



HAL
open science

Action 2 -Prévision des inondations HYDROM A1 : Courbes de tarage dynamiques -Influence de la marée

F. Mendez-Rios, Benjamin Renard, Jérôme Le Coz, Terraz Théophile

► To cite this version:

F. Mendez-Rios, Benjamin Renard, Jérôme Le Coz, Terraz Théophile. Action 2 -Prévision des inondations HYDROM A1 : Courbes de tarage dynamiques -Influence de la marée. INRAE. 2022. hal-04359881

HAL Id: hal-04359881

<https://hal.inrae.fr/hal-04359881>

Submitted on 21 Dec 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Programme MTECT (DGPR/SRNH) – INRAE 2022

Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique et de la cohésion des territoires par décision de subvention n°2103680778.



Action 2 - Prévision des inondations

HYDROM A1 : Courbes de tarage dynamiques - Influence de la marée

Auteur : Felipe MENDEZ-RIOS (INRAE, décembre 2022)



Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Synthèse.....	1
3. Stations hydrométriques influencées par la marée : cas de la Seine aval.....	2
3.1. Etat des lieux.....	2
3.2. Transposition du modèle 1D de la Seine aval de Mascaret vers MAGE	3
3.3. Etude comparative entre modèles hydrodynamiques 1D	4
3.4. Influence du coefficient de Strickler.....	5
3.5. Comparaisons sur des campagnes de jaugeage.....	7
3.5.1. Campagne de jaugeage du 06 avril 2017.....	7
3.5.2. Campagne de jaugeage du 26 septembre 2016.....	9
3.5.3. Campagne de jaugeage du 01 octobre 2016.....	11
3.5.4. Comparaison des limnigrammes des autres stations.....	12
3.6. Conclusions de l'étude comparative	14
4. Couplage MAGE-BaM.....	15
4.3. Cas simplifié (premier essai de calage).....	17
4.3.1. Nombre des simulations 1 000	17
4.3.2. Nombre des simulations 10 000	17
4.4. Cas Seine aval configuration MAGE	18
4.5. Cas Seine aval configuration Mascaret.....	19
5. Perspectives pour l'estimation bayésienne d'un modèle hydrodynamique 1D en contexte de marée.....	21
6. Références.....	22
7. Annexes.....	22
7.1. Transposition du modèle Mascaret vers Mage.....	22
7.1.1. Géométrie (.ST/.geo).....	22
7.1.2. Conditions limites amont et aval (. HYD, .LIM /.loi).....	24
7.1.3. Rugosité (. RUG /.cas).....	24
7.1.4. Conditions initiales (. INI /.lig).....	25
7.1.5. Paramétrage du modèle (.lis).....	25
7.1.6. Résultats du modèle (.opt).....	25
7.2. Comparaison des modèles Mage et Mascaret	25
7.2.1. Modèle de la Seine aval sur MAGE	25
7.2.2. Campagnes de jaugeages à disposition.....	26
7.2.3. Analyse des hauteurs d'eau	27
Marégraphe	28
Mascaret.....	28
Mage.....	29
7.2.4. Analyse du débit	30
Mascaret.....	31
Mage.....	32
7.2.5. Analyse de la vitesse	32
Mascaret.....	34
Mage.....	35
7.2.6. Analyse du rayon hydraulique	35
Mascaret.....	36



Mage.....	36
7.3. Implémentation d'un nouveau modèle 'MAGE' sous <i>BaM</i>	37
7.3.1. Contrôleur général (Config_BaM.txt).....	37
7.3.2. Contrôle des actions que <i>BaM</i> doit exécuter (Config_RunOptions.txt).....	37
7.3.3. Configuration du couplage MAGE- <i>BaM</i> (Config_setup.txt et fichiers MAGE).....	38
7.3.4. Configuration du modèle (Config_Model.txt).....	38
7.3.5. Configuration de l'inférence (Config_Data.txt et Config_RemnantSigma.txt).....	39
7.3.6. Configuration des simulations MCMC (Config_MCMC.txt et Config_Cooking.txt).....	41
7.3.7. Analyse des simulations MCMC (Config_Summary.txt et Config_Residuals.txt).....	41

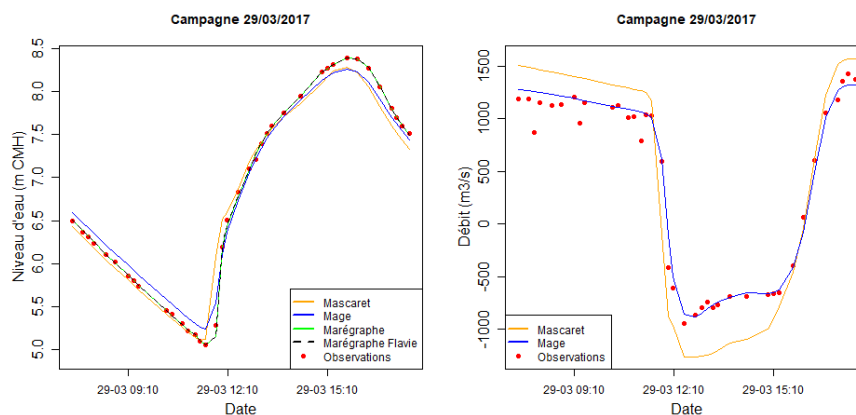
1. Introduction

Ce document a pour but de présenter de manière synthétique puis plus détaillée les principaux développements réalisés en 2022 concernant l'action A1 HYDROM de la convention entre le SCHAPI et INRAE. Le but de l'action est de développer des outils opérationnels et des méthodes pour améliorer la gestion et l'estimation de la mesure des débits via des courbes de tarage variables dans le temps (dites « dynamiques ») et de quantifier les incertitudes associées. Ce rapport traite des avancées méthodologiques concernant le cas de stations hydrométriques influencées par la marée. Les objectifs majeurs de cette année 2022 sont de terminer l'étude sur le couplage d'un modèle hydrodynamique 1D (ici avec le code MAGE, mais la méthode s'appliquerait à tout autre code de simulation équivalent comme Mascaret) et *BaM* (*Bayesian Modeling*) afin de pouvoir tirer parti de l'estimation bayésienne du modèle via la méthode de Monte-Carlo par chaînes de Markov (*MCMC*). Le couplage avec *BaM* permettra également d'utiliser non seulement des hauteurs d'eau, mais aussi des débits pour estimer les paramètres de MAGE.

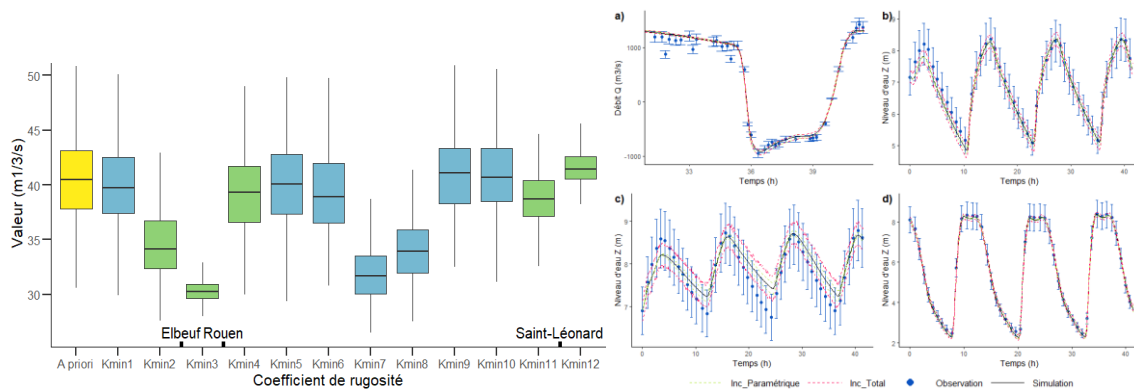
2. Synthèse

En ce qui concerne les stations hydrométriques influencées par la marée, il est possible de scinder en deux parties. La première porte sur la justification de l'approche modélisation 1D avec un cas d'étude, notamment la Seine-aval pour l'estimation de hauteur d'eau et de débit. La deuxième partie consiste dans l'implémentation du calage bayésien d'un modèle 1D afin d'évaluer la faisabilité de l'intégration sur le framework *BaM* ! :

1. Simulation hydrodynamique 1D pour l'estimation et prédiction de hauteur d'eau et de débit.
 - MAGE est un code hydrodynamique 1D qui résout les équations de Saint-Venant. L'équipe présente une expertise sur son utilisation ce qui est un atout à ce stade, car on est encore dans une étape préliminaire d'exploration et de faisabilité. (Collaborations : INRAE centre Lyon-Grenoble-Auvergne-Rhône-Alpes, contacts : Jérôme Le Coz, Théophile Terraz, INRAE centre Provence-Alpes-Côte d'Azur, contacts : Benjamin Renard).
 - Modèle de la Seine aval disponible sous Mascaret 1D. Transfert vers MAGE et comparaison au passage de la performance de la simulation de hauteur d'eau et de débit (collaborations : DREAL Normandie, contacts : Stéphane Piney, Marie Morin, et Université de Rouen, , Flavie Druine et Julien Deloffre).



2. Implémentation du calage bayésien d'un modèle 1D.
 - Estimation automatique des coefficients de résistance hydraulique via *BaM* tout au long de la zone d'étude. Vérification de la faisabilité et piste d'optimisation et tests futurs.



3. Conclusions principales:

- Confirmation de la capacité de BaM à accueillir n'importe quel code hydrodynamique 1D. Les deux modèles 1D (même géométrie et mêmes paramètres, seuls les codes de calcul – Mascaret et MAGE - différent) donnent des bons résultats en termes de niveaux d'eau sur la station de contrôle (Rouen).

- La dynamique des débits est mal représentée par Mascaret alors qu'elle est bien reproduite par MAGE. En effet, les débits sont souvent mal modélisés sur toute le cycle de marée. La cause n'est pas explorée à ce stade, mais elle ne peut venir que de différences de résolution numérique.
- Le transfert du modèle Seine aval du code Mascaret vers le code MAGE a permis d'identifier une diminution du temps de calcul qui est intéressante en vue de l'utilisation d'une méthode *MCMC*.
- Faisabilité de l'estimation des coefficients de Strickler en régime fluvio-maritime (transitoire) pour les modèles hydrodynamiques 1D.
- Confirmation de l'importance de l'intégration de jaugeages pour le calage du modèle afin d'assurer de bien reproduire la dynamique de la hauteur d'eau et du débit
- L'application comme « courbe de tarage » n'est pas évidente, car en régime fluvial (subcritique), il faut spécifier les débits en conditions amont (donc disposer de stations hydrométriques en amont). Toutefois, l'application reste utile pour la prévision des débits et des niveaux (inondations) dans les secteurs à influence maritime.
- La nouveauté de l'étude est d'un côté la facilité du calage automatique non seulement en hauteur, mais aussi en débit avec incertitudes de mesure prises en compte. Dans un autre côté, l'approche fournit des prédictions/prévision avec incertitudes.

4. Perspectives :

- Prévision d'un plan d'expérience pour les tests à mener pour l'évaluation de la performance en prenant en compte toujours de réponse à des questionnements précises.
- Mettre l'accent sur l'application sur la Seine aval dans un premier temps. A terme, mise en pratique sur d'autres cas d'étude avec des modèles 1D opérationnels déjà réunis comme la Nive (SPC Adour-Garonne, réseau complexe avec casiers hydrauliques), l'Aulne (SPC Côtiers bretons, présence de déversoirs) ou le Rhône à Beaucaire (CNR/INRAE, influence maritime plus faible, fortes incertitudes en basses eaux, débordement en lit moyen).
- Communications soumises pour les conférences 2023 *European Geosciences Union (EGU)* et *Prévision - Société Hydrotechnique de France (SHF)*.
- Elaboration d'un article sur la Seine aval qui sert à présenter et valider les développements méthodologiques réalisés.

3. Stations hydrométriques influencées par la marée : cas de la Seine aval

3.1. Etat des lieux

Au fil des dernières années, différents modèles de courbes de tarages ont été proposées, validées et testées sur plusieurs stations influencées par la marée comme le cas de la Saïgon, au Vietnam et le cas de la Seine. Certains modèles sont déjà intégrés dans l'outil *BaM*. Etant donné que les stations mentionnées précédemment ont des régimes transitoires différents, notamment avec des variations progressives sur la Saïgon et des variations plutôt brutales sur la Seine, un seul

modèle n'était pas suffisant pour englober ces cas particuliers. C'est pourquoi l'objectif principal de l'année 2022 était d'évaluer la performance d'une approche basée sur les modèles hydrodynamiques 1D.

L'idée est d'utiliser des modèles hydrodynamiques 1D (type Mascaret, MAGE) pour comparer leurs résultats aux mesures du marégraphe et des campagnes des jaugeages effectués afin de pouvoir conclure sur leurs performances pour traiter ces types de cas. Cette approche sera appliquée aux données de la Seine aval qui dispose d'un modèle hydrodynamique calé sur Mascaret 1D (partenariat avec la DREAL Normandie et l'Université de Rouen). C'est pour cela que la première partie de l'étude se concentre sur le transfert du modèle Mascaret vers Mage (modèle hydrodynamique 1D d'INRAE), poursuivi d'une étude comparative afin d'évaluer la performance des deux modèles en termes non seulement des hauteurs d'eau, mais également de débit.

Ensuite, l'idée est d'intégrer non seulement l'information des jaugeages, mais aussi l'enregistrement du niveau d'eau. Toutefois, ce n'est pas une bonne approche de mettre la totalité de l'information de la ligne d'eau, car il faut aussi valoriser l'information des jaugeages et c'est pourquoi le marégraphe à rendre sera dégradé (en enlevant des mesures).

A terme, l'objectif est de pouvoir donner le marégraphe et les campagnes de jaugeages à chaque station dont l'information est disponible pour nourrir l'étape de calage et pouvoir viser l'étape suivante, la prédiction.

3.2. Transposition du modèle 1D de la Seine aval de Mascaret vers MAGE

Le modèle hydrodynamique 1D de la Seine Aval a été réalisé sous Mascaret (code EDF). Il nous a été fourni par Stéphane PINEY et Marie MORIN (DREAL Normandie). La zone comprise pour l'analyse démarre à Poses (dernière station influencée par la marée) qui se repère à l'aval d'un barrage et elle finit à Tancarville après avoir parcouru environ 138 km. Le site d'étude ne présente pas d'ouvrage sur le secteur Poses – Tancarville et il n'existe qu'un seul affluent significatif qui déverse sur la branche principale de la Seine, il s'agit de l'Eure (Figure 1).



Figure 1. La Seine aval

Il faut remarquer que les données nécessaires pour faire tourner le modèle Mascaret sont disponibles pour la période du 01/01/2015 au 01/01/2021. Le temps de calcul était long pour une telle période et les fichiers résultats sont très lourds, donc le modèle ne sera appliqué qu'autour des périodes où des campagnes de jaugeages sont disponibles.

Afin de transposer le modèle vers Mage, il faut certains fichiers affichés dans le tableau ci-dessous:

Mage	Mascaret	Description	Astuce adoptée
.ST	.geo	Géométrie des biefs à analyser. Les profils peuvent être mis en type XYZ, AC, LC, R, T et RT	Routine R pour transférer les données d'un format à l'autre
.HYD	.loi	Condition limite intermédiaire ou à l'amont : hydrogramme	
.LIM		Condition limite à l'aval : limnigramme	
.RUG	.cas	Paramétrage du modèle. Il est possible d'extraire les valeurs du coefficient de Strickler (Ks)	Lecture du fichier et mettre à la main directe sur Mage
.INI	.lig	Condition initiale de la ligne d'eau (pas besoin de fournir s'il n'existe pas)	
	.lis*	Paramétrage du modèle. Il est possible de trouver le paramétrage global et temporel.	Lecture du fichier pour compréhension du paramétrage du modèle
	.opt*	Résultats après simulation	-

* Les fichiers ne sont pas importés pour lancer Mage, ils servent à comprendre ce qui fait le modèle

Tableau 1. Fichiers à importer

Les détails plus précis se trouvent dans les Annexes.

3.3. Etude comparative entre modèles hydrodynamiques 1D

Etant donné que l'analyse se réduit en première instance à une campagne de jaugeages, l'exportation des données de toutes les sources (marégraphes, Mage, Mascaret) est limitée à l'échelle temporelle où le jaugeage a été réalisé. En d'autres termes, la période à étudier est réduite autour du 29 mars 2017. De même, l'étude sera répandue aux autres quatre campagnes de jaugeages dont les données sont disponibles. Ensuite, une analyse de la ligne d'eau sera réalisée afin de comparer le comportement diffusif du flux pour en tirer des conclusions intéressantes. Il faut remarquer que la modélisation sur Mascaret, pour cette campagne, commence depuis 28 mars 2017 à 00 :10 :00, ce qui sert à établir aussi le jour de démarrage du calcul sur Mage.

L'étude comparative est divisée en quatre branches principales, l'analyse de la cote, du débit, de la vitesse et du rayon hydraulique (RH), présentées en Annexe, afin de réaliser une évaluation intégrale des simulations.

La Figure 2 illustre le comportement de l'hydrogramme et le limnigramme quand la marée arrive au point de mesure. La première ligne montre la magnitude et la direction de l'écoulement (débit positifs et négatifs quand le courant remonte). Ensuite, le graphique des cotes de la ligne d'eau par rapport au temps qui nous permet de mieux visualiser l'effet de la marée sur nos mesures. Le troisième graphique identifie le rapport entre les cotes. Il faut remarquer que le graphique affiche une montée soudaine quand la marée atteint la station. Le dernier graphique indique lorsque la marée passe.

En résumé, l'analyse se base sur la station hydrométrique de Rouen, car elle dispose non seulement des campagnes de jaugeages, mais aussi d'enregistrement de hauteur d'eau et l'analyse s'effectue sur différentes non seulement variables (hauteur, débit), mais aussi campagne de jaugeages

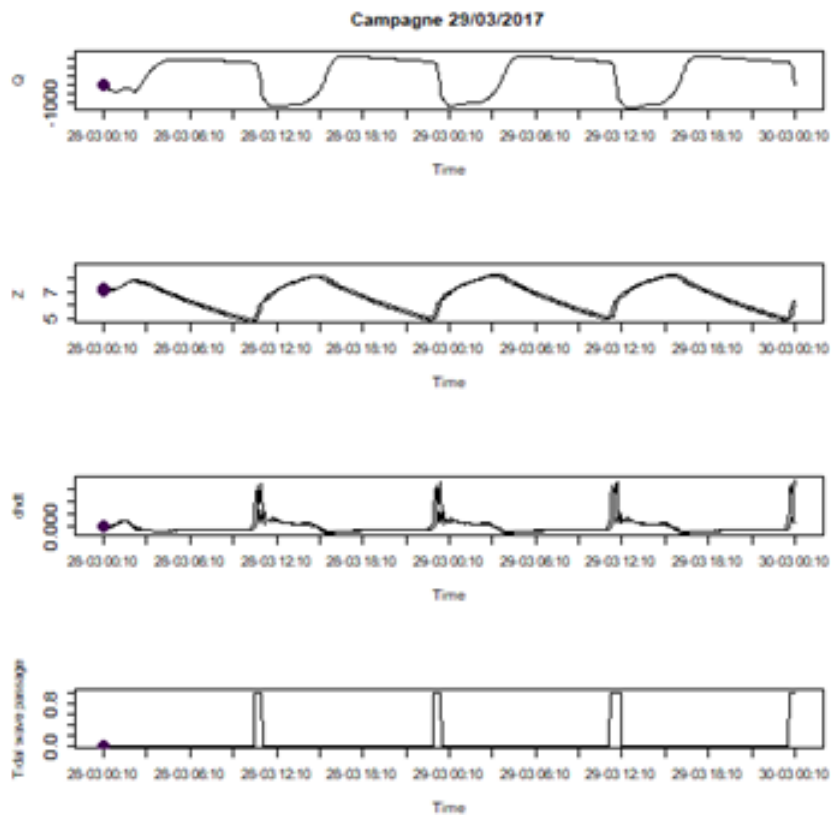


Figure 2. Comportement de l'hydrogramme et du limnigramme quand la marée passe par la station de mesure

3.4. Influence du coefficient de Strickler

L'objectif de cette partie est d'établir une valeur définie du coefficient de Strickler (K_s) sur toute la branche étudiée et d'en tirer des conclusions par rapport à l'impact du changement du frottement.

Le premier scénario à tester est un K_s fixe tout au long de la zone d'étude. Effectivement, c'est toujours une bonne idée de commencer avec un cas simple afin d'analyser son comportement et en tirer des conclusions. D'ailleurs, la valeur du coefficient est relativement élevée puisqu'il s'agit d'une rivière naturelle sinusoïdal qui coule en lit mineur et prenant comme base les valeurs proposées sur Mascaret, donc un K_s homogène de 40 semble plutôt cohérent.

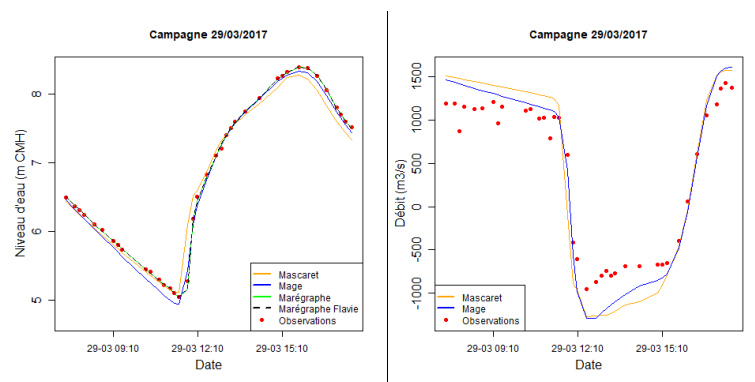


Figure 3. Limnigramme et hydrogramme pour un K_s de 40

En ce qui concerne les variables directement récupérées au moment de réaliser le jaugeage, nous constatons qu'en hauteur, même si la performance des simulations a diminué, elles restent toujours très près des jaugeages. En revanche, nous constatons un décalage important en débit. Effectivement, il semble que Mage a plutôt la même tendance que Mascaret, autrement dit, le modèle n'est pas bien calé parce qu'il a tendance de surestimer le débit.

Afin d'approfondir plus sur la distribution des erreurs, une analyse d'erreur absolue et relative est mise en place comme les

cas précédents. Toutefois, l'analyse comparative ne sera plus effectuée par rapport aux résultats de Mascaret sinon les simulations de la configuration de Mascaret sur Mage.

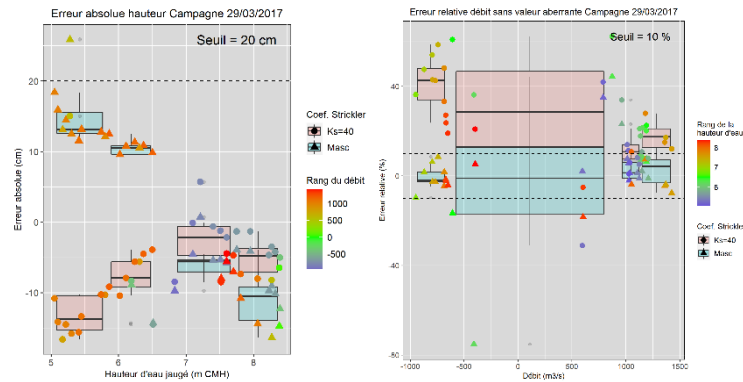


Figure 4. Erreur absolue en hauteur et erreur relative en débit pour un Ks de 40

Dans le cas d'un Ks homogène, il se trouve que le modèle a tendance à surestimer la valeur de hauteur sur toutes les gammes. Les écarts tendent à se réduire à mesure que la hauteur est plus grande. Par contre, pour les hauteurs supérieures à 7.5 mètres, la médiane de l'erreur commence à s'éloigner de l'écart nul. Nous constatons aussi que l'erreur la plus grande est atteinte quand les débits positifs diminuent vers zéro (hauteur faible).

