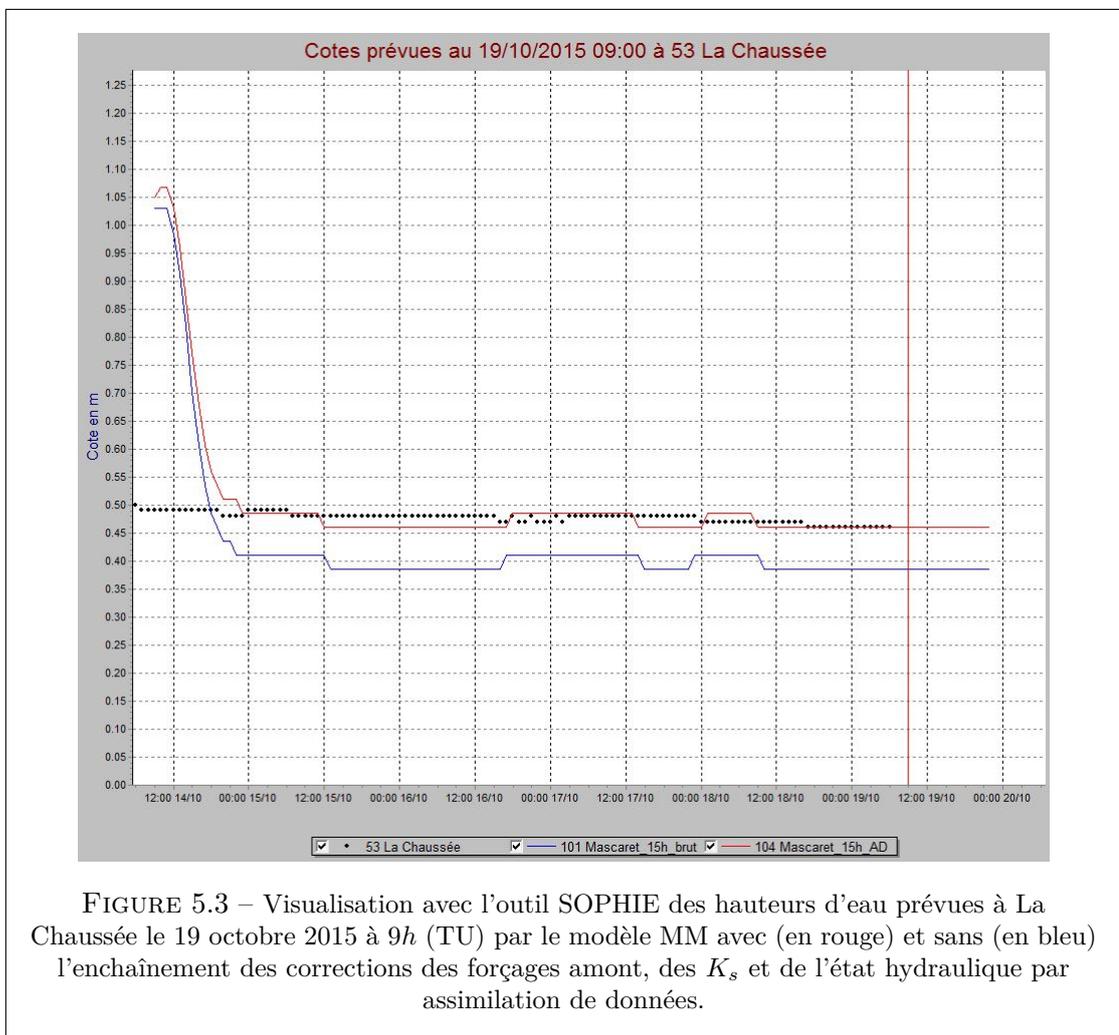
$$\boxed{428400 \ 428400 \ 3600 \ 428400 \ 172800 \ CTL\_KS\_WATERLINE} , \quad (5.4)$$

avec en condition limite amont le forçage ( $Q_{Vitry} * 1.2$ ) multiplié par le coefficient  $a^a$  issu de l'étape 1. Le mot-clé *CTL\_KS\_WATERLINE* indique à la maquette DAMP que l'on enchaîne la correction des  $K_s$  et de l'état hydraulique. Les hauteurs observées aux stations de La Chaussée, Châlons-en-Champagne et Damery sont assimilées entre  $T-12h$  et  $T$  pour corriger les  $K_s$  **m** et **n** des portions 1, 2, 3 et 6 du bief 2 comme présenté dans la Partie 3.3.2. Les paramètres relatifs à la correction des  $K_s$  locaux et sur de grandes distances, pour corriger localement la relation hauteur - débit et déphaser l'onde de crue, sont regroupés dans le Tableau 3.1. Enfin, l'état hydraulique est corrigé en assimilant les hauteurs d'eau entre  $T-12h$  et  $T$  aux stations de La Chaussée, Châlons-en-Champagne et Damery. Cette correction est répartie sur 2 km en amont et 5 km en

aval de part et d'autre de ces trois stations. Le fichier *parametresassim.cas* relatif au modèle MM utilisé en opérationnel au SPC SAMA est consultable dans l'annexe 4.

### Export des résultats et visualisation

Une fois l'analyse avec le mot-clé *CTL\_KS\_WATERLINE* terminée, les valeurs simulées et prévues entre  $T-5$  jours et  $T+15$ , 24 et 48h à La Chaussée, Châlons-en-Champagne et Damery sont exportées vers le superviseur SOPHIE. On obtient par exemple les hauteurs d'eau simulées à Damery entre le 14 et le 19 octobre à 9h et prévues jusqu'à 21h TU par le modèle MM avec et sans assimilation de données comme illustré Figure 5.3. L'effet de la condition initiale qui engendre l'écart important entre les hauteurs d'eau modélisées et observées sur le premiers pas de temps de la simulation s'estompe rapidement.



On obtient un paramètre  $a^a = 0.9743$  (les débits de la simulation brute - qui servent d'ébauche - sont légèrement supérieurs à ceux assimilés à Châlons-en-Champagne pour corriger le forçage amont). La hauteur d'eau à La Chaussée est assimilée pour corriger les  $K_s$   $\mathbf{m}$  et  $\mathbf{n}$  de la portion 2 ( $K_s$  locaux). On obtient un incrément de  $-1.65$  pour le  $K_s$   $\mathbf{m}$  et de 0 pour  $\mathbf{n}$  car, en période de basses-eaux, l'écoulement s'effectue exclusivement dans le lit mineur. Un incrément de  $-1.65$  revient à diminuer le  $K_s$   $\mathbf{m}$  (on passe de  $\mathbf{m}^b = 26$  à  $\mathbf{m}^a = 24.35$ ), donc augmenter le frottement et accroître localement la ligne d'eau. Cette augmentation locale du frottement augmente d'une dizaine de *cm* la hauteur d'eau simulée à La Chaussée par rapport au modèle brut. Les incréments analysés pour les  $K_s$   $\mathbf{m}$  et  $\mathbf{n}$  des portions 1 et 3 ( $K_s$  longues distances) sont proches de 0 car on est dans une période hydrologique calme où les débits s'écoulant à Châlons-en-Champagne sont constants : une modification des  $K_s$  n'engendrera pas un déphasage visible à cette station. Enfin, les hauteurs d'eau analysées (suite à la correction locale des  $K_s$ ) et observées à La Chaussée étant très proches, l'incrément calculé pour la correction de l'état hydraulique est lui aussi proche de 0.

Depuis sa mise en opérationnel, le SPC SAMA n'a pas connu d'événement hydrologique de grande ampleur, d'où cet exemple de prévision en période de basses-eaux. On a observé le 19 octobre 2015 à 21h 0.43 *m*, valeur prévue par le modèle MM avec assimilation de données avec une anticipation de 12h. Toutefois, un prévisionniste, dans ces conditions, aurait pu faire la même prévision sans modèle.

#### 5.1.4 L'enchaînement GRP - Mascaret

L'échéance maximale de prévision d'un modèle hydraulique à une station aval correspond au temps de propagation entre le forçage amont et cette dernière. Lorsqu'il y a plusieurs forçages amont, c'est le forçage le plus proche de la station aval qui devient limitant en termes de temps de prévision. Le temps de propagation entre deux stations est variable. Les frottements dans le lit majeur étant généralement plus élevés, en crue, le temps de propagation augmente. Pour obtenir une prévision à, par exemple,  $T+12h$  avec un modèle hydraulique à une station aval, on prolonge les débits du forçage amont par un débit constant entre  $T$  et  $T+12h$ . Pour augmenter cette échéance de prévision, il est tout-à-fait possible d'accroître la période sur laquelle on prolonge les débits du forçage amont en commettant intrinsèquement une erreur considérable : si le temps de propagation moyen entre le forçage amont et la station aval est de 12h, les valeurs prévues à la station aval vont être dégradées. La prolongation par un débit constant va commencer à influencer les prévisions et au-delà d'une échéance de 12h, le modèle va prévoir un débit constant à la station aval.

Les modèles hydrologiques (*cf* Partie 1.3.1) utilisent les pluies observées et prévues pour prévoir les débits à un exutoire. En mettant en place un modèle hydrologique GRP avec une échéance maximale de 24h pour une station condition limite amont d'un modèle hydraulique, il est possible d'agrèger les débits prévus entre  $T$  et  $T+24h$  aux débits observés. En prolongeant le dernier débit prévu par le modèle GRP à  $T+24h$  par un débit constant sur 12h (période correspondant au temps de propagation moyen entre le forçage amont et la station aval), on peut disposer d'une prévision à  $T+36h$  comme

illustré Figure 5.4. Si on prolonge le dernier débit prévu par le modèle GRP à  $T+24h$  par un débit constant sur  $24h$ , on accroît l'échéance de prévision mais la prolongation par un débit constant va commencer à influencer les prévisions au delà d'une échéance de  $T+36h$ .

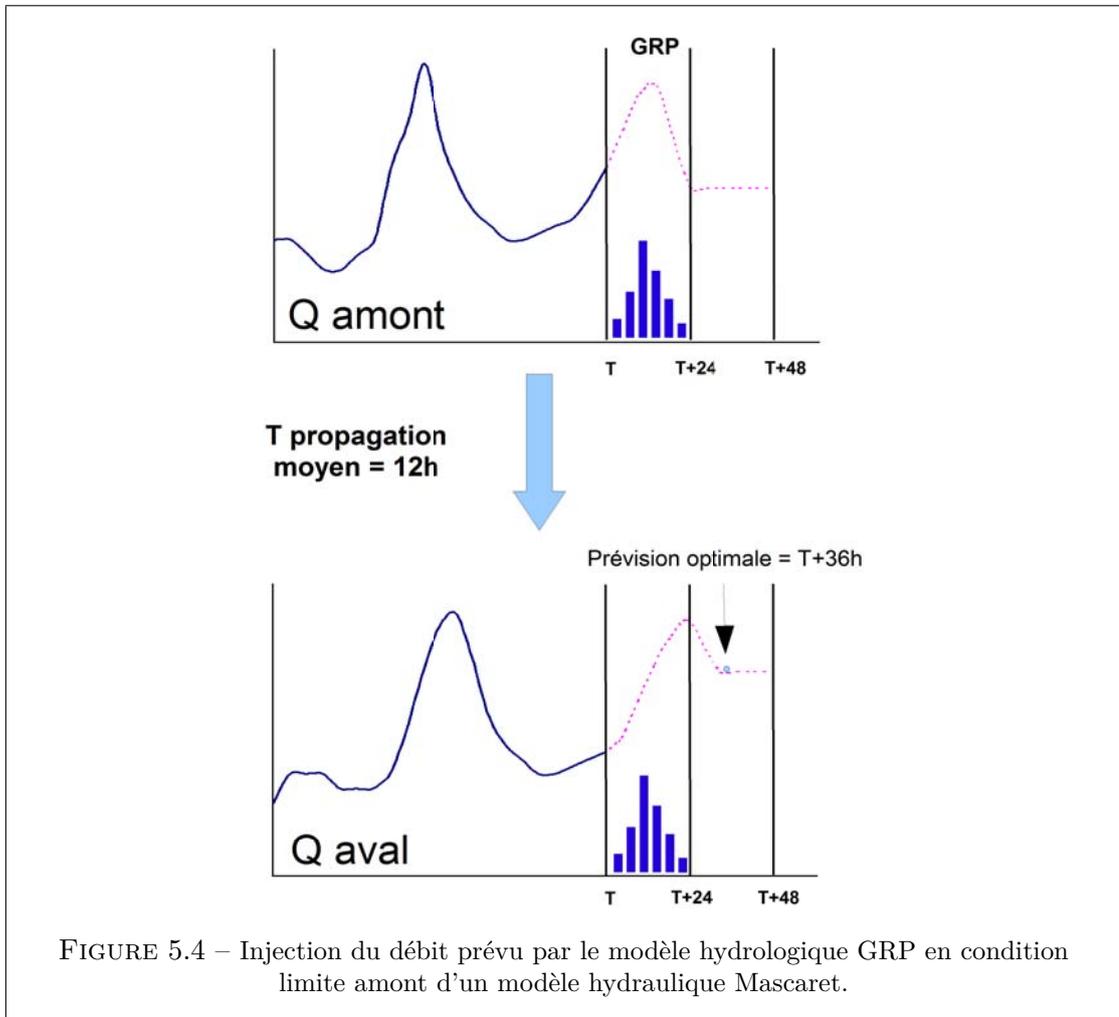


FIGURE 5.4 – Injection du débit prévu par le modèle hydrologique GRP en condition limite amont d'un modèle hydraulique Mascaret.

Le SPC SAMA a créé des modèles hydrologiques GRP sur la majeure partie de ses stations hydrologiques situées en tête de bassin, notamment pour celles utilisées en condition limite amont du modèle MAG. En condition opérationnelle, lorsque l'on souhaite disposer de prévisions du modèle MAG à une échéance plus lointaine, l'outil TOAD permet de lancer les modèles GRP des stations correspondant aux forçages amont du modèle MAG avec différents scénarios de pluies prévues (le choix du scénario revient au prévisionniste). En sélectionnant l'enchaînement GRP - Mascaret, les prévisions GRP entre  $T$  et  $T+24h$  sont automatiquement agrégées dans les fichiers dynamiques *.loi*. Les débits des apports intermédiaires modélisés à partir d'un hydrogramme d'une station proche sont prolongés en injectant la prévision GRP de cette même station. Les coef-

ficients  $A^i$  sont appliqués sur les débits prévus par GRP au même titre que les débits observés. Enfin, le dernier débit prévu par le modèle GRP est prolongé par un débit constant sur les 21h suivantes qui correspond à l'échéance maximale du modèle MAG. Une fois les fichiers dynamiques complétés, il est possible de lancer le modèle MAG sans (modèle brut) et avec la correction des forçages amont (et des  $K_s$ ) par assimilation de données. Les paramètres analysés  $a^i$  sont alors aussi appliqués sur les débits prévus par GRP.