En revanche, une amélioration marquée est mise en évidence au moment où le flux coule vers l'amont (débit négatif). En effet, sur cette période du temps, il est possible de trouver les écarts les plus proches à zéro. Ceci pour dire qu'il est très bien calé quand l'écoulement circule dans cette direction.

En comparaison avec les résultats des simulations issues de la configuration de Mascaret, nous constatons une amélioration dans le calage surtout à hauteurs d'eau élevées. Par contre, il semble que l'erreur à hauteurs faibles reste constant en valeur absolue, car d'un côté, si le Ks suit la configuration de Mascaret, les simulations ont tendance à surestimer la hauteur tandis que le cas en analyse tend à sous-estimer. Il faut aussi remarquer que si le Ks est homogène, les distributions des boîtes à moustaches baisse leur précision, mais elles accroissent en exactitude. En conclusion, même s'il y a des changements entre les deux configurations, les simulations sont à l'intérieur des intervalles de tolérance ce qui nous permet de conclure qu'avec un Ks homogène de 40, le modèle est calé en hauteur.

Par rapport au débit, un décalage important est mis en évidence sur toutes les gammes de débits. Effectivement, la nouvelle configuration tend à surestimer le débit systématiquement. Le comportement de l'hydrogramme est similaire à celui de Mascaret comme il peut être apprécié sur la Figure 3. La question pertinente à se poser est quelles sont les raisons pour lesquelles, même si le modèle est calé en hauteur, le débit simulé est écarté des débits attendus ?

Finalement, l'analyse est aussi effectuée pour la vitesse et le rayon hydraulique, ces variables sont intrinsèques d'une mesure sauf que nous ne les récupérons pas explicitement. Les mêmes conclusions trouvées en débit et en hauteur coïncident par rapport à celles du débit et hauteur d'eau, respectivement. Ce qui est un indicateur qui sert à s'assurer de la cohérence des données, car les variables sont directement corrélées.

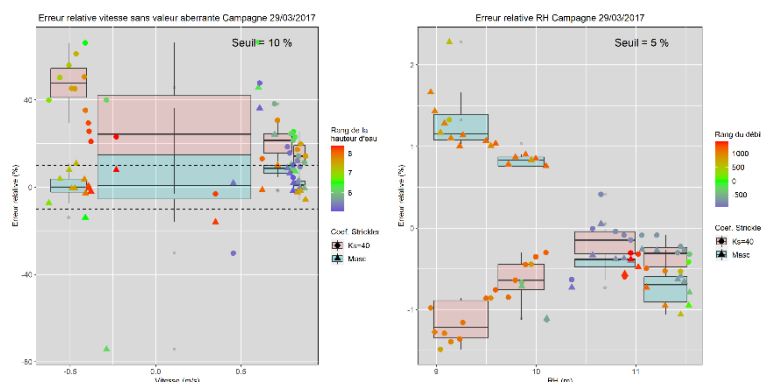


Figure 5. Erreur relative de la vitesse et du RH pour un Ks de 40

En vitesse, nous constatons qu'avec un K_s homogène, les simulations ont tendance à surestimer sur toutes les gammes. Ce qui est possible qu'il existe la même erreur que Mascaret. Il est possible que l'onde de diffusion sur la zone d'étude perturbe les conditions du flux en faisant que même si le modèle est calé en hauteur, elle a des problèmes pour bien reproduire les débits jaugés.

En terme de RH, une amélioration des écarts est manifestée surtout à valeurs élevées de RH. En revanche, à RH faibles la médiane de l'erreur reste identique sauf qu'une surestime tandis que l'autre sous-estime. De toute façon, les écarts ne sont pas très différents à l'écart nul, ce qui indique que les deux configurations sont très bien calées.

En définitive, si le modèle a un K_s de 40 sur toute la zone d'étude, le modèle sera bien calé en hauteur et RH, mais il ne sera pas bien calé ni en débit, ni en vitesse.

3.5. Comparaisons sur des campagnes de jaugeage

3.5.1. Campagne de jaugeage du 06 avril 2017

L'objectif de cette rubrique est de comparer les résultats obtenus entre les deux modèles en comparant les données simulées contre la campagne de jaugeage du 06 avril 2017 afin d'évaluer la performance à long terme de Mascaret et Mage après avoir donné quelques jours de *warm up*.

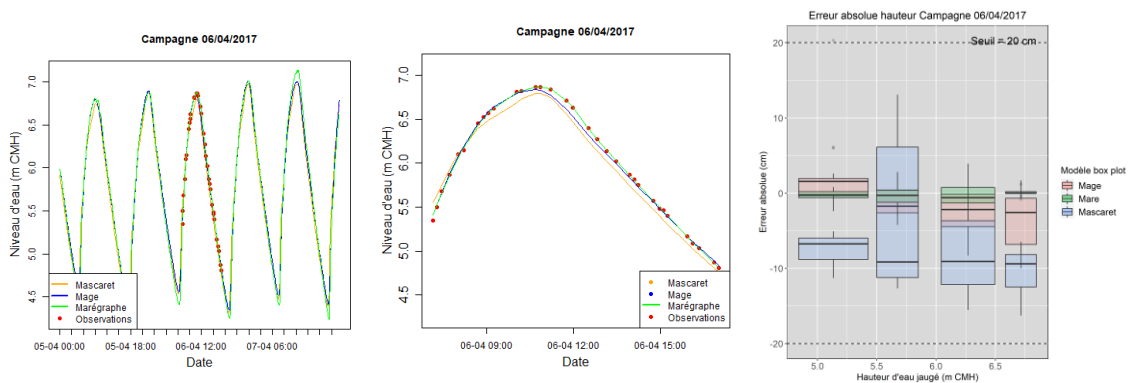


Figure 6. Limnigramme (gauche), en faisant un zoom sur les jaugeages (milieu) et le calcul de l'erreur absolue

D'après les résultats, nous constatons que toutes les sources d'information (marégraphe et modèles) sont bien calées en hauteur. Pourtant, Mage continue à fournir des cotes plus proches de celles jaugées. En revanche, Mascaret a tendance à sous-estimer les hauteurs sur toutes les gammes. De même, la dispersion et l'exactitude des données simulées sont très performantes sur Mage sauf pour la dernière gamme, tandis que dans Mascaret, les données ont tendances à être dispersées et inexactes.

En somme, grâce à l'intervalle de tolérance affectée à l'analyse, il est possible de conclure que les deux modèles sont toujours bien calés en hauteur, en faisant ressortir une meilleure performance du modèle Mage.

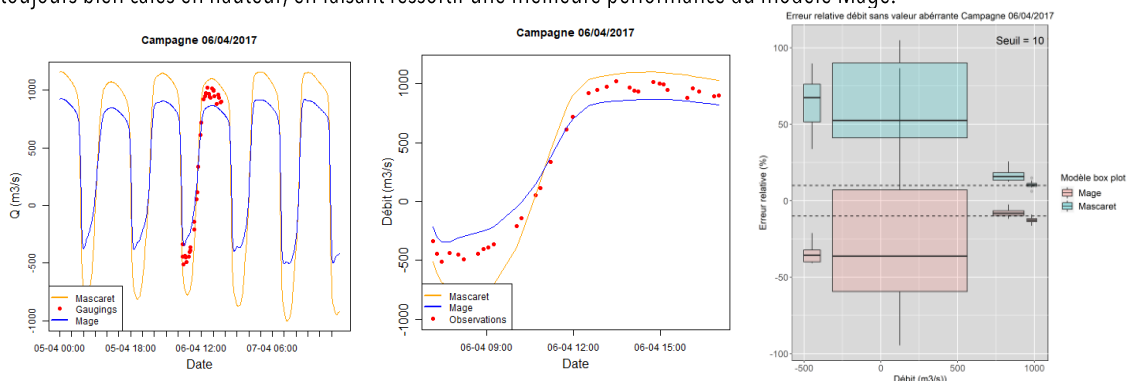


Figure 7. Hydrogramme (gauche), en faisant un zoom sur les jaugeages (milieu) et le calcul de l'erreur relative

Contrairement aux performants résultats en hauteur, il semble que les modèles ont plus de problèmes pour bien reproduire le débit. Le premier graphique de la Figure 7 illustre l'hydrogramme de Mascaret et Mage pendant environ trois jours. Nous constatons qu'il existe un écart important surtout aux pics des débits (maximum valeurs du débit en valeur absolue). Au moment de comparer avec les jaugeages, il semble que Mage a tendance de sous-estimer le débit sur toutes les gammes tandis que Mascaret surestime. Il faut aussi dire que les deux modèles représentent mieux les données à fort débit. En effet, les résultats de Mage de la troisième gamme de débit restent à l'intérieur de l'intervalle de confiance tandis que ceux de Mascaret ne sont pas très loin d'être acceptés. En revanche, quand il s'agit de l'analyse du groupe des débits maximums, les simulations de Mascaret sont plus performantes que celle de Mage, même si aucune de deux est acceptée.

Il est constaté qu'aucun de deux modèles est capable de bien représenter le phénomène où l'écoulement coule vers l'amont. Effectivement, la médiane de Mage et Mascaret s'élève à environ 40 % et 70 %, respectivement. Ce qui est inacceptable puisque l'intervalle de confiance est établi à 10 %. Ensuite, la deuxième gamme n'est pas très interprétable à cause de la dispersion des données qui sont le résultat de diviser par le débit nul.

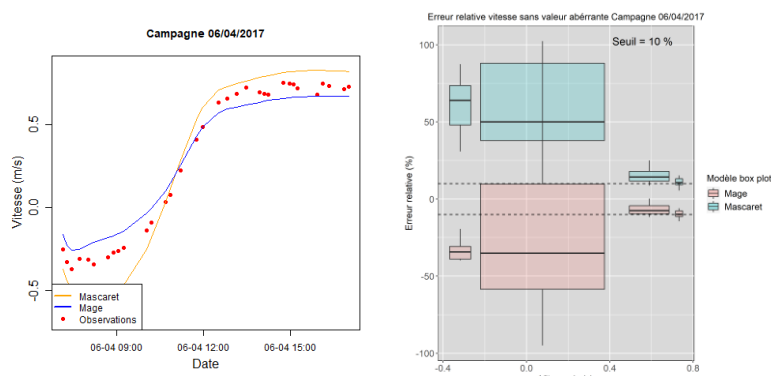


Figure 8. Graphique de la vitesse en faisant un zoom sur les jaugeages (gauche) et calcul de l'erreur relative

En somme, aucun de deux modèles est bien calé en débit, sauf le troisième groupe des débits où Mage arrive à bien représenter les données. Néanmoins, il est remarquable la difficulté des modèles pour comprendre le phénomène de la marée.

Comme nous avons vu précédemment, la vitesse et le débit sont des variables corrélées. C'est ainsi que les distributions des boîtes à moustaches sont très similaires à

celles montrées en débit. Il est valable de conclure que l'analyse se ressemble à celle du débit.

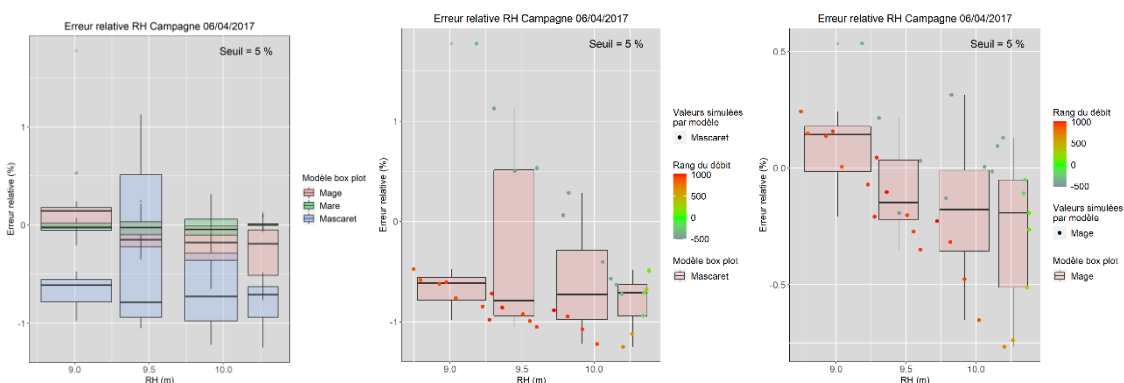


Figure 9. Calcul de l'erreur relative du RH (gauche), en faisant un zoom sur les simulations de Mascaret (milieu) et celle de Mage (droite)

Le RH nous permet d'identifier que dans la plupart du temps, les modèles sous-estiment la valeur réelle. Néanmoins, ça n'impact pas les résultats, car même s'ils s'éloignent de l'écart nul, c'est négligeable.

Afin d'étudier l'impact d'un Ks homogène à long terme, il est proposé de nouveau étudier le cas où dans toute la zone d'étude le coefficient de rugosité s'élève à 40.

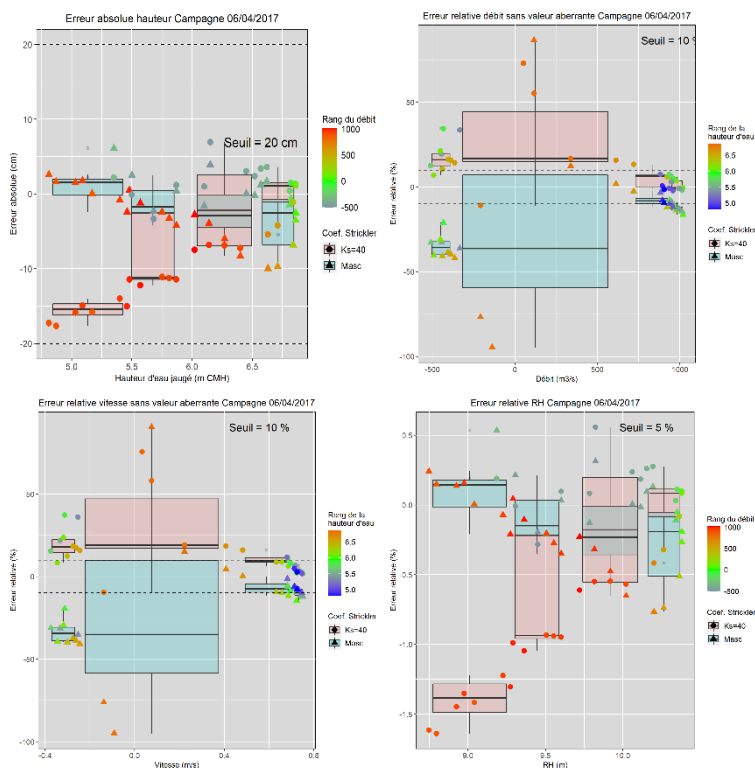


Figure 10. Calcul de l'erreur pour toutes les variables en comparant les configurations du Ks

importante est très marquée en comparaison aux données simulées avec la configuration de Mascaret.

Enfin, quand la hauteur d'eau arrive au groupe des valeurs les plus hautes, une amélioration des résultats est manifestée puisque la médiane des écarts est plus proche de l'écart nul que l'autre configuration.

En terme de vitesse et débit, une amélioration substantielle se trouve sur les résultats. Il est mis en évidence une réduction notable sur les écarts entre l'ancienne configuration et l'actuelle, ce qui indique une hausse de la performance du modèle. A fort débits positifs, un Ks homogène semble une bonne solution afin de reproduire les débits observés. En revanche, même si à fort débit négatif, l'écart dépasse le seuil d'acceptation, il y a eu une diminution de la différence trouvée avec la configuration de Mascaret.

En conclusion, malgré que le modèle ait perdu de la qualité des résultats en hauteur, sa performance en débit a accru considérablement. C'est pour cela qu'il existe l'intérêt de faire un calage automatique via BaM pour trouver la solution optimale en fonction distributions a priori fournies à l'algorithme pour qu'il discerne la meilleure configuration qui sert à caler non seulement en hauteur, mais aussi en débit notre modèle.

3.5.2. Campagne de jaugeage du 26 septembre 2016

Puisque les données de la campagne de jaugeage en 2016 existent, il est aussi intéressant croiser l'information prélevée sur ces deux périodes de temps. A savoir, les campagnes réalisées en septembre et octobre. En premier lieu, l'analyse est effectuée pour la campagne de septembre. Afin de conserver le format suivi tout au long de l'étude, il est présenté les résultats des différentes variables évaluées sans entrer trop en détail pour que l'étude reste dans l'étape préliminaire.

D'un côté, nous apercevons qu'en hauteur et RH, les deux modèles sont très bien calés. Il faut noter que Mage a tendance à surestimer légèrement les hauteurs sauf à hauteurs élevées. En revanche, Mascaret tend à sous-estimer tous les résultats. Néanmoins, la différence est négligeable.

La Figure 10 permet de nous rendre compte de l'impact, l'influence et l'importance du coefficient de Strickler. Si l'étude se concentre à la hauteur d'eau, il se trouve que le modèle est plutôt bien calé dans le sens que les simulations restent à l'intérieur de l'intervalle de tolérance de 20 cm. Portant, si nous comparons la performance de l'écart entre la configuration proposée par Mascaret et celle du Ks homogène, il est possible de conclure que la qualité des données produites a fortement baissé. Ceci est aussi le cas pour l'étude du rayon hydraulique. Effectivement, il est possible d'identifier qu'à hauteurs faibles d'eau, l'écart passe d'être près de l'écart nul à 15 cm approximativement.

Ensuite, au fur et à mesure que les cotes d'eau augmentent, l'écart dans la nouvelle configuration a tendance à s'approcher à zéro. Néanmoins, la dispersion est de plus en plus

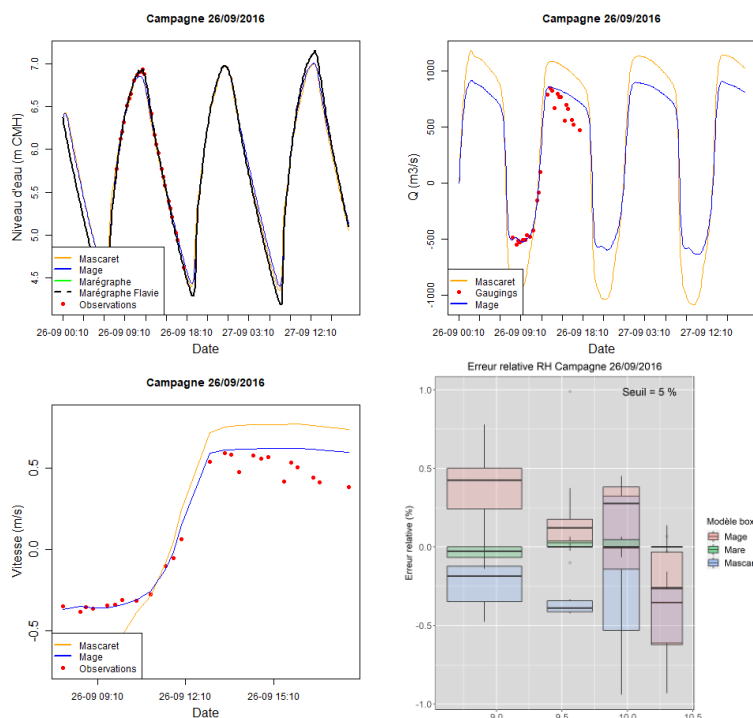


Figure 11. Simulations des modèles de chaque variable de la campagne de septembre 2016

toute la zone d'étude, il est proposé une analyse comparative des écarts entre les deux configurations. Un Ks de 40 est établi sur toute la rivière et les résultats s'affichent sur la Figure 12.

Même si le Ks reste constante, nous constatons qu'en hauteur et RH, les écarts sont négligeables puisque les résultats restent très similaires aux valeurs attendues. Pourtant, il faut remarquer que le modèle a baissé non seulement en précision, mais aussi en exactitude. Par conséquent, à partir d'un point de vue rigoureux, la performance a diminué en fixant un Ks homogène.

En ce qui concerne le débit et la vitesse, il est mis en évidence que les écarts sont de plus en plus importants sur toutes les gammes. Le même phénomène arrive sur Mascarot sauf que la différence entre les deux cas repose sur la configuration. En d'autres termes, sur mascarot, il y a un ensemble de Ks qui varie en fonction du PK. Contrairement au dernier cas simulé où le Ks reste invariable sur tous les transepts.

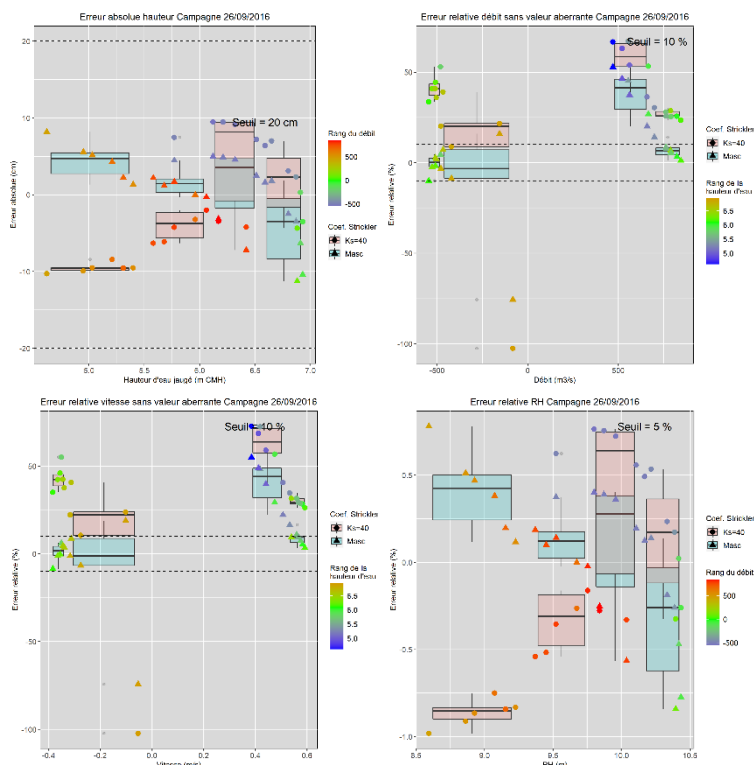


Figure 12. Comparaison entre les configurations de la campagne de septembre 2016

D'un autre côté, les graphiques de débit et de vitesse simulés entre les deux modèles ne ressemblent pas. En effet, Mascarot a une forte tendance à surestimer les pics de l'hydrogramme. Par contre, Mage le fait plutôt bien sauf quand il s'agit de la chute du débit qui passe aux valeurs négatives. Dans ce cas-là, aucun de deux modèles est très fiable, car ils tendent à surestimer le débit et la vitesse.

En conclusion, il est remarquable la performance de Mage non seulement pour la reproduction du comportement en hauteur, mais également en débit. En ce qui concerne Mascarot, il est possible de conclure qu'il est de nouveau bien calé en hauteur, mais ne pas en débit.

Afin d'évaluer sur cette campagne le cas où le Ks devient homogène sur toute la zone d'étude, il est proposé une analyse comparative des écarts entre les deux configurations. Un Ks de 40 est établi sur toute la rivière et les résultats s'affichent sur la Figure 12.

3.5.3. Campagne de jaugeage du 01 octobre 2016

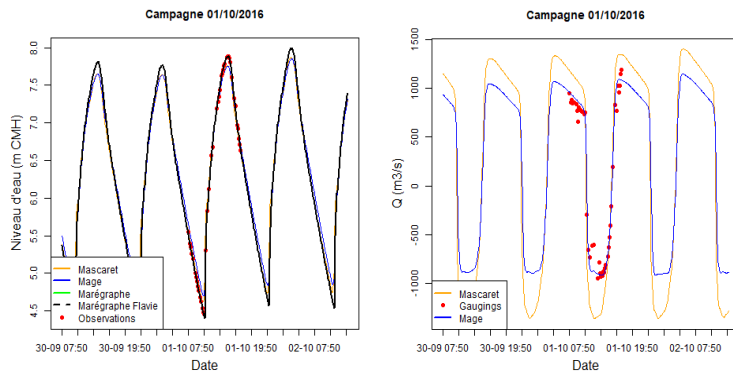


Figure 13. Simulations des modèles du débit et de la hauteur d'eau de la campagne d'octobre 2016

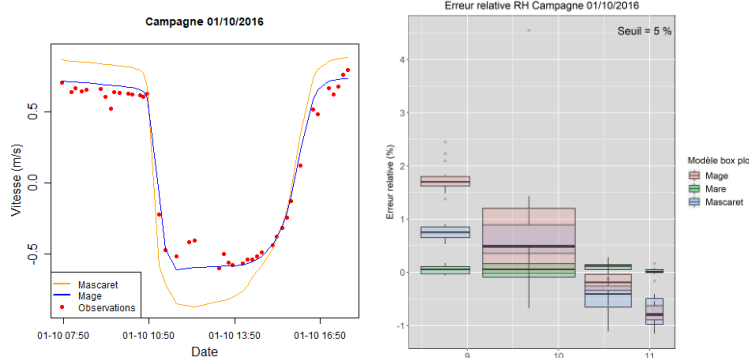


Figure 14. Simulations des modèles de la vitesse et du RH de la campagne d'octobre 2016

différences sont plus prononcées. Les simulations issues de Mage sont très cohérentes en comparaison aux jaugeages. Pour Mascaret, il surestime systématiquement sur toutes les gammes. Ce modèle a des problèmes pour s'adapter à la marée dans le sens que même s'il réussit à détecter la vague et changer de débit positif à négatif, les simulations manifestent qu'il y a carrément une chute du débit très marquée et le résultat du débit simulé est assez inexacte surtout à fort débit.

En définitive, le modèle Mage est plus performante non seulement à court terme, mais également à long terme pour reproduire les valeurs de hauteur et de débit. Contrairement à Mascaret qui est seulement calé en hauteur, mais ne pas en débit.

Maintenant, afin d'évaluer la qualité des simulations à différentes valeurs de Ks, il a été établi un Ks de 40. La Figure 15 illustre la comparaison entre la configuration proposée par Mascaret et

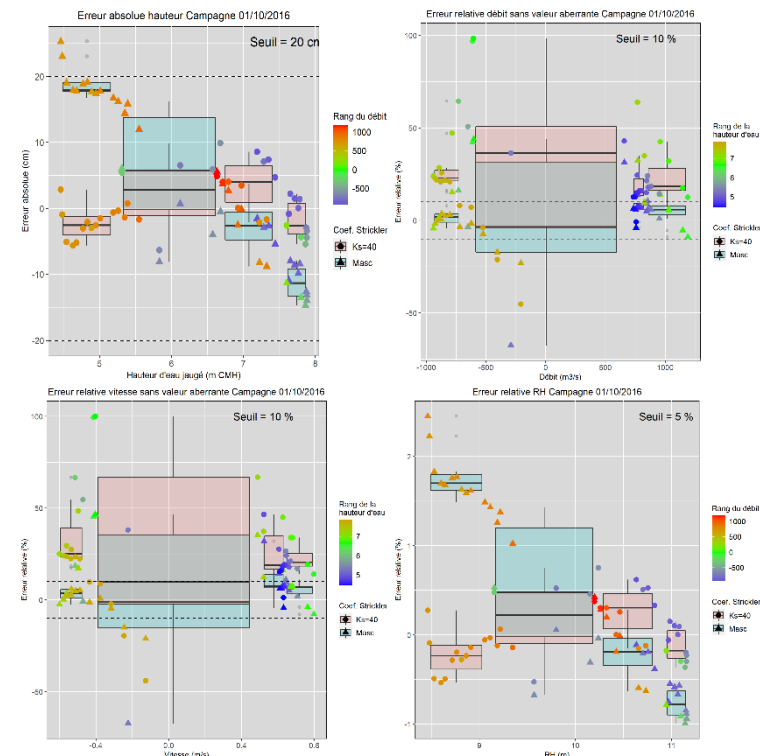


Figure 15. Comparaison entre les configurations de la campagne d'octobre 2016

En 2016 il y a eu une autre campagne de jaugeage en octobre, c'est pour cela que l'information fournie en cette période nous servira à croiser les simulations et de mesurer leur qualité à long terme, car le modèle aura de temps pour dissiper les conditionnes initiales et commencer à s'adapter plutôt aux conditionnes limites.

D'après la Figure 13 et la Figure 14, il semble que les deux modèles sont bien calés en hauteur et rayon hydraulique alors qu'en débit et vitesse, Mage est mieux calé que Mascaret surtout au moment de reproduire le changement du débit positif à négatif et vice versa.

En traitant d'abord l'analyse de hauteur d'eau, il est mis en évidence que Mage a tendance de surestimer les hauteurs faibles et de sous-estimer les hauteurs élevées. Il faut remarquer que l'écart n'est pas assez grand pour que les résultats soient rejetés. De même, Mascaret a un comportement à peu près similaire. Par rapport au débit, les

le cas proposé précédemment.

Il est possible de mettre en évidence une amélioration notable sur le calage en hauteur et RH. En effet, la plupart des médianes des erreurs sont plus près de zéro. Ce qui sert comme indicateur d'une augmentation dans l'exactitude des simulations en comparaison à la configuration proposée par Mascaret.

Contrairement à ce qui est arrivé au calage en hauteur, la performance des simulations de débit et de vitesse est assez réduite quand le Ks est stable. Effectivement, en première instance, le modèle représente bien les données jaugées sur toutes les gammes et puis, si le Ks est constante, les simulations sont assez écartées à l'information prélevée à la campagne.

3.5.4. Comparaison des limnigrammes des autres stations

Afin d'étudier la performance des simulations, il est aussi proposé d'analyser le calage entre les marégraphes de certaines stations par rapport aux hauteurs de la ligne d'eau simulées des modèles. Pour ce faire, il a été analysé tout le début et le final de la simulation pour évaluer les CI et le comportement après avoir donné du temps au modèle pour qu'il soit capable de dissiper l'effet de ces conditionnes. Le Tableau 2 illustre les stations à étudier :

Marégraphe	PK rapport	PK modèle
Elbeuf	16816	16823
Rouen	42464	41568
Heurteauville	96808	97091
Saint-Léonard	130340	130623

Tableau 2. Marégraphes à croiser avec les résultats de la simulation

La première station à analyser sera Elbeuf repérée tout au début de la zone d'étude. Cette station se trouve à l'amont de Rouen qui a été la station utilisée pour le calage des modèles. Ceci est important afin d'évaluer si le calage des modèles pour savoir si les modèles sont capables de reproduire les données non seulement à l'aval de la station de contrôle (Rouen), mais aussi à l'amont.

Il faut remarquer qu'en 2016, la période analysée est comprise entre le 26 septembre jusqu'au 02 octobre alors qu'en 2017, l'étude est réalisée à partir du 28 mars jusqu'au 07 mai.

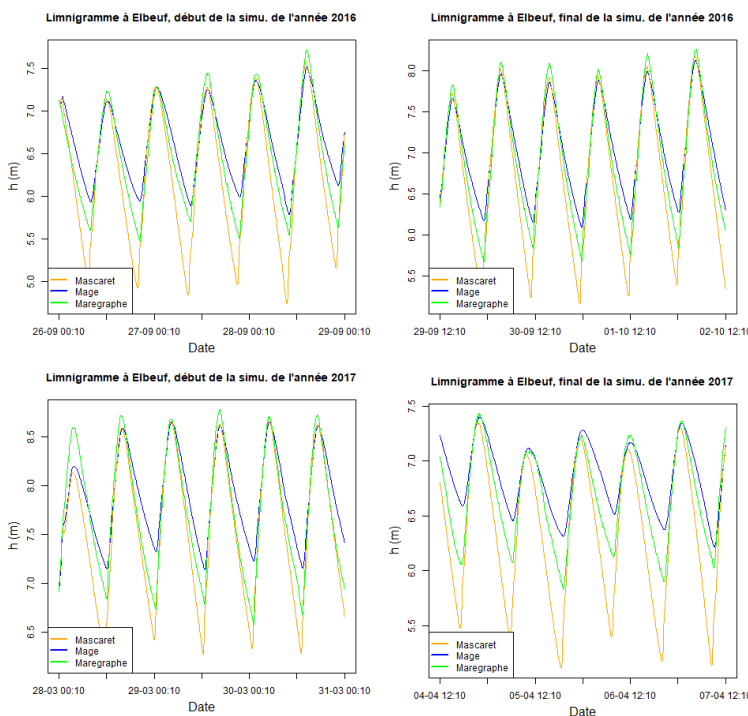


Figure 16. Comparaison des limnigrammes à Elbeuf

réduction des écarts au fur et à mesure que le temps passe en 2016. A la fin de la période d'étude, il semble que Mage

D'après la Figure 16, il est possible de conclure que les deux modèles ont des problèmes pour reproduire l'effet de la marée à l'amont de la station de contrôle. En effet, il semble que Mascaret a tendance de sous-estimer les valeurs des hauteurs d'eau sur toute la période d'étude. Ce qui indique que le modèle évacue un débit trop fort depuis le début de la zone d'étude, ce qui pourrait être la raison pour laquelle à Rouen, les valeurs de débits sont écartées par rapport aux jaugeages et marégraphes. Le même comportement se trouve en 2016 et 2017.

En revanche, Mage a tendance de surestimer systématiquement les hauteurs enregistrées dans les marégraphes. Mage a des problèmes pour bien reproduire la descente de la hauteur. Néanmoins, l'écart est moins considérable que celui de Mascaret et il est aussi possible de remarquer une

reproduit bien les hauteurs enregistrées. Par contre, en 2017 Mage a plus de problèmes pour son calage en hauteur. En conclusion, aucun de modèles sont bien calés à l'amont de la station de contrôle. L'analyse passe à Heurteauville et à Saint-Léonard qui se localisent à l'amont de Rouen comme la Figure 17 illustre :

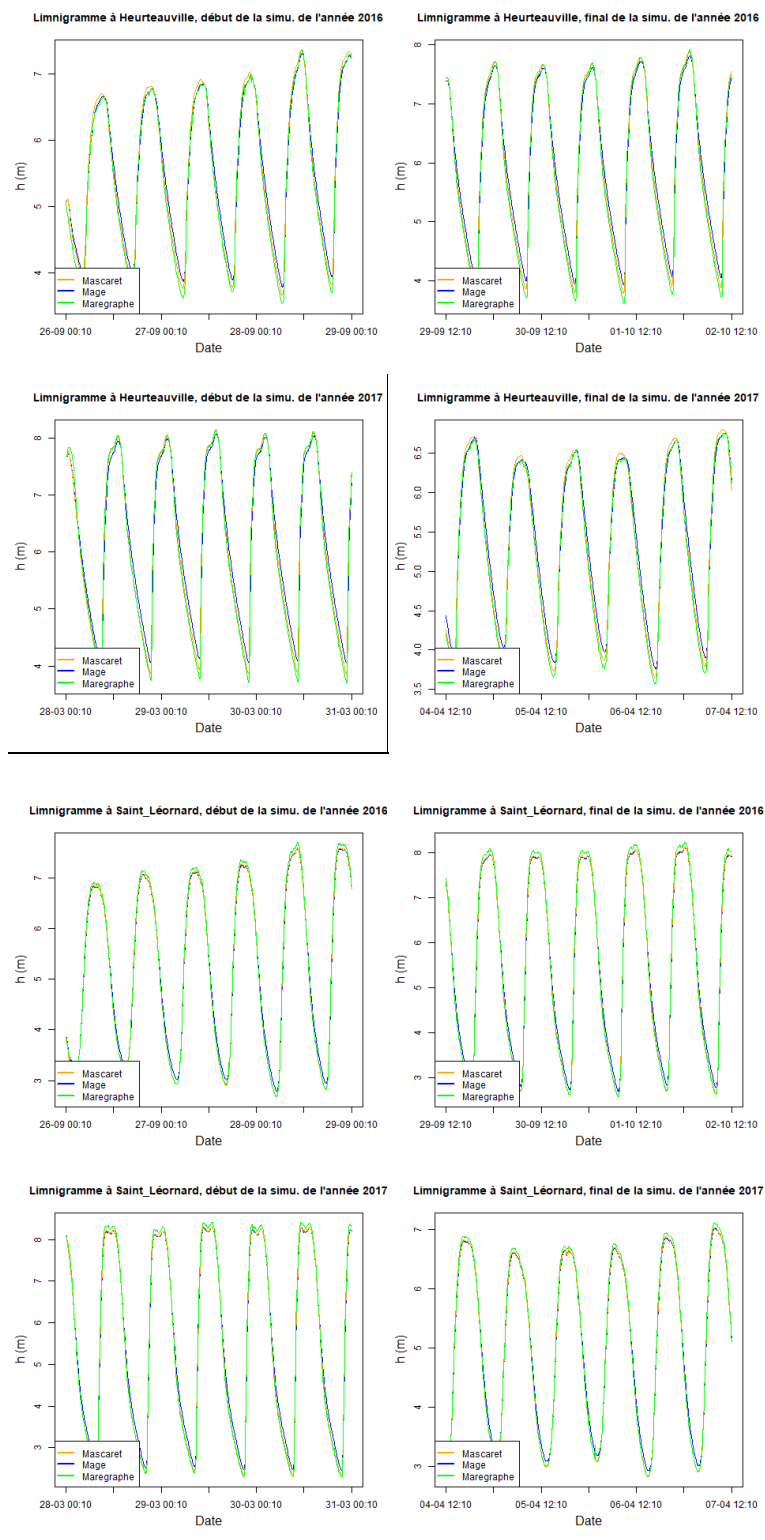


Figure 17. Marégraphes et limnigrammes simulés à Heurteauville et Saint Léonard

D'après la comparaison entre les marégraphes et les limnigrammes simulées, il est possible de conclure que les deux modèles sont bien calés en hauteur pour les stations à l'aval de la station de contrôle.

3.6. Conclusions de l'étude comparative

Une fois réalisées toutes les analyses, on conclut que Mascaret est bien calé en hauteur, ce qui indique aussi un bon calage sur le rayon hydraulique. En revanche, le modèle n'est pas du tout calé ni en débit, ni en vitesse. En prenant en compte la même configuration des conditions limites et des coefficients de Strickler, nous constatons que Mage reproduit bien toutes les variables en étude. Avec l'objectif d'analyser une possible simplification du modèle, il a été proposé un changement des paramètres, notamment le coefficient de rugosité. Quand la distribution du K_s est homogénéisé à 40 sur toute la zone d'étude, le modèle ne rend pas des résultats performants.

Pour mieux cerner les résultats, une analyse inter-campagnes sur une même année semble pertinente. En termes de hauteur d'eau, étant donné que la première campagne a été réalisée aux premiers jours de la simulation, il est possible de réfléchir que les CI peuvent affecter la qualité des simulations. Malgré que cette hypothèse soit totalement valable, le modèle a pris quelques heures, voir jours pour se réchauffer et dissiper l'impact des CI. Pour certaines personnes, il peut sembler très peu de données à mettre au modèle pour qu'il soit capable d'empêcher que les CI jouent un rôle important. Toutefois, il semblerait que les CI sont bien représentatives en hauteur, ce qui nous permet de pouvoir comparer les résultats contre les jaugeages, car le modèle n'aura pas besoin de beaucoup de temps pour comprendre le phénomène dont nous cherchons.

C'est pour cela que la configuration de mascaret semble plus cohérente qu'un K_s homogène sur certains cas, sur d'autres, la performance n'est pas assez différente. Par contre, quand nous nous concentrons sur la deuxième campagne de l'année, nous trouvons une amélioration du calage en hauteur quand le K_s est constant. Cela pourrait être expliqué grâce au temps de *warm up* qui fait que le modèle s'adapte mieux au comportement réel.

En termes de débit, tout au début de la simulation issue de Mage avec la configuration de Mascaret, même si la plupart des gammes de débits restent à l'intérieur de l'intervalle de tolérance, certains groupes posaient des problèmes d'exactitude. Néanmoins, à long terme, les écarts commencent à baisser de sorte que la médiane de l'erreur relative de toutes les gammes analysées soient inférieures à 10 %. Ce qui est un indicateur de la nécessité et l'importance de laisser le modèle se chauffer avant de lancer l'analyse. Effectivement, dans ce cas-là, les CI du débit ne sont pas très fiables (zéros partout), mais qui est aussi raisonnable dû à la difficulté de récupérer cette donnée dans un instant « t » défini. C'est pour cela qu'une amélioration de la qualité des données est mise en évidence après avoir laissé quelques jours pour que le modèle englobe et comprend l'effet de la marée.

Cette analyse est valable pour le cas de 2016, en revanche, le cas de 2017 est plutôt différent parce que même s'il y a eu une légère amélioration de la qualité des données simulées en hauteur (qui n'est pas très claire), il y a été trouvé un abaissement de la précision et exactitude des simulations de débit. Ceci indique que les CI non seulement en hauteur, mais aussi en débit en 2017 représentaient mieux le comportement réel à cette instante. Par contre, il semblerait que l'erreur en débit pourrait être expliquée par l'incertitude des conditions limites fournies au modèle. De même, ce qui est aussi important de remarquer est l'amélioration de la qualité des débits simulés quand le K_s est homogène alors que la qualité diminue pour la configuration de Mascaret.

D'ailleurs, en ce qui concerne l'évolution de la performance quand le K_s est constante, il est remarquable que depuis le début, le modèle avait des problèmes pour reproduire les débits jaugés sur toutes les gammes. A mesure que le temps passe, les écarts sont de plus en plus marqués. Cela permet d'apercevoir l'influence et l'impact considérable du coefficient de rugosité sur le débit et le manque d'incidence sur le calage en hauteur.

En outre, il faut remarquer que certaines boîtes à moustache de chaque variable analysée sont généralement très dispersées parce que c'est le moment où il y a eu un changement de la direction du flux. En d'autres termes, une analyse correspond aux données des débits négatifs tandis que l'autre est plutôt pour les valeurs positives du débit. Par conséquent, l'écart va forcément augmenter en provoquant une dispersion élevée qui limite les conclusions sur ces gammes.

En ce qui concerne le calage des autres stations sur la zone d'étude, c'est étonnant qu'il y ait une différence considérable entre les modèles et le marégraphes. Il semble que cet écart entre les hauteurs simulées de Mascaret et le marégraphe, est la raison pour laquelle ce modèle a des problèmes à niveau de débit, car il a tendance à évacuer plus d'eau que la réel.

En définitive, il est possible de conclure que Mage est un modèle qui simule avec un bonne performance le cas de la Seine aval que, même si la station est soumise à une forte influence de la marée, les hauteurs et les débits restent bien calé par rapport aux mesures. Toutefois, les temps de calcul sont encore longs pour le calage, d'où la nécessité de simplifier le

modèle. L'étude de cette approche permet de donner réponse aux enjeux comme des inondations, prévision des crues, surveillance de la voie navigable, entre autres. De même, il a été mis en avant une amélioration en termes de temps de calcul entre les deux modèles. C'est pour cela que maintenant l'intérêt est de caler le modèle via *BaM* pour arriver à bien représenter non seulement les niveaux d'eau, mais aussi le débit dans toutes les stations qui disposent du marégraphe.

4. Couplage MAGE-BaM

Tout d'abord, il est intéressant de rappeler les principes de *BaM* afin de mieux comprendre le potentiel de l'outil et les étapes à franchir pour l'intégration de nouveaux modèles en général et de MAGE en particulier.

BaM est une généralisation du code de calcul BaRatin qui permet de remplacer la courbe de tarage par un modèle quelconque. *BaM* a pour but l'estimation des paramètres du modèle et des incertitudes associées. *BaM* permet aussi d'effectuer des prédictions à partir du modèle, en prenant en compte les différentes sources d'incertitudes.

D'après Renard, B (2017), dans *BaM* « un modèle est défini comme une fonction qui calcule une ou plusieurs variable(s) de sortie à partir d'une ou plusieurs variable(s) d'entrée. Cette fonction dépend d'un certain nombre de paramètres qui sont généralement inconnus et qui devront donc être estimés ». Donc, *BaM* a besoin au minimum des éléments listés ci-dessous :

- Nombre de variables d'entrée.
- Vecteur de paramètres nommé θ qui devra être estimé.
- Une fonction $M(\mathbf{X}; \theta)$ qui sert à calculer, à partir des variables d'entrée et des paramètres, les valeurs prises par les variables de sortie.
- Nombre de variables de sortie

D'autres éléments sont optionnels pour le pilotage de l'outil :

- Informations spécifiques du modèle. Cela sera en fonction du modèle à intégrer. A titre d'exemple, il peut s'agir d'un fichier d'options, de conditions initiales, des données topographiques, entre autres.
- Paramètres dérivés : des paramètres calculés en fonction des paramètres estimés θ .
- Variable d'état : ce sont des variables de sortie supplémentaires, leur particularité est qu'elles ne sont pas observables et qu'elles ne sont donc pas utilisées pour l'estimation des paramètres du modèle. Elles sont plutôt informatives sur l'état du modèle.

En résumé, la schématisation ci-dessous montre la représentation interne de *BaM*.

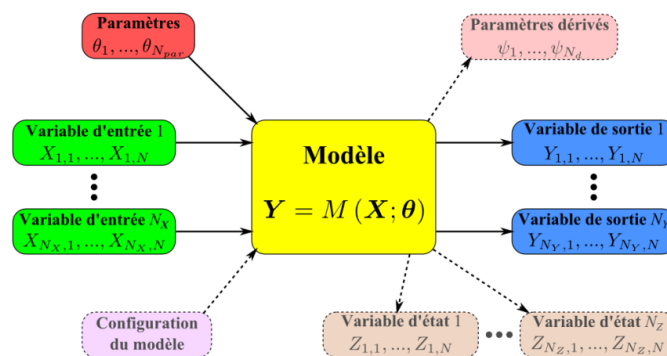


Figure 18. Schématisation du modèle manipulé par *BaM* (Renard, B (2017))

L'estimation des paramètres se base sur la comparaison des simulations du modèle avec des observations de ses variables de sortie en utilisant une analyse Bayésienne (Renard, 2017). Le résultat de cette analyse est la distribution a posteriori des paramètres à estimer, qui combine l'information portée par les données (quantifiée via la vraisemblance) et la distribution a priori des paramètres. Puisque le vecteur de paramètres à estimer peut être de grande dimension, *BaM* s'appuie sur un algorithme de Monte Carlo par Chaîne de Markov (MCMC) qui génère un grand nombre de vecteurs de paramètres issus de cette distribution a posteriori.