Cet enchaînement permet d'accroître les échéances de prévision aux stations de Chaumont, Condes, Mussey, Joinville, Chamouilley et Saucourt de 24h. Le 10 janvier 2013 à 13h, Météo-France annonce des précipitations pour les prochaines 24h. Ces prévisions sont utilisés par GRP. Le prévisionniste, pour anticiper un éventuel passage en vigilance jaune, lance les modèles Mascaret sans assimilation de données, GRP (en intégrant les prévisions météorologiques entre  $T$  et  $T+24h$ ) et de l'enchaînement GRP - Mascaret. La Figure 5.5 compare les prévisions obtenues avec les modèles GRP à  $T+24h$  (courbe violette), Mascaret sans assimilation de données à  $T+12h$  (courbe rouge) et de l'enchaînement GRP - Mascaret à  $T+36h$  (courbe orange).

L'enchaînement GRP - Mascaret prévoit un débit de  $70 \text{ m}^3/\text{s}$  à une échéance de 36h. Or, on a observé  $45 \text{ m}^3/\text{s}$  (point bleu le 12 janvier à 1h). Accroître les échéances de prévisions en enchaînant les modèles permet d'avoir une vision à plus long terme de la réaction hydrologique. Cependant, on ajoute aux incertitudes du modèle hydraulique, dont la réduction est l'objet de ces travaux, les incertitudes du modèle hydrologique. Il est possible à partir du modèle GRP et des prévisions météorologiques issues des bulletins précipitations biquotidiens et RR3 (*cf* Partie 1.2.1) d'obtenir des prévisions à une échéance de 3 jours (72h). Toutefois, les incertitudes sur la quantification et la distribution spatiale des précipitations, s'ajoutant aux incertitudes propres à la transformation de la pluie en débits du modèle hydrologique, sont telles qu'elles peuvent simplement donner une tendance et non une prévision chiffrée fiable. Afin de s'affranchir des incertitudes sur les pluies prévues, il est possible de limiter l'échéance de prévision du modèle au temps de réaction du bassin. Sur le tronçon Marne Amont, les temps de réaction des stations situées en tête du bassin du modèle MAG sont comprises entre 6 et 12h. Afin de diminuer les incertitudes, il serait possible de se limiter à une prolongation des débits des forçages amont par le modèle GRP d'une dizaine d'heures.

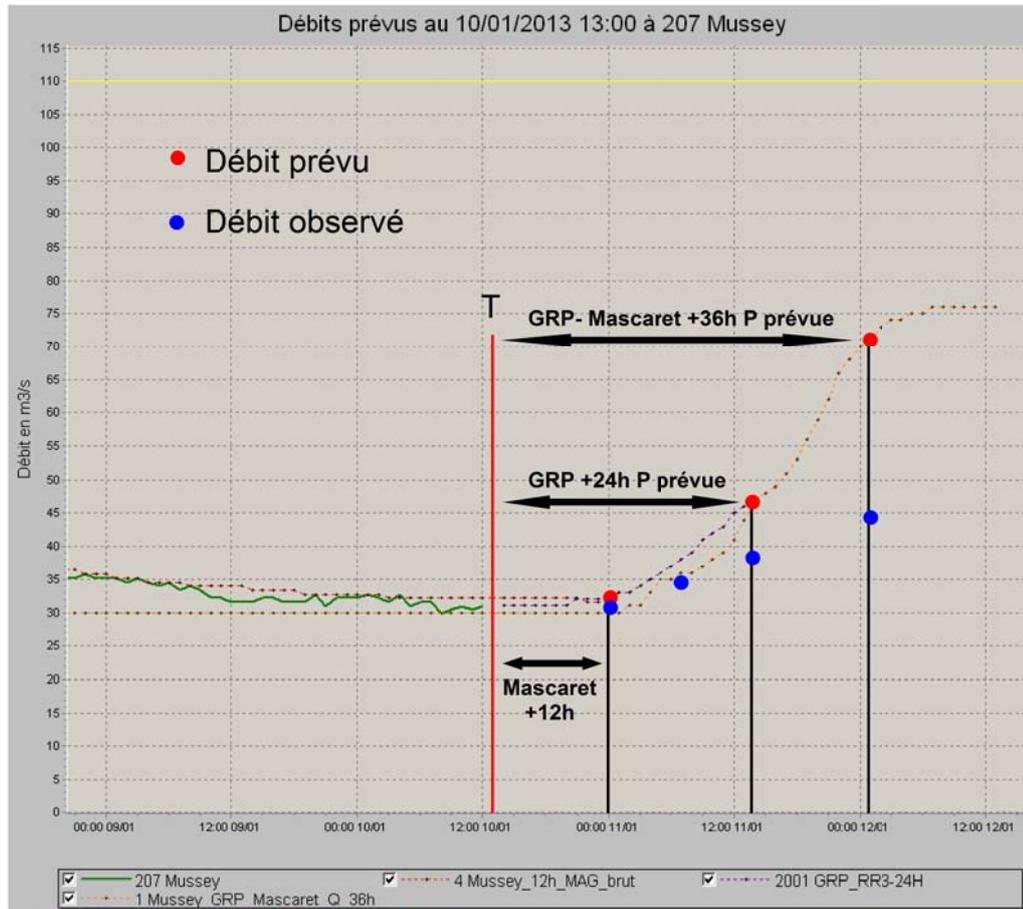


FIGURE 5.5 – Débits prévus à Mussey le 10 janvier 2013 à 13h par le modèle MAG sans assimilation de données, le modèle GRP et l’enchaînement des modèles GRP et Mascaret.

Il est prévu en 2016 de quantifier, avec la méthode *a posteriori*, les incertitudes des modèles GRP utilisés en opérationnel au SPC SAMA. Cette estimation, combinée aux abaques d’erreurs présentés dans la Partie 4.1.1 (Figures 4.1 et 4.2), nous permettra de mieux appréhender les incertitudes relatives à l’enchaînement GRP - Mascaret.

## 5.2 Au SCHAPI avec la Plate-forme Opérationnelle de Modélisation (POM)

La Plate-forme Opérationnelle pour la Modélisation (POM) est un outil de pilotage des modèles de prévision de crues qui permet la préparation des données d'entrées des modèles et leur lancement. Ses principales fonctionnalités sont :

- d'alimenter des modèles en données observées et prévues en temps réel issues de la PHyC (Plate-forme Hydro Centrale) en y appliquant les pré-traitements nécessaires ;
- de piloter le lancement des modèles et d'enchaîner si besoin les différents modèles d'amont en aval ;
- de collecter des résultats et d'y appliquer les post-traitements nécessaires avant export vers la PHyC ou un site FTP afin de mettre les prévisions à disposition des différents outils de supervision dont le superviseur national.

La PHyC est une base de données nationale d'archivage de données hydrologiques et météorologiques. Le superviseur national est une application web à destination des prévisionnistes des SPC et du SCHAPI qui permet de :

- visualiser les données hydrométriques et météorologiques observées, sous forme cartographique, de graphiques et de tableaux ;
- corriger ces données ;
- visualiser les prévisions issues des modèles ;
- produire des prévisions expertisées ;
- gérer des alarmes hydrologiques et techniques.

La POM peut piloter des modèles Mascaret, GRP (*cf* Partie 1.3.1) et les modèles inclus dans le superviseur SOPHIE (Système Ouvert de Prévision Hydrologique Informatisé avec Expertise). Des développements sont également en cours pour pouvoir lancer des modèles Plathynes (qui regroupent les modèles hydrologiques distribués ATHYS et Marine, *cf* Partie 1.3.1) et Telemac 2D (*cf* Partie 1.3.2). La POM est constituée par une application web et une base de données, hébergées chacune sur une machine virtuelle. Le serveur qui héberge ces machines virtuelles est secouru par un serveur de secours identique. La POM centrale est hébergée au SCHAPI. Le déploiement d'une version locale de la POM (possédant les mêmes fonctionnalités que la POM du SCHAPI) est effectif à ce jour dans huit SPC. Une première version du superviseur national est branchée à la PHyC depuis l'automne 2015. Les SPC ayant des modèles pilotés par la POM du SCHAPI peuvent visualiser les prévisions en accédant à distance au superviseur national en attendant un déploiement local de ce dernier prévu en 2016.

Les modèles MAG, MM et GRP utilisés en opérationnel au SPC SAMA ont été intégrés dans la POM au SCHAPI durant l'été 2015. Le prévisionniste, en se connectant à distance à la POM, peut actuellement piloter :

- le modèle MAG avec les mots-clés *DRYRUN*, *CTL\_LOI*, *CTL\_KS*, *CTL\_LOI\_WATERLINE* et *CTL\_KS\_WATERLINE* (cf Partie 2.4.4) ;
- le modèle MM avec les mêmes mots-clés ;
- les modèles GRP des stations de Marnay, Louvières, Villiers, Lacrête et Humberville, correspondant aux forçages amont du modèle MAG, calculé à partir des prévisions RR3 de Météo-France (cf Partie 1.2.1) ;
- l'enchaînement des modèles GRP et Mascaret (cf Partie 5.1.4).

Le pré-traitement des données d'entrée par la POM permet notamment d'interpoler les données manquantes, de multiplier les forçages amont des modèles Mascaret MAG et MM par les coefficients multiplicatifs  $A_i$  et  $A_{MM}$  (cf Parties 1.5.3 et 1.5.4) et d'affecter aux forçages, un débit minimum pour éviter des erreurs de type "sections à sec" lors des simulations estivales. Ces pré-traitements permettent aux prévisionnistes de toujours disposer de prévisions même en cas d'absence de données. Les prévisionnistes du SPC peuvent, en se connectant à distance à la POM, lancer par exemple le modèle MM avec le mot-clé *CTL\_KS* (Figure 5.6) puis visualiser les résultats prévus à partir du superviseur national (Figure 5.7). Les paramètres relatifs à la fenêtre temporelle d'assimilation de données de la POM sont identiques à ceux présentés dans les Parties 5.1.2 et 5.1.3 avec l'outil interne au SPC SAMA TOAD.

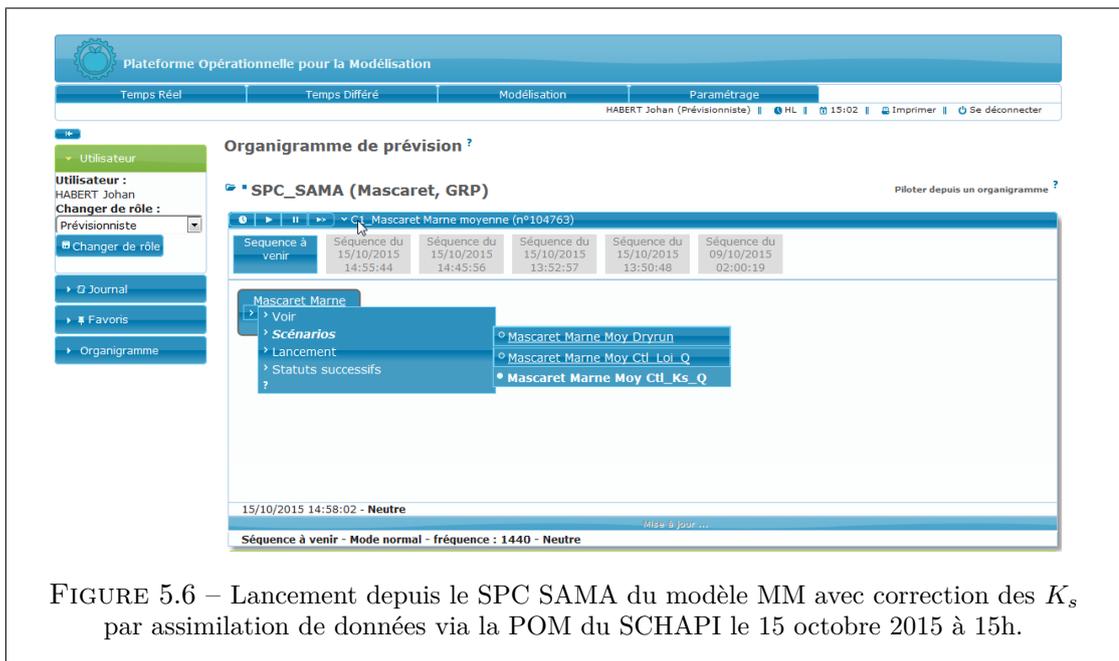


FIGURE 5.6 – Lancement depuis le SPC SAMA du modèle MM avec correction des  $K_s$  par assimilation de données via la POM du SCHAPI le 15 octobre 2015 à 15h.

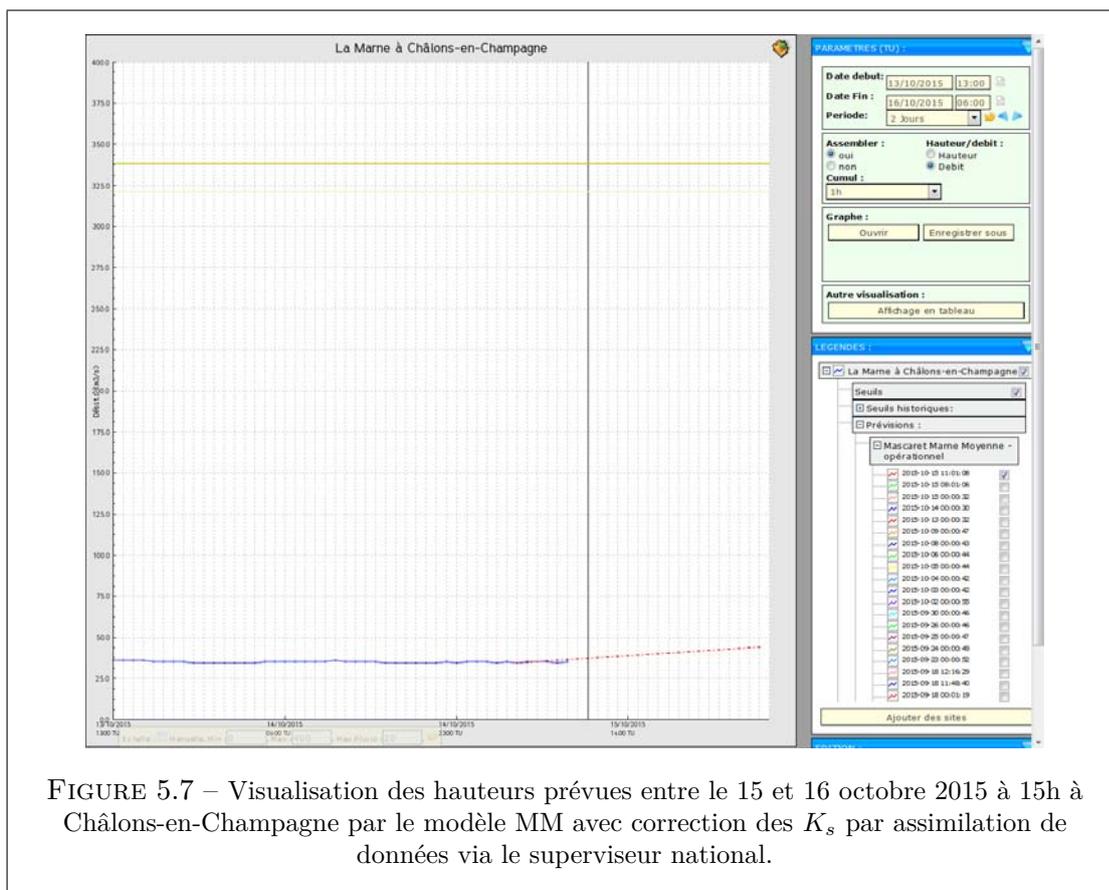


FIGURE 5.7 – Visualisation des hauteurs prévues entre le 15 et 16 octobre 2015 à 15h à Châlons-en-Champagne par le modèle MM avec correction des  $K_s$  par assimilation de données via le superviseur national.