Etant donné que *BaM* s'intéresse non seulement à l'estimation des paramètres, mais également à leurs incertitudes, l'outil considère trois sources d'erreurs (Figure 19) :

- **Erreur sur les données de sortie** : différence entre les valeurs observées des variables de sortie et les vraies valeurs.
- **Erreur sur les données d'entrée** : idem pour les variables d'entrée.
- **Erreur structurelle** : différence entre la vraie valeur de la variable de sortie et la valeur simulée par le modèle.

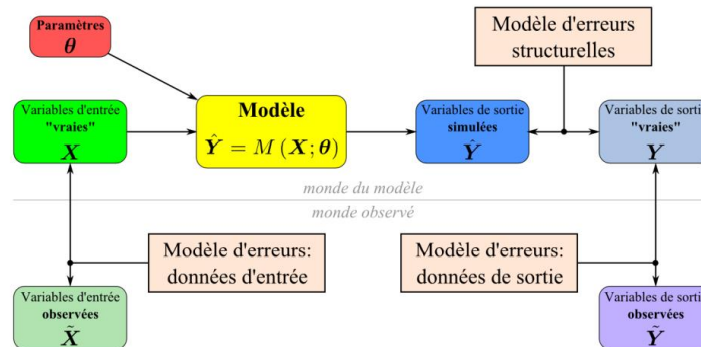


Figure 19. Modèles d'erreurs intégrés sur BaM (Renard, B (2017))

Après avoir réalisé l'étape d'estimation, le modèle est prêt pour réaliser des prédictions. En d'autres termes, il simulera (avec incertitudes) les valeurs des variables de sortie à partir des variables d'entrée fournies par l'utilisateur (avec incertitudes) et des paramètres estimés (avec incertitudes). Plusieurs situations peuvent être représentées en fonction de la variable d'entrée fournie. Dans notre cas d'étude, l'utilité serait pour d'un côté, la **prévision** autrement dit, les variables d'entrée correspondent à des valeurs futures. En variant des conditions de la marée, les conditions initiales de la ligne d'eau, il est possible de pouvoir prédire le comportement du débit futur avec leur incertitude. D'un autre côté, il peut également être utilisé en **reconstruction** lorsque les variables d'entrée correspondent à des valeurs passées qui ont été observées. En d'autres termes, en sachant différentes amplitudes d'onde et des coefficients de marée, il peut calculer les débits à partir de hauteurs d'eau.

Pour le premier essai d'intégration du modèle MAGE, un modèle simplifié de la Seine aval a été implémenté. En effet, l'objectif est d'avoir un modèle qui s'exécute plutôt vite pour obtenir les premiers résultats et évaluer la stabilité numérique des simulations. Plusieurs astuces ont donc été adoptées comme la réduction des profils transversaux, l'homogénéisation des certaines valeurs de frottement par tronçon (réduction de la quantité de Ks) et la réduction de la période d'analyse (focus sur la première campagne de jaugeages de mars 2017).

S'il fallait classer les possibles modifications sur un modèle hydraulique pour réduire son temps de calcul, il me semble qu'il faudrait prioriser la réduction de la période d'analyse (moins d'itérations sur MAGE). Ensuite, la réduction des tronçons qui seront affectés par un coefficient de rugosité, car cela permettra de réduire le vecteur de paramètres sur BaM. Plus précisément, 2 paramètres sont économisés pour chaque tronçon (Ks du lit mineur et du lit majeur). Enfin, le nombre des profils transversaux, en prenant garde de ne pas endommager ou perdre de précision du comportement de la ligne d'eau.

Ce nouveau modèle simplifié utilise un seul coefficient de rugosité pour les 34 profils du premier bief. En revanche, le deuxième bief passe de 568 à 194 profils et par rapport aux coefficients de Strickler, il passe de 12 à 7 tronçons. Finalement, la durée de la période simulée passe de 124 jours 23 h à 1 jour 17 h 25 minutes. Cela est possible parce qu'on a conclu précédemment que les conditions initiales étaient suffisamment bonnes pour que leur impact sur les simulations devienne rapidement négligeable.

En conclusion, on passe d'un temps de calcul de 16 à environ 0.5 secondes. Ceci est bénéfique pour faciliter les premiers tests d'intégration MAGE-BAM puisque l'utilisation de méthodes MCMC réclame de réaliser un grand nombre de simulations (typiquement 10 000). Toutefois, le premier essai sera réalisé avec 1 000 simulations pour vérifier la stabilité numérique.

Sont présentées en Annexes la façon de brancher un modèle hydrodynamique 1D sur BaM (MAGE en l'occurrence) ainsi que les différents tests menés afin de vérifier le bon fonctionnement du couplage MAGE-BAM et de réaliser les premiers tests d'estimation automatique.

4.3. Cas simplifié (premier essai de calage)

4.3.1. Nombre des simulations 1 000

Les figures montrées précédemment correspondent au calage du présent cas. En effet, le nombre de simulations entre chaque adaptation est de 10 alors que le nombre de cycle reste 100 pour un total de 1 000 simulations. Ce cas a pour objectif de confirmer si le couplage a été bien fait.

En ce qui concerne l'étape du brûlage et affinage, puisqu'il n'y a pas beaucoup de simulations pour brûler une grande quantité d'itérations, nous fixons le facteur de brûlage à 20 % du total et ensuite, prendre 1 simulation toutes les 8. En conclusion, 100 simulations sont utilisées pour le traitement des données.

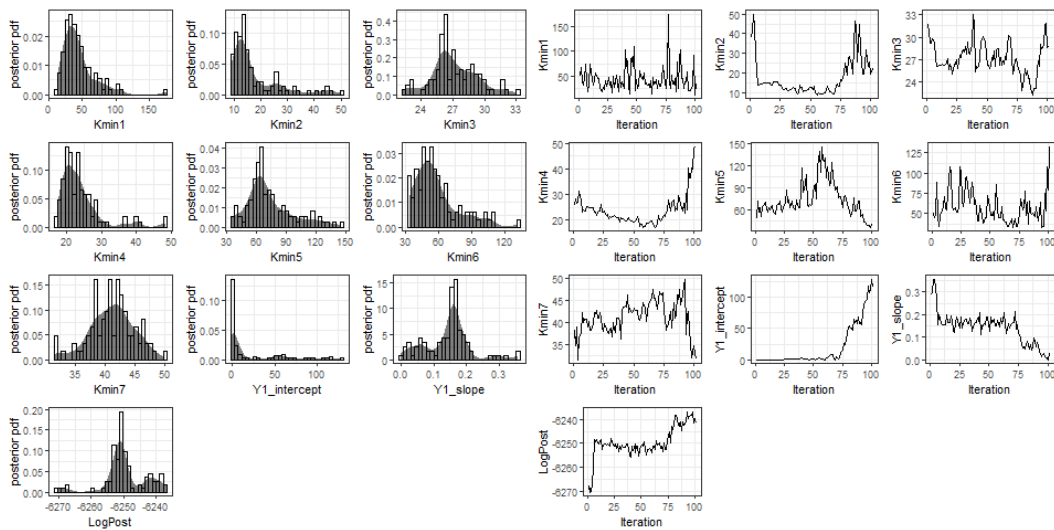


Figure 20. Distribution à posteriori (à gauche) et trace des simulations (à droite) par paramètre cas simplifié 1 000 simulations

Bien que les simulations MCMC n'aient de toute évidence pas convergé au bout de 1000 itérations, la Figure 20 montre que l'espace des paramètres a été visité, ce qui confirme que le couplage entre MAGE et BaM fonctionne. Donc, il est possible de passer au cas suivant sans aller plus loin d'étudier ce cas.

4.3.2. Nombre des simulations 10 000

Etant donné que le couplage a été possible et un premier essai a été effectué, il est possible de croître la quantité de simulations vers des ordres de valeurs plus adaptés à la méthode MCMC. C'est pour cela que le nombre de simulation entre chaque adaptation s'élève à 100 au lieu de 10. Ce qui fait un total de 10 000 itérations qui est plus cohérent par rapport au type d'analyse. Effectivement, après brûlage et affinage, il y a encore 500 données restantes pour lancer le traitement des simulations au lieu du 100 comme le cas précédent. Il est intéressant de remarquer que les temps de calcul ont largement augmenté. En effet, pour les 1 000 simulations, le calcul a duré environ 3 à 4 h, alors que dans l'autre cas, il a pris de l'ordre de jours. Les distributions a posteriori et le traçage des paramètres se montrent ci-après :

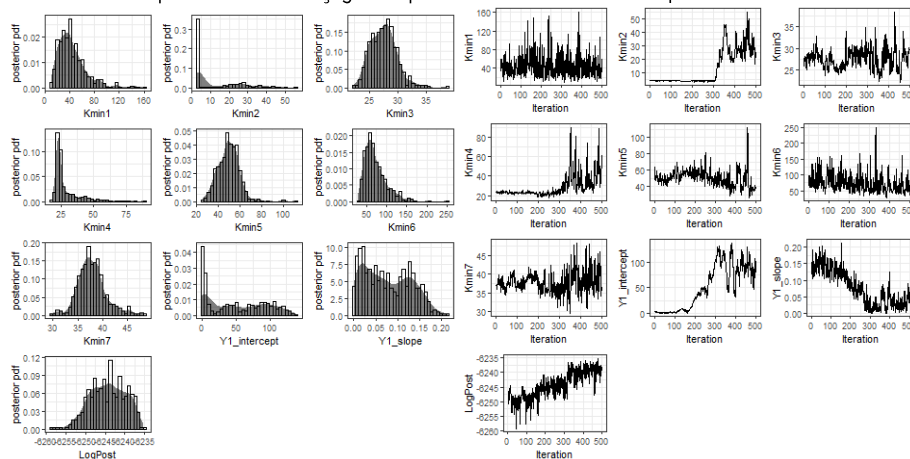


Figure 21. Distribution à posteriori (à gauche) et trace des simulations (à droite) par paramètre cas simplifié 10 000 simulations

La plupart du temps, la convergence augmente dans les dernières itérations, sauf le « Kmin2 » et les paramètres liées à l'erreur associée au modèle. A moment d'étudier leurs traçages, il est possible de voir des tendances parmi les simulations, ce qui n'est pas un bon signe.

Cela arrive en moindre mesure sur le paramètre « Kmin4 ». En effet, il semble que les simulations varient sur une gamme des valeurs plutôt réduite. Ensuite, à partir de l'itération 300, cette gamme s'étend autrement dit les simulations commencent à explorer des autres valeurs sur le monde paramétrique. Même s'il existe des tendances marquées, la distribution a posteriori permet d'identifier la valeur optimale issue de l'analyse Bayésienne.

Etant donné qu'on est encore dans la première étape de faisabilité de l'intégration du modèle MAGE sous BaM, il est possible de s'arrêter à ce stade notamment à cause du manque de convergence.

4.4. Cas Seine aval configuration MAGE

A différence du cas précédent, la quantité de tronçons reste la même que celle du modèle Mascaret. En d'autres termes, la quantité de paramètres (coefficient du rugosité) vont augmenter de 14 à 24 paramètres parce que maintenant, il faut caler 12 coefficients en lit mineur (lit majeur fixe). Toutefois, la même réduction des profils transversaux s'effectue afin de mettre en évidence le besoin ou pas d'un maillage assez détaillé et le nombre de simulations reste à 10 000.

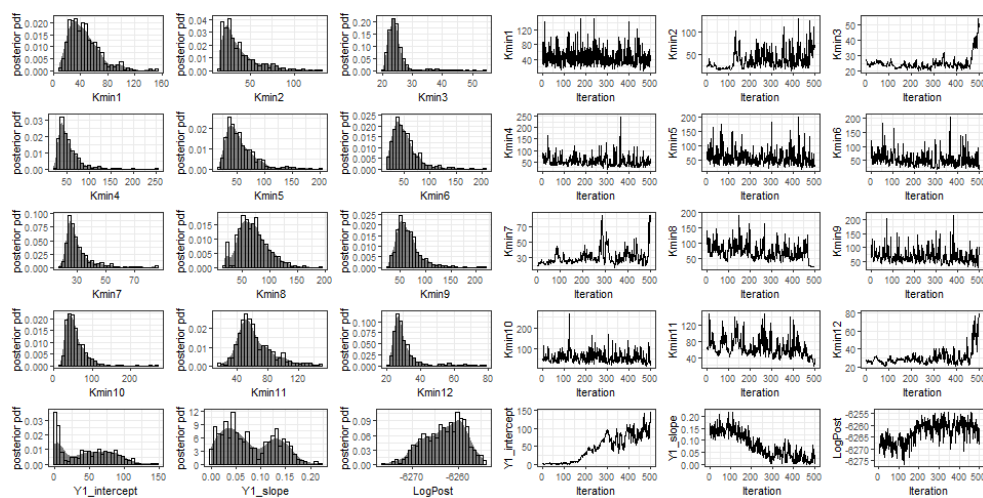


Figure 22. Distribution à posteriori (à gauche) et trace des simulations (à droite) par paramètre de la configuration MAGE avec 10 000 simulations

En général, les traces des simulations permettent de mettre en avant une bonne exploration des paramètres pour étudier leur convergence. Il n'y a pas beaucoup de tendances marquées, sauf sur certains coefficients de rugosité. En revanche, la méthode a des problèmes sur d'autres paramètres, car l'incertitude sur la valeur du paramètre est grande, ce qui pourrait induire une grande incertitude sur les résultats. Le tableau ci-après présente le résumé des statistiques après simulation du vecteur paramètre.

Paramètre	Initial guess	Mean	Median	St.Dev.	Variance	CV	MaxPost
Kmin1	37.00	45.88	41.53	22.84	521.81	0.50	27.81
Kmin2	37.00	37.88	31.04	19.76	390.45	0.52	21.57
Kmin3	37.00	25.04	24.06	4.23	17.87	0.17	27.98
Kmin4	37.00	53.23	47.31	24.58	604.01	0.46	41.72
Kmin5	37.00	56.76	49.69	26.53	703.76	0.47	44.53
Kmin6	37.00	51.71	46.51	24.75	612.37	0.48	33.76
Kmin7	37.00	30.68	27.50	9.91	98.21	0.32	27.14
Kmin8	37.00	69.88	67.32	26.45	699.79	0.38	40.09
Kmin9	37.00	66.79	61.32	25.82	666.84	0.39	68.33
Kmin10	37.00	57.39	51.72	27.42	751.60	0.48	38.20
Kmin11	37.00	63.90	58.15	22.48	505.23	0.35	41.91
Kmin12	37.00	30.68	28.43	8.38	70.19	0.27	34.47

Paramètre	Initial guess	Mean	Median	St.Dev.	Variance	CV	MaxPost
Y1_intercept	0.01	44.02	43.75	36.29	1317.18	0.82	99.91
Y1_slope	0.60	0.08	0.07	0.05	0.00	0.67	0.02

Tableau 3. Résumé des paramètres de la configuration MAGE avec 10 000 simulations

Il faut remarquer le temps de calcul, il s'élève à un peu plus de 1 jour et 2 h de temps CPU. Cela permettra de comparer les temps dont l'outil a besoin pour lancer le calcul en fonction du modèle hydraulique fourni. Etant donné que le vecteur de paramètre a augmenté, une hausse du temps CPU était attendue.

La comparaison avec le cas précédent n'est pas très pertinente au niveau du calcul des coefficients de rugosité, car les longueurs des tronçons sont différentes, ce qui fait tout changer. Par contre, cette analyse vaut la peine par rapport au cas de base, autrement dit celui qui suit la configuration du Mascaret qui sera présenté dans la sous-section suivante.

4.5. Cas Seine aval configuration Mascaret

La même configuration du modèle sur Mascaret a été mise en place, sauf pour la quantité de coordonnées sur chaque profil puisqu'il est limité à 24 points par section. Néanmoins, il a été démontré que l'impact du changement était très faible.

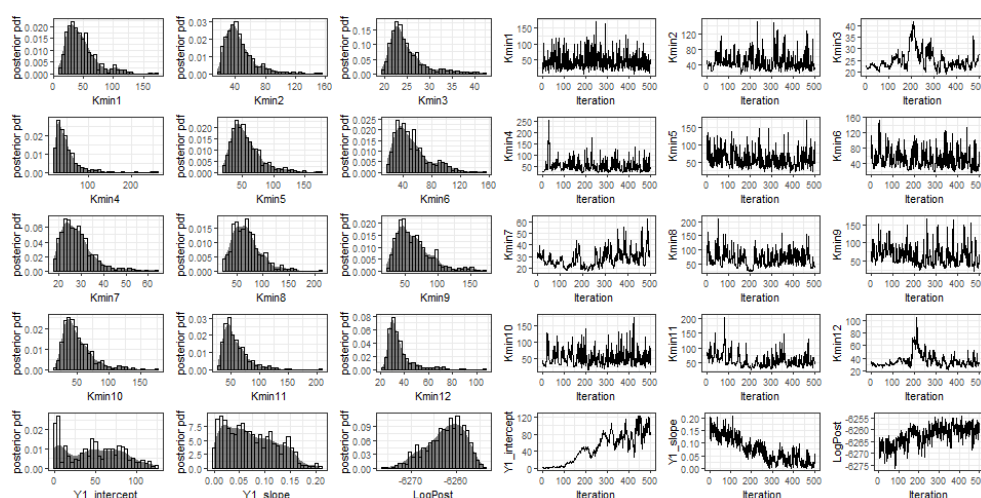


Figure 23. Distribution à posteriori (à gauche) et trace des simulations (à droite) par paramètre de la configuration Mascaret avec 10 000 simulations

A grosso modo, non seulement les distributions a posteriori, mais aussi les traces ont, la plupart, une bonne performance. En d'autres termes, les distributions de probabilité arrivent sont plus précises que l'a priori. Toutefois, le problème se soulève au niveau du modèle d'erreur, car la distribution a posteriori n'est plus informative que celle a priori.

Par rapport à la trace des simulations, on remarque une bonne exploration tout au long des paramètres sans présences de tendances marquées. A différence du cas précédent, il a été mis en évidence une meilleure stabilité sur les traces des certains paramètres.

En plus, un tableau résumé est présenté afin de connaître la valeur exacte de chaque paramètre pour ensuite les comparer avec la configuration avec moins de sections transversales afin de tirer des conclusions sur l'importance de la simplicité ou complexité du modèle de base. Pour le calcul de l'écart relatif, le résultat issu de la configuration de MAGE a été pris comme référence pour le calcul. Puis, l'estimation est effectuée par rapport au résultat issu de l'optimisation depuis Mascaret (le plus performants jusqu'au présent).

Paramètre	Initial guess	Mean	Median	St.Dev.	Variance	CV	MaxPost
Kmin1	37.00	46.41	40.72	24.74	612.04	0.53	25.84
Kmin2	37.00	46.37	40.65	20.40	416.20	0.44	28.71
Kmin3	37.00	25.01	23.78	4.06	16.46	0.16	24.24
Kmin4	37.00	49.87	42.41	28.78	828.20	0.58	53.22

Paramètre	Initial guess	Mean	Median	St.Dev.	Variance	CV	MaxPost
Kmin5	37.00	56.60	51.58	24.30	590.57	0.43	39.06
Kmin6	37.00	51.41	44.64	23.88	570.49	0.46	50.21
Kmin7	37.00	28.05	26.73	7.07	50.01	0.25	26.00
Kmin8	37.00	68.55	65.56	26.84	720.46	0.39	56.25
Kmin9	37.00	63.89	58.32	26.39	696.51	0.41	47.52
Kmin10	37.00	51.32	45.59	22.84	521.84	0.45	56.17
Kmin11	37.00	58.20	51.76	21.61	467.20	0.37	44.76
Kmin12	37.00	36.17	32.87	10.74	115.27	0.30	31.35
Y1_intercept	0.01	47.31	47.32	34.12	1164.03	0.72	78.90
Y1_slope	0.60	0.07	0.06	0.05	0.00	0.68	0.02

Tableau 4. Résumé des paramètres de la configuration Mascaret avec 10 000 simulations

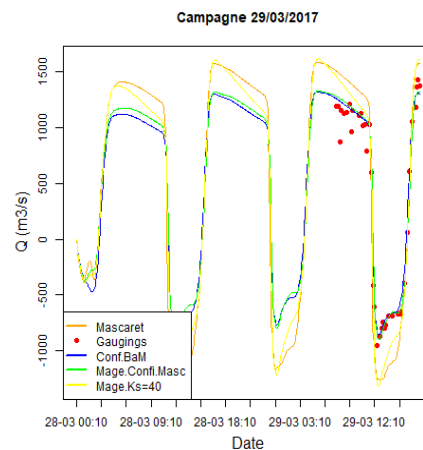


Figure 24. Hydrogrammes à partir des différentes configurations comparées aux données de la campagne de jaugeage

Paramètre	MAGE	MASCARET	Optimisation Mascaret (Opt.masc)	Erreur relative (MAGE-mascaret)	Erreur relative (MAGE-Opt.masc)	Erreur relative (Mascaret-Opt.masc)	Configuration plus proche à l'Opt.masc
Kmin1	27.81	25.84	46.50	-7%	40.19%	44.42%	MAGE
Kmin2	21.57	28.71	46.50	33%	53.61%	38.26%	Mascaret
Kmin3	27.98	24.24	32.40	-13%	13.63%	25.19%	MAGE
Kmin4	41.72	53.22	33.30	28%	-25.28%	-59.81%	MAGE
Kmin5	44.53	39.06	37.00	-12%	-20.34%	-5.57%	Mascaret
Kmin6	33.76	50.21	37.80	49%	10.69%	-32.83%	MAGE
Kmin7	27.14	26.00	34.50	-4%	21.33%	24.63%	MAGE
Kmin8	40.09	56.25	33.00	40%	-21.50%	-70.46%	MAGE
Kmin9	68.33	47.52	38.60	-30%	-77.02%	-23.11%	Mascaret
Kmin10	38.20	56.17	34.80	47%	-9.76%	-61.42%	MAGE
Kmin11	41.91	44.76	36.50	7%	-14.82%	-22.62%	MAGE
Kmin12	34.47	31.35	34.40	-9%	-0.20%	8.87%	MAGE
Y1_intercept	99.91	78.90	-	-21%	-	-	
Y1_slope	0.0174	0.0168	-	-4%	-	-	

Tableau 5. Comparaison du MAP issu après simulation du cas avec la configuration de MAGE et Mascaret

Contrairement au cas précédent, ces deux cas ont non seulement la même quantité de tronçons, mais aussi les longueurs sont exactement les mêmes puisque l'intérêt est d'évaluer la nécessité d'avoir autant des sections transversales ou si c'était possible d'en réduire.

Un premier calcul sur l'erreur relative s'effectue entre les résultats des deux simulations (MAGE-Mascaret). Le 50% des estimations des paramètres ont eu une différence de moins de 15% en valeur absolue, ce qui reste à peu près similaire. En revanche, l'autre moitié de l'ensemble a tendance à avoir des valeurs assez écartées. De même, les mêmes proportions se conservent (50%-50%) pour des paramètres qui sont surestimés et sous-estimés.

Ensuite, l'analyse est réalisée entre les résultats des simulations et celui obtenu d'après le processus d'optimisation de Mascaret, les valeurs sont affichées dans le Tableau 9 et recopier dans le Tableau 5 au quatrième colonne.

A ce moment, on peut remarquer que les résultats sont encore loin des ceux obtenus pour Mascaret qui semblent être optimales. En même temps, il est normal qu'ils sont assez écartés parce que le calage a seulement pris en compte la campagne de jaugeages réalisé en mars. Néanmoins, si on analyse les simulations de Mage, il y en a 5 qui sont à moins de 15% d'écart alors qu'il y en a uniquement 2 pour la configuration de Mascaret.

De même, une dernière colonne a été proposé afin d'identifier la configuration qui fournissait les valeurs les plus proches au résultat après optimisation. En résumé, 9 sur 12 paramètres indiquent que les résultats de la configuration MAGE se ressemblent plus aux optimales.

De toute façon, il faut toujours prendre de recul et penser qu'à cet état le calage n'est pas fini et il faut travailler pour avoir un modèle performant en fonction des observations du marégraphe et des campagnes des jaugeages. La dernière étape serait de réaliser une étude comparative comme celle fait à la section 3.3, mais avec les coefficients de rugosité calés via MAGE.

En termes de temps requis pour le calcul, il s'élève à environ 1 jour et 12 h de temps CPU. Environ 38.5 % plus lente que le cas MAGE, la seule différence entre les deux était le nombre des sections transversales disponible sur le modèle hydraulique. Cette conclusion justifie le choix d'utiliser un modèle avec un maillage pas trop détaillé afin d'optimiser le calage. De toute façon, il faut surveiller d'avoir un équilibre du pas de maillage pour éviter d'abîmer la performance du modèle pour arriver à reproduire les données observées.

5. Perspectives pour l'estimation bayésienne d'un modèle hydrodynamique 1D en contexte de marée

Certains cas d'étude comme la Seine peut rapidement être un cas compliqué à traiter avec les différents modèles proposés dans les années précédentes. C'est pour cela que cette année, un grand travail a été effectué sur l'utilisation d'un modèle hydrodynamique 1D (MAGE) pour l'estimation des débits en zone tidale afin de réaliser des prédictions des hauteur-débit ou des prévisions. Néanmoins, le problème se porte sur son intégration dans *BaM* pour le calage automatique de sorte qu'il puisse comprendre des observations des campagnes des jaugeages et des niveaux des lignes d'eau.

L'objectif pour 2023 est de stabiliser et de terminer de régler et valider la méthode de calage du modèle 1D dans le *framework* de *BaM* en intégrant différentes observations. De plus, l'une des missions plus importantes est la réduction du temps de calcul pour le calage afin de pouvoir de rendre l'outil plus opérationnel.

Pour attaquer le temps de calcul deux stratégies sont envisageables. D'un côté, paralléliser l'étape de prédiction afin de pouvoir réaliser des prévisions à long termes après avoir réalisé le calage du modèle. D'un autre côté, écrire un guide qui a pour but de renseigner l'utilisateur des paramètres à fournir et quelques simplifications possibles à faire sur le modèle de base pour réduire le temps de calcul sans perdre qualité des résultats.

D'ailleurs, puisque différents efforts ont été réalisés pour la modélisation de ces cas particuliers, un article scientifique est envisageable en prenant la Seine comme exemple d'application afin de comparer tous les modèles et leur performance pour fournir une possible solution aux cas similaires. De même, l'idée est de pouvoir mettre en place la méthode sur différents cas d'étude qui dispose d'un modèle 1D afin de pouvoir tester l'outil. Deux stations hydrométriques sont déjà envisagées pour mettre en œuvre la méthode, ce sont sur l'Aulne à Châteaulin et sur le Rhône à Beaucaire.

Enfin, puisqu'on utilise les campagnes de jaugeages réalisées par l'Université de Rouen, il est aussi intéressant de lui faire un retour pour informer l'utilité et l'importance de ces données pour le développement et calage du modèle.

6. Références

Bargot, P. (2016). Calage de modèle hydraulique 1D d'un estuaire: étude de la stabilité numérique de la solution : Application au modèle Seine aval, *Rapport technique du CEREMA*.

Benjamin, R. (2014). Probabilités et Statistiques appliquées à l'Hydrologie. France. pp.90. hal-02597049f

Benjamin, R., Le Coz, J., Blanquart, B., Bonnifait, L., (2015). Statistiques avancées pour le calcul d'incertitudes en hydrologie. Applications à la prédétermination et à l'hydrométrie. France, pp.116. hal-02602443

Benjamin, R. (2017). BaM ! (Bayesian Modeling): Un code de calcul pour l'estimation d'un modèle quelconque et son utilisation en prédiction. irstea, pp.90. hal-02606929

Benjamin, R. (2018). Prise en compte des erreurs systématiques dans l'estimation des courbes de tarage et des modèles hydrologiques. (Action HYDROM A3 du programme MEEM (DGPR/SNRH) – Irstea 2018). *Rapport technique convention SCHAPI/Irstea*, 67 pages, décembre.

Chasse, P., Descatoire, I. (2008). Guide de prise en main Fudaa-Mascaret 3.0. Notice F 08.04. Centre d'Etudes Techniques Maritimes Et Fluviales (CETMEF), 137 pages.

Mansanarez, V. (2016) Non-unique stage-discharge relations: Bayesian analysis of complex rating curves and their uncertainties. *PhD Thesis*, Grenoble Alps University.

Nedelec, F, Lampert, L. & Riou, P. (2010). Réseau Hydrologique Littoral Normand (RHLN) – Suivi 2008. Rapport scientifique, 140.

Perret, E., Le Coz, J., Renard, B., Lang, M. (2019). Courbes de tarage dynamiques – hystérésis, influence de la marée et végétation aquatique (Action HYDROM A1 du programme MEEM (DGPR/SNRH) – Irstea 2019). *Rapport technique convention SCHAPI/Irstea*, 70 pages, décembre.

Perret, E., Le Coz, J., Renard, B. (2020). Courbes de tarage dynamiques (Action HYDROM A1 – INRAE 2020). *Rapport technique convention SCHAPI/INRAE*, 34 pages.

Perret, E., Le Coz, J., Renard, B. (2021). Courbes de tarage dynamiques – végétation aquatique et influence de la marée (Action HYDROM A1 – INRAE 2021). *Rapport technique convention SCHAPI/INRAE*, 43 pages.

Piney, S., Héluin, S., Morel, G., Hébrard, A., Glaziou, G., Diribarne, J., Kopp, S. (2018). Mesures de débit en estuaire : l'exemple de la Seine Résultats et enseignements. Article scientifique. La Houille Blanche, n° 5-6, 2018, p. 43-51. <https://doi.org/10.1051/lhb/2018050>

7. Annexes

7.1. Transposition du modèle Mascaret vers Mage

Après avoir identifié les fichiers dont il y a besoin, il est présenté plus en détail le travail effectué sur chaque fichier pour la transposition du modèle.

7.1.1. Géométrie (.ST/.geo)

Un total de 601 transects sont disponibles pour dessiner la géométrie du modèle dont ceux au niveau des marégraphes. De

même, la bathymétrie est disponible sur tous les profils du bief en analyse. Le format des données est affiché dans le tableau ci-dessous :

PROFIL Bief_1 profil_1 0.0		
1705.29	14.02	B
1706.29	13.91	B
1707.29	13.8	B
1708.29	13.75	B
1709.29	13.65	B
1710.29	13.65	B
1711.29	13.5	B

Tableau 6. Exemple du fichier de la géométrie sur Mascaret

La première ligne fournit d'information par rapport au bief et profil en analyse. Par exemple, le tableau montre les données du bief numéro 1. Notamment le numéro du profil et le point kilométrique (PK) respective. Ensuite, il est possible d'identifier qu'il s'agit d'un profil type AC parce qu'il n'y a que coordonnées Y et Z. La dernière colonne sert à différencier le lit majeur (T) du lit mineur (B). D'après les données enregistrées sur le modèle, il n'y a pas de lit majeur, seulement du lit mineur.

1	0	0	22	7600.0000	Amont
7600.0000	541.5157	139.9300			
7600.0000	540.6418	139.1200			
7600.0000	534.0142	135.2100			
7600.0000	531.1771	134.1900	rg		
7600.0000	528.3399	135.0100			
7600.0000	522.6656	135.6100			
7600.0000	519.2610	135.6100			
7600.0000	514.7216	135.4100			
7600.0000	507.9124	134.9100	rd		
7600.0000	498.8335	135.2100			
7600.0000	493.1592	135.0100			
7600.0000	492.6374	135.2300			
7600.0000	491.6782	135.3600			
7600.0000	491.2186	135.5800			
999.999	999.999	999.999			

Tableau 7. Exemple du fichier de la géométrie type AC sur Mage

Pour Mage, l'information générale du bief s'affiche sur la première ligne. En effet, le premier nombre fait référence au profil. Ensuite, les deux valeurs de zéro sont définies par défaut. Puis, le numéro 22 signifie le profil en étude suivie du PK et finalement, un nom au choix de l'utilisateur (optionnel). Mage comprend toujours que la section importée suit un profil type X,Y,Z. Néanmoins, il est possible de représenter différents types de profil.

Par exemple, dans ce cas-là, la valeur de la première colonne (X) est égale au PK. Ensuite, la colonne suivante (Y) correspond aux valeurs des abscisses. Puis, la colonne postérieure (Z) comprend les cotes.

Enfin, la dernière colonne sert à affecter un nom particulier s'il y a besoin d'avoir le traçage d'une coordonnée. Ceci est optionnel, en revanche, ce qui est obligatoire à mettre est le « rg » pour rive gauche et « rd » pour rive droite afin de différencier le lit mineur du lit majeur. Il faut remarquer qu'il y a besoin de plus d'un fichier de géométrie s'il y a plusieurs biefs. Dans le présent cas, il y en a deux, l'un avant l'apport ponctuel et l'autre à l'aval. En d'autres termes, il s'agit de l'intersection de l'Eure sur la Seine. D'ailleurs, Mage arrive à faire la séparation entre deux profil via la dernière ligne de 999.999.

Etant donné que le format n'est pas du tout compatible, il a fallu développer une routine pour lire les fichiers et puis transférer d'un format à l'autre. Le code a été écrit sur R Studio. Voici une image des résultats obtenus après avoir lancé la routine :

```

PROFIL Bief_1 profil_34 5064.0
39.94 14.22 B
40.94 12.51 B
41.94 11.77 B
42.94 11.8 B
43.94 11.78 B
44.93 11.75 B
45.93 11.73 B
46.93 11.68 B

```

```

34 0 0 417 5064
5064 39.94 14.22 rg
5064 40.94 12.51
5064 41.94 11.77
5064 42.94 11.8
5064 43.94 11.78
5064 44.93 11.75
5064 45.93 11.73
5064 46.93 11.68 rd
999.999 999.999 999.999

```

Figure 25. Géométrie en format Mascaret

Figure 26. Résultats de la routine R pour transférer le format Mascaret vers Mage

Vu qu'il y a un apport intermédiaire qui correspond à l'affluent de l'Eure, il faut avoir deux fichiers .ST afin d'importer séparément la géométrie. Le code est assez flexible pour s'adapter à n'importe quel nombre des apports intermédiaires. Il va toujours générer n+1 fichiers de ST, où n est égal à nombre des apports ponctuels.

7.1.2. Conditions limites amont et aval (.HYD, .LIM /.loi)

D'après le rapport SCHAPI HYDROM – Perret et al., 2021, la condition initiale à l'amont du modèle est une loi Q(t) qui correspond au débit de Vernon Q_{Vernon} , considéré égal à celui de Poses Q_{Poses} (le barrage de Poses est entre les deux); ce qui est une hypothèse plutôt critiquable notamment à basses eaux, car la structure va influencer l'égalité mentionnée précédemment. En revanche, à fort débit le barrage devient transparent et donc l'hypothèse $Q_{Poses} = Q_{Vernon}$ est valable.

Le modèle 1D Mascaret est principalement utilisé par le service de prévision des crues (SPC), qui s'intéresse donc aux forts débits, c'est pourquoi d'un point de vue opérationnel cette hypothèse est acceptée.

Du côté de MAGE, la condition limite (CL) à l'amont est limitée à un hydrogramme, ce qui est le cas des données d'entrée fournies à Mascaret. Par contre, les unités pour le temps ne correspondent pas aux mêmes, alors que le débit a le même format (m³/s). En effet, sur Mascaret, le temps est donné en secondes tandis que sur MAGE, le temps est en minutes.

Afin de transférer automatiquement les fichiers d'un format à l'autre, une routine simple est créée afin de transformer le temps de secondes à minutes. Il faut remarquer que le même processus est appliqué aux points intermédiaires. Effectivement, le déversement de l'Eure sur la Seine est modélisé comme un apport ponctuel du débit en entrée au PK 5064 comme une loi de Q(t). En ce qui concerne le débit d'entrée, il est égal au débit qui est supposé égal au débit de la station de Louviers $Q_{Louviers}$.

Enfin, la CL à l'aval peut varier parmi un hydrogramme, un limnigramme ou même les résultats d'une courbe de tarage (Q(z)). Néanmoins, il n'est pas obligatoire à fournir, dans le sens que s'il n'y a pas de CL aval, le modèle comprendra qu'il s'agit d'un écoulement en régime permanent uniforme. Dans le cas d'étude, la CL retenue est le niveau de l'eau à Tancarville $Z_{Tancarville}$. Il a été mis en évidence le même problèmes d'unités mentionné précédemment.

7.1.3. Rugosité (.RUG /.cas)

D'après des anciens rapports, grâce aux marégraphes disponibles sur différentes stations hydrométriques, le modèle a été calé en terme de hauteur sous différentes conditions fluvio-maritimes (une dizaine d'événements de calage). D'ailleurs, la campagne de jaugeages de 2015 a fourni d'information utile pour le calage en terme de débit et de fixer des valeurs du coefficient de Strickler sur chaque tronçon défini entre chaque marégraphe disponible. Le dernier calage effectué a été en 2015.

En termes du format, ils se ressemblent entre eux. Autrement dit, il faut définir une abscisse de début et de la fin à affecter avec une valeur de coefficient de Strickler en lit mineur et en lit majeur. La façon de procéder plus simple à réaliser était de mettre à la main directement sur PamHyr (interface de MAGE) qui va générer le fichier dans le bon format qui sera ensuite utilisé pour MAGE.

7.1.4. Conditions initiales (.INI /.lig)

Cette condition n'est pas forcément nécessaire pour lancer le modèle sur MAGE. Néanmoins, il s'agit des conditions initiales (CI) de l'écoulement en termes de hauteur et débit, afin d'évaluer ensuite le comportement de la ligne d'eau (LE). Dans l'étude, il existe un fichier avec les CI, mais il n'y a pas de débit courant à travers les profils. Ce fichier a été importé sur MAGE. Il faut aussi remarquer que si l'utilisateur ne fournit pas de données, le modèle fera un calcul automatique afin de recréer la condition initiale en fonction de l'information d'entrée.

7.1.5. Paramétrage du modèle (.lis)

Ce fichier a pour but de vérifier le paramétrage avant de lancer le calcul. En d'autres termes, il montre les paramètres temporels comme le pas de temps utilisé, le temps initial entre autres valeurs à retenir pour réaliser le même paramétrage sur MAGE. Enfin, l'objectif est aussi de fournir non seulement les mêmes conditions hydrauliques, mais aussi les conditions du paramétrage afin de reproduire le cas d'étude sur deux modèles différents. Après avoir homogénéisé ces conditions, il est possible de comparer les résultats.

7.1.6. Résultats du modèle (.opt)

Après avoir simulé le cas sur Mascaret, tous les résultats sont stockés sur ce document. Parmi les variables stockées, ils se trouvent le temps, le nombre du bief, le nombre du profil, le PK, la cote de référence, la cote de la ligne d'eau, le débit en lit mineur, le débit en lit majeur, le coefficient de Strickler pour les différents lits, le nombre de Froude, la vitesse moyenne, la hauteur d'eau et le débit total. Ce fichier servira à croiser avec les résultats des jaugeages et MAGE afin de comparer leurs performances.

7.2. Comparaison des modèles Mage et Mascaret

7.2.1. Modèle de la Seine aval sur MAGE

Une fois que le transfert des fichiers a été fait, il est temps de monter le modèle sur MAGE. Tout d'abord, il faut créer le réseau. Pour ce faire, la zone d'étude est divisée en deux. C'est découpage correspond à la confluence de l'affluent Eure qui arrive à la branche principale de la rivière comme la Figure 27 illustre. Il faut noter que le nœud intermédiaire doit être mis comme apport ponctuel sur le réseau pour que MAGE comprenne qu'il s'agit d'un affluent.

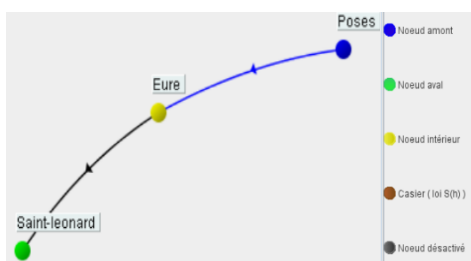


Figure 27. Réseau du Seine aval sur Mage

C'est ainsi que le réseau est créé, maintenant il faut importer les fichiers transformés pour affecter la CL à l'amont, au point intermédiaire et à l'aval, lesquels sont deux hydrogrammes (Q(t)) et un limnigramme (Z(t)), respectivement.

Ensuite, les sections transversales de chaque profil sont fournies par chaque tronçon en important les fichiers préalablement convertis. Il faut ajouter un processus en plus parce qu'il semblerait qu'une interpolation a été faite sur Mascaret sur la section transversale du transept. Ce qui provoque d'avoir un nombre considérable des coordonnées par profil qui perturbe le calcul sur Mage. En effet, le modèle est bloqué à l'instant de lancer l'étude. De toute façon, il arrive à courir le cas, mais il prend énormément du temps. C'est pour cela qu'une purge des profils a été réalisée pour tous les transepts, en fixant un nombre de 24 points par profil.

Un total de 15 sites avec marégraphes est présent sur le domaine de simulation du modèle. Les PK des stations ont été prélevés d'après l'étude réalisée par Philippe Bagot : « Calage de modèle hydraulique 1D d'un estuaire: étude de la stabilité numérique de la solution. Application au modèle Seine aval ». Leur localisation est répertoriée dans le Tableau 8. D'après le rapport SCHAPI HYDROM 2021 Emeline et al., ces quinze marégraphes sont utilisés pour estimer la ligne d'eau initiale lors d'une simulation avec Mascaret. Les cotes altimétriques des marégraphes sont toutes exprimées en mètres issus des Cartes Marines du Havre (m CMH), avec 0 m CMH = - 4,378 m NGF (Nivellement Général de la France) IGN 69.

Site	PK rapport	PK modèle
Poses	0	0
Elbeuf	16816	16823

Site	PK rapport	PK modèle
Oissel	27297	27439
Rouen	42464	41568
Petit-Couronne	50937	51186
La Bouille	58595	58878
Val-des-Leux	64772	65055
Duclair	78199	78482
Mesnil-sous-Jumièges	85295	85578
Heurteauville	96808	97091
Caudebec	110944	111227
Vateville	116579	116862
Aizier	123279	123562
Saint-Léonard	130340	130623

Tableau 8. Marégraphes présents sur le domaine de simulation de la Seine aval. Le PK=0 km représente le site de Poses, soit l'amont du domaine.

Puis, il faut fournir les valeurs de rugosité à la main en prenant en compte les limites en fonction du PK et sa valeur en lit mineur et lit majeur. Les valeurs de la rugosité importées sont affichées dans le tableau ci-dessus :

Pk initial	Pk final	K lit min	K lit maj
0.000	16823	46.500	10.000
16823.000	27439	32.400	10.000
27439.00	41568	32.400	10.000
41568.00	51186	33.300	10.000
51186.00	58878	37.000	10.000
58878.00	65055	37.800	10.000
65055.00	78482	34.500	10.000
78482.00	85578	33.000	10.000
85578.00	97091	33.000	10.000
97091.00	111227	38.600	10.000
111227.00	116862	34.800	10.000
116862.00	123562	36.500	10.000
123562.00	130623	36.500	10.000
130623.00	137983	34.400	10.000

Tableau 9. Rugosité de la zone d'étude modélisée sur Mascaret

Enfin, le paramétrage de calcul numérique et temporel est calé en fonction de l'information lue sur le fichier « .lis » de Mascaret afin de reproduire autant que possible le cas d'étude sur les deux modèles.

Après avoir mis toute cette information nécessaire pour lancer le modèle, il faut lancer le maillage. Néanmoins, sur Mascaret un maillage a déjà été fait, il n'y a pas d'intérêt à avoir plus de sections. C'est pour cela que le pas de maillage fourni est assez grand pour empêcher qu'il crée des nouveaux profils.

Finalement, il est possible de lancer le modèle. Pour ce faire, il faut ajuster l'instant initial et final en JJ : HH : MIN : SS et le pas de temps de calcul en secondes. Ceci permettra de se concentrer sur les campagnes de jaugeages pour pouvoir analyser les résultats. De plus, les lignes des commande REP sont utilisées pour extraire les résultats du débit, du cote et de la vitesse d'écoulement.

7.2.2. Campagnes de jaugeages à disposition

En tout, 5 campagnes de jaugeages depuis 2015 jusqu'au 2017 sur la Seine aval à Rouen sont disponibles pour la comparaison, à terme, avec les modélisations. Toutes ces campagnes ont été présentées dans le rapport SCHAPI HYDROM – Perret et al. (2019). En résumé, nous disposons des campagnes suivantes, toutes effectuées durant des conditions fluvio-maritimes différentes :

- le 29 septembre 2015, grande marée (coefficient 117)
- le 26 septembre 2016, étiage, coefficient de marée 49-54

- le 1^{er} octobre 2016, étiage, coefficient de marée 89
- le 23 mars 2017, crue, coefficient de marée 105-108
- le 06 avril 2017, crue, coefficient de marée 50

D'après le rapport de l'année précédente, il est remarqué les opérateurs ont changé entretemps, autrement dit, il peut avoir des mesures qui n'ont pas été effectuées aux mêmes endroits au cours du temps. Néanmoins, suite à une enquête, il semblerait que les mesures de débit aient été faites quasiment aux même endroits : « au droit » du marégraphe de Rouen pour la campagne de 2015 et à une centaine de mètres du marégraphe pour les campagnes de 2016 et 2017 d'après Flavie Druine qui a participé à ces campagnes durant sa thèse.

7.2.3. Analyse des hauteurs d'eau

La Figure 28 montre les résultats des simulations des deux modèles (bleu pour Mage et orange pour Mascaret) et les marégraphes. En effet, en vert s'affiche le marégraphe enregistré directement sur la station repérée à Rouen, alors que la ligne pointillée en noir coïncide à une mesure extra fournie par Flavie du GIP Seine-aval.