L'enchaînement de la correction des forçages amont, des  $K_s$  et de l'état hydraulique des modèles Mascaret pourra être lancé prochainement depuis la POM, lors de la prochaine mise à jour du prototype DAMP opérationnel au SCHAPI.

## 5.3 Perspectives d'évolution

### 5.3.1 De la maquette DAMP

La version actuelle de DAMP (DAMP2.2) implémentée au sein de la POM ne permet pas encore d'enchaîner les corrections des forçages amont, des  $K_s$  et de l'état hydraulique. L'enchaînement des trois corrections présenté dans cette thèse (*cf* Chapitre 4) a été développé par G. Joinville (CERFACS) sur une version ancienne de DAMP (DAMP1). Cet enchaînement a été intégré dans la dernière version de DAMP (DAMP2.3) dans le cadre de la convention 2015-2016 entre le CERFACS, le LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement) et le MEDDE (Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie). Il est aussi prévu dans cette convention d'ajouter la correction issue du CTL\_WATERLINE sur les valeurs prévues avec une décroissance linéaire afin d'accroître l'effet de cette correction à plus longue échéance.

Actuellement, les écarts-types d'erreur d'observation des débits sont renseignés avec une valeur de débit fixe en  $m^3/s$ . Le remplacement de cette valeur fixe par un pourcentage d'erreur (généralisé lors de la création de la courbe de tarage par exemple) permettrait de faire évoluer la matrice de covariance des erreurs d'observation  $\mathbf{R}$  en fonction du débit observé. Il est en effet légitime d'accorder une incertitude plus grande aux forts débits issus de l'utilisation d'une courbe de tarage moins précise en hautes-eaux.

Dans le cadre de l'affichage des incertitudes de prévision sur le site Vigicrues, la matrice  $\mathbf{A}$  des erreurs d'analyse pourrait être exploitée en opérationnel pour encadrer les prévisions analysées à partir de deux intégrations du modèle Mascaret supplémentaires comme présenté dans la Partie 4.1.2). Ces simulations supplémentaires sont peu coûteuses en termes de temps de calcul et pourraient compléter les fourchettes d'incertitudes calculées *a posteriori* (*cf* Partie 4.1.1), notamment pour les événements hydrologiques extrêmes au-delà de la gamme de validité des fourchettes identifiées *a posteriori*. Ces fourchettes d'incertitudes pourraient aussi être déterminées en appliquant un filtre de Kalman d'ensemble (EnKF). La thèse de Sébastien Barthélémy a montré que l'application de méthodes ensemblistes permettrait d'améliorer la quantification des incertitudes de certains paramètres ainsi qu'une meilleure estimation de l'état hydraulique sur l'ensemble du domaine de nos modèles hydrauliques de prévisions des crues. Il va poursuivre ses travaux en vue d'une application opérationnelle. Nabil El Mocayd, dans le cadre de sa thèse au CERFACS co-financée par le CNES et EDF, tente de réduire les coûts de calculs des méthodes ensemblistes avec l'utilisation de modèles polynomiaux basés sur la théorie des polynômes du chaos, il s'agit de construire une surface de réponse du modèle Mascaret 1D en fonction des paramètres contrôlés dans le cadre de l'assimilation de données.

### 5.3.2 De la prévision des crues au SCHAPI

Le SCHAPI a pour objectif d'offrir une information au public plus complète dans le domaine de la prévision des crues en :

- affichant sur le site Vigicrues les prévisions de hauteur d'eau et/ou de débit

- aux stations sous forme de graphique dès la fin de l'année ;
- passant de la prévision ponctuelle des crues à la prévision cartographique des inondations. Les cartes de zones inondées potentielles seront dans un premier temps destinées aux seuls gestionnaires de crise pour faciliter leur prise de décision par anticipation.

Le SCHAPI va mettre à disposition des SPC l'outil EAO (Expertise Assistée par Ordinateur) qui permet de visualiser les prévisions brutes des modèles (issues par exemple de la POM via la PHyC) et d'ajouter une fourchette d'incertitudes (issue par exemple de l'outil OTAMIN). Ces valeurs peuvent être modifiées à la main par le prévisionniste et exportées vers la PHyC (elles deviennent alors des prévisions et des incertitudes expertisées) pour être enfin publiées sur Vigicrues. Une version beta de EAO est en cours de test dans certains SPC. Une version finalisée sera diffusée à l'ensemble du réseau en décembre 2015. EAO peut fonctionner indépendamment d'OTAMIN (*cf* Partie 4.1.1), de la POM et du superviseur national mais, le déploiement de ces derniers facilitera son utilisation via un format de fichier commun (format XML Sandre).

Dans le cadre du passage à la prévision des inondations, l'objectif pour la fin de l'année 2015, défini par le SCHAPI, est d'avoir une couverture nationale d'au moins 20 % des stations de prévision du réseau Vigicrues par au moins trois scénarios d'inondation en fonction de différentes classes de hauteurs d'eau. L'outil CartoZI a été mis à disposition des SPC pour permettre la production en régie des cartes de zones inondées potentielles (*cf* Partie 4.2.1).

### 5.3.3 De la prévision des crues au SPC SAMA

Il est préférable d'améliorer la qualité de l'observation avant d'avoir recours à des méthodes d'assimilation de données. Dans ce contexte, des travaux ont été réalisés depuis 2013 pour extrapoler les courbes de tarage avec Mascaret au-delà des plus hauts jaugeages réalisés pour une dizaine de stations hydrométriques (notamment celle de Mussey, *cf* Partie 3.2). A partir de récents levés bathymétriques, les courbes de tarage des stations de Marnay, Condes et Saucourt vont être extrapolées. Les incertitudes liées au calcul du débit de ces stations d'entrée et d'observation du modèle MAG devraient être réduites. De plus, un projet de création de station hydrométrique sur le Rongeant (affluent en rive droite de la Marne sur le tronçon Marne Amont, Figure 1.16) est en réflexion avec l'UH de la DREAL Champagne-Ardenne afin de disposer en temps réel du débit de ce cours d'eau actuellement non-instrumenté. Cette station pourra être intégrée en forçage amont du modèle MAG où le débit du Rongeant est actuellement estimé en injectant l'hydrogramme de la station de Villiers multiplié par un coefficient  $A$  égal à 5.5 ( $Q_5$ , Figure 1.17).

Le modèle MM va être étendu en aval pour bénéficier de prévisions à la station de Château-Thierry (*cf* Figure 1.14). L'utilisation de DAMP en opérationnel va être étendue au modèle Mascaret Seine Amont (qui couvre la tête de bassin de la Seine jusqu'à Bar-sur-Seine, condition limite aval du modèle) qui comme le modèle MAG connaît des problématiques de quantification des apports des cours d'eau non-instrumentés.

Des abaques d'incertitudes ont déjà été créés pour le modèle MAG avec l'outil TOAD. Des travaux similaires vont être réalisés avec l'outil national OTAMIN pour le modèle MAG et étendus aux modèles MM et GRP afin de faciliter l'export des fourchettes d'incertitudes calculées *a posteriori* (cf Partie 4.1.1) vers EAO.

Dans le cadre du passage à la prévision des inondations, la géométrie du modèle MAG va être densifiée à partir de données LIDAR et de profils bathymétriques levés durant l'été 2015. Les lignes d'eau simulées par le modèle hydraulique pour différents débits vont être utilisées pour créer des cartes de zones inondées potentielles avec CartoZI et QGIS par la suite versées dans la base de données de la plate-forme VIGInond.

# Conclusion

Les modèles hydrauliques apportent à l'expertise du prévisionniste une information fiable pour anticiper le risque de crue en condition opérationnelle. Il doit toutefois garder en souvenir que ces modèles sont entachés d'erreurs. La validité des prévisions dépend de la qualité des données d'entrée (données topographiques, bathymétriques et des forçages) et de l'estimation, entre autres, des débits des cours d'eau non-instrumentés et des paramètres de frottement retenus. Les apports intermédiaires et les coefficients de frottement sont estimés lors de la phase de calage en minimisant les écarts entre les valeurs simulées par le modèle et celles observées lors de plusieurs événements de crues. Il en résulte des valeurs moyennes et des écarts-types caractérisant leur variabilité. La quantification et la réduction des incertitudes de prévision est actuellement une préoccupation centrale du réseau Vigicrues. Des méthodes et des outils ont été développés dans le cadre du GT sur les incertitudes pour estimer et afficher sur le site Vigicrues les fourchettes d'incertitudes à 80% des valeurs prévues par les prévisionnistes en temps réel. Les incertitudes en entrée des modèles se traduisent en incertitudes sur les variables d'intérêt en sortie des modèles. Elles limitent les capacités descriptives et prédictives de ces derniers. Les valeurs observées et simulées par le modèle sont combinées pour améliorer d'une part l'estimation de paramètres qui engendre des erreurs sur les valeurs simulées et d'autre part de corriger directement l'état simulé du modèle. Le CERFACS a entrepris des travaux en 2010 pour développer la maquette DAMP (Data Assimilation for Mascaret Prototype) qui permet le portage et l'utilisation de méthodes d'assimilation de données appliquées aux modèles hydraulique Mascaret de prévisions des crues utilisés en opérationnel dans les SPC et au SCHAPI.

L'objectif de ces travaux de thèse a été d'améliorer les prévisions de hauteurs d'eau et de débits, sur le bassin de la Marne, issues des modèles hydrauliques utilisés dans le cadre opérationnel de la prévision des crues à partir de méthodes d'assimilation de données. Ces prévisions reposent sur des modèles hydrauliques 1D Mascaret, opérationnels au SPC SAMA, enrichis par une méthode d'assimilation de données *in situ* utilisant un Filtre de Kalman Étendu (EKF) à travers la maquette DAMP. A travers la participation du SPC SAMA au GT sur les incertitudes, les sources d'erreurs relatives aux modèles hydrauliques Marne Amont Global (MAG) et Marne Moyenne (MM) ont été identifiées et les fourchettes d'incertitudes des prévisions qui en découlent, estimées avec la méthode d'analyse des erreurs constatées *a posteriori*. Il a aussi été montré que les intervalles d'erreur des prévisions pouvaient être déterminés en exploitant les matrices

**A** de covariance des erreurs d'analyses. Des travaux ont été entrepris pour contourner ou diminuer les incertitudes des modèles MAG et MM. Des profils en travers complémentaires ont été levés en régie ou bien par des cabinets de géomètres lorsqu'il a été estimé que la donnée géométrique était insuffisante et entachait la relation hauteur-débit simulée par le modèle. L'extrapolation de la courbe de tarage de la station de Mussey a été modifiée pour améliorer la qualité des débits observés. Il a été montré que des méthodes d'assimilation de données pouvaient aussi être mises en place pour réduire les erreurs des prévisions des modèles MAG et MM. Un Filtre de Kalman Étendu a été appliqué pour bénéficier d'une estimation optimale de divers paramètres incertains ou pour corriger directement les valeurs simulées par les modèles. L'assimilation d'observations de débits et de hauteurs d'eau pour corriger les forçages amont et les coefficients de frottement du modèle MAG a permis d'améliorer l'estimation des apports intermédiaires et la relation hauteur-débit simulée à Joinville. Le cyclage de la correction des forçages amont par assimilation de données a permis une amélioration moyenne de 91% des débits prévus à l'échéance maximale (comprise entre 5 et 21h selon les stations) par rapport aux prévisions du modèle sans assimilation. L'assimilation d'observations de hauteurs d'eau pour corriger les forçages amont, les coefficients de frottement et l'état hydraulique du modèle MM aurait permis d'anticiper la hauteur observée à la station de Châlons-en-Champagne d'une douzaine d'heures lors de la crue d'avril 1983. L'utilisation de la matrice **A**, pour estimer les fourchettes d'incertitudes, s'est révélée envisageable au vu de l'intervalle calculé lors du rejeu de cet événement. L'aboutissement de ces travaux est l'utilisation en opérationnel des méthodes d'assimilation de données appliquées aux modèles MAG et MM. L'outil TOAD et la POM développés respectivement par le SPC SAMA et par le SCHAPI permettent d'exploiter la maquette DAMP en opérationnel. Le temps de calcul, inférieur à 4 minutes pour l'enchaînement des trois corrections du modèle MM à partir de TOAD, est compatible avec le processus de caractérisation du risque hydrologique en temps réel. Les temps de calcul sont moindres en utilisant la POM du SCHAPI qui dispose d'une puissance de calcul plus importante. Le SPC SAMA dispose depuis décembre 2013 de prévisions issues de modèles hydrauliques corrigés par assimilation de données. Cet outil permet aussi de visualiser les fourchettes d'incertitudes calculées avec la méthode *a posteriori* et d'enchaîner les modèles hydrologiques GRP et hydrauliques Mascaret. L'injection des prévisions GRP en condition limite amont des modèles Mascaret permet d'accroître les échéances de prévisions mais accroît aussi les incertitudes liées à la quantification de la pluie prévue. Ces mêmes valeurs peuvent aussi être obtenues à partir de la chaîne opérationnelle du SCHAPI depuis l'été 2015.

Le SCHAPI a pour objectif d'offrir une information au public plus complète dans le domaine de la prévision des crues en affichant sur le site Vigicrues les prévisions de hauteurs d'eau et/ou de débits aux stations sous forme de graphique dès la fin de l'année 2015 ainsi qu'en passant de la prévision ponctuelle des crues à la prévision cartographique des inondations. Le futur déploiement des outils EAO et OTAMIN dans les SPC devrait permettre aux prévisionnistes de quantifier, voire d'affiner les fourchettes d'incertitudes relatives à leurs prévisions. Parallèlement, des travaux sont en cours au CERFACS pour intégrer de nouvelles fonctionnalités à la maquette DAMP. La thèse

de Sébastien Barthélémy (Barthélémy, 2015) a montré que l'application de méthodes ensemblistes (EnKF) permettrait d'améliorer la quantification des incertitudes de certains paramètres ainsi qu'une meilleure estimation de l'état hydraulique sur l'ensemble du domaine modélisé par un couplage de modèles hydrauliques 1D et 2D. Il poursuit ses travaux au CERFACS en vue d'une application opérationnelle. Nabil El Mocayd, dans le cadre de sa thèse, tente de réduire les coûts de calculs des méthodes ensemblistes avec l'utilisation de modèles polynomiaux basés sur la théorie des polynômes du chaos. A plus long terme, la mission SWOT devrait fournir des observations de hauteurs d'eau qui pourront être éventuellement assimilées en complément des données *in situ* afin d'améliorer les modèles hydrauliques de prévisions des crues. Les données SWOT seront disponibles à partir de 2020 mais de nombreuses études sont en cours afin d'anticiper et d'exploiter au mieux cette future source d'observation. À l'issue de son stage au CERFACS, Vita Ayoub a conclu que l'assimilation de données SWOT permettrait d'optimiser l'estimation de paramètres tels que les coefficients de frottement de modèles hydrauliques.