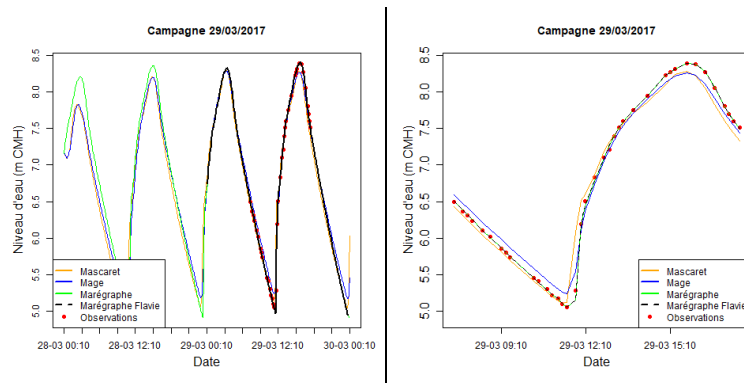


Figure 28. Limnigramme lors du jaugeage et détail du limnigramme sur la campagne de jaugeage

La première impression des résultats des simulations est qu'il y a des problèmes lors du démarrage du calcul. Ceci semble cohérent, car en ce qui concerne la condition initiale (CI), il n'y a que les hauteurs d'eau qui ont été fournies. Puisque les CI ont besoin de la cote initiale de la ligne d'eau (LE) et du débit, il a fallu mettre comme débit nul au CI pour démarrer le calcul. Ceci peut être la raison pour laquelle les modèles ne sont pas du tout calés aux premières heures. C'est pour cela qu'il est toujours pertinent de *warm up* ou laisser réchauffer le modèle afin d'éviter que ces données perturbent les conclusions.

Nous constatons qu'au fur et à mesure que le temps passe, les limnigrammes ont tendance à s'approcher aux marégraphes, ce qui permet de conclure, que l'impact des CI a été diffusé et il n'y a plus de répercussion sur le comportement du flux. Il est aussi pertinent de mettre en valeur la qualité des CI, car les modèles n'ont pas pris beaucoup de temps pour se réchauffer et s'adapter aux données enregistrées.

Il semble que tous les résultats non seulement des marégraphes, mais aussi des simulations, soient très proches des hauteurs attendues. Afin d'évaluer plus en détail l'exactitude (fidélité) et la précision (justesse) des données, il est proposé de réaliser une étude de l'erreur absolue comme la Figure 29 illustre.

Le graphique recueille plusieurs sources d'information importantes pour la compréhension globale du comportement et l'affectation de la marée sur l'écoulement. En premier lieu, il a été établi un nombre de quatre classes où les limites concernent aux quantiles de la variable en

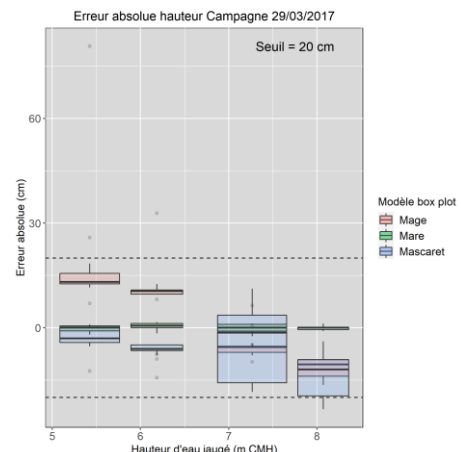


Figure 29. Erreur absolue des cotes de la campagne de mars 2017

analyse. Dans ce cas-là, la hauteur d'eau reportée dans les jaugeages.

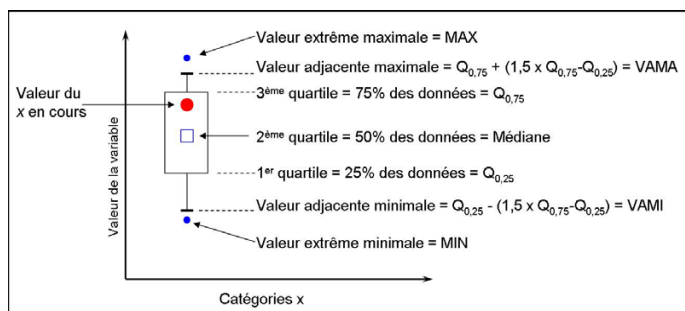


Figure 30. Lecture d'une boîte à moustache

erreurs triées par groupes des hauteurs d'eau, une analyse statistique a été proposée afin de mieux comprendre la dispersion ou la centralité des distributions des écarts aux données acquises issues des campagnes de jaugeage. A cette fin, une analyse via boîte à moustache est implémentée (Figure 30). Dans cette perspective, une boîte est créée en fonction des distinctes sources impliquées. Effectivement, dans la légende de la Figure 29, trois boîtes sont affichées, en rouge l'analyse pour le modèle Mage, en vert celui du marégraphe et en bleu l'étude des résultats issus du modèle Mascaret. De plus, une ligne pointillée en noir s'affiche à ± 20 cm, celle-ci indique l'intervalle dont l'erreur est acceptable.

Marégraphe

Tout d'abord, l'analyse se concentre sur la station limnigramme. Il est prévu que les résultats soient précis et exacts puisque cette mesure représente en temps réel le comportement de l'écoulement. En effet, les boîtes à moustache en vert dans la Figure 29 sont assez étroites, en d'autres termes ils représentent bien le comportement du flux.

Afin de mieux évaluer les données acquises par le marégraphe, l'analyse est faite seulement pour cette source comme il s'affiche sur la Figure 31. Après l'analyse des écarts absolus, le résultat est comme prévu. En d'autres termes, les médianes de chaque classe est autour du zéro, ce qui veut dire que la valeur enregistrée par le marégraphe est presque pareille à celle reportée par les jaugeages. D'ailleurs, étant donné que même s'il y a certains résultats qui s'éloignent du zéro, les écarts restent à l'intérieur de l'intervalle de confiance ou de tolérance qu'il a été octroyé à l'étude. Il faut remarquer le seuil d'acceptation proposé est discutable. De plus, en faisant l'hypothèse que cette mesure est la plus représentative du comportement réel du flux, il est possible de conclure que le marégraphe présente le vrai comportement de l'écoulement en temps réel.

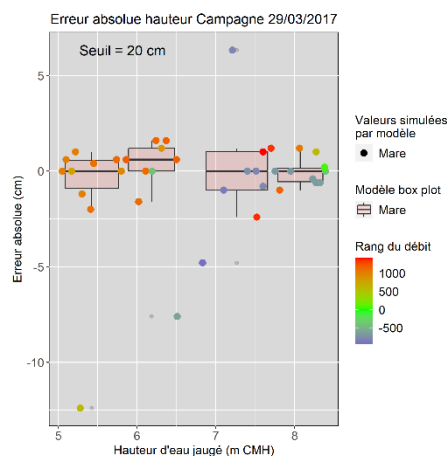


Figure 31. Erreur absolue des cotes issues du Marégraphe

Etant donné que l'analyse s'est effectuée seulement pour une source d'information, il est possible d'ajouter une information pertinente, notamment le débit. C'est pour cela qu'un dégradé de couleurs a été proposée pour reconnaître la gamme de débit qui a provoqué l'écart. En conséquence, les débits les plus petits s'affichent en bleu, tandis que les plus grands en rouge. Quand le débit s'approche à zéro, le code de couleur affecté est vert.

Mascaret

Dans cette même perspective, maintenant l'étude se focalisera sur les résultats issus du modèle Mascaret (Figure 32). En comparaison aux résultats du marégraphe, les médianes sont systématiquement au-dessous de l'écart nul, ce qui veut dire qu'en général le modèle tend à sous-estimer les hauteurs de la ligne d'eau. De plus, il est possible de conclure que les données à hauteurs faibles sont généralement très précises et exactes. Par contre, au fur et à mesure que les hauteurs deviennent de plus en plus élevées, l'erreur tend à diminuer sa précision et ensuite, diminuer aussi son exactitude.

D'un côté, pour les cotes entre sept (7) mètres sur la carte marine du Havre (CMH), même si la médiane est très près de l'écart nul, ce qui veut dire que les résultats sont fidèles (exacts), la précision ou la justesse diminue parce que la boîte devient plus large.

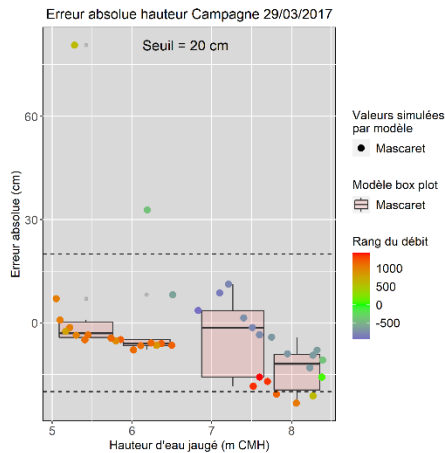


Figure 32. Erreur absolue des cotes issue du Mascaret

De plus, quand la marée arrive l'eau remonte vers l'amont (débit négatif) et d'après l'analyse effectuée, les simulations tendent à surestimer la cote de la LE et même si la majorité des résultats respecte l'intervalle de tolérance, il y a certaines valeurs qui peuvent être considérées aberrantes. En effet, le processus de passer d'un débit positif à un débit négatif d'un coup devient difficile à reproduire par le modèle. C'est pour cela que les deux valeurs aberrantes sont bien écartées du reste, car il s'agit de l'arrivée de la vague. En conclusion, il semble que les simulations du modèle Mascaret soient bien calées en hauteur.

Mage

Les résultats de l'analyse des simulations du modèle Mage s'affichent sur la Figure 33 (première figure). Il existe un écart systématique marqué entre les simulations et les jaugeages quand il s'agit de la descente de la vague et la remontée. En effet, à mesure que la hauteur d'eau diminue, l'écart est de plus en plus important, ce qui indique que le modèle a tendance à surestimer la hauteur d'eau.

En revanche, quand Mage essaie de représenter la montée de la vague, il tend à sous-estimer la hauteur d'eau. Pourtant, Mage modélise mieux la remontée que la descente de la vague. De toute façon, les médiantes de l'erreur absolue en hauteur restent toujours à l'intérieur l'intervalle de tolérance proposée, ce qui veut dire que le modèle est bien calé en hauteur.

De plus, il faut remarquer qu'en général les données sont justes et fidèles grâce à sa médiane et dispersion faible, ce qui permet de conclure que le modèle est capable de bien reproduire le comportement réel de la marée.

D'ailleurs, Mage tend à surestimer les données dans toutes les gammes de hauteur proposées, tandis qu'à débit faibles il sous-estime. Ceci est possible de s'interpréter à partir des codes couleurs affectées à chaque donnée à une hauteur d'eau comme la Figure 33 illustre.

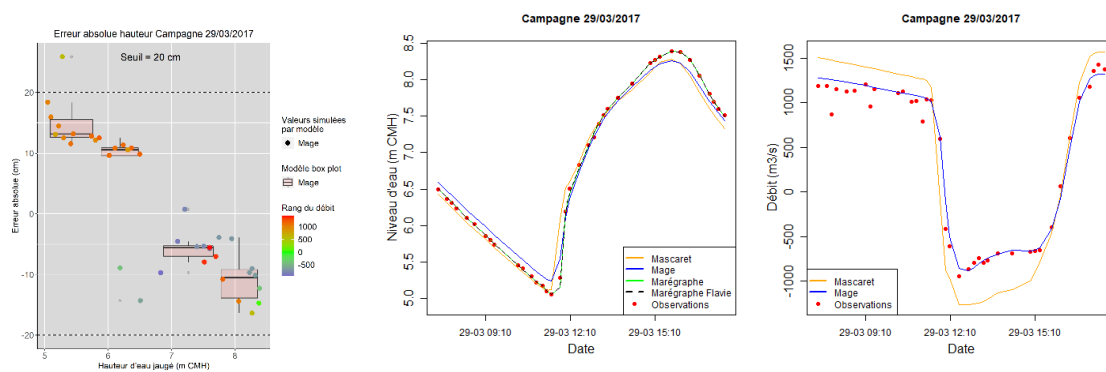


Figure 33. Box plot d'erreur absolue en hauteur (gauche), limnigramme (milieu) et hydrogramme (droite)

Donc, si l'analyse effectuée du côté gauche à droite, les hauteurs d'eau plus petites correspondent aux débits positifs plus faibles à la descente. Soudainement, sa trajectoire passe direct vers la coupure du débit nul, ce qui fait que le modèle maintenant passe de surestimer à sous-estimer les valeurs. Ensuite, quand le débit est négatif, pendant les premières minutes l'écart tend à l'écart nul. Toutefois, à mesure que le débit tombe de nouveau à zéro, l'erreur s'élève de nouveau. En effet, Mage a tendance à sous-estimer. Puis, quand le débit devient de nouveau aux valeurs positives, les écarts commencent à décroître progressivement en s'approchant de l'écart nul. Puis, il n'y a pas de jaugeage afin de suivre la trajectoire.

Cette dernière analyse sert à comprendre que Mage a des problèmes pour reproduire bien le comportement à faibles débits non seulement positifs, mais également négatifs. En revanche, Mage représente bien l'instant quand la vague arrive au point de mesure, ce sont des valeurs les plus près de l'écart nul. En conclusion, même s'il s'agit du même modèle avec le même paramétrage, Mascaret et Mage fournissent des résultats différents. Néanmoins, les deux modèles sont bien calés en hauteur.

7.2.4. Analyse du débit

L'étude se focalisera maintenant sur le débit. Les prélèvements des campagnes nous permettent aussi de confronter les données simulées par les différents modèles. En revanche, il n'y a pas de donnée de la marée qui peuvent être utilisées pour l'analyse comparative.

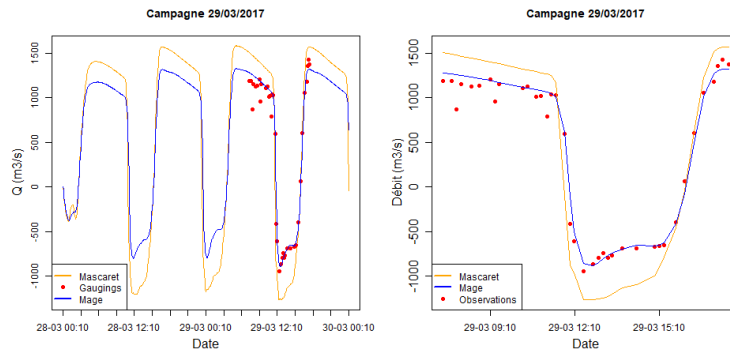


Figure 34. Hydrogramme lors du jaugeage

La Figure 34 illustre l'impact de la marée sur notre station de mesure. Effectivement, d'un coup le flux passe d'avoir un débit environ de $1000 \frac{m^3}{s}$ à $-800 \frac{m^3}{s}$ dans une période très courte de temps. Puis, le même comportement arrive après avoir passé quelques heures, mais à l'inverse. Autrement dit, la marée ne remonte plus et l'eau coule vers l'aval.

Il faut remarquer que dans la théorie le débit ne peut pas avoir des valeurs négatives puisqu'il s'agit d'une mesure physique. Pourtant, au sein de la présente étude, le signe du débit indique la direction vers laquelle le flux circule. A savoir, positive, l'écoulement coule de l'amont à l'aval alors que le débit négatif, la marée fait que le courant circule dans l'autre direction.

La première impression du graphique est la difficulté de Mascaret pour bien représenter le comportement réel du flux alors que Mage est plutôt bien calé en débit. A première vue, nous pouvons constater qu'au moment où l'écoulement coule de l'amont à l'aval, les deux modèles ont tendance à surestimer le débit. Néanmoins, quand la vague arrive à la station (changement de signe des valeurs du débit) provoque une chute soudaine des valeurs du débit. Ce comportement devient

un défi pour les modèles. Effectivement, Mascaret continue à surestimer tandis que Mage alterne entre sous-estimer et surestimer, mais c'est parce qu'il est très bien calé en débit.

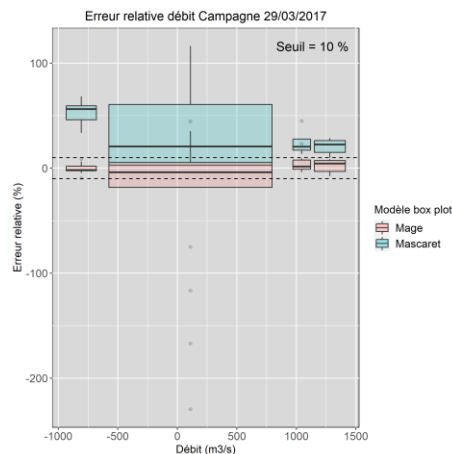


Figure 35. Erreur relative du débit lors du jaugeage

Le calcul de l'erreur relative est égal à la division entre la différence du débit enregistré par rapport au débit jaugé et le débit jaugé. Puisque l'erreur relative est fournie généralement en pourcentage, le résultat est multiplié par 100.

Afin de réaliser une étude comparative entre les deux modèles, il est proposé une étude de l'erreur relative de la variable en analyse. Pour mieux comprendre la distribution des erreurs, nous poursuivons à mettre en œuvre la boîte à moustache.

Le calcul de l'erreur relative est égal à la division entre la différence du débit enregistré par rapport au débit jaugé et le débit jaugé. Puisque l'erreur relative est fournie généralement en pourcentage, le résultat est multiplié par 100.

Une ligne pointillée est proposée vers 10 % afin de donner un intervalle de tolérance dans lequel les simulations seront

acceptées. Afin d'avoir une meilleure compréhension de la performance des modèles, une analyse séparément est effectuée ci-dessous.

Mascaret

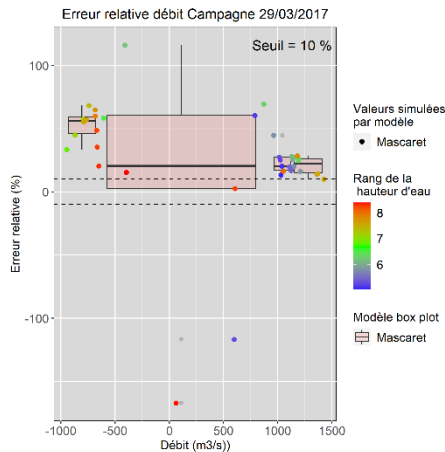


Figure 36. Erreur relative du débit issue de Mascaret

Le modèle a tendance à surestimer dans toutes les classes de débit. Néanmoins, il faut remarquer que sa performance augmente au fur et à mesure que le débit accroît et quand la direction de l'écoulement se dirige vers l'aval.

D'ailleurs, la répartition des percentiles est peu symétrique dans le sens que la deuxième classe couvre presque la moitié des valeurs. Ce qui est plutôt logique, car la majorité des mesures du débit reste soit à l'allégement de la vague ou la remontée. Autrement dit, parmi les débits jaugés, seulement certaines mesures ont été prises pendant la transition, car c'est un processus qui se produit rapidement.

En ce qui concerne les autres classes (1, 3 et 4), il semble que Mascaret est assez juste, mais ne pas très fidèle. En d'autres termes, le modèle a tendance à fournir des données du débit plutôt cohérent entre eux, mais ils sont décalés par rapport au débit attendu.

De plus, nous constatons le problème qui existe quand le débit traverse le débit nul. En effet, l'erreur relative augmente très vite ce qui perturbe l'analyse de la deuxième classe. Dans l'intention d'évaluer la capacité du modèle de reproduire la totalité de l'hydrogramme, il est proposé d'enlever le jaugeage dont le débit est très proche au débit nul et relancer l'analyse.

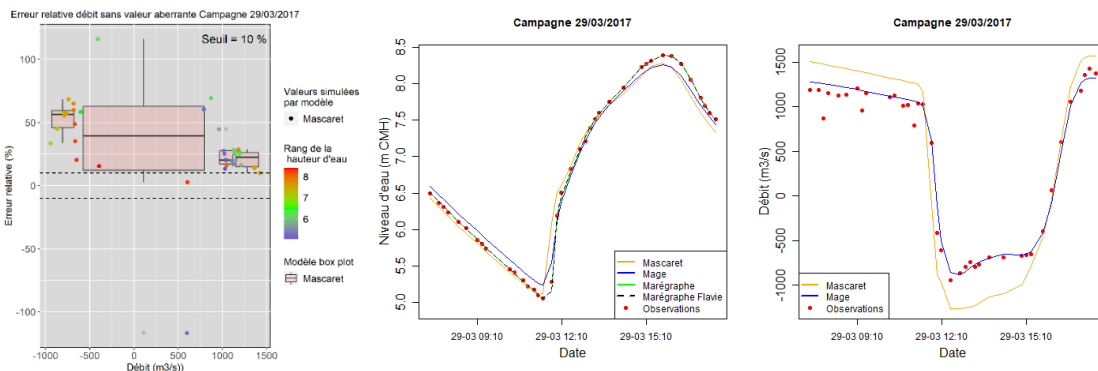


Figure 37. Erreur relative du débit sans valeur aberrante (gauche), limnigramme (milieu) et hydrogramme (droite)

Même si l'étude ne prend pas en compte la valeur aberrant, la boîte à moustache est encore assez large pour conclure que les erreurs de cette gamme de débits sont fidèles et justes. Au contraire, la médiane s'est déplacée de sorte qu'il soit plus loin de l'écart nul. En conclusion, entre les débits compris entre $-500 \frac{m^3}{s}$ à $750 \frac{m^3}{s}$ approximativement, il semblerait que le modèle a des problèmes pour reproduire les débits observés sur terrain. Ceci démontre la difficulté annoncée précédemment, car la vague arrive soudainement et ça provoque le changement du signe qui n'est pas facile à produire.

L'autout de savoir quelle est la hauteur d'eau à un certain débit, nous permet d'aller plus loin sur la compréhension du phénomène en cours. Par exemple, le modèle fournit des simulations plus performantes quand il reproduit la descente de la hauteur d'eau. Par contre, les valeurs minimales des hauteurs d'eau tendent à avoir une erreur relative énorme puisque le débit s'approche au débit nul.

Ensuite, au fur et à mesure que le débit commence à augmenter vers la direction amont (débit de plus en plus négatifs), et la cote d'eau de plus en plus grande, l'écart diminue. Néanmoins, quand le débit se dirige vers le débit nul et les hauteurs de la LE sont plus importantes, l'écart comment à réduire considérablement sauf avant d'arriver le débit nul. Ici, l'écart a tendance à s'élever amplement à cause des raisons exposées dernièrement.

Puis, dans la zone où le débit devient encore positif, le débit arrive à son point maximal et la hauteur d'eau tombe doucement, les erreurs ont tendance à se stabiliser sur un débit qui ne corresponde pas à l'attendu, mais qui ne diffère pas

beaucoup. En conclusion, le modèle Mascaret n'est pas très bien calé sur le débit.

Mage

La Figure 38 côté gauche illustre les résultats en prenant compte la totalité des jaugeages. Etant donné que le graphique est illisible, le même jaugeage enlevé sur Mascaret est retiré de cette analyse (Voir Figure 38 côté droite).

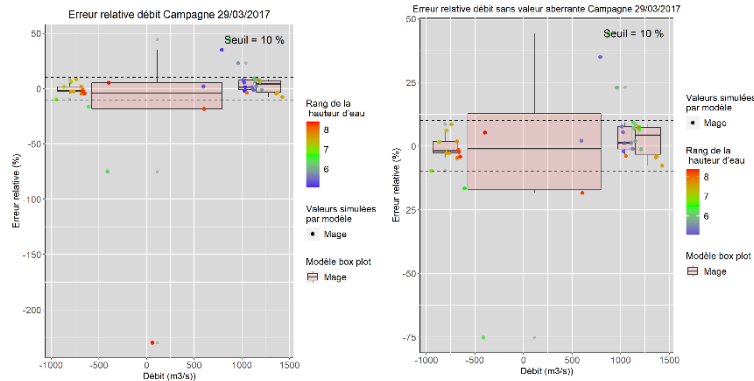


Figure 38. Erreur relative du débit (gauche) et résultats sans valeur aberrante issue du Mage

Il semble que Mage a moins de problèmes pour la réplication des débits attendus. Effectivement, les résultats de l'analyse de la première classe sont non seulement fidèles, mais également justes. La gamme suivante n'est pas très interprétable à cause de sa dispersion. Enfin, les deux derniers groupes sont moins performantes que la première gamme de débit analysée, mais ces groupes restent toujours à l'intérieur du seuil d'acceptation établi, ce qui indique que Mage est aussi bien calé en débit

En faisant l'accent sur les codes couleurs des données, nous pouvons constater que Mage reste bien calé à hauteurs non seulement élevées, mais également faibles. En effet, en général, les écarts restent à l'intérieur de l'intervalle de confiance sauf certaines valeurs qui dépassent le seuil. Néanmoins, le commun parmi ses données, ce sont des jaugeages qui se repèrent près du changement du débit (positif vers négatifs et à l'inverse). Par conséquent, ce sont des valeurs qui peuvent impacter numériquement parlant à cause de la division par une valeur nulle. Portant, l'incertitude non seulement sur la mesure, mais aussi sur l'effet de la marée à cet instant reste encore comme un défi pour prendre la mesure en temps réel et aussi pour le modèle de bien reproduire ce comportement.

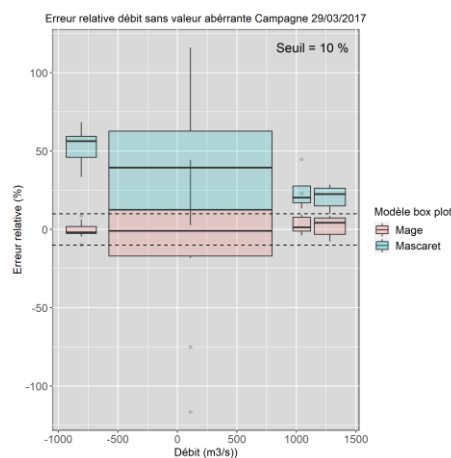


Figure 39. Erreur relative du débit sans valeur aberrante lors du jaugeage

Maintenant, les deux graphiques sans valeur aberrante se superposent avec l'objectif de conclure sur la performance d'un modèle par rapport à l'autre.

La Figure 39 superpose les deux résultats de l'analyse mise en place pour chaque modèle. Il est possible de conclure que Mascaret n'est pas calé en débit alors que Mage est bien calé. En effet, en négligeant la boîte du deuxième groupe, le reste des boîtes sont précises, mais inexactes. Par conséquent, il faudrait trouver des pistes qui nous amènent à trouver les raisons pour lesquelles Mascaret est bien calé en hauteur, mais ne pas en débit.

En revanche, Mage est très performance quand il se parle du débit. Effectivement, toutes les gammes du débit restent toujours à l'intérieur de l'intervalle de confiance.

Il faut remarquer aussi que le deuxième groupe reste ininterprétable à cause de la dispersion des résultats occasionné par la division sur le débit nul au moment d'estimer l'écart relatif.

7.2.5. Analyse de la vitesse

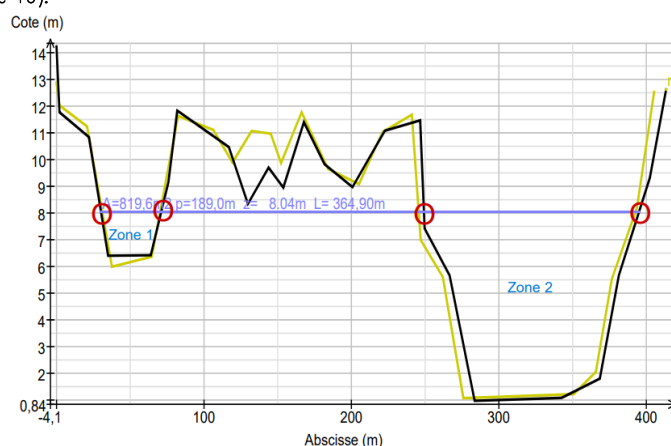
Etant donné que le débit et la vitesse de l'écoulement sont deux variables directement corrélées, la dynamique de la vitesse se ressemble beaucoup à celle du débit. C'est pour cela que l'analyse effectuée précédemment peut nous aider à analyser si la bathymétrie a un enjeu pertinent sur le comportement hydraulique ou, au contraire, son impact est négligeable.

Bien que les modèles fournissent les valeurs de la vitesse par chaque pas de temps, il n'y a pas encore valeurs avec qui elle soit comparable. En effet, le jaugeage prélève seulement hauteur de la LE et le débit par chaque pas de temps. Toutefois, connaissant la bathymétrie du terrain et la cote de la LE, c'est possible d'estimer la surface mouillée. Par conséquent, il est possible de calculer la vitesse comme la division du débit entre la surface mouillée.

Afin de calculer la surface mouillée, il va falloir pour chaque pas de temps, calculer la surface mouillée en prenant en compte chaque hauteur d'eau par chaque coordonnée de la section transversale. C'est pourquoi une fonction sur R a été développée pour qu'il soit possible d'estimer non seulement la surface mouillée, mais également le périmètre mouillé.

Les variables d'entrée seront les hauteurs d'eau mesurées par chaque pas de temps en mètres et la géométrie du transect en profil AC (Abscisse, cote) en mètres. Donc, la routine fera un processus itératif en suivant les prochaines étapes. Il faut remarquer que cette routine est valable seulement quand le flux ne déborde pas et les abscisses sont croissantes.

1. Lecture des hauteurs d'eau jaugées, les abscisses et les cotes du terrain.
2. Un certain nombre des points fictifs sont créés sur la projection du terrain puisque nous connaissons la valeur de la hauteur d'eau, mais ne pas son abscisse. Il faut éclaircir que le nombre des points va dépendre de la quantité de zones inondées qu'il existe entre le terrain et la ligne d'eau. Effectivement, il y en aura deux par chaque zone (Voir la Figure 40).



* Le profil ne correspond pas à celui du Rouen, il a été choisi, à titre d'exemple, afin de présenter le cas où le flux inonde plusieurs chenaux

Figure 40. Exemple d'une hauteur d'eau jaugée à un certain pas de temps

3. Les deux coordonnées les plus proches à cette hauteur d'eau sont repérées. L'une de deux se trouve immergée tandis que l'autre se trouve émergée.
4. En faisant l'hypothèse qu'entre deux points du terrain, le niveau du sol suit est linéaire, c'est possible d'interpoler les coordonnées afin de calculer l'abscisse de la cote de la LE sur le terrain.
5. Etant donné que pour chaque cote il existe une abscisse associée, il est possible de passer à calculer le périmètre et la surface mouillée. Afin d'illustrer le processus réalisé la Figure 41 est présentée. Ceci montre le découpage en sous-sections. La première figure sera la plupart du temps un triangle. Ensuite, le tronçon suivant à analyser sera la somme d'un rectangle et un triangle et ainsi de suite. Le calcul de la surface mouillée est effectué comme la somme des aires de chaque section. L'estimation du périmètre mouillé est réalisée comme la racine carrée de la somme des différences des abscisses et des cotes (théorème de Pythagore). Même si la figure ne s'agit pas d'un triangle sinon d'un rectangle, le même calcul est pertinent, car la distance sera la différence entre les abscisses.

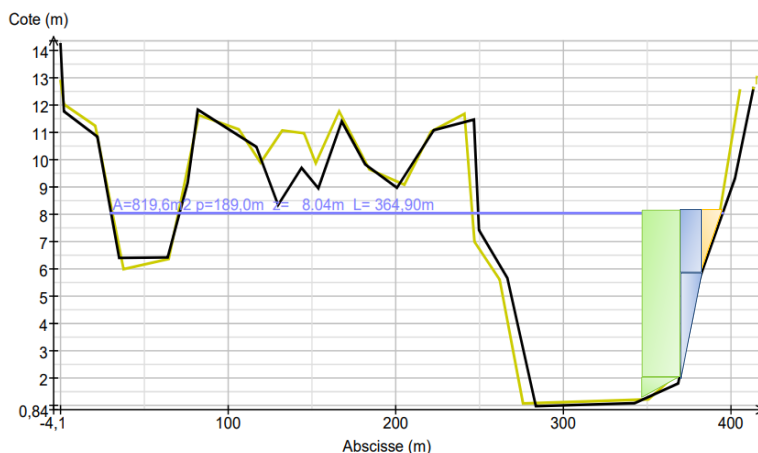


Figure 41. Division en sous-sections pour l'estimation du périmètre mouillé et la surface mouillée

6. L'estimation du rayon hydraulique est aussi possible de réaliser, car il est le résultat de la division de la section mouillée entre le périmètre mouillé. Enfin, le tableau suivant est proposé afin de stocker l'information :

Date	Hauteur d'eau jaugée ou simulée (m)	Périmètre mouillée (m)	Surface mouillée (m ²)	Rayon hydraulique (m)
29/03/2017 07:29	6.50	145.8736	1473.092	10.0984

Tableau 10. Tableau résultat du calcul de périmètre mouillé, la surface mouillée et le rayon hydraulique

Puisque l'information de la surface mouillée est disponible, il est procédé d'estimer la vitesse de chaque observation sur la campagne de jaugeage par chaque pas de temps. Les résultats s'affichent sur le côté gauche de la Figure 42.

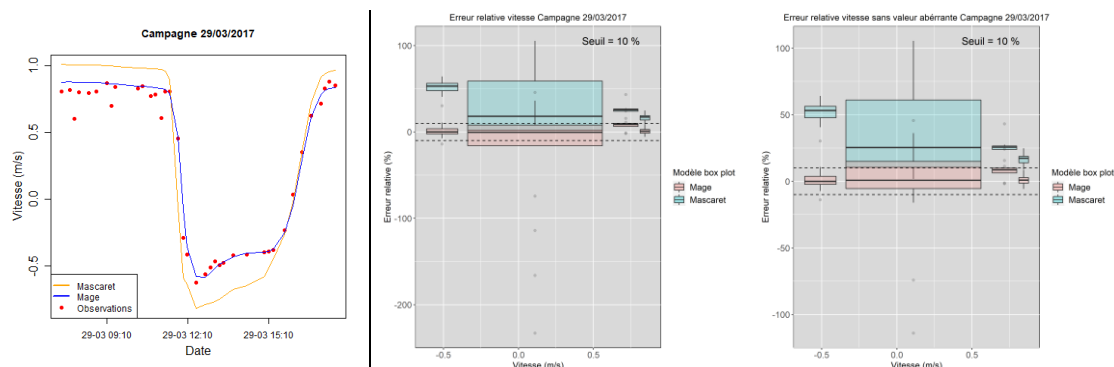


Figure 42. Vitesse lors du jaugeage (gauche), erreur relative de la vitesse (milieu) sans valeur aberrante (droite) des deux modèles

Comme pour le cas précédent, les erreurs ont la même tendance que celle de l'analyse du débit. Autrement dit, Mascarret tend à surestimer tout au long des gammes de débit en réduisant l'écart quand la vitesse est de plus en plus grande. En revanche, Mage reproduit bien les jaugeages.

Malgré que l'analyse ne comprenne pas la valeur aberrante, la deuxième gamme de débit reste peu interprétable comme le cas précédent. Une approche plus précise est nécessaire pour mieux comprendre les résultats.

Mascarret

En prenant en compte l'analyse des écarts du débit, non seulement les boîtes à moustaches se ressemblent, mais aussi la distribution des codes couleurs des hauteurs d'eau est similaire (Figure 43). Une fois de plus, c'est validé la relation existant entre les deux variables analysées, ce qui veut aussi dire que l'étude est cohérente.

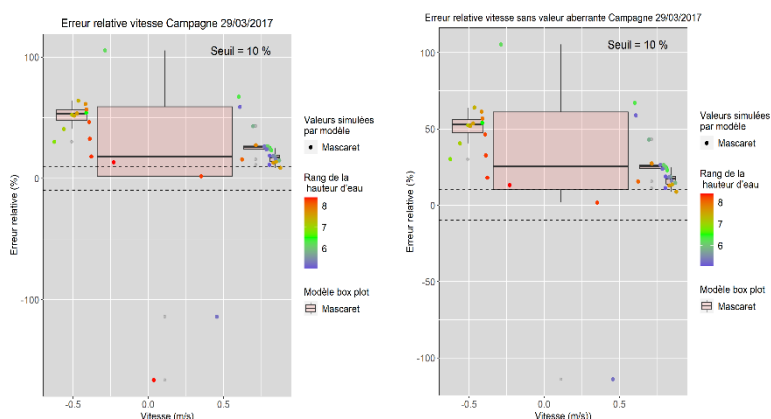


Figure 43. Erreur relative de la vitesse (gauche) sans valeur aberrante (droite) issue du Mascarret

Nous constatons que Mascarret a tendance à surestimer les données quand la marée arrive au point de mesure. La médiane de l'erreur relative à cette gamme de débits reste élevée (approximativement 50 %). Ensuite, la gamme suivante n'est pas très interprétable tandis que les deux dernières gammes sont très justes, mais peu fidèles. En d'autres termes, Mascarret réussit à mieux reproduire la descente malgré qu'il ne soit pas acceptable.

En conclusion, le modèle interprète mieux l'allongement de la vague que la montée. De plus, il faut remarquer que l'erreur en débit est plus grande qu'en vitesse.

Mage

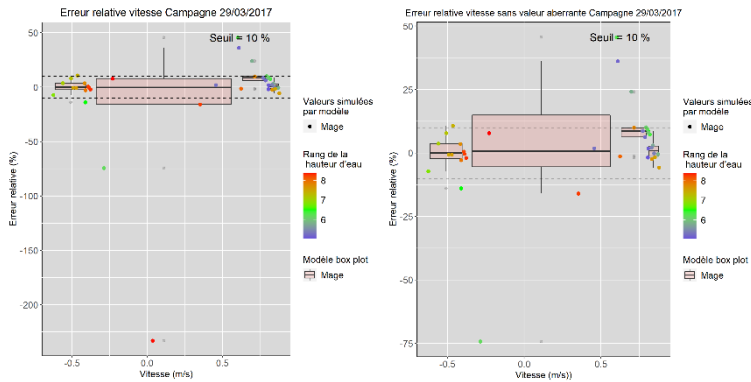


Figure 44. Erreur relative de la vitesse (gauche) sans valeur aberrante (droite) issue du Mage

Une fois encore, la trajectoire de l'erreur ressemble à celle du débit, indiquant que l'analyse est cohérente. De même, les résultats obtenus sont très performants sur les différentes gammes de vitesse.

Pour aller plus loin, une comparaison entre les bathymétries du profil a été faite afin de comparer les différences entre le profil fourni à Mascaret et Mage, car il faut se rappeler qu'avant de rendre le profil sur Mage, une purge a été faite afin que le modèle puisse être lancé, en établissant 24 points de la bathymétrie qui servent à décrire le profil.

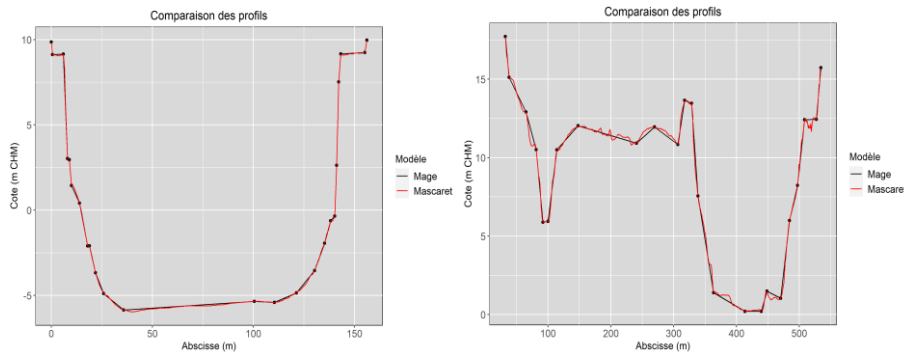


Figure 45. Comparaison des sections transversales à Rouen sur Mage et Mascaret (gauche) et au PK 6293 (droite)

Après avoir réalisé l'analyse des sections transversales à Rouen, comme la Figure 45 affiche, il n'y a pas de changement considérable du transept suite la purge. Puisque la section de la zone d'étude suit plutôt une forme simple, un autre profil a été analysé à titre d'exemple pour évaluer la performance de la purge de Mage. En conclusion, nous constatons que même si le terrain est un peu compliqué, la purge de Mage reste plutôt bien puisqu'il réussit à bien décrire la section transversale.

7.2.6. Analyse du rayon hydraulique

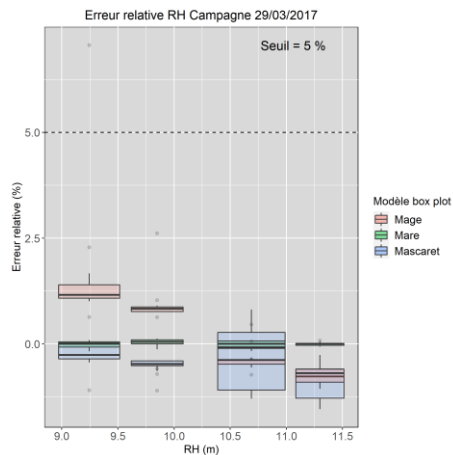


Figure 46. Erreur relative du RH

Maintenant, nous nous intéressons à l'écart relatif du RH afin de pouvoir tirer des conclusions qui peuvent nous donner des pistes pour découvrir la raison pour laquelle les résultats des simulations sont différents. Le RH a été calculé pour toutes les sources d'information y compris les jaugeages.

La Figure 46 affiche l'écart relatif des toutes les sources d'information, autrement dit, les deux modèles et la marée. Un intervalle de tolérance est fixé à 5 % afin de rester le plus restrictif possible.

En analysant les écarts de la marée, elles tendent à être nulles, ce qui veut réaffirmer que le marégraphe est une très bonne source d'information dont il est possible s'appuyer pour comparer les résultats. En ce qui concerne les modèles, une analyse plus en détail est nécessaire pour arriver à meilleures conclusions.

Mascaret

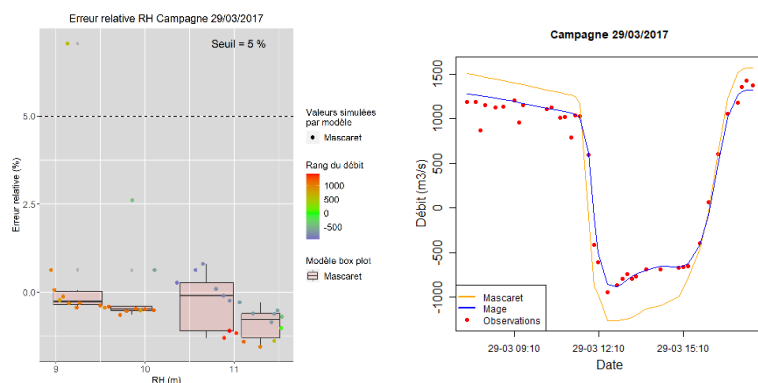


Figure 47. Erreur relative du RH (gauche) la possible trajectoire de l'erreur (milieu) et hydrogramme issue du Mascaret

atypique.

Ensuite, l'écoulement coule vers l'amont, dans ce cas-là, à mesure que le débit est plus important, le RH et l'écart augmentent. Enfin, quand le débit remonte, le RH diminue en même temps que l'écart. Il faut remarquer que la tendance générale du modèle est de sous-estimer le RH par rapport à l'information estimée à partir des jaugeages.

Mage

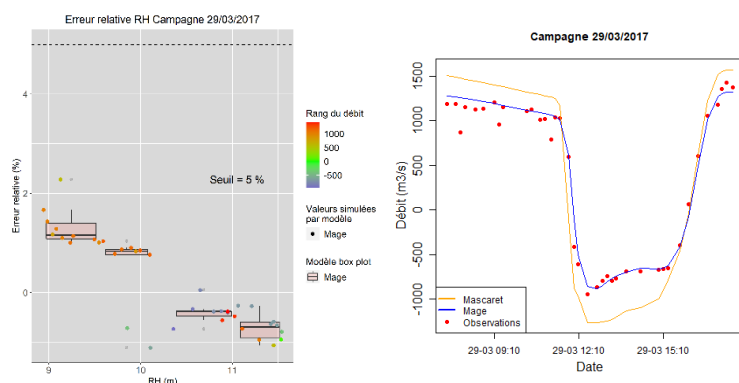


Figure 48. Erreur relative du RH (gauche) la possible trajectoire de l'erreur (milieu) et hydrogramme issue du Mage

toute façon, puisque les résultats restent toujours à l'intérieur de l'intervalle de confiance, il est possible de conclure que Mage est aussi calé en RH.

Si nous nous concentrons sur l'information apportée par le débit, il est mis en évidence qu'à mesure que le débit diminue, la médiane de l'écart relatif est de plus en plus importante. Ensuite, quand juste avant que le débit tombe vers zéro, la différence arrive à des valeurs les plus hautes et d'un coup l'erreur tombe vers l'écart nul très vite. Néanmoins, quand le débit est négatif, il est possible de voir qu'au moment d'arriver à la valeur la plus grande possible, l'erreur atteint la valeur la plus près de l'écart nul. Puis, au fur et à mesure que le débit tombe de nouveau vers zéro, les écarts relatifs commencent aussi à augmenter légèrement. Dans ce cas-là, le modèle a tendance à sous-estimer. Après, le débit devient encore positif et nous constatons que les écarts diminuent progressivement.

En résumé, Mage surestime systématiquement le calcul du RH pour des valeurs comprises entre neuf (9) et à peu près dix (10) mètres. Ensuite, il sous-estime pour les autres gammes du RH. D'après l'analyse de la hauteur d'eau, il réaffirme l'hypothèse que le décalage est directement lié à l'écartement des hauteurs d'eau simulées. Effectivement, les deux trajectoires de l'erreur se ressemblent beaucoup, car les deux variables sont corrélées.

D'après la Figure 47, il est possible de conclure qu'en général, le RH simulé par le modèle est plutôt bien calé dans toutes les gammes de débit. En suivant la trajectoire de l'erreur en fonction du débit, nous constatons qu'à mesure que le débit passe de positif à négatif, non seulement l'écart, mais aussi le RH devient de plus en plus petits. Pourtant, quand le débit passe par zéro, l'erreur tend à s'élever considérablement sans punir la boîte à moustache, car il s'agit d'une valeur

Le premier graphique de la Figure 48 montre que l'écart relatif augmente à mesure que le RH devient de plus en plus petit. Pour ce cas, il a tendance à surestimer. Par contre, pour des valeurs du RH plus grandes, l'erreur commence aussi à augmenter. Pourtant, le modèle sous-estime sur ce cas.

Il faut mettre l'accent sur la dispersion des données, puisqu'elle est quasiment nulle. Néanmoins, en ce qui concerne l'exactitude, il est perceptible qu'il existe une erreur systématique qui provoque cette inexactitude. De

7.3. Implémentation d'un nouveau modèle 'MAGE' sous BaM

Le code de calcul est contrôlé par des fichiers de configuration au format texte pour piloter les différentes fonctionnalités de l'outil. L'objectif de cette section est d'illustrer les fichiers requis avec leur contenu. Le présent rapport se concentre sur les fichiers de configuration propres au modèle MAGE. Le guide détaillé des fichiers de configuration se trouve dans Renard (2017) ou sur <https://github.com/BaM-tools/BaMdocs>.