# Table des figures

|      |  |    |
|------|--|----|
| 1.1  | Schéma de la station hydrométrique de Louvières sur la Traire (Haute-Marne). . .   | 13 |
| 1.2  | Jaugeage au moulinet (photo A et B) et par ADCP (photo C et D). . . . .  | 15 |
| 1.3  | Le cycle de l'eau et les processus simulés par les modèles hydrologiques et de propagation : les débits aux exutoires 1 et 2 (points rouges) sont simulés à l'aide de modèles hydrologiques qui tiennent compte des précipitations. Le débit à l'exutoire 3 en aval est simulé par un modèle hydraulique en propageant les débits observés et/ou prévus (dans le cas où l'on enchaîne les modèles) aux exutoires 1 et 2 dans la vallée décrite par des profils topographiques et/ou un maillage issu d'un MNT. . . . . | 20 |
| 1.4  | Schéma structurel du modèle GRP. . . . .   | 23 |
| 1.5  | Débits moyens journaliers prévus par la chaîne SIM-PE à Cailly-sur-Eure le 15/12/2011 : le graphique A détaille les 51 membres de la prévision d'ensemble avec les seuils d'alerte moyen (marron) et haut (bleu), le graphique B synthétise l'information en utilisant des plages colorées en fonction des quantiles d'incertitude min-max Q5-95, Q10-90 et Q25-75 (sources : SCHAPI). . . . .   | 25 |
| 1.6  | Propagation d'une onde de crue entre une section amont et une section aval. . .  | 26 |
| 1.7  | Carte nationale de vigilance crue diffusée le 9 décembre 2010 à 16h sur le site Vigicrues. . . . .   | 31 |
| 1.8  | Vue locale du SPC SAMA de la carte de vigilance crue diffusée le 9 décembre 2010 à 16h sur le site Vigicrue ; le tronçon Marne Amont est en vigilance orange et les tronçons Marne Moyenne (Châlons-en-Champagne), Saulx-Ornain (Bar-le-Duc), Seine Troyenne (Troyes) sont en vigilance jaune. . . . .   | 32 |
| 1.9  | Débits observés à St-Jean-de-Védas sur la Mosson dans l'Hérault entre le 19 et le 26 août 2015 à 10h. . . . .  | 33 |
| 1.10 | Carte de vigilance météorologique diffusée par Météo-France le 24 août 2015 à 10h.   | 33 |
| 1.11 | Le bassin de la Seine. . . . .   | 34 |
| 1.12 | Photographie de la crue de 1910 à Paris. . . . .   | 35 |
| 1.13 | Le lac-réservoir Marne, photo <b>A</b> : vue aérienne du lac, photo <b>B</b> : l'église de Champaubert en période d'étiage, photo <b>C</b> : le canal de prise. . . . .  | 36 |
| 1.14 | Le territoire de compétence du SPC SAMA. . . . .   | 38 |
| 1.15 | Observations et prévisions au SPC SAMA. . . . .  | 40 |
| 1.16 | Le tronçon Marne Amont. . . . .  | 41 |
| 1.17 | Le modèle Marne Amont Global. . . . .  | 43 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 1.18 | Débits et hauteurs modélisés à Condes lors de la crue de validation d'avril 2001 avec et sans prise en compte des apports intermédiaires. . . . .   | 47  |
| 1.19 | Débits et hauteurs observés et modélisés à Mussey pour la crue de validation de janvier 2004. . . . .   | 47  |
| 1.20 | Le modèle Marne Moyenne (MM). . . . .   | 49  |
| 1.21 | Comparaison entre la courbe de tarage de Châlons-en-Champagne et la relation $H/Q$ simulée par le modèle MM. . . . .  | 52  |
| 1.22 | Hauteurs observées et modélisées à La Chaussée pour la crue de décembre 2010. . . . .   | 53  |
| 1.23 | Débits observés et modélisés à Châlons-en-Champagne pour la crue de décembre 2010. . . . .  | 53  |
| 1.24 | Hauteurs observées et modélisées à Damery pour la crue de décembre 2010. . . . .  | 54  |
| 2.1  | Profil en travers de la rivière Saulx (affluent de la Marne pris en compte dans le modèle MM). Les droites verticales bleues correspondent aux limites extérieures du lit mineur ; les droites vertes correspondent aux limites du lit majeur. . . . .  | 58  |
| 2.2  | Schéma de la confluence entre la Marne et la Saulx du modèle MM. Le modèle est composé de 3 biefs (b) ; deux hydrogrammes ont été imposés en condition limite amont aux extrémités libres $e_1$ et $e_5$ ; une courbe de tarage a été imposée en condition limite aval à l'extrémité libre $e_4$ . Le nœud $n_1$ composé des extrémités libres $e_2$ , $e_3$ et $e_6$ modélise la confluence. . . . . | 59  |
| 2.3  | Diminution du pourcentage de l'erreur moyenne sur une période de 26 jours avec la méthode de correction des forçages amonts (en rouge) en réanalyse (à $-24h$ , en pointillés) et en prévision (à $+6h$ en trait plein) présentée dans (Ricci et al., 2011). . . . .  | 66  |
| 2.4  | Schéma PrePALM de la maquette DAMP. . . . .   | 69  |
| 2.5  | Représentation schématique de l'enchaînement de la correction des paramètres $a, b, c$ ou $\mathbf{m}, \mathbf{n}$ (courbe verte) et de la correction de la ligne d'eau (courbe rouge) sur un cycle d'analyse. . . . .  | 76  |
| 3.1  | Le modèle Marne Amont Global. . . . .   | 81  |
| 3.2  | Le modèle Marne Moyenne (MM). . . . .   | 109 |
| 3.3  | Ondes de crue simulées avec $dK_s \mathbf{m} \in [-10; +10]$ à La Chaussée, les écart-types sont calculés en comparant les débits de la simulation d'ébauche (trait plein noir) et des simulations perturbées. . . . .  | 111 |
| 3.4  | Ondes de crue simulées avec $dK_s \mathbf{m} \in [-10; +10]$ à Châlons-en-Champagne, les écart-types sont calculés en comparant les débits de la simulation d'ébauche (trait plein noir) et des simulations perturbées. . . . .   | 111 |
| 3.5  | Ondes de crue simulées pour $dK_s \mathbf{m} = -8$ et $+8$ à Châlons-en-Champagne. . . . .  | 112 |
| 3.6  | Déphasages temporels obtenus pour différentes gammes de débits à La Chaussée pour des $dK_s$ compris entre $-10$ et $+10$ et ceux calculés à partir de $dK_s = -2$ . . . . .  | 113 |
| 3.7  | Déphasages temporels obtenus pour différentes gammes de débits à Châlons-en-Champagne pour des $dK_s$ compris entre $-10$ et $+10$ et ceux calculés à partir de $dK_s = -2$ . . . . .   | 114 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.8  | Ondes de crue simulées avec $dK_s \mathbf{n} \in [-6;+6]$ à La Chaussée, les écart-types sont calculés en comparant les débits de la simulation d'ébauche (trait plein noir) et des simulations perturbées. . . . .   | 115 |
| 3.9  | Ondes de crue simulées avec $dK_s \mathbf{n} \in [-6;+6]$ à Châlons-en-Champagne, les écart-types sont calculés en comparant les débits de la simulation d'ébauche (trait plein noir) et des simulations perturbées. . . . .  | 116 |
| 3.10 | Déphasage temporel obtenu pour différentes gammes de débits à La Chaussée pour des $dK_s$ compris entre $-6$ et $+6$ et ceux calculés à partir de $dK_s = -2$ . . . . .   | 117 |
| 3.11 | Déphasage temporel obtenu pour différentes gammes de débits à Châlons-en-Champagne pour des $dK_s$ compris entre $-6$ et $+6$ et ceux calculés à partir de $dK_s = -2$ . . . . .  | 117 |
| 3.12 | Hauteurs observées et simulées par le modèle brut et l'enchaînement des 2 étapes d'assimilation de données à <b>La Chaussée</b> entre le 05/12/2010 et le 05/01/2011. $N$ représente le critère de Nash-Sutcliffe dans la légende. . . . .  | 120 |
| 3.13 | Débits observés et simulés par le modèle libre et l'enchaînement des 2 étapes d'assimilation de données à <b>Châlons-en-Champagne</b> entre le 05/12/2010 et le 05/01/2011. $N$ représente le critère de Nash-Sutcliffe dans la légende. . . . .  | 121 |
| 3.14 | Hauteurs observées et simulées par le modèle libre et l'enchaînement des 2 étapes d'assimilation de données à <b>Damery</b> entre le 05/12/2010 et le 05/01/2011. $N$ représente le critère de Nash-Sutcliffe dans la légende. . . . .  | 121 |
| 3.15 | Comparaison des débits obtenus avec l'enchaînement des 2 étapes et l' <b>étape 1</b> avec un écart-type d'erreur d'ébauche de 0.08 (courbe rose) à Châlons-en-Champagne entre le 05/12/2010 et le 05/01/2011 à $+24h$ . . . . .   | 124 |
| 3.16 | Débits observés et prévus à Châlons-en-Champagne le 24/12/2010 à $2h$ . . . . .   | 125 |
| 4.1  | Abaque d'intervalles d'incertitudes à 50 % et 80 % des hauteurs prévues à Mussey à 12 h par le modèle MAG sans assimilation de données calculés par l'IRSTEA avec la méthode CEMA. . . . .  | 130 |
| 4.2  | Abaque d'intervalles d'incertitudes à 50 % et 80 % des hauteurs prévues à Mussey à 12 h par le modèle MAG avec assimilation de données calculés par l'IRSTEA avec la méthode CEMA. . . . .  | 131 |
| 4.3  | Carte de zones inondées potentielles minimum (bleu) et maximum (incluant le rouge) à Pont-sur-Seine (en aval de Troyes) diffusée à titre expérimental le 10 mai 2013 pour un pic de crue prévu pour les 12 et 13 mai 2013, et utilisée sur le terrain par les acteurs de la gestion de crise. . . . . | 133 |
| 4.4  | Exemple de carte de zone inondée potentielle de l'agglomération châlonnaise réalisée avec CartoZI pour un débit simulé de $637 m^3/s$ . . . . .   | 136 |
| 4.5  | Hauteurs d'eau observées à Châlons-en-Champagne lors de l'épisode de crue d'avril 1983; le prévisionniste veut connaître la hauteur prévue à partir de l'instant $T$ le 13 avril 1983 à $7h$ . . . . .  | 138 |
| 4.6  | Limnigramme observé et prévu à Châlons-en-Champagne le 13 avril 1983 à $7h$ . . . . .   | 141 |
| 4.7  | Limnigramme observé et prévu à Châlons-en-Champagne entre le 12 et le 14 avril 1983 à $7h$ (zoom sur les jours 4 et 5 de la Figure 4.6). . . . .  | 142 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 4.8  | Hauteurs prévues à Châlons-en-Champagne entre le 13 et le 14 avril 1983 à 7h suite à l' <b>étape 1</b> (en rouge), à l'enchaînement de l' <b>étape 1</b> et de l' <b>étape 2</b> (en vert foncé) et des trois corrections (en vert clair) accompagnés de leurs faisceaux d'incertitudes respectifs (en pointillés). | 144 |
| 4.9  | Hauteurs prévues à Châlons-en-Champagne entre le 13 et le 14 avril 1983 à 7h suite à l'enchaînement des trois corrections accompagné de son intervalle d'incertitudes à 80 % calculé à partir de la matrice de covariance des erreurs d'analyses <b>A</b> .   | 145 |
| 4.10 | Zones potentiellement inondées au pic de crue le 13/04/1983 à 21h par le modèle brut.   | 148 |
| 4.11 | Zones potentiellement inondées au pic de crue le 13/04/1983 à 21h par le modèle avec assimilation de données.   | 149 |
| 4.12 | Photographie aérienne de l'amont de Châlons en avril 1983.  | 150 |
| 4.13 | Photographie aérienne de l'aval de Châlons en avril 1983.   | 151 |
| 5.1  | Organigramme opérationnel de lancement du modèle MM avec assimilation de données via l'outil TOAD.  | 155 |
| 5.2  | Visualisation avec l'outil TOAD des débits prévus à Chamouilley le 30 janvier 2014 à 8h (TU) par le modèle MAG avec (en bleu) et sans (en vert) la correction des forçages amont par assimilation de données ainsi que leurs fourchettes d'incertitudes respectives à 80%.  | 158 |
| 5.3  | Visualisation avec l'outil SOPHIE des hauteurs d'eau prévues à La Chaussée le 19 octobre 2015 à 9h (TU) par le modèle MM avec (en rouge) et sans (en bleu) l'enchaînement des corrections des forçages amont, des $K_s$ et de l'état hydraulique par assimilation de données.                                       | 160 |
| 5.4  | Injection du débit prévu par le modèle hydrologique GRP en condition limite amont d'un modèle hydraulique Mascaret.   | 162 |
| 5.5  | Débits prévus à Mussey le 10 janvier 2013 à 13h par le modèle MAG sans assimilation de données, le modèle GRP et l'enchaînement des modèles GRP et Mascaret.  | 164 |
| 5.6  | Lancement depuis le SPC SAMA du modèle MM avec correction des $K_s$ par assimilation de données via la POM du SCHAPI le 15 octobre 2015 à 15h.  | 166 |
| 5.7  | Visualisation des hauteurs prévues entre le 15 et 16 octobre 2015 à 15h à Châlons-en-Champagne par le modèle MM avec correction des $K_s$ par assimilation de données via le superviseur national.  | 167 |
| 5.8  | Hauteurs observées et simulées par le modèle brut et l'enchaînement des 2 étapes d'assimilation de données à La Chaussée entre le 05/12/2010 et le 05/01/2011 à +24h.   | 184 |
| 5.9  | Débits observées et simulées par le modèle brut et l'enchaînement des 2 étapes d'assimilation de données à Châlons-en-Champagne entre le 05/12/2010 et le 05/01/2011 à +24h.  | 184 |
| 5.10 | Hauteurs observées et simulées par le modèle brut et l'enchaînement des 2 étapes d'assimilation de données à Damery entre le 05/12/2010 et le 05/01/2011 à +24h.  | 185 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.11 | Profils en travers renseignés dans le modèle MM pour décrire l'agglomération châlonnaise. . . . .                       | 189 |
| 5.12 | Interpolation des profils et création de la MNSE. . . . .   | 190 |
| 5.13 | MNT de l'agglomération châlonnaise, un point tous les mètres avec une précision de plus ou moins 15 <i>cm</i> . . . . . | 191 |
| 5.14 | Soustraction de la MNSE au MNT afin de déterminer la hauteur brute. . . . .   | 192 |
| 5.15 | Hauteur d'eau calculée sans prise en compte des digues. . . . .   | 193 |
| 5.16 | Application du masque afin de tenir compte des digues. . . . .  | 194 |



# Liste des tableaux

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 1.1 | Signification des valeurs du coefficient de marée. . . . .  | 17  |
| 1.2 | Épisodes de crues utilisés pour le calage et la validation du modèle MAG. Les seuils de vigilance jaunes et orange sont de respectivement 60 et 120 $m^3/s$ à Condes, 120 et 210 $m^3/s$ à Mussey et 170 et 350 $m^3/s$ à Chamouilley. . . . .  | 44  |
| 1.3 | Coefficients multiplicatifs $A_i$ d'apports et leurs écarts-types avec $i \in [1,5]$ . . . . .  | 45  |
| 1.4 | Coefficients de Strickler moyens des lits mineurs ( <b>m</b> ) et majeurs ( <b>n</b> ) retenus au calage pour le modèle Marne Amont Global en fonction des biefs décrits dans la Figure 1.17. . . . .   | 46  |
| 1.5 | Épisodes de crues utilisés pour le calage et la validation du modèle MM. Les seuils de vigilance jaunes et orange sont de respectivement 340 et 550 $m^3/s$ à la station de Châlons-en-Champagne. La crue d'avril 1983 sera utilisée pour valider la maquette de correction des paramètres du modèle MM par assimilation de données dans le Chapitre 4. . . . .   | 50  |
| 1.6 | Coefficients de Strickler moyens des lits mineurs ( <b>m</b> ) et majeurs ( <b>n</b> ) retenus au calage pour le modèle MM. . . . .   | 51  |
| 3.1 | Paramètres appliqués aux huit crues pour l' <b>étape 2</b> de l'assimilation de données appliquée au modèle MM. $K_s^b$ correspond aux $K_s$ d'ébauche, $\sigma b$ aux écarts-types d'erreur d'ébauche et $dK_s$ à la perturbation faite à $K_s^b$ pour déterminer l'opérateur d'observation $G$ . Les valeurs seuils $K_s^a$ sont les valeurs minimales et maximales que peuvent atteindre les $K_s$ analysés. . . . . | 119 |
| 3.2 | Critères de Nash moyens $N$ obtenus pour les huit crues de validation à La Chaussée, Châlons-en-Champagne et Damery avec la simulation brute et l'enchaînement des deux étapes d'assimilation de données. . . . .   | 122 |
| 3.3 | Critères de Nash moyens $N$ obtenus pour les huit crues de validation aux échéances maximales de prévision des stations de La Chaussée, Châlons-en-Champagne et Damery avec la simulation brute et l'enchaînement des deux étapes d'assimilation de données. . . . .  | 123 |
| 4.1 | Paramètres appliqués pour la correction des forçages amont ( <b>étape 1</b> ) du modèle MM pour la crue d'avril 1983. . . . .   | 139 |
| 4.2 | Paramètres appliqués pour la correction des $K_s$ par assimilation de données ( <b>étape 2</b> ) du modèle MM pour la crue d'avril 1983. . . . .  | 140 |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 4.3 | Erreurs d'analyses obtenues pour les paramètres $a$ , $\mathbf{m}$ et $\mathbf{n}$ . . . . .           | 143 |
| 4.4 | Composition des différentes simulations pour le calcul de la fourchette d'incertitudes à 80 %. . . . . | 144 |

# Annexe 1

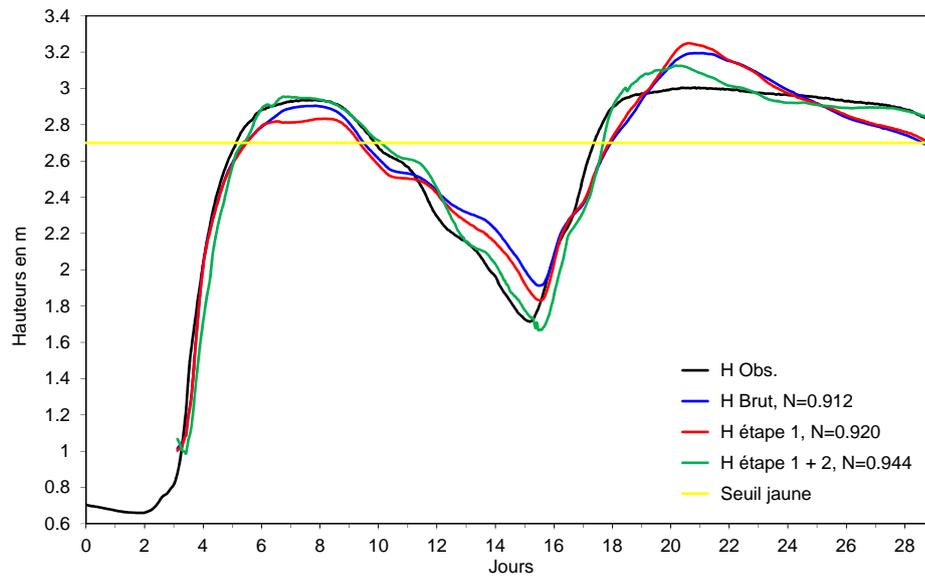


FIGURE 5.8 – Hauteurs observées et simulées par le modèle brut et l'enchaînement des 2 étapes d'assimilation de données à La Chaussée entre le 05/12/2010 et le 05/01/2011 à +24h.

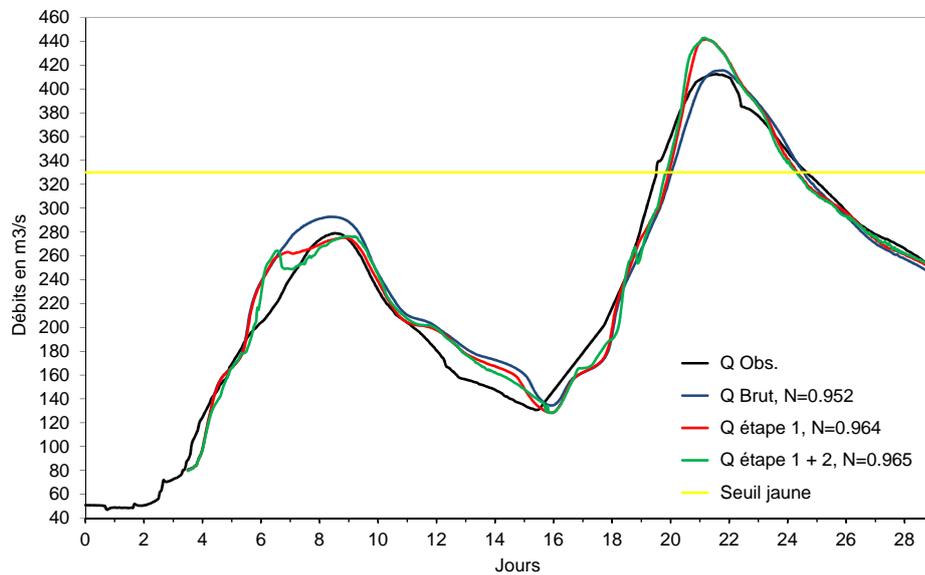
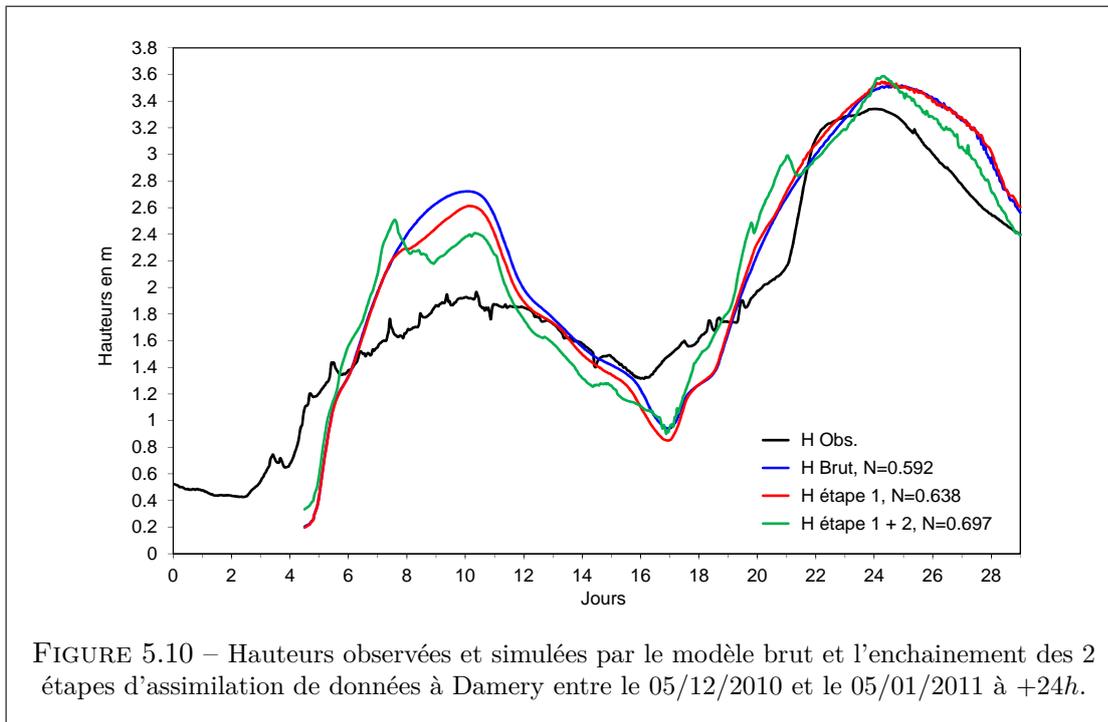


FIGURE 5.9 – Débits observés et simulés par le modèle brut et l'enchaînement des 2 étapes d'assimilation de données à Châlons-en-Champagne entre le 05/12/2010 et le 05/01/2011 à +24h.





## Annexe 2



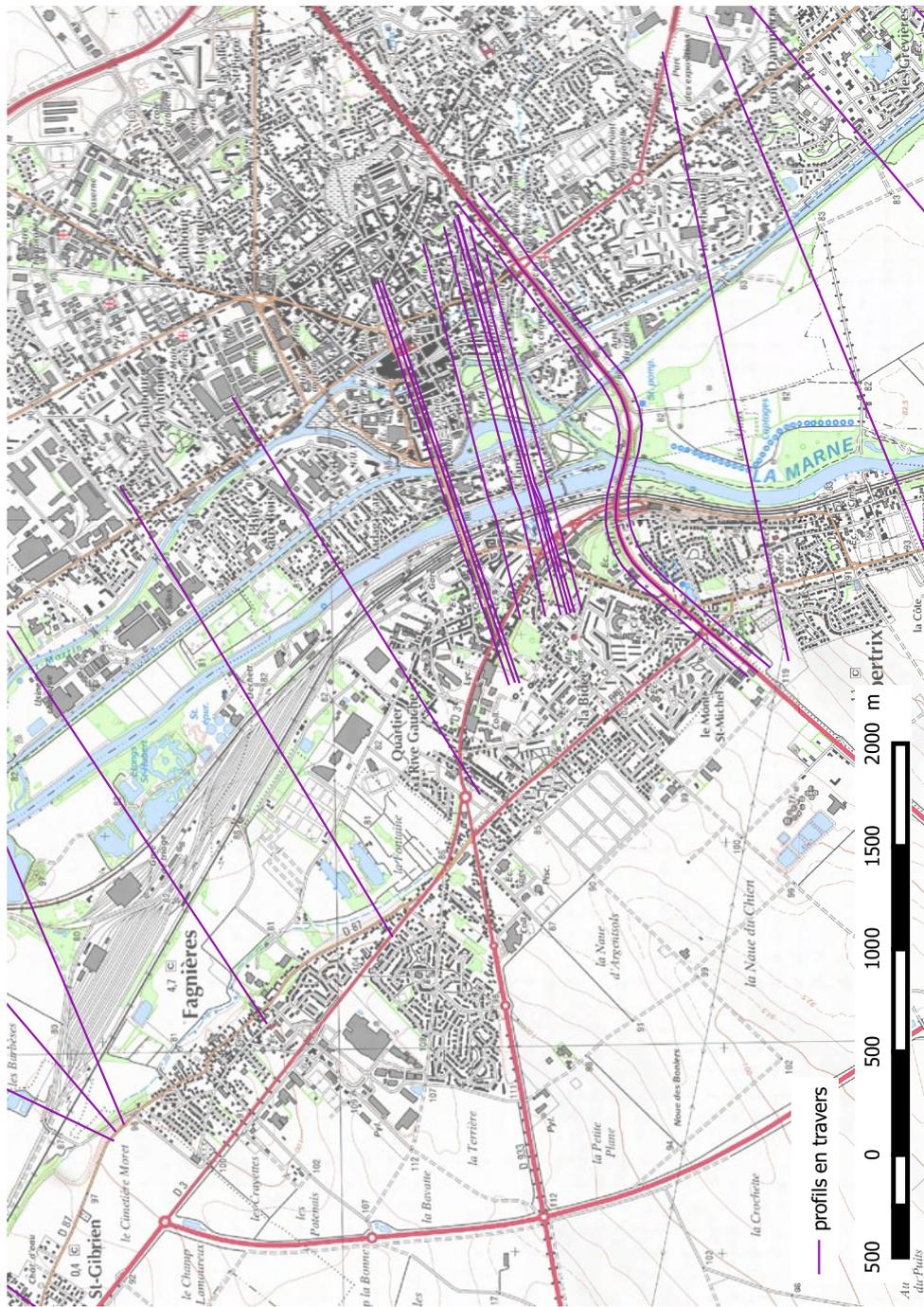


FIGURE 5.11 – Profils en travers renseignés dans le modèle MM pour décrire l’agglomération chalonnaise.

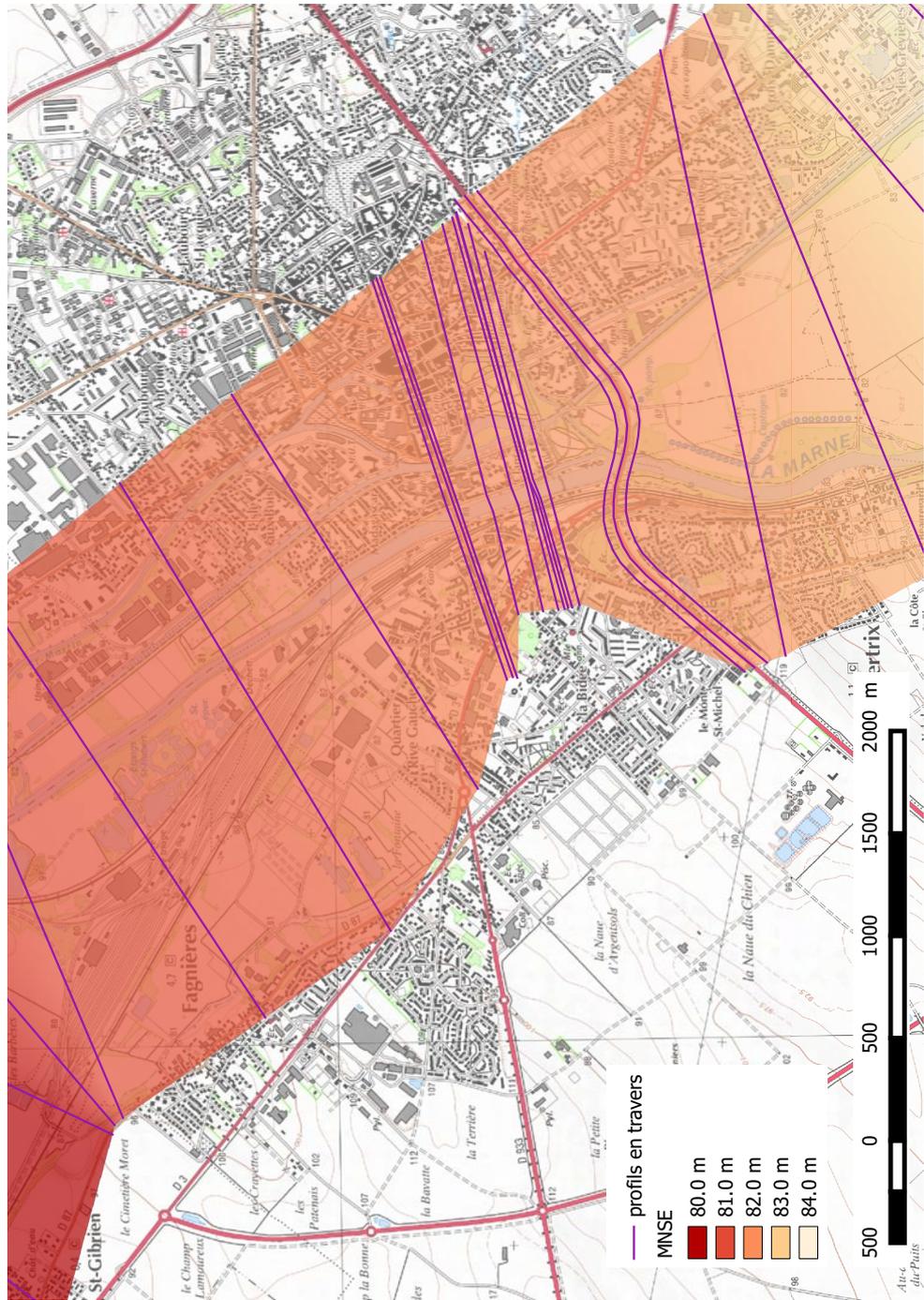


FIGURE 5.12 – Interpolation des profils et création de la MNSE.





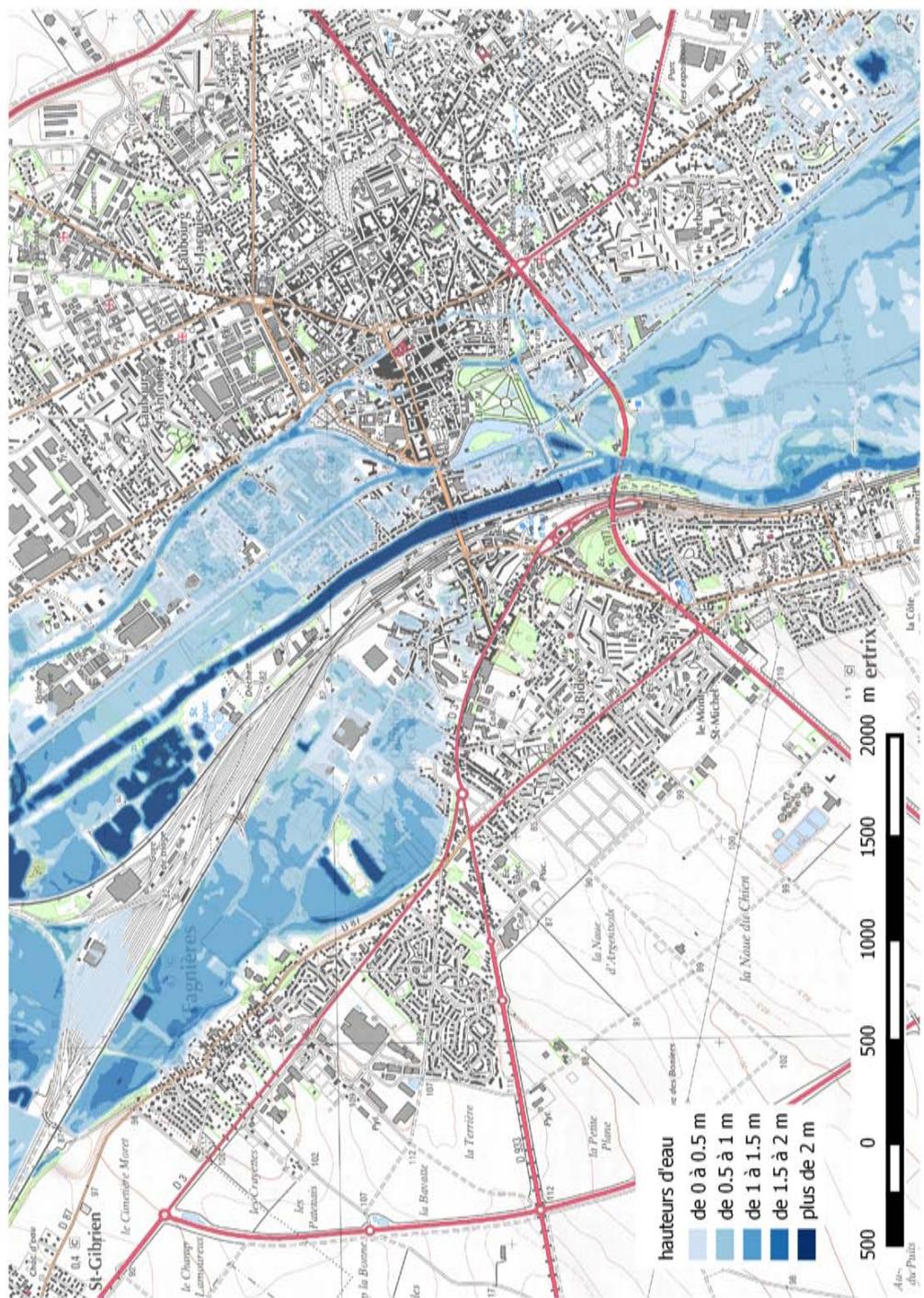


FIGURE 5.15 – Hauteur d'eau calculée sans prise en compte des digues.

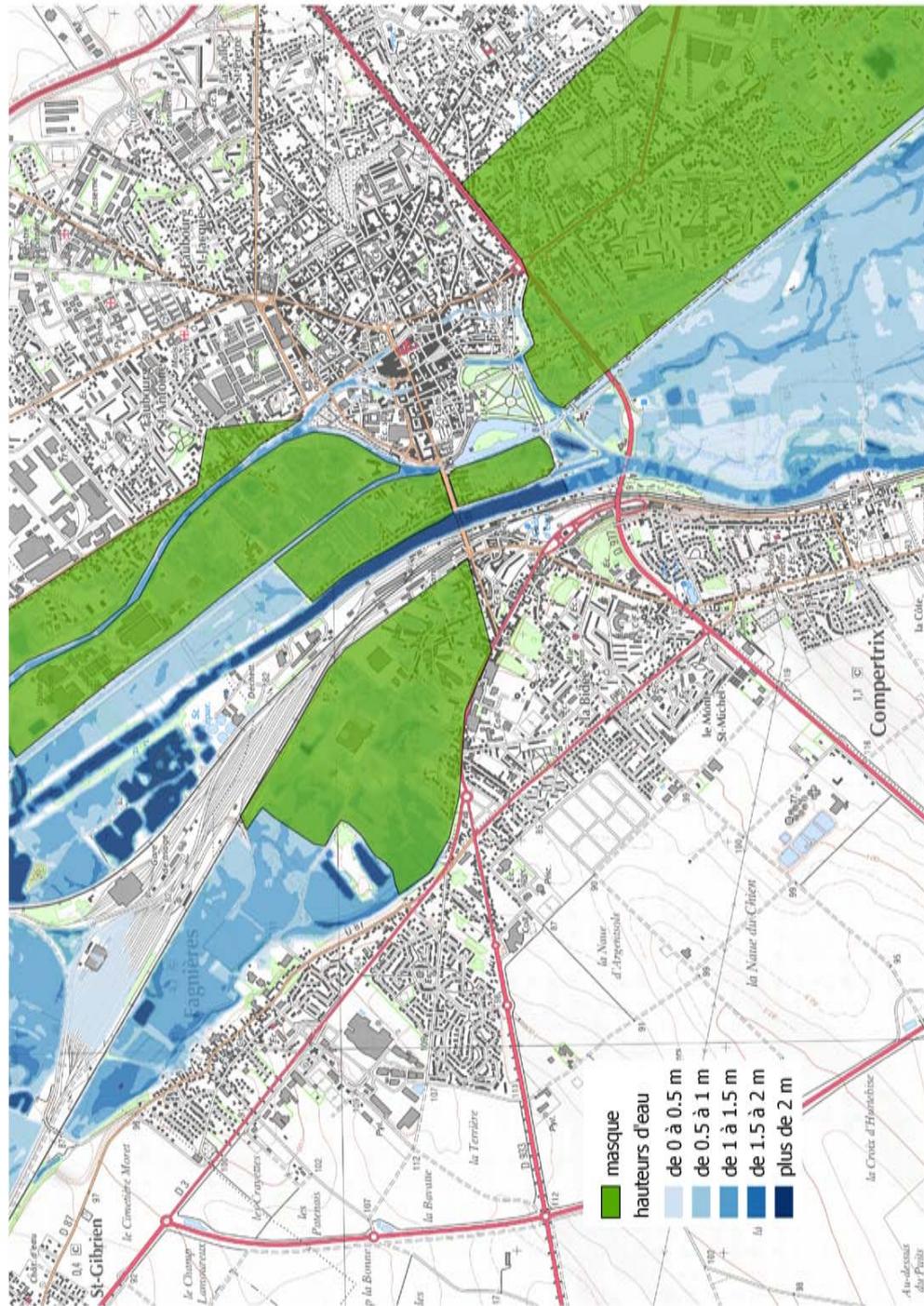


FIGURE 5.16 – Application du masque afin de tenir compte des digues.

# Annexe 3

```

/*****
/FICHER DE PARAMETRES ASSIMILATION MASCARET MAG
/*****
/
IMPRESSION DES LOIS HYDRAULIQUES = VRAI
/
IMPRESSION DES KS = VRAI
/
/FLAG CALAGE KS (VRAI) ou LOIS (FAUX)
FLAG CALAGE KS OU LOIS = FAUX
/
/TEMPS DE DEBUT DU CALAGE DES DEBITS ET KS PAR ASSIMILATION
TEMPS DE DEBUT DU CALAGE PAR ASSIMILATION = 406800
/
/TEMPS DE FIN DU CALAGE DES DEBITS ET KS PAR ASSIMILATION
TEMPS DE FIN DU CALAGE PAR ASSIMILATION = 428400
/
/*****
/CTL_LOI
/*****
/
/ FLAG DATA Z (VRAI) OU Q (FAUX) POUR CALAGE
FLAG DATA Z OU Q POUR CALAGE = FAUX
/
/DONNEES LOI 5 (3)
/
LOI 5 CALAGE = 'a'
LOI 5 STATIONS CALAGE = FAUX;VRAI;FAUX;VRAI;VRAI
LOI 5 VALEUR MIN = 4.
/
/DONNEES LOI 6 (3)
/
LOI 6 CALAGE = 'a'
LOI 6 STATIONS CALAGE = VRAI;VRAI;FAUX;VRAI;FAUX
LOI 6 VALEUR MIN = 2.
/
/DONNEES LOI 7 (3)
/
LOI 7 CALAGE = 'a'
LOI 7 STATIONS CALAGE = FAUX;VRAI;FAUX;VRAI;VRAI
LOI 7 VALEUR MIN = 2.
/
/DONNEES LOI 8 (3)

```

```

/
LOI 8 CALAGE = 'a'
LOI 8 STATIONS CALAGE = FAUX;VRAI;FAUX;VRAI;FAUX
LOI 8 VALEUR MIN = 2.
/
/DONNEES LOI 9 (3)
/
LOI 9 CALAGE = 'a'
LOI 9 STATIONS CALAGE = FAUX;FAUX;FAUX;VRAI;FAUX
LOI 9 VALEUR MIN = 2.
/
/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
/
/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
/
/SEUIL DE REJET DES OBS POUR LE CALAGE EN % DE LA VALEUR MODELE
SEUIL REJET MISFIT CALAGE = 100.
/
/*****
/CTL_KS
/*****
/
/FLAG DATA Z (VRAI) OU Q (FAUX) POUR CALAGE_KS
FLAG DATA Z OU Q POUR CALAGE_KS = VRAI
/
/NOMBRE DE ZONES DE KS A MODIFIER
NOMBRE DE ZONES DE KS A MODIFIER = 1
/
/NUMEROS DES ZONES DE KS A MODIFIER
NUMEROS DES ZONES DE KS A MODIFIER = 6.
/
/VALEURS MIN FROTTEMENT MINEUR POUR LES ZONES KS A MODIFIER
VALEUR MIN FROTTEMENT MINEUR = 10.

```

```

/
/VALEURS MAX FROTTEMENT MINEUR POUR LES ZONES KS A MODIFIER
VALEUR MAX FROTTEMENT MINEUR = 18.
/
/VALEURS MIN FROTTEMENT MAJEUR POUR LES ZONES KS A MODIFIER
VALEUR MIN FROTTEMENT MAJEUR = 6.
/
/VALEURS MAX FROTTEMENT MAJEUR POUR LES ZONES KS A MODIFIER
VALEUR MAX FROTTEMENT MAJEUR = 10.
/
/STATIONS POUR LE CALAGE SUR LA ZONE
ZONE 1 STATIONS CALAGE = FAUX ;FAUX ;VRAI ;FAUX ;FAUX
/
/MODIF KS m=mineur n=majeur
ZONE 1 CALAGE = 'mn'
/
/PERTURBATION DU PARAMETRE M KS (m3/s)
PERTURBATION DU PARAMETRE M KS = -3.
/
/PERTURBATION DU PARAMETRE N KS (m3/s)
PERTURBATION DU PARAMETRE N KS = -2.
/
/ECART TYPE DU PARAMETRE M KS (m3/s)
ECART TYPE DU PARAMETRE M KS = 3.
/
/ECART TYPE DU PARAMETRE N KS (m3/s)
ECART TYPE DU PARAMETRE N KS = 2.
/
/SEUIL DE REJET DES OBS POUR LE CALAGE KS EN % DE LA VALEUR MO-
DELE
SEUIL REJET MISFIT CALAGE KS = 100
/
/*****
/PARAMETRES DES STATIONS D'OBSERVATION
/*****
/
NOMBRE DE STATIONS DE MESURE = 5
BRANCHE DE LA STATION =
3;4;4;4;8
ABSCISSE DE LA STATION =
28044.0 ;73438.0 ;82063 ;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
/
/SEUIL DE REJET DES OBS POUR ASSIMILATION CALAGE ET KS PAR STA-
TION (min en mt)
SEUIL REJET OBSERVATIONS Z =
0. ;0. ;0. ;0. ;0.
/
/SEUIL DE REJET DES OBS DE DEBIT POUR CALAGE PAR STATION (min en
m3/s)
SEUIL REJET OBSERVATIONS Q =
2. ;2. ;2. ;2. ;2.
/
/ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION EN METRES
ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION DE HAUTEUR A LA STATION =
0.025 ;0.025 ;0.025 ;0.025 ;0.025
/
/ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION DE DEBIT EN M3/s
ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION DE DEBIT A LA STATION = 2. ;2. ;2. ;2. ;2.
/
/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 = 3600.0
/
/TAILLE DE LA FENETRE POUR LA MOYENNE GLISSANTE DU LISSAGE DES
OBS
TAILLE DE LA FENETRE POUR LE LISSAGE DES OBS = 3600.0
/
/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 = 3600
/
/CHEMIN SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE
CHEMIN SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE = './../DonneesStat'

```



# Annexe 4

```

/*****
/FICHER DE PARAMETRES ASSIMILATION MASCARET MM
/*****
/
IMPRESSION DES LOIS HYDRAULIQUES = VRAI
/
IMPRESSION DES KS = VRAI
/
/FLAG CALAGE KS (VRAI) ou LOIS (FAUX)
FLAG CALAGE KS OU LOIS = FAUX
/
/TEMPS DE DEBUT DU CALAGE DES DEBITS ET KS PAR ASSIMILATION
TEMPS DE DEBUT DU CALAGE PAR ASSIMILATION = 385200
/
/TEMPS DE FIN DU CALAGE DES DEBITS ET KS PAR ASSIMILATION
TEMPS DE FIN DU CALAGE PAR ASSIMILATION = 428400
/
/*****
/CTL_LOI
/*****
/
/ FLAG DATA Z (VRAI) OU Q (FAUX) POUR CALAGE
FLAG DATA Z OU Q POUR CALAGE = FAUX
/
/DONNEES LOI 3 (3)
/
LOI 3 CALAGE = 'a'
LOI 3 STATIONS CALAGE = FAUX;VRAI;FAUX
LOI 3 VALEUR MIN = 10.
/
/PERTURBATION DU PARAMETRE A POUR LOI DEBIT (adim)
PERTURBATION PARAMETRE A DEBIT = 1.05
/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
/
/ECART TYPE PARAMETRE A POUR LOI DEBIT (adim)
ECART TYPE PARAMETRE A DEBIT = 0.08
/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

```

```

/
/SEUIL DE REJET DES OBS POUR LE CALAGE EN % DE LA VALEUR MODELE
SEUIL REJET MISFIT CALAGE = 100.
/
/*****
/CTL_KS
/*****
/
/FLAG DATA Z (VRAI) OU Q (FAUX) POUR CALAGE_KS
FLAG DATA Z OU Q POUR CALAGE_KS = VRAI
/
/NOMBRE DE ZONES DE KS A MODIFIER
NOMBRE DE ZONES DE KS A MODIFIER = 4
/
/NUMEROS DES ZONES DE KS A MODIFIER
NUMEROS DES ZONES DE KS A MODIFIER = 2;3;4;7
/
/VALEURS MIN FROTTEMENT MINEUR POUR LES ZONES KS A MODIFIER
VALEUR MIN FROTTEMENT MINEUR = 25;21;22;35
/
/VALEURS MAX FROTTEMENT MINEUR POUR LES ZONES KS A MODIFIER
VALEUR MAX FROTTEMENT MINEUR = 35;31;32;45
/
/VALEURS MIN FROTTEMENT MAJEUR POUR LES ZONES KS A MODIFIER
VALEUR MIN FROTTEMENT MAJEUR = 8;7;7;10
/
/VALEURS MAX FROTTEMENT MAJEUR POUR LES ZONES KS A MODIFIER
VALEUR MAX FROTTEMENT MAJEUR = 18;17;17;20
/
/STATIONS POUR LE CALAGE SUR LA ZONE
/
/MODIF KS m=mineur n=majeur
/
ZONE 1 STATIONS CALAGE = FAUX;VRAI;FAUX
/
ZONE 1 CALAGE = 'mn'
/
ZONE 2 STATIONS CALAGE = VRAI;FAUX;FAUX
/
ZONE 2 CALAGE = 'mn'
/
ZONE 3 STATIONS CALAGE = FAUX;VRAI;FAUX
/

```

```

ZONE 3 CALAGE = 'mn'
/
ZONE 4 STATIONS CALAGE = FAUX;FAUX;VRAI
/
ZONE 4 CALAGE = 'mn'
/
/PERTURBATION DU PARAMETRE M KS (m3/s)
PERTURBATION DU PARAMETRE M KS = -2.
/
/PERTURBATION DU PARAMETRE N KS (m3/s)
PERTURBATION DU PARAMETRE N KS = -2.
/
/ECART TYPE DU PARAMETRE M KS (m3/s)
ECART TYPE DU PARAMETRE M KS = 3.
/
/ECART TYPE DU PARAMETRE N KS (m3/s)
ECART TYPE DU PARAMETRE N KS = 2.
/
/SEUIL DE REJET DES OBS POUR LE CALAGE KS EN % DE LA VALEUR MO-
DELE
SEUIL REJET MISFIT CALAGE KS = 100
/
/*****
/CTL_WATERLINE
/*****
/
/ECART TYPE ERREUR D'EBAUCHE AUX POINTS D'OBSERVATION EN METRES
ECART TYPE ERREUR D'EBAUCHE A LA STATION =
0.1;0.1;0.1
/
/LONGUEUR DE PORTEE DE L'ERREUR D'EBAUCHE POUR Z EN METRES
(AMONT)
LONGUEUR DE PORTEE AMONT POUR Z =
2000.0;2000;2000
/
/LONGUEUR DE PORTEE DE L'ERREUR D'EBAUCHE POUR Z EN METRES
(AVAL)
LONGUEUR DE PORTEE AVAL POUR Z =
5000.0;5000;5000
/
/LONGUEUR DE PORTEE DE L'ERREUR D'EBAUCHE POUR Q EN METRES
(AMONT)
LONGUEUR DE PORTEE AMONT POUR Q =

```

2000 ;2000 ;2000  
 /  
 /LONGUEUR DE PORTEE DE L'ERREUR D'EBAUCHE POUR Q EN METRES  
 (AVAL)  
 LONGUEUR DE PORTEE AVAL POUR Q =  
 5000.0 ;5000 ;5000  
 /  
 /COEFF A COURBE DE TARAGE  $Q=A*Z\hat{R}+B$   
 COEFF A COURBE DE TARAGE =  
 57.24 ;57.24 ;57.24  
 / /COEFF R COURBE DE TARAGE  $Q=A*Z\hat{R}+B$   
 COEFF R COURBE DE TARAGE =  
 1. ;1. ;1.  
 / /COEFF B COURBE DE TARAGE  $Q=A*Z\hat{R}+B$   
 COEFF B COURBE DE TARAGE =  
 -23.32 ;-23.32 ;-23.32  
 /  
 /\*\*\*\*\*  
 /PARAMETRES DES STATIONS D'OBSERVATION  
 /\*\*\*\*\*  
 /  
 NOMBRE DE STATIONS DE MESURE = 3  
 BRANCHE DE LA STATION =  
 2 ;2 ;2  
 ABSCISSE DE LA STATION =  
 24226.0 ;44386.0 ;92245.0  
 NOM DE LA STATION =  
 'Lachaussee' ;'Chalons' ;'Damery'  
 /DECALAGE DE L'ORIGINE DES OBSERVATIONS PAR RAPPORT A LA COTE  
 MARINE EN METRES  
 DECALAGE DE LA STATION =  
 86.72 ;77.52 ;63.66  
 /  
 /SEUIL DE REJET DES OBS POUR ASSIMILATION CALAGE ET KS PAR STA-  
 TION (min en mt)  
 SEUIL REJET OBSERVATIONS Z =  
 0.1 ;0.1 ;0.1  
 /  
 /SEUIL DE REJET DES OBS DE DEBIT POUR CALAGE PAR STATION (min en  
 m3/s)  
 SEUIL REJET OBSERVATIONS Q =  
 0.1 ;0.1 ;0.1  
 /

```
/ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION EN METRES
ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION DE HAUTEUR A LA STATION =
0.025 ;0.025 ;0.025
/
/ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION DE DEBIT EN M3/s
ECART TYPE ERREUR D'OBSERVATION DE DEBIT A LA STATION = 10. ;10. ;10.
/
/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 = 3600.0
/
/TAILLE DE LA FENETRE POUR LA MOYENNE GLISSANTE DU LISSAGE DES
OBS
TAILLE DE LA FENETRE POUR LE LISSAGE DES OBS = 3600.0
/
/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 = 3600
/
/CHEMIN SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE
CHEMIN SAUVEGARDE LIGNE D'EAU INITIALE = '../DonneesStat'
```

# Glossaire

- bassin versant : espace sur lequel tous les écoulements des eaux convergent vers un même point nommé exutoire du bassin versant. La limite physique de cet espace est la ligne de crêtes appelées aussi ligne de partage des eaux.
- bathymétrie : science de la mesure des profondeurs et des reliefs subaquatiques, elle correspond à la description topographique du fond de la rivière.
- courbe de tarage : courbe caractérisant la relation hauteur-débit d'une station hydrométrique, elle est composée de point de jaugeage.
- crue : élévation de la hauteur du niveau d'eau ou augmentation du débit moyen d'un cours d'eau.
- débâcle : rupture brusque d'un barrage de glace dans les régions nordiques.
- enjeu : personnes, biens et activités pouvant subir des dommages et des préjudices.
- étiage (période de plus basses eaux des rivières et des nappes souterraines)
- erreur : décalage reconnu ou constaté entre une affirmation (une prévision passée) et cette donnée vraie sans introduire de notion de doute. Au contraire, l'incertitude fait référence au doute. L'incertitude anticipe l'erreur et les erreurs connues permettent d'évaluer notre incertitude.
- hydrogramme : graphique représentant la variation des débits en fonction du temps.
- hydrométrie : ensemble des techniques de mesures de la hauteur d'eau et du débit d'un cours d'eau.
- incertitude : *cf* erreur.
- inondation : submersion temporaire, par l'eau, de terres qui ne sont pas submergées en temps normal.
- jaugeage : mesure instantanée du débit pour une hauteur d'eau lue à l'échelle.
- karst : structure géomorphologique résultant de l'érosion des roches calcaires qui engendre entre autres la formation de rivières souterraines, de pertes, de résurgences, de grottes et de gouffres.
- houle : mouvement ondulatoire de la surface de la mer provoqué par un vent éloigné de la surface d'observation.
- limnigramme : graphique représentant la variation de la hauteur d'eau en fonction du temps.
- lit majeur : lit maximum qu'occupe un cours d'eau dans lequel l'écoulement

ne s'effectue que temporairement lors du débordement des eaux hors lit mineur en période de très hautes eaux en particulier lors de la plus grande crue historique.

- lit mineur : partie du lit du cours d'eau comprise entre les berges franches ou bien marquées, dans laquelle l'intégralité de l'écoulement s'effectue en dehors des périodes de très hautes eaux et de crues débordantes.
- marée : variation du niveau de la mer due à l'effet conjugué des forces de gravitation de la lune et du soleil.
- risque naturel : conjonction d'un phénomène naturel nommé aléa et d'enjeux, c'est à dire l'existence de personnes, de biens et activités pouvant subir des dommages et des préjudices.
- surcote : différence positive entre le niveau marin observé et le niveau marin qui existerait en présence de la marée astronomique seule (lorsque cette différence est négative, on parle de décote) générée par la variation de la pression atmosphérique et du vent consécutive au passage d'une dépression météorologique.
- topographie : science de la mesure et de la représentation du relief.
- tsunamis (ou raz-de-marée) : vagues destructrices pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres provoquées par un tremblement de terre, un glissement de terrain sous-marin ou une explosion volcanique.
- marégramme : graphique représentant la variation de la marée en fonction du temps.
- modèle hydrologique : représentation simplifiée des processus du cycle hydrologique à l'exutoire d'un bassin versant aussi appelée modèle pluie-débit qui comprend la précipitation de pluie ou de neige sur les surfaces continentales et son acheminement vers les cours d'eau qui drainent à la fois les eaux de surface et souterraines.

# Liste des acronymes

- 1D : modèle hydraulique mono-dimensionnel.
- 2D : modèle hydraulique bi-dimensionnel.
- ADCP : Acoustic Doppler Current Profiler.
- ANTILOPE (produit météorologique) : ANalyse par spaTialisation hOraire des PrÉcipitations.
- AROME (modèle météorologique) : Application de la Recherche à l'Opérationnel à MésoÉchelle.
- ARPEGE (modèle météorologique) : Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle.
- BD ALTI : Base de Données ALTIométrique.
- BFG : Bundesanstalt Für Gwässerkunde.
- CEMAGREF : Centre d'Études du Machinisme Agricole et du Génie Rural des Eaux et Forêts.
- CEPMMT : Centre Européen de Prévision Météorologiques à Moyen Terme.
- CEREMA : Centre d'Études et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement.
- CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique.
- CETMEF : Centre d'Étude Technique Maritimes Et Fluviales.
- CNES : Centre National d'Études Spatiales.
- CNR : Compagnie Nationale du Rhône.
- CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique.
- CVH : Cellules de Veilles Hydrologiques.
- CWIPI : Coupling With Interpolation Parallel Interface.
- DAMP : Data Assimilation for Mascaret Prototype.
- DCE : Directive Cadre sur l'Eau.
- DDT : Direction Départementale des Territoires.
- DEAL : Direction de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement.
- DOM : Départements d'Outre-Mer.
- DREAL : Direction Régionale de l'Environnement de l'Aménagement et du Logement.
- DRIEE : Direction Régionale et Interdépartementale de l'Environnement et de l'Énergie.

- EA : Environment Agency.
- EAO : Expertise Assistée par Ordinateur.
- EDF : Électricité de France.
- EKF : Extended Kalman Filter.
- EnKF : Filtre de Kalman d'Ensemble.
- EFAS : European Flood Awareness System.
- EPS (modèle météorologique) : Ensemble Prediction System.
- EPTB : Établissement Public Territorial de Bassin.
- FK : Filtre de Kalman.
- GPS : Global Positioning System.
- GR (modèle hydrologique) : Génie Rural.
- GRP (modèle hydrologique) : Génie Rural pour la Prévision.
- GT : Groupe de Travail.
- HDR : Habilitation à Diriger des Recherches.
- HEC-HMS (modèle hydrologique) : Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System.
- IGN : Institut Géographique National.
- INRA : Institut National de Recherche Agronomique.
- IRSTEA : Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture.
- ISBA (modèle de surface) : Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère.
- JRC : Joint Research Center.
- KaRIN (radar altimétrique) : Ka-band Radar Interferometer.
- LIDAR : Light Detection And Ranging.
- LNHE : Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement.
- MAG (modèle hydraulique) : Marne Amont Global.
- MARINE (modèle hydrologique) : Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations pour des événements Extrêmes.
- MEDDE : Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie.
- MM (modèle hydraulique) : Marne Moyenne.
- MNSE : Modèle Numérique de Surface en Eau.
- MODCOU (modèle hydrologique) : MODèle hydrologique COUplé.
- NGF : Nivellement Général Français.
- ONERA : Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales.
- OTAMIN : OuTil Automatique d'estiMation de l'iNcertitude prédictive.
- PEARP (modèle météorologique) : Prévision d'Ensemble ARPege.
- PEAROME (modèle météorologique) : Prévision d'Ensemble AROME.
- PHyC : Plate-forme Hydro Centrale.
- PIREN Seine : Programme Interdisciplinaire de Recherche sur l'Environnement de la Seine.
- POM : Plate-forme Opérationnelle pour la Modélisation.
- R&D : Réseau et Distribution.

- RDI : Référent Départemental pour l'appui technique à la préparation et à la gestion des crises d'Inondation.
- RIC : Règlement de surveillance de prévision et de transmission de l'Information sur les Crues.
- RMSE : Root Mean Square Error.
- RR3 (produit météorologique) : cumul pluviométrique journalier prévu discrétisé au pas de temps tri-horaire.
- SAC : Service d'Annonce de Crues.
- SAFRAN (modèle météorologique) : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige.
- SAMA : Seine Amont Marne Amont.
- SAR : Synthetic Aperture Radar.
- SCHAPI : Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévention des Inondations.
- SDPC : Schéma Directeur de Prévision des Crues.
- SHOM : Service Hydrographique et Océanographique de la Marine.
- SHE (modèle hydrologique) : Système Hydrologique Européen.
- SHF : Société Hydrotechnique de France.
- SIG : Système d'information Géographique.
- SIM-PE (modèle hydrologique) : SAFRAN-ISBA-MODCOU Prévision d'Ensemble.
- SPC : Service de Prévision des Crues.
- SWOT : Surface Water and Ocean Topography.
- TOPMODEL (modèle hydrologique) : TOPography based hydrological MODEL.
- TRI : Territoires à Risques importants d'Inondations.
- TU : Temps Universel.
- NFFS : National Flood Forecasting System.
- UH : Unités d'Hydrométrie.
- VNF : Voies Navigables de France.



# Bibliographie

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E., and Rasmussen, J. (1986). An introduction to the european hydrological system SHE, 1 : History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. *Journal of Hydrology*, 87 :45–49.
- Andreadis, K., Biancamaria, S., and Ricci, S. (2013). Preparing for the assimilation of continental water surface elevation imagery from upcoming satellite mission. Hydrologic Data Assimilation for the SWOT mission meeting. *EOS American Geophysical Union*, pages –.
- Barthélémy, S. (2015). *Assimilation de données ensembliste et couplage de modèles hydrauliques 1D-2D pour la prévision des crues en temps réel. Application au réseau hydraulique "Adour Maritime"*. PhD thesis.
- Bates, P. D. and De Roo, P. J. (2000). A simple raster based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 236 :54–77.
- Bedient, P. B. and Hubert, W. C. (2002). *Hydrology and Floodplain Analysis*. Prentice-Hall Publishing.
- Berthet, L. (2010). *Prévision des crues à pas de temps fin : comment mieux assimiler l'information de débit dans un modèle pluie-débit*. PhD thesis, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.
- Berthet, L., Andreassian, V., Perrin, C., and Javelle, P. (2009). How crucial is it to account for the antecedent moisture conditions in flood forecasting? comparaison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 :819–831.
- Biancamaria, S., Durand, M., Andreadis, K. M., Bates, P. D., Boone, A., Mognard, N. M., Rodriguez, E., Alsdorf, D. E., Lettenmaier, D. P., and Clark, E. A. (2011). Assimilation of virtual wide swath altimetry to improve Artic river modeling. *Remote Sensing of Environment*, 115 :373–381.
- Bourgin, F. (2014). *Comment quantifier l'incertitude prédictive en modélisation hydrologique ? Travail exploratoire sur un grand échantillon de bassins versants*. PhD thesis, IRSTEA - AgroParisTech.

- Braud, I., Roux, H., Anquetin, S., Maubourguet, M. M., Manus, C., Viallet, P., and Dartus, D. (2010). The use of distributed hydrological models for the Gard 2002 flash flood event : Anaysis of associated hydrological processes. *Journal Of Hydrology*, 394 :162–181.
- Brunstein, D. (1999). *Un système d’Information Géographique pour l’analyse du continuum amont-aval et les changements d’échelle dans un système fluvial*. PhD thesis, Université de Paris I -Panthéon - Sorbonne.
- Buis, S., piacentini, A., and Déclat, D. (2006). PALM : a computational framework for assembling high-performance computing applications. *Concurrency and Computation*, 18 :231–245.
- Cohn, S. E. (1974). *An Introduction to Estimation Theory*.
- Cousteau, M., Regimbeau, F., Thirel, G., Habets, F., Janet, B., Martin, E., De Saint-Aubin, C., and Soubeyroux, J. M. (2015). Impact of improved meteorological forcing soil physics and data assimilation on an operationnal Hydrological Ensemble Forecast System over France. *Journal of hydrology*, 525 :781–792.
- Crawford, N. H. and Burges, S. J. (2004). History of the Stanford watershed model. *Water Ressources IMPACT*, 6 :3–5.
- Cunge, J. A. (1969). Au sujet d’une méthode de propagation de crue. *Journal of Hydraulics Research*, 7 :205–230.
- De Roo, A., Gouweleeuw, B., Bates, P. D., and Hollingsworth, A. (2003). Development of a European Flood Forecasting System. *International Journal of River Basin Management*, 1 :49–59.
- Duchaine, F., Jauré, S., Poitu, D., Quémarais, E., Staffelbach, G., Morel, T., and Gicquel, L. (2015). Analysis of high performance conjugate heat transfer with the openpalm coupler. *Journal of Computational Science and Discovery*, 8 :015003.
- Durand, M., Andreadis, K. M., Alsdorf, D. E., Lettenmaier, D. P., Moller, D., and Wilson, M. (2008). Estimation of bathymetric depth and slope from data assimilation of swath altimetry into a hydrodynamic model. *Geophysical Research Letters*, 35 :1–5.
- EDF-CETMEF (2011). Mascaret V7.1, Note de principe. Technical report, EDF-CETMEF.
- Evensen, G. (2007). *Data assimilation : the ensemble Kalman filter*. Springer.
- Flipo, N. (2005). *Modélisation intégrée des transferts d’azote dans les aquifères et les rivières : Application au bassin du Grand Morin*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Gelb, A. (1974). *Applied optimal estimation*. MIT press.

- Goutal, N. (2014). *Développements autour de la simulation des écoulements à surface libre en rivière. Équations de Saint-Venant - Couplage de modèles - Incertitudes - Application aux ondes de submersion*. PhD thesis.
- Goutal, N. and Morel, F. (2002). A finite volume solver for 1D shallow-water equations applied to an actual river. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 38 :1–19.
- Gouweleeuw, B., Thielen, J., Franchello, G., De Roo, A., and Buizza, R. (2005). Flood forecasting using medium-range probabilistic weather prediction. *Hydrological and Earth System Sciences*, 9 :365–380.
- Guha-Sapir, D., Vos, F., Below, R., and Ponserre, S. (2012). Annual disaster statistical review 2011 : the numbers and trends. Technical report, Centre for Research on the Epidemiology of Disaster.
- Habert, J., Ricci, S., Le Pape, E., Thual, O., Piacentini, A., Goutal, N., , Jonville, G., and Rochoux, M. (2015). Reduction of the uncertainties in the water level-discharge relation of a 1d hydraulic model in the context of operational flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 532 :52–64.
- Habert, J., Ricci, S., Piacentini, A., Jonville, G., Le Pape, E., Thual, O., Goutal, N., Zaoui, F., and Ata, R. (2013). Estimation of lateral inflows using data assimilation in the context of real-time flood forecasting for the Marne catchment in France. *Advances in Hydroinformatics - SIMHYDRO 2012*, pages 93–105.
- Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchistéguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Moigne, P. L., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana-Segui, P., Rousset-Regimbeau, F., and Viennot, P. (2008). The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research*, 113 :1–18.
- Hans, P. A. (2012). *De la prévision des crues à la prévision des inondations - Reflexion sur les méthodes et les outils pour la cartographie des zones inondables*. PhD thesis, Mastère spécialisé en hydraulique de l'ENSEEIH.
- Hervouet, J. M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows : modelling with the finite element method*. John Wiley & Sons.
- Hingray, B., Picouet, C., and Musy, A. (2009). *Hydrologie 2, Une science pour l'ingénieur*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Jean-Baptiste, N., Malaterre, P. O., Dorée, C., and Sau, J. (2011). Data assimilation for real-time estimation of hydraulic states and unmeasured perturbations in a 1D hydrodynamic model. *Mathematics and Computers in Simulation*, 81 :2201–2214.
- Kalman, R. E. (1960). *A new approach to linear filtering and prediction problems*.

- Knebl, M. R., Yang, Z. L., and Maidment, D. R. (2005). Regionnal scale flood modeling using nexrad rainfall, GIS and HEC-HMS/RAS. *Journal of Environmental Management*, 75 :325–336.
- Lai, X. and Monnier, J. (2009). Assimilation of spatially distributed water levels into a shallow-water model. Part 1 : Mathematical method and test case. *Journal of Hydrology*, 377 :1–11.
- Le Dimet, F. X. and Talagrand, O. (1986). *Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations : theoretical aspects*. Tellus A.
- Madsen, H. and Skotner, C. (2005). Adaptive state updating in real-time river flow forecasting - A combined filtering and error forecasting procedure. *Journal of Hydrology*, 308 :302–312.
- Malaterre, P. O. (1994). *Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation*. PhD thesis, LAAS-CNRS-ENGREF-CEMAGREF.
- Malaterre, P. O. (1998). Pilote : linear quadratic optimal controller for irrigation canals. *Journal of Irrigation and Drainage*, 124 :187–194.
- Matgen, P., Montinari, M., Hostache, R., Pfister, L., Hoffmann, L., Plaza, D., Pauwels, V. R. N., De Lannoy, G. J. M., Keyser, R., and Savenije, H. H. G. (2010). Towards the sequential assimilation of SAR-derived water stages into hydraulic models using the Particle Filter : Proof and concept. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14 :1773–1785.
- Maybeck, M., De Marsily, G., and Fustec, E. (1998). *La Seine en son bassin. Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé*. Elsevier.
- MEDDE (2011). Tableau des événements naturels dommageables survenus en France de 1900 à 2010. *prim.net*.
- Mirouze, I. (2010). *Régularisation de problèmes inverses à l'aide de l'équation de diffusion, avec application à l'assimilation variationnelle de données océaniques*. PhD thesis, Université de Toulouse.
- Mishra, S. K. and Singh, V. P. (2003). *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. Springer Netherlands.
- Neal, J. C., Atkinson, P. M., and Hutton, C. W. (2007). Floods inundation model updating using an ensemble Kalman filter and spatially distributed measurements. *Journal of Hydrology*, 336 :401–415.
- Pedinotti, V. (2013). *Préparation à la mission SWOT (Surface Water Ocean Topography) : Apport de l'altimétrie à large fauchée à la modélisation grande échelle des processus hydrologiques et hydrodynamiques en Afrique de l'Ouest*. PhD thesis, Université de Toulouse.

- Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V. (2007). Modèles hydrologiques du Génie Rural (GR). Technical report, CEMAGREF.
- Ricci, S. (2004). *Assimilation variationnelle océanique : modélisation multivariée de la matrice de covariance d'erreur d'ébauche*. PhD thesis, Université de Toulouse.
- Ricci, S., Piacentini, A., Thual, O., Le Pape, E., and Jonville, G. (2011). Correction of upstream flow and hydraulic state with data assimilation in the context of flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 :3555–3575.
- Rochoux, M. (2014). *Vers une meilleure prévision de la propagation d'incendies de forêt : évaluation de modèles et assimilation de données*. PhD thesis, Ecole Centrale Paris.
- Roux, H., Labat, D., Garambois, P. A., Maubourguet, M. M., Chorda, J., and Dartus, D. (2011). A physically-based parsimonious hydrological model for flash floods in mediteranean cathments. *Natural Hazards Earth System Sciences*, 11 :2567–2582.
- Sasaki, Y. (1958). An objective analysis based on the variational method. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 36 :77–88.
- Sasaki, Y., Gu, P., and Yan, L. (1955). A fundamental study of the numerical prediction based on the varaitional principle. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 33 :262–275.
- SCHAPI-SPC (2014). Guide méthodologique sur l'estimation des incertitudes de prévision des crues. Technical report, SCHAPI-SPC. <http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Portail:Wikhydro>, consulté le 22/06/15.
- Talagrand, O., Vautard, R., and Strauss, B. (1997). Evaluation of probabilistic prediction systems. In *Proc. ECMWF Workshop on Predictability*, pages 1–25.
- Tangara, M. (2005). *Nouvelle méthode de prévision de crue utilisant un modèle pluie-débit global*. PhD thesis, Ecole Pratique des Hautes Etudes de Paris.
- Thirel, G. (2009). *Amélioration des prévisions d'ensemble des débits sur la France de SAFRAN-ISBA-MODCOU*. PhD thesis, Université de Toulouse.
- Thirel, G., Martin, E., Mahfouf, E., Massart, J. F., Ricci, S., and Habets, F. (2010a). Short an medium range hydrological ensemble forecasts over France - Part 1 : Description and validation of the assimilation system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14 :1623–1637.
- Thirel, G., Martin, E., Mahfouf, E., Massart, J. F., Ricci, S., Regimbeau, F., and Habets, F. (2010b). Short an medium range hydrological ensemble forecasts over France - Part 2 : Impact on the ensemble streamflow forecasts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14 :1639–1653.

- Thompson, J. R., Sørensen, H. R., Gavin, H., and Refsgaard, A. (2004). Application of a coupled MIKE SHE/MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England. *Journal of Hydrology*, 293 :151–179.
- Thual, O. (2010). *Hydrodynamique de l'environnement*. École polytechnique.
- Todling, R. and Cohn, S. E. (1994). Suboptimal schemes for atmospheric data assimilation based on the kalman filter. *Monthly Weather Review*, 122 :2530–2557.
- USACE (1994). *Engeneering and Design - Flood-Runoff Analysis*. US Army Corp of Engineers.
- Van Der Knijff, J., Younis, J., and De Roo, A. (2010). Lisflood : a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, 24 :189–212.
- Vincendon, B., Dicrocq, V., Saulnier, G. M., Bouilloud, L., Chancibault, K., and ans J. Noilhan, F. H. (2010). Benefit of coupling the ISBA land surface model with a TOPMODEL hydrological model version dedicated to mediteranean flash floods. *Journal of Hydrology*, 394 :256–266.
- Warren, I. R. and Bach, H. (1992). MIKE 21 : a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. *Environmental Software*, 7 :229–240.
- Weerts, A. H., Winsemius, H. C., and Verkade, J. S. (2011). Estimation of predictive hydrological uncertainty using quantile regression from the National Flood Forecasting System (England and Wales). *Hydrology and Earth System Sciences*, 15 :255–265.
- Werner, M., Cranston, M., Harrison, T., Whitfield, D., and Schellekens, J. (2009). Recent developments in operational flood forecasting in England, Wales and Scotland. *Meteorological Applications*, 16 :13–22.
- WMO (2011). Manual on flood forecasting and warning. Technical report, World Meteorological Organization.
- Yoon, Y., Durand, M., Merry, C. J., Clark, E. A., Andreadis, K. M., and Alsdorf, D. E. (2012). Estimating river bathymetry from data assimilation of synthtic SWOT measurements. *Journal of Hydrology*, 464-465 :363–375.