Dans le code Fortran de BaM, chaque modèle se présente sous la forme d'un module Fortran avec une interface imposée, assurant le bon « branchement » du modèle désiré. Les modèles les plus simples peuvent être réimplémentés pour se conformer à cette interface, mais cela serait totalement contre-productif dans le cas d'un modèle complexe tel que MAGE. Nous avons donc essentiellement implémenté un adaptateur (« wrapper ») autour du code MAGE existant. Plus précisément, cet adaptateur prend en entrée les paramètres θ du modèle (coefficients de rugosité), les écrit au format attendu par MAGE, lance l'exécutable pour réaliser les calculs puis lit les résultats pour les renvoyer en sortie. Le code résultant peut être consulté à l'adresse https://github.com/BaM-tools/BaM/blob/main/src/Models/MAGE_model.f90

7.3.1. Contrôleur général (Config_BaM.txt)

Ce fichier permet d'établir l'espace de travail où sont stockés non seulement les fichiers de configuration propre au modèle en question, mais aussi les résultats. *BaM* a forcément besoin de ce fichier pour être lancé. Ce fichier doit impérativement être localisé dans le même dossier que l'exécutable BaM. En revanche, tous les autres fichiers de configuration seront placés dans l'espace de travail (workspace).

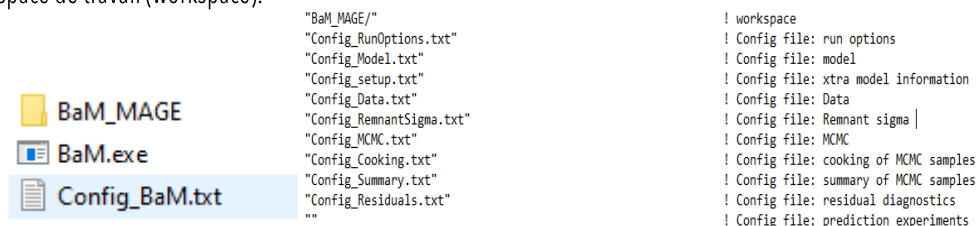


Figure 49. Espace de travail (à gauche) et contenu du fichier Config_BaM.txt (à droite)

Ce qu'il faut toujours retenir dans ce fichier est que la première ligne fait référence à l'espace du travail du modèle à lancer.

7.3.2. Contrôle des actions que BaM doit exécuter (Config_RunOptions.txt)

Les actions à effectuer sur *BaM* sont affichées dans ce fichier. Il faut lui donner une réponse vrai/faux afin d'activer ou désactiver une action. Il faut respecter le format (.true./false.). La signification de chaque ligne est donnée ci-après :

- Ligne 1 : simulation MCMC des paramètres à estimer ;
- Ligne 2 : résumé statistique des simulations MCMC ;
- Ligne 3 : analyse des résidus, i.e. comparaison des simulations du modèle avec les données de calibration
- Ligne 4 : prédictions et propagation des incertitudes

```
.true.    ! Do MCMC?  
.true.    ! Do MCMC summary?  
.true.    ! Do Residual diagnostics?  
.false.   ! Do Predictions?
```

Figure 50. Contenu du fichier Config_RunOptions.txt

En général, le lancement de *BaM* s'effectue en deux étapes. La première étape réalise l'estimation, ce qui indique l'activation des trois premières lignes. La deuxième étape porte sur la prédiction et pour ce faire, il faut désactiver les trois premières lignes et activer seulement la dernière. Il faut toujours faire dans ce sens, car la deuxième étape a besoin des fichiers MCMC préalablement créés.

7.3.3. Configuration du couplage MAGE-BaM (Config_setup.txt et fichiers MAGE)

Ce fichier permet de fournir à BaM les informations nécessaires pour contrôler MAGE. La première ligne de la Figure 51 donne le chemin vers l'exécutable MAGE. La seconde ligne donne le dossier du projet MAGE, contenant tous les fichiers issus de MAGE. La troisième ligne donne le nom du fichier de configuration principal de MAGE, nommé *REP file* (Figure 52). Effectivement, les rectangles en rouge indiquent les fichiers dont BaM a besoin pour lancer l'analyse Bayésienne.

```
! /home/brenard/BEN/GitHub/MAGE/mage*           ! Mage executable
! /home/brenard/BEN/GitHub/BaM/tests/BaM_MAGE/Mage_Seineav3_0/' ! Project directory
! 'Seineav3.REP'                                 ! REP file
```

Figure 51. Contenu du fichier Config_setup.txt

```
confirmation=non
TAL Seineav3.TAL
MIN Seineav3.MIN
TIT Seineav3.TIT
GEO Seineav3.GEO
DEV Seineav3.DEV
NUM Seineav3.NUM
RUG Seineav3.RUG
HYD Seineav3.HYD
INI Seineav3.INI
LIM Seineav3.LIM
TRA Seineav3.TRA
BIN Seineav3.BIN
ERR Seineav3.ERR
ENV Seineav3.ENV
CSV_R_comp_29m_q_2_41568_1_300
```

Figure 52. Contenu du REP file

La figure ci-dessous illustre les contenus des fichiers qui sont utilisés par BaM pour contrôler MAGE. Le RUG file contient les coefficients de Strickler (paramètres θ) qui sont modifiés par BaM. Le CSV file contient les résultats des simulations de MAGE, qui sont lus par BaM comme variables de sorties. Il est possible d'utiliser plusieurs CSV files, et donc d'avoir plusieurs variables de sorties (par exemple, hauteurs et débits à plusieurs sites).

***** STRICKLERS *****					Temps	Débits
*Bif	x deb	x fin	K min	K moy		
K 1	0.	5064.	39.83	10.00	0.000	0.000
K 2	5064.	16823.	19.63	10.00	0.083	-20.957
K 2	16823.	51186.	26.11	10.00	0.167	-95.319
K 2	51186.	65055.	30.33	10.00	0.250	-149.710
K 2	65055.	97091.	53.70	10.00	0.333	-196.478
K 2	97091.	111227.	52.27	10.00	0.417	-229.715
K 2	111227.	137983.	37.26	10.00	0.500	-252.923
					0.583	-275.966
					0.667	-298.085
					0.750	-318.447

Figure 53. Contenu du RUG file (à gauche) et CSV file (à droite)

7.3.4. Configuration du modèle (Config_Model.txt)

Ce fichier contient toutes les propriétés du modèle à caler. Chaque ligne est répertoriée ci-dessous :

- Ligne 1 : identifiant du modèle à lancer, car plusieurs modèles sont disponibles sur l'outil ;
- Ligne 2 : nombre de variables d'entrée. Dans le cas d'étude, il n'y a aucun variable d'entrée. Néanmoins, la façon du codage de l'outil, il ne permet pas d'avoir la valeur Nulle comme entrée. Même si le modèle comme tel n'a pas besoin de variable, il faut lui spécifier 1 ;
- Ligne 3 : nombre de variables de sortie. Il s'agit des observations auxquelles les simulations seront comparées, et correspond donc au nombre de CSV files spécifiés dans le REP file de MAGE. En premier lieu, il a été affecté la valeur de 1, car le calage s'est fait seulement avec les débits jaugés dans les campagnes des jaugages ;
- Ligne 4 : nombre de paramètres à estimer via une approche Bayésienne. Pour le cas d'étude, il faut se souvenir qu'il y aura toujours deux coefficients de Strickler (lit mineur et lit majeur) à caler pour chaque tronçon défini. Le cas utilisé pour le premier calage utilise seulement 7 tronçons, c'est pour cela que le nombre de paramètres est égal à 14 ;
- Ligne 5 : pour chaque paramètre, un bloc de 4 lignes composé de :
 - a) Nom du paramètre. K_{\min_i} pour le coefficient de rugosité du lit mineur du tronçon « i » et K_{\maj_i} pour le lit majeur ;
 - b) Valeur initiale du coefficient de Strickler ;

- c) Distribution a priori. Plusieurs distributions sont disponibles sur BaM, mais pour un coefficient de Strickler positif, la distribution Log-Normale semble une bonne approche ;
- d) Paramètres de la distribution a priori (séparés par des virgules). Puisque la distribution est un Log-Normale, les paramètres sont la moyenne et écart-type du log (népérien) du Ks. Ainsi, si un Ks de 40 est la valeur jugée la plus probable, il faut lui appliquer le logarithme népérien ($\ln(40) \approx 3.7$) pour spécifier le premier paramètre. Le second peut être interprété comme une incertitude-type relative (le 0.5 ci-dessous correspond donc à une incertitude-type a priori d'environ (50%) ;

Dans *BaM*, il est aussi possible de fixer un paramètre à sa valeur initiale via la pseudo-distribution 'FIX'. Il faut remarquer qu'après la pseudo-distribution, il est nécessaire de laisser une ligne blanche dans la quatrième ligne de chaque bloc paramètre.

Ces étapes se répètent autant des fois qu'indiqué par le nombre de paramètres.

```
["MAGE"                ! Model ID
1                      ! nX: number of input variables
1                      ! nY: number of output variables
14                     ! nPar: number of parameters theta
"Kmin1"                ! Parameter Name
11.0                   ! Initial guess
'LogNormal'            ! Prior distribution
3.7,0.5                ! Prior parameters
"Kmaj1"                ! Parameter Name
10.                    ! Initial guess
'FIX'                  ! Prior distribution
                       ! Prior parameters
```

Figure 54. Contenu du fichier *Config_Model.txt*

7.3.5. Configuration de l'inférence (*Config_Data.txt* et *Config_RemnantSigma.txt*)

Pour l'estimation des paramètres, il faut établir les données utilisées avec leur incertitude associée. Une liste plus détaillée est donnée ci-après :

- Ligne 1 : chemin d'accès au fichier de données. Ce fichier contient les valeurs des observations accompagnées ou pas de leurs incertitudes.
- Ligne 2 : nombre de lignes d'en-tête ;
- Ligne 3 : nombre de lignes et donc d'observations dans le fichier. Une contrainte de BaM est que toutes les variables d'entrée/sortie doivent utiliser la même grille temporelle. Toutes les colonnes doivent donc avoir la même taille ;
- Ligne 4 : nombre de colonnes dans le fichier ;
- Ligne 5 : colonne(s) contenant les variables d'entrée (autant de colonnes que de variables d'entrée, séparées par des virgules). Dans le présent cas d'étude, le temps a été sélectionné (même s'il n'est pas vraiment une variable d'entrée) comme variable pour organiser l'information des jaugeages ;
- Ligne 6 : colonne(s) contenant l'écart-type des erreurs non-systématiques pour les variables d'entrée. La valeur 0 peut être utilisée si l'on souhaite faire l'hypothèse que toutes ces erreurs sont nulles [recommandé];
- Ligne 7 : colonne(s) contenant l'écart-type des erreurs systématiques pour les variables d'entrée. La valeur 0 peut être utilisée [recommandé];
- Ligne 8 : colonne(s) contenant l'index des erreurs systématiques pour les variables d'entrée. La valeur 0 peut être utilisée [recommandé];
- Ligne 9 : colonne(s) contenant les variables de sortie. Pour le premier calage, il s'agit seulement du débit jaugé issus de la campagne de jaugeages ;
- Ligne 10 : colonne(s) contenant l'écart-type des erreurs non-systématiques pour les variables de sortie. Elle correspond à l'incertitude-type du jaugeage. Néanmoins, il n'y avait pas d'information là-dessus et c'est pourquoi une incertitude relative de 5% a été affectée sur l'ensemble des jaugeages;
- Ligne 11 : colonne(s) contenant l'écart-type des erreurs systématiques pour les variables de sortie. La valeur 0 peut être utilisée [recommandé];
- Ligne 12 : colonne(s) contenant l'index des erreurs systématiques pour les variables de sortie. La valeur 0 peut être utilisée [recommandé].

```

'/home/brenard/BEN/GitHub/BaM/tests/BaM_MAGE/Seineav3.BAD'          !!! Absolute path to data file
1      !!! number of header lines
498    !!! Nobs, number of rows in data file (excluding header lines)
4      !!! number of columns in the data file
1      !!! columns for X (observed inputs) in data file - comma-separated if several
0      !!! columns for Xu (random uncertainty in X, EXPRESSED AS A STANDARD DEVIATION - use 0 for a no-error assumption)
0      !!! columns for Xb (systematic uncertainty in X, EXPRESSED AS A STANDARD DEVIATION - use 0 for a no-error assumption)
0      !!! columns for Xb_idx (index of systematic errors in X - use 0 for a no-error assumption)
3      !!! columns for Y (observed outputs) in data file - comma-separated if several
4      !!! columns for Yu (uncertainty in Y, EXPRESSED AS A STANDARD DEVIATION - use 0 for a no-error assumption)
0      !!! columns for Yb (systematic uncertainty in Y, EXPRESSED AS A STANDARD DEVIATION - use 0 for a no-error assumption)
0      !!! columns for Yb_idx (index of systematic errors in Y - use 0 for a no-error assumption)

```

Figure 55. Contenu du fichier Config_Data.txt

Les variables de sorties font référence pour le premier calage aux débit jaugés à la campagne de jaugeages de mars 2017. A terme, l'objectif est de pouvoir caler en fonction non seulement des jaugeages, mais aussi du marégraphe sur les stations où l'information est disponible. Le contenu d'un fichier de données possible est montré ci-après.

```

"Temps";"Débits";"Debit_jauge";"Incertitude_jaugeage"
0;0;-9999;-9999
0.083;-20.975;-9999;-9999
0.167;-95.78;-9999;-9999
0.25;-149.303;-9999;-9999
0.333;-203.48;-9999;-9999
0.417;-237.651;-9999;-9999
0.5;-264.599;-9999;-9999
0.583;-291.399;-9999;-9999
0.667;-316.949;-9999;-9999
0.75;-340.351;-9999;-9999
0.833;-360.694;-9999;-9999
0.917;-375.797;-9999;-9999
1;-383.166;-9999;-9999
1.083;-381.879;-9999;-9999

```

Figure 56. Contenu du fichier Seineav3.BAD

En ce qui concerne l'organisation du fichier, il s'appuie sur l'exportation des résultats issus de MAGE, c'est pour cela qu'il est similaire au fichier « .csv » précédemment mentionné. Même si BaM n'as pas besoin d'une variable d'entrée, il faut lui donner un paramètre qui permet d'organiser les observations, dans le cas présent, la variable affectée est le temps.

La colonne suivante n'est pas utilisée. En revanche, la troisième et quatrième colonne font référence à la campagne de jaugeage. Effectivement, la troisième correspond au débit jaugé alors que la suivante fait référence à l'incertitude associée. Etant donné qu'il faut fournir d'information à chaque pas de temps et il n'y a pas suffisamment de jaugeages tout au long du temps de simulation, il est possible de donner la valeur de « -9999 » afin de dire qu'aucune observation est liée à ce pas de temps.

De plus, il faut spécifier un modèle d'erreurs structurelles pour chaque variable de sortie. L'explication s'effectue ci-après :

- Ligne 1 : identifiant du modèle d'erreurs structurelles ('Constant', 'Linear', 'Exponential' ou 'Gaussian');
- Ligne 2 : nombre de paramètres du modèle d'erreurs structurelles ;
- Ligne 3 : pour chaque paramètre, un bloc de 4 lignes composé de :
 - a) Nom du paramètre ;
 - b) Valeur initiale ;
 - c) Distribution a priori ;
 - d) Paramètres de la distribution a priori (séparés par des virgules).

```

'Linear'          ! Function f used in sdev=f(Qrc)
2                ! Number of parameters gamma for f
"intercept"      ! Parameter Name
0.01             ! Initial Guess
'Uniform'        ! Prior distribution
0,100000        ! Prior parameters
"slope"         ! Parameter Name
0.60            ! Initial Guess
'Uniform'        ! Prior distribution
0,100000        ! Prior parameters

```

Figure 57. Contenu du fichier Config_RemnantSigma.txt

7.3.6. Configuration des simulations MCMC (Config_MCMC.txt et Config_Cooking.txt)

Le fichier Config_MCMC.txt sert à régler les propriétés de l'algorithme MCMC alors que l'autre fichier établit les conditions du brûlage et affinage des simulations. L'explication pour le premier fichier est la suivante (voir Renard, B (2017) pour plus de détails):

- Ligne 1 : nom du fichier où seront sauvegardées les simulations MCMC ;
- Ligne 2 : nombre de simulations entre chaque adaptation ;
- Ligne 3 : nombre de cycles d'adaptation ;
- Ligne 4 : taux d'acceptation minimal ;
- Ligne 5 : taux d'acceptation maximal ;
- Ligne 6 : facteur de diminution de l'écart-type de saut ;
- Ligne 7 : facteur d'augmentation de l'écart-type de saut ;
- Ligne 8 : option pour la spécification de l'écart-type de saut initial. L'écart-type de saut initial est égal à un facteur fois la valeur absolue de la valeur initiale du paramètre. Si option=0, ce facteur est identique pour tous les paramètres. Si option=1, ce facteur est spécifié individuellement pour chaque paramètre ;
- Ligne 9 : ligne cosmétique ignorée ;
- Ligne 10 : facteur si option=0 ;
- Ligne 11 : facteurs individuels pour θ si option=1 ;
- Ligne 12 : facteurs individuels pour γ si option=1.

En ce qui concerne le post-traitement des simulations, il est divisé en deux étapes, le brûlage et l'affinage qui seront expliqués par la suite :

- Brulage (« burn »): on efface le début des simulations, afin de laisser le temps à l'algorithme MCMC de converger ;
- Affinage (« slim »): sur les simulations restant après brulage, on ne conserve qu'une simulation toutes les X pour diminuer le volume de stockage et les temps de calculs ultérieurs

Pour ce faire, il faut régler le fichier Config_Cooking.txt et l'explication s'illustre ci-dessous :

- Ligne 1 : nom du fichier où seront sauvegardées les simulations MCMC « dégraissées »;
- Ligne 2 : facteur de brulage ;
- Ligne 3 : facteur d'affinage.

```
!Results_MCMC.txt" ! File name
10 ! NAdapt
100 ! Ncycles
0.1 ! MinMoveRate
0.5 ! MaxMoveRate
0.9 ! DownMult
1.1 ! UpMult
0 ! Mode for setting the initial Std of the jump distribution
**** DEFINITION OF INITIAL JUMP STD **** ! Cosmetics
0.1 ! MultFactor in default mode (ignored in manual mode)
0.1,0.1,0.1 ! RC MultFactor in manual mode (ignored in auto mode)
0.1,0.1 ! Remnant MultFactor in manual mode (ignored in auto mode)
!Results_MCMC_Cooked.txt" ! Result file
0.2 ! BurnFactor
8 ! Nslim
```

Figure 58. Contenu du fichier Config_MCMC.txt (à gauche) et Config_Cooking.txt (à droite)

7.3.7. Analyse des simulations MCMC (Config_Summary.txt et Config_Residuals.txt)

Après avoir effectué l'analyse Bayésienne, il est proposé de réaliser des statistiques des simulations afin de décrire les résultats. Le fichier correspondant a seulement une ligne qui spécifie le fichier où sera sauvegardé le résumé.

```
"Results_Summary.txt" ! Result file
```

Figure 59. Contenu du fichier Config_Summary.txt

Le fichier résultats contient les statistiques suivantes : Nombre de simulations, valeur minimum, valeur maximale, étendue, moyenne, médiane, premier et dernier percentile, premier et troisième quantile, déviation standard, variance, covariance, asymétrie (Skewness), aplatissement (Kurtosis) et Maximum A Posteriori (MAP) du vecteur paramètre.

	Kmin1
N	0.500000E+03
Minimum	0.103506E+02
Maximum	0.161284E+03
Range	0.150933E+03
Mean	0.441898E+02
Median	0.398576E+02
Q10%	0.207693E+02
Q25%	0.281303E+02
Q75%	0.542953E+02
Q90%	0.712995E+02
St.Dev.	0.232132E+02
Variance	0.538854E+03
CV	0.525308E+00
Skewness	0.167711E+01
Kurtosis	0.427405E+01
MaxPost	0.302558E+02

Figure 60. Contenu du fichier Results_Summary.txt

Enfin, une comparaison entre les variables de sortie simulées par le modèle avec celles observées est proposée. En ce qui concerne le fichier configuration, il semble à celui d'avant, car il y a seulement une ligne qui stipule le fichier où les résultats seront sauvés.

"Results_Residuals.txt" ! Result file

Figure 61. Contenu du fichier Config_Residuals.txt

Le fichier résultat est organisé comme suit :

- N_x colonnes contenant les variables d'entrée observées;
- N_x colonnes contenant les variables d'entrée estimées vraies. Si les données d'entrée sont supposées sans erreur, alors, la variable d'entrée vraie est égale à la variable d'entrée observée;
- N_y colonnes contenant les variables de sortie observées;
- N_y colonnes contenant les variables de sortie débiaisées;
- N_y colonnes contenant les variables de sortie simulées;
- N_y colonnes contenant les résidus pour chaque variable de sortie. Ces résidus sont calculés en considérant les observations débiaisées ;
- N_y colonnes contenant les résidus standardisés pour chaque variable de sortie. Si les modèles d'erreurs sont corrects (à la fois pour les erreurs de mesure et les erreurs structurelles), ces résidus standardisés devraient suivre une loi normale centrée réduite $N(0,1)$.

X1_obs	X1_true	Y1_obs	Y1_unbiased	Y1_sim	Y1_res	Y1_stdres
0.000000E+00	0.000000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	0.000000E+00	-0.999990E+05	-0.100000E+01
0.830000E-01	0.830000E-01	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.209680E+02	-0.999780E+05	-0.999790E+00
0.167000E+00	0.167000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.956270E+02	-0.999034E+05	-0.999043E+00
0.250000E+00	0.250000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.157434E+03	-0.998416E+05	-0.998425E+00
0.333000E+00	0.333000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.206596E+03	-0.997924E+05	-0.997934E+00
0.417000E+00	0.417000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.235412E+03	-0.997636E+05	-0.997645E+00
0.500000E+00	0.500000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.260405E+03	-0.997386E+05	-0.997396E+00
0.583000E+00	0.583000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.285361E+03	-0.997136E+05	-0.997146E+00
0.667000E+00	0.667000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.309607E+03	-0.996894E+05	-0.996903E+00
0.750000E+00	0.750000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.331924E+03	-0.996671E+05	-0.996680E+00
0.833000E+00	0.833000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.351459E+03	-0.996475E+05	-0.996485E+00
0.917000E+00	0.917000E+00	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.367015E+03	-0.996320E+05	-0.996329E+00
0.100000E+01	0.100000E+01	-0.999990E+05	-0.999990E+05	-0.377489E+03	-0.996215E+05	-0.996225E+00

Figure 62. Contenu du fichier Results_Residuals.txt



Centre siège Antony-Paris
Direction de l'Appui aux Politiques Publiques
1, rue Pierre-Gilles de Gennes
CS 10030
92761 Antony Cedex
Tél. : +33 1 (0)1 40 96 61 21



Rejoignez-nous sur :

www.inrae.fr



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE
ET DE LA COHÉSION
DES TERRITOIRES**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE