



Analyse des crues de juillet 2021

Jérôme Le Coz, B. Camenen, Michel Lang, François Bourgin, Vazken Andréassian, Olivier Delaigue, Paul C. Astagneau

► To cite this version:

Jérôme Le Coz, B. Camenen, Michel Lang, François Bourgin, Vazken Andréassian, et al.. Analyse des crues de juillet 2021. INRAE. 2023, 147 p. hal-04495131

HAL Id: hal-04495131

<https://hal.inrae.fr/hal-04495131>

Submitted on 8 Mar 2024

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.

Public Domain



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Programme MTE (DGPR/SRNH) – INRAE 2021

Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique par décision de subvention n°2102897179.



Action 2 - Prévision des inondations

EXPERT : Analyse des crues de juillet 2021

INRAE, UR RIVERLY : Jérôme LE COZ, Benoît CAMENEN, Michel LANG

INRAE, UR HYCAR : François BOURGIN, Vazken ANDREASSIAN, Olivier DELAIGUE, Paul ASTAGNEAU

Août 2023

Contexte de l'action

En juillet, des crues exceptionnelles pour la saison se sont produites dans le nord-est de la France. Leur caractère exceptionnel a rendu plus difficile la compréhension de leur déroulement, et entraîné une modification des relations hauteur-débit des stations hydrométriques et du temps de propagation de la crue. Cela a par conséquent compliqué le travail de prévision et dégradé la qualité des informations fournies. La présence de végétation a sans doute joué un rôle, mais ce n'est sans doute pas le seul élément ayant eu une influence. Une expertise du fonctionnement de ces rivières est utile à la fois pour améliorer les prévisions sur ces secteurs, mais aussi sur d'autres territoires ayant un fonctionnement similaire.

Les cours d'eau les plus concernés par le côté exceptionnel sont l'Aisne et l'Oise, et la Marne et la Chiers.

Travaux prévus

Les travaux prévus dans le cadre de cette expertise viseront à :

1. examiner et réévaluer si besoin les courbes de tarage sur les secteurs ciblés (en lien avec les unités d'hydrométrie concernées) ;
2. étudier les modèles hydrauliques utilisés ;
3. analyser le comportement des modèles hydrologiques utilisés, en lien avec un exercice d'évaluation international sur l'évènement.

Les points 1 et 2 seront menés par l'équipe de RIVERLY, le point 3 par l'équipe HYCAR

Chacun des trois volets a fait l'objet d'un rapport détaillé (ci-joint). Les principaux enseignements de cette action sont les suivants.

1/ Volet Hydrométrie

Une analyse de 9 courbes de tarage sur 5 rivières du Nord-Est de la France (Aisne, Chiers, Helpe Majeure, Loison et Oise) a été réalisée en exploitant les jaugeages disponibles pendant la crue de juillet 2021. La comparaison entre débits jaugés et débits issus de l'extrapolation des courbes de tarage montre une forte surestimation de ces derniers (+20 à + 60 %) liée à des débordements en lit majeur dans des conditions « *atypiques* ». L'occurrence de la crue en période estivale, avec la présence de cultures hautes et denses non encore moissonnées, a induit une résistance à l'écoulement dans le lit majeur bien plus forte que celle rencontrée dans le reste de l'année.

L'examen des courbes de tarage avec la méthode bayésienne BaRatin et les jaugeages de la crue de juillet 2021 confirme ce diagnostic. Les courbes BaRatin sont revues à la baisse avec ces jaugeages. L'examen des paramètres (a , b , c) de la relation $Q = a (H - b)^c$ montre une baisse importante du paramètre $a = K B \sqrt{S}$ pour le lit majeur, où K est le coefficient de Strickler, B la largeur et S la pente de l'écoulement. D'après la littérature (Cowan, 1956 ; Chow, 1959 ; Ree et Crow, 1977), le facteur de réduction sur le coefficient de Strickler K_{majeur} du lit majeur, entre un lit avec végétation usuelle ($K_{majeur} = 10-15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) et un lit avec végétation cultivée très dense ($K_{majeur} = 2-5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) explique cette baisse importante sur le paramètre a de la courbe de tarage.

Le réexamen systématique des courbes de tarage par la méthode BaRatin présenterait plusieurs intérêts pour les services opérationnels :

- Du fait de la base hydraulique simplifiée mais explicite de BaRatin, il est possible de « rejouer » l'extrapolation des courbes de tarage existantes dans des conditions « estivales », en retenant une valeur plus faible du coefficient de Strickler en lit majeur. Ces courbes de tarage « estivales » pourraient être utilisées en cas de doute sur les conditions d'écoulement et donner une information utile aux prévisionnistes sur l'incertitude des débits.
- La courbe de tarage BaRatin pourrait être rapidement mise à jour, dès qu'un nouveau jaugeage confirme l'hypothèse retenue pour une courbe « estivale ».

2/ Volet Modélisation hydraulique

Deux modèles 1D de prévision hydraulique ont été évalués : le premier sur la Marne amont (modèle Mascaret d'EDF) sur le secteur situé entre Vitry-en-Perthois et Châlons-en-Champagne, le second sur l'Aisne moyenne (modèle Hydra d'Hydratec) sur le secteur situé entre Givry et Soissons. Sur la Marne amont, le modèle Mascaret a été mis à disposition et une analyse détaillée a pu être réalisée. Sur l'Aisne moyenne, le modèle Hydra n'est pas ouvert et la discussion a porté uniquement sur les résultats de la modélisation.

Sur la Marne amont, la propagation de la crue de juillet 2021 par le modèle Mascaret montre à Châlons-en-Champagne une forte surestimation de 30% du débit de crue et une anticipation de 24 h par rapport à la date de la pointe de crue. Une large partie de l'erreur sur le débit aval provient de la donnée d'entrée erronée sur la partie amont. Il subsiste néanmoins encore un décalage temporel sur la pointe de crue, qui peut être réduit en revoyant à la baisse les coefficients de Strickler du lit majeur. A noter que l'examen détaillé du modèle Mascaret construit sur la Marne amont fait apparaître plusieurs marges de progression :

- La géométrie utilisée pour représenter le lit mineur mériterait d'être davantage détaillée (nombre insuffisant de points par profil en travers), alors que celle du lit majeur pourrait être simplifiée (cf. impact sur le temps de calcul).
- Le cas spécifique des ouvrages d'art mériterait d'être modélisé par une loi d'ouvrage plutôt que de résoudre les équations de Barré-Saint-Venant sur des transects rapprochés.
- Des améliorations sont possibles dans la description du lit majeur, notamment en intégrant dans le lit mineur des zones basses qui sont actives avant le franchissement de la cote débordement du lit mineur.

Sur l'Aisne moyenne, les résultats montrent également une forte surestimation des niveaux aval prévus pour la crue de juillet 2021 par le modèle hydraulique Hydra, calé sur des épisodes de crue d'hiver. Plusieurs postes d'amélioration sont proposées :

- Rejouer le modèle Hydra avec une correction sur la condition d'entrée en débit sur l'amont (cf. courbe de tarage en conditions « estivales »).
- Réduire les coefficients de Strickler du lit majeur en conditions « estivales ».
- Rajouter des casiers dans le lit majeur si la correction sur les coefficients de Strickler du lit majeur n'est pas suffisante.

3/ Volet Modélisation hydrologique

Une analyse des performances des modèles de prévision hydrologique au pas de temps horaire GR5H a été réalisée sur 9 bassins versants répartis sur 6 rivières du Nord-Est de la France (Aisne, Aire, Chiers, Loison, Oise et Serre), à partir des débits ré-estimés au volet 1. Les deux versions testées du modèle hydrologique (GR5H et GR5H_RI) montrent une tendance générale à la sous-estimation des débits de crue lors de l'épisode de juillet 2021, mais avec une variabilité importante selon les stations. La version plus récente GR5H_RI (travail de thèse de Paul Astagneau 2019-2022 et post-doctorat en cours) permet de moduler les fonctions de production et de routage du modèle GR5H en fonction de l'intensité des précipitations. Elle permet sur certains des 9 bassins étudiés d'améliorer la qualité de la prévision hydrologique et de réduire la sous-estimation des crues.

Les performances des modèles GR5H ne semblent pas avoir été impactées de façon spécifique lors de la crue de juillet 2021. Une perspective intéressante à mentionner est le travail en cours d'amélioration des capacités prédictives des modèles GR, en intégrant des stratégies d'assimilation des données. Une réévaluation rapide des débits de crue en temps réel, comme celle mentionnée dans le volet 1, pourrait être exploitée pour la prévision hydrologique.



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Programme MTE (DGPR/SRNH) – INRAE 2021

Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique par décision de subvention n°2102897179.



Action 2 - Prévission des inondations

EXPERT : Analyse des crues de juillet 2021
Volet hydrométrie : courbes de tarage

Auteur : Jérôme LE COZ (INRAE, mars 2023)

Table des matières

1. Introduction	2
2. Analyses BaRatin des stations hydrométriques	4
2.1. L'Oise à Flavigny Le Grand (H7041025)	4
2.2. L'Oise à Hirson - mire historique (H7021010)	9
2.3. L'Oise à Hirson - déversoir (H7001111)	13
2.4. L'Aisne à Berry au Bac, bras principal (H6321011)	16
2.5. L'Helpe majeure à Liessies (D0156510)	20
2.6. Le Loison à Han-lès-Juvigny (B4572010)	26
2.7. La Chiers à Chauvency-le-Château (B4601010)	31
2.8. L'Aisne à Mouron (H6201010)	36
2.9. L'Aisne à Verrières (H6021020)	40
2.10. La Chiers à Montigny-sur-Chiers (B4031010)	44
3. Analyse des causes possibles des détarages observés.....	49
3.1. Jaugeages biaisés ?	49
3.2. Effets d'hystérésis ?	49
3.3. Encombrement inhabituel du lit majeur ?	50
4. Conclusions.....	51
5. Références	52

1. Introduction

En juillet 2021, plusieurs pays d'Europe occidentale ont été frappés par des crues extrêmes dues à des précipitations exceptionnelles. Dans le nord-est de la France, des débordements ont commencé à se produire sur plusieurs rivières le 14 juillet. Les unités d'hydrométrie (UH) locales (UH Meuse-Moselle/DREAL Grand-Est, DREAL Hauts-de-France, UH Seine Aube Marne Aisne/DREAL Grand-Est) ont réussi à effectuer des jaugeages ADCP mobiles pendant la crue à de nombreuses stations hydrométriques. Ils ont souvent observé des détarages spectaculaires des débits de crue, les débits mesurés étant généralement inférieurs de 20 à 60 % aux débits calculés à partir des courbes de tarage hauteur-débit en vigueur.

De tels détarages inhabituels sont nettement plus importants que l'incertitude typique des mesures de débit de l'ADCP (5%-10%). Pour éviter des biais dans la prévision des crues, les courbes de tarage ont parfois dû être recalibrées à la volée avec des informations limitées, ce qui était inconfortable. Les hydromètres locaux ont signalé que les détarages peuvent être dus à la végétation du lit majeur qui était très différente des conditions hivernales de celles des jaugeages de crue utilisés pour construire les hauts des courbes de tarage. En juillet 2021, en effet, les plaines inondables étaient couvertes de hautes cultures d'été qui n'avaient pas été récoltées en raison du temps exceptionnellement froid et pluvieux.

Pour tester cette hypothèse sur une base hydraulique, les courbes de tarage de sept stations sur les rivières Aisne, Oise, Helppe Majeure, Chiers et Loison dans le Nord-Est de la France ont été ré-analysées à l'aide de la méthode bayésienne BaRatin implémentée dans le logiciel libre BaRatinAGE. Pour chacune de ces stations, les contrôles identifiés comprennent le chenal principal (et éventuellement d'autres contrôles bas débit) et un lit majeur rural relativement large. Pour chaque station, deux courbes de tarage et leurs enveloppes d'incertitude sont calculées : la courbe de tarage « normale » (ou « d'hiver ») utilisant tous les jaugeages associés à la courbe en vigueur sauf ceux de la crue de juillet 2021, et la courbe de tarage « juillet 2021 » n'utilisant aucun jaugeage de crue débordante sauf ceux de la crue de juillet 2021. Pour la courbe de tarage « juillet 2021 », l'a priori sur la hauteur d'activation du lit majeur est généralement estimé à partir de l'a posteriori (résultats calés) de la courbe de tarage « normale », mais le coefficient du contrôle par le lit majeur est estimé par BaRatin en utilisant les jaugeages ADCP de juillet 2021. L'incertitude de tous les jaugeages est supposée égale à 10%, valeur moyenne qui semble raisonnable pour couvrir l'ensemble des conditions de mesure rencontrées, de l'étiage aux crues. Les courbes de tarage ainsi obtenues sont cohérentes avec les courbes de tarage estimées manuellement par les hydromètres locaux. Les coefficients du contrôle par le lit majeur estimés par BaRatin pour la courbe de tarage « juillet 2021 » sont diminués d'un facteur allant de 1,6 à 14, typiquement (c'est-à-dire des coefficients de Strickler allant typiquement de $15\text{-}20\text{ m}^{1/3}/\text{s}$ à $2\text{-}10\text{ m}^{1/3}/\text{s}$), ce qui est spectaculaire mais cohérent avec les tables de valeurs disponibles pour les coefficients de frottement dans des champs nus ou végétalisés par des cultures.

L'analyse bayésienne proposée semble utile aux hydromètres pour évaluer l'étendue possible des décatarages dus à une rugosité inhabituelle du lit majeur à leurs stations, et pour se préparer à recalibrer leurs courbes de tarage si une crue débordante se produit à nouveau en dehors de la saison hivernale. Une courbe de tarage « d'été » peut ainsi être proposée par défaut, et ré-évaluée dès que des nouveaux jaugeages sont disponibles. C'est également un moyen pratique pour eux d'informer et de préparer les prévisionnistes de crues sur les causes et l'occurrence de tels détarages, et sur l'incertitude liée au débit qu'ils devraient prendre en compte.

Pour chaque station traitée, la courbe de tarage « juillet 2021 » estimée avec cette analyse BaRatin est appliquée au limnigramme récupéré sur l'Hydroportail pour calculer un hydrogramme de la crue de juillet 2021 avec incertitudes, pour utilisation dans les volets modélisation hydraulique et modélisation hydrologique de l'expertise. Des échanges d'information ont eu lieu avec les UH concernées :

- UH Meuse-Moselle/DREAL Grand-Est : Denis Lognon, Guillaume Principato, Yohan Soltermann, Philippe Hestroffer
- DREAL Hauts-de-France : Pierre Delcour, Clarisse Ingouackas de Marillac, Nathalie Gaffet
- UH Seine Aube Marne Aisne/DREAL Grand-Est : Benjamin Deweppe

2. Analyses BaRatin des stations hydrométriques

2.1. L'Oise à Flavigny Le Grand (H7041025)

La station est située en aval du pont de la Place de la mairie (Fig. 1). On distingue (cf. vues Google Earth) un lit mineur et un grand lit majeur cultivé. Un contrôle section à l'étiage est possible mais BaRatin ne l'identifie pas dans les jaugeages (essais non montrés). On suppose donc un modèle simple à deux contrôles: lit mineur + lit majeur rectangulaires.

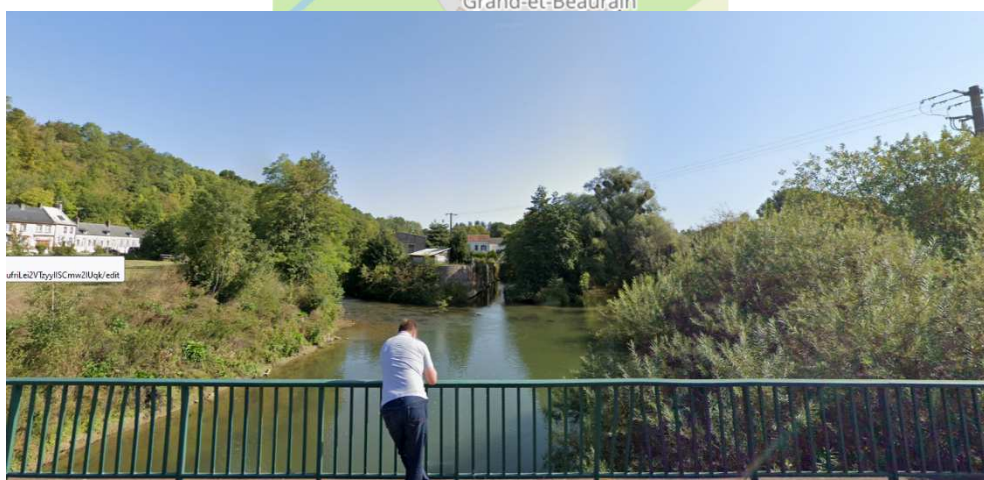
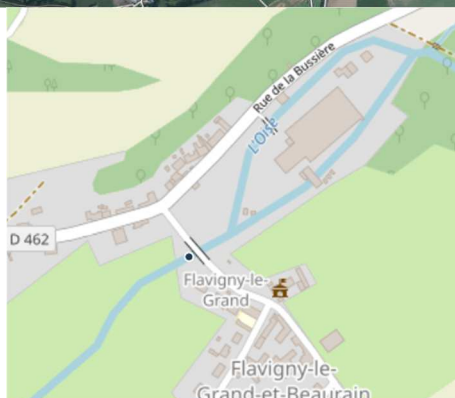
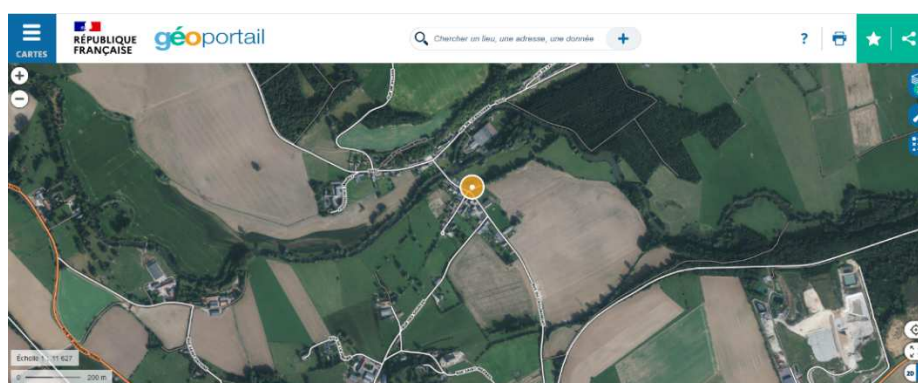




Fig. 1 – L'Oise à Flavigny Le Grand (H7041025) : situation de la station et vues des contrôles en amont/aval

Les a priori définis sur ces deux contrôles sont déduits de Géoportail.

Lit mineur :

- $k = 1 \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 20 \pm 10 \text{ m}$
- $K = 30 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.00024 \pm 0.0005$ (estimée avec Geoportail)

Lit majeur :

- $k = 4 \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 400 \pm 200 \text{ m}$
- $K = 20 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.00024 \pm 0.0005$

La courbe de tarage « normale » est estimée en utilisant les jaugeages 2014-2022 associés à la courbe de tarage en vigueur sans les 2 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 2). On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, avec un calage plus précis des paramètres du lit mineur. La courbe de tarage estimée avec BaRatin est très proche de la courbe de tarage en vigueur. Cependant, le haut de l'extrapolation de la courbe de tarage officielle est étrange, et semble supposer une augmentation de la rugosité des lits pour les plus hauts débits, ou alors la mise en charge du pont ? Un commentaire dans Barème indique que l'extrapolation a été faite suite à un travail d'un stagiaire en

fin des années 2000 mais l'UH n'a pas d'autre information. A voir si cette hypothèse est justifiée ou pas (la courbe BaRatin suppose au contraire que les deux contrôles se maintiennent de façon homogène).

On note une forte dispersion des jaugeages bas débit, qu'il serait utile de nettoyer en essayant d'identifier des détarages (ou bien géré par courbes de correction végétation ?). Il en résulte une incertitude restante (et donc totale) relativement élevée dans le résultat BaRatin.

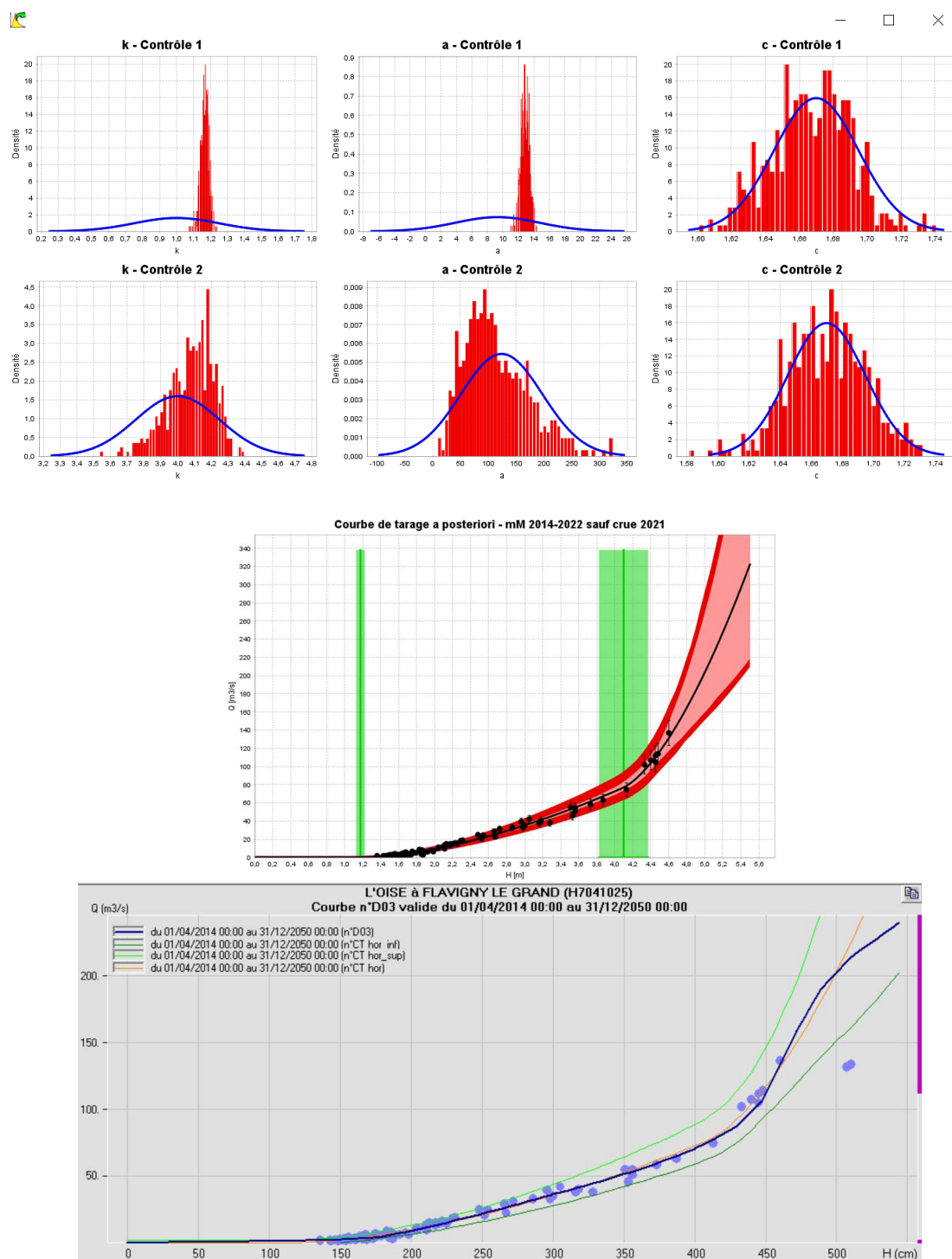


Fig. 2 - L'Oise à Flavigny Le Grand (H7041025) : courbes de tarage « normales » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

La courbe de tarage « juillet 2021 » est estimée en utilisant les mêmes jaugeages sauf ceux à cote supérieure à 4.25 m (avant débordement) et cette fois-ci avec les 2 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 3). Les a priori précédents sont conservés sauf la hauteur de débordement calée précédemment ($k_2 = 4.1 \pm 0.14$ m a priori). En effet, on fait l'hypothèse que la cote de débordement du lit majeur ne change pas selon la saison, et on transfère cette information que les deux seuls jaugeages après débordement de juillet 2021 ne peuvent pas fournir.

On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, mais l'incertitude de la courbe de tarage est plus grande que précédemment, surtout en crue. La courbe de tarage estimée avec BaRatin s'écarte de la courbe de tarage en vigueur, qui sort de l'enveloppe d'incertitude. Pour le lit majeur, on trouve un coefficient $a_2 = 21 \pm 14$ pour la crue 2021 contre $a_2 = 119 \pm 40$ hors crue 2021, soit une réduction d'un facteur 5.8. Le coefficient de Strickler supposé de $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ serait donc réduit à $3.4 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, toutes choses étant égales par ailleurs. C'est extrêmement faible, et dénote peut-être autant d'une obstruction partielle voire presque totale du lit majeur que d'une « rugosité » accrue...

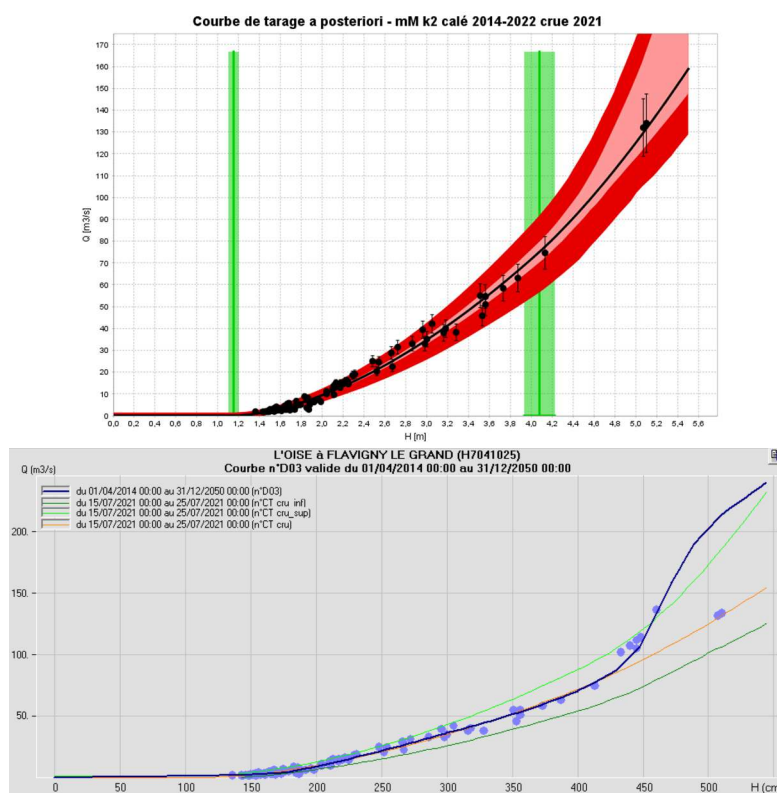


Fig. 3 – L'Oise à Flavigny Le Grand (H7041025) : courbes de tarage « juillet 2021 » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage « juillet 2021 » est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 4).

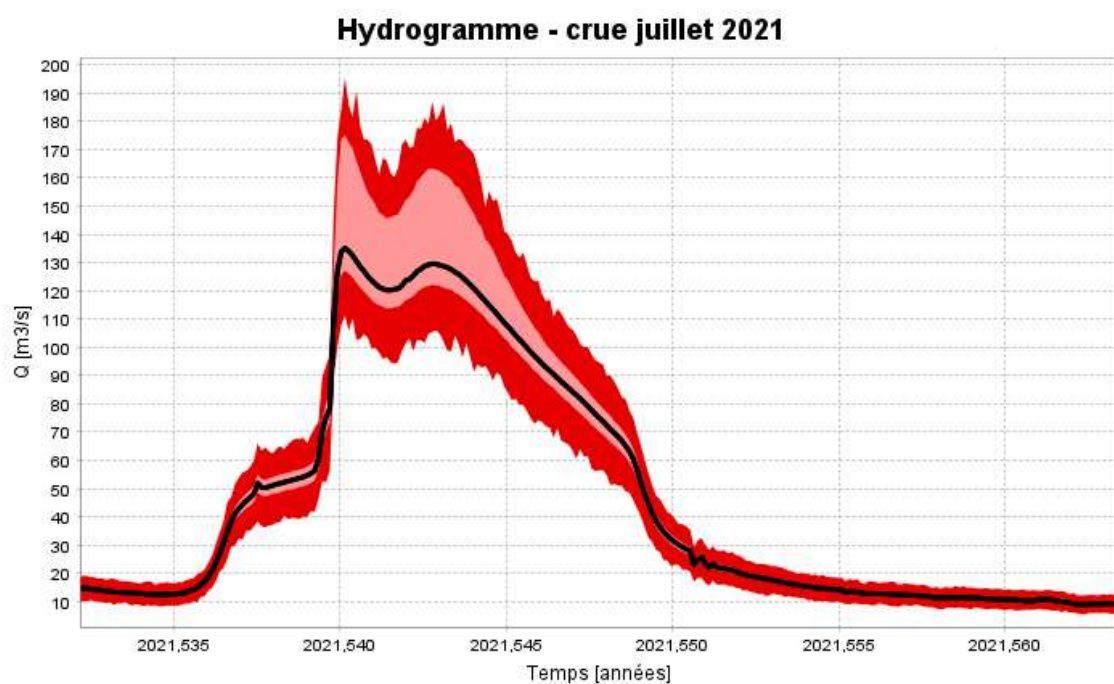


Fig. 4 – L'Oise à Flavigny Le Grand (H7041025) : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

2.2. L'Oise à Hirson – mire historique (H7021010)

Cette station a été jaugée lors de la crue le 15 juillet 2021 (21h), mais elle n'est a priori pas susceptible de détarage en hautes eaux à cause de l'encombrement du lit majeur (pas de débordement, lit chenalisé). Elle est analysée car utile pour le volet modélisation hydrologique de l'expertise. Les courbes de tarage disponibles dans la base Barème offrent un bon exemple du problème de l'hydromètre devant extrapoler le haut des courbes de tarage (Fig. 5).

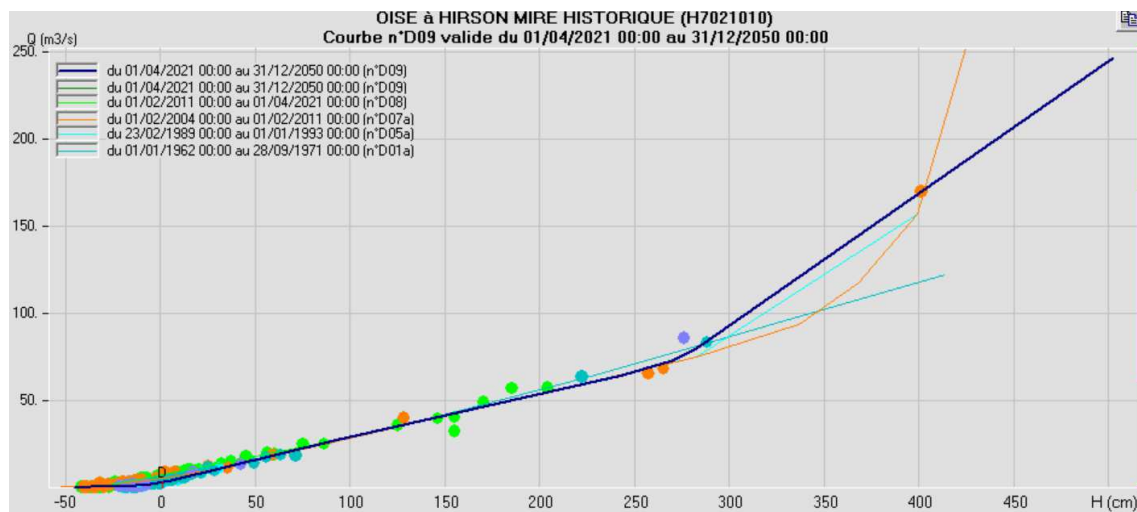


Fig. 5 – Courbes de tarage de l'Oise à Hirson Mire historique (H7021010), dans la base Barème

Le point de mesure (radar aérien et mire historique) est situé en aval immédiat d'un déversoir, lui-même localisé en aval du pont situé en aval de la confluence entre l'Oise et le Gland (Fig. 6). Un autre point de mesure, plus récent, est situé en amont immédiat de l'ouvrage. Il s'agit d'un déversoir épais (plat avec chanfrein aval), avec de petites rehausses ou banquettes (hautes de 17 cm) visibles en rives droite et gauche. Selon la fiche de levé topographique de la station, le zéro de la mire est à 161,20 m, et les points haut et bas du déversoir à 161,85 m et 161,68 m (référentiel altimétrique NGF IGN69). Le cours d'eau est contraint latéralement par des murs verticaux (pas de débordement ni contournement). La hauteur de la chute est donc de 50 à 65 cm environ, donc on peut penser que le déversoir peut s'envoyer pour une crue comme celle de juillet 2021. Ces informations sur le déversoir seront utiles pour analyser la courbe de tarage de la station suivante, située en amont du déversoir, mais pas pour analyser cette station « mire historique », située en aval et donc pas contrôlée par le déversoir.

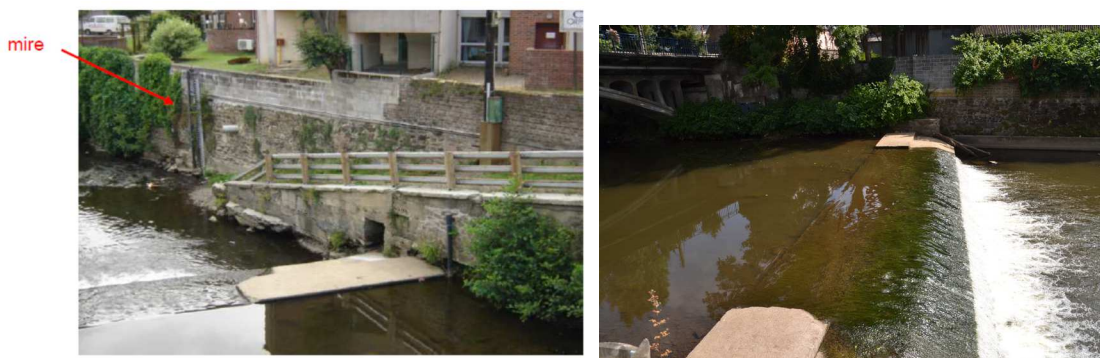




Fig. 6 – Vues de la station et du déversoir de l'Oise à Hirson Mire historique (H7021010)

On considère un modèle simple consistant en un contrôle par section (le radier naturel en gravier qu'on devine sur les photos) suivi d'un contrôle chenal (sans débordement). On considère donc deux contrôles successifs : un déversoir rectangulaire de 15 ± 2 m de large et de hauteur inconnue (prise à -0.5 ± 0.3 m), remplacé quand il s'ennoie par un chenal rectangulaire de 13 ± 2 m de large :

Déversoir rectangulaire :

- $k = -0.5 \text{ m} \pm 0.3 \text{ m}$
- $B = 15 \pm 2 \text{ m}$

Lit mineur :

- $k = 0 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 13 \text{ m} \pm 2 \text{ m}$
- $K = 25 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$

Les jaugeages associés à la courbe de tarage en vigueur, après avril 2021, sont peu nombreux et présentent de la dispersion à bas débit. Ceux associés à la courbe de tarage précédente (2011-2021) sont nombreux mais ils présentent aussi une importante dispersion, et certains sont à exclure (détarage marqué). On a appliqué la sélection suivante. Pour les hauteurs d'eau inférieures à 10 cm (correspondant au contrôle basses eaux), on ne conserve que les jaugeages postérieurs au 01/04/2021, date de mise en service de la courbe de tarage en vigueur. On conserve tous les jaugeages à $h > 10$ cm postérieurs au 01/01/2011 ainsi que les jaugeages de crue antérieurs à $h > 2,5$ m. Sont écartés 7 « jaugeages » théoriques datés du 01/08/2011 00:00 à 00:06 qui ne sont pas des jaugeages mais des estimations calculées lors d'un stage en 2011. Une incertitude de 10% est supposée pour tous les jaugeages, sauf un jaugeage élevé (4,01 m ; $170 \text{ m}^3/\text{s}$, 07/01/2011 à 12h30) qui conditionne assez fortement la courbe de tarage mais semble plus incertain (20% d'incertitude supposée). Après prise d'information auprès du service, ce jaugeage a été réalisé à l'ADCP StreamPro (il aurait dû être codé « AP » et non « AU ») en aval de la station au niveau de la rocade d'Hirson (RD1043) en raison des difficultés à jauger à cette cote au niveau de la station (débordements, remous). Il est commenté : « 144 + 26 au pont de la rocade l'g xp » car le débit est la somme de deux jaugeages, l'un sur le bras principal et l'autre sur un bras secondaire activé par le débordement.

On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori (Fig. 7). L'incertitude totale est plutôt élevée en raison de la dispersion de certains jaugeages autour de la courbe de tarage. Le

jaugeage hautes eaux isolé de 2011 est cohérent avec l'enveloppe d'incertitude de la courbe mais il suggère une tendance plus haute, différente de la courbe MaxPost. La courbe de tarage estimée avec BaRatin est plus basse que la courbe de tarage en vigueur pour les hautes eaux extrapolées. Il faudrait revoir attentivement le jaugeage de 2011 ainsi que la validité des hypothèses sur les contrôles.

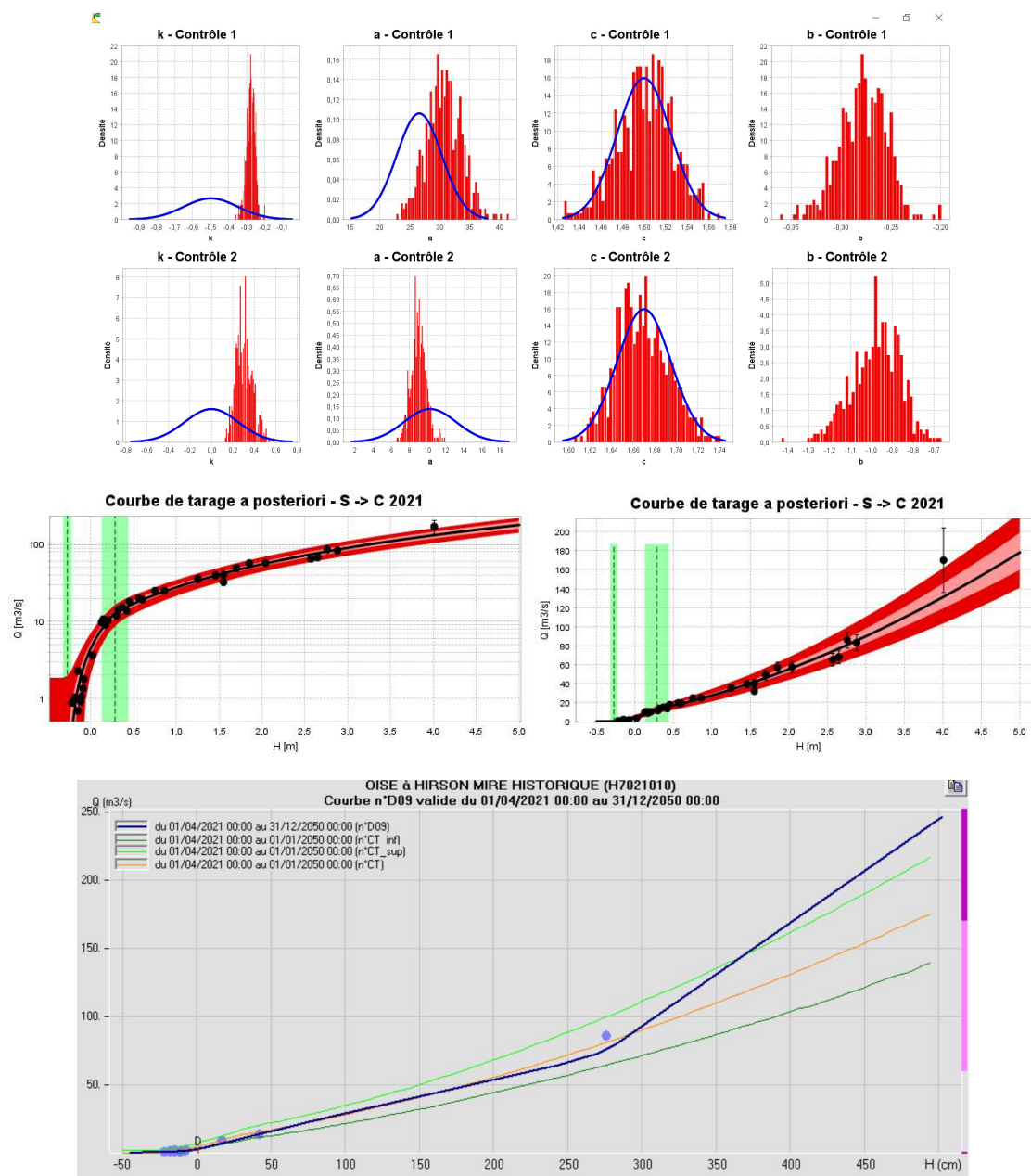


Fig. 7 – L'Oise à Hirson Mire historique (H7021010) : courbe de tarage estimée avec BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 8).

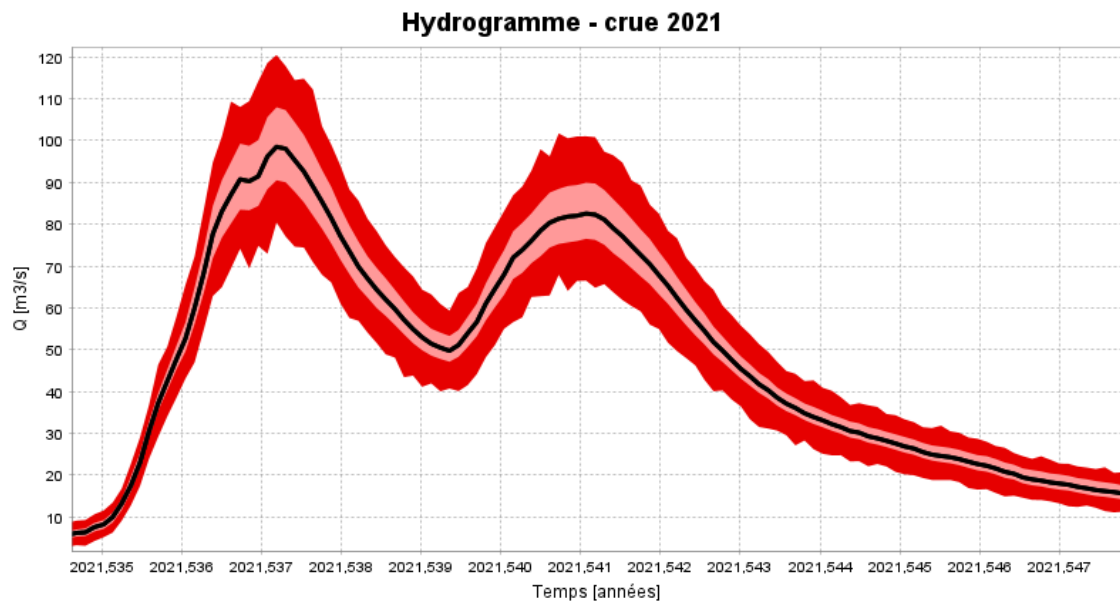


Fig. 8 – L'Oise à Hirson Mire historique (H7021010) : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

2.3. L'Oise à Hirson – déversoir (H7001111)

Cette station correspond au point de mesure plus récent (2015) installé en amont immédiat du déversoir, qui fait contrôle en basses et moyennes eaux mais s'ennoe sans doute en forte crue (cf. station Oise à Hirson – Mire historique). La distance entre les bouts des banquettes est de 13,2 m (Google Earth), mais à l'étiage, le déversement sur le bord aval du seuil se fait sur une largeur un peu plus grande, environ 15 m. La banquette droite semble faire 3,7 m, et la banquette gauche environ 5 m. Mais le chenal se rétrécissant, la largeur totale du bord aval du déversoir (actif en crue) fait seulement 21,2 m environ.

On considère donc un modèle à deux contrôles par section additifs remplacés par un contrôle chenal quand le déversoir est ennoyé : un déversoir rectangulaire de 15 ± 1 m de large et de hauteur prise à 0 ± 0.2 m, et un déversoir rectangulaire de 6 ± 1 m de large et de hauteur prise à 0.17 ± 0.2 m), pour représenter l'élargissement du seuil après mise en eau des banquettes. Les paramètres du contrôle chenal sont les mêmes que pour la station Hirson mire historique mais la hauteur d'ennoiement du seuil est très incertaine (supposée autour de 1,5 m soit le double de la hauteur de chute du déversoir).

Déversoir rectangulaire 1 :

- $k = 0 \text{ m} \pm 0.2 \text{ m}$
- $B = 15 \pm 1 \text{ m}$

Déversoir rectangulaire 2 :

- $k = 0.17 \text{ m} \pm 0.2 \text{ m}$
- $B = 6 \pm 1 \text{ m}$

Lit mineur :

- $k = 1.5 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 13 \text{ m} \pm 2 \text{ m}$
- $K = 25 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$

Les résultats a posteriori sont en bon accord avec les a priori (Fig. 9), avec un calage précis des deux déversoirs rectangulaires, mais aucun calage des paramètres du contrôle par chenal (les a posteriori restent équivalents aux a priori), puisqu'il n'y a aucun jaugeage dans cette gamme de débit. Cela se traduit par une forte incertitude de la partie extrapolée de la courbe, qui pourra se réduire avec des jaugeages à débit plus élevé et/ou une information plus précise sur la cote d'ennoiement du déversoir (par exemple via des photos ou observations de l'écoulement sur le déversoir en crue). Une astuce possible pourrait consister à récupérer des jaugeages de crue disponibles à la station Mire historique en estimant la hauteur d'eau correspondante à la station déversoir. Pour ce faire, il faudrait essayer d'établir une relation entre les hauteurs d'eau aux deux stations en crue. Cela permettrait de préciser la courbe de tarage à la station Déversoir pour les forts débits.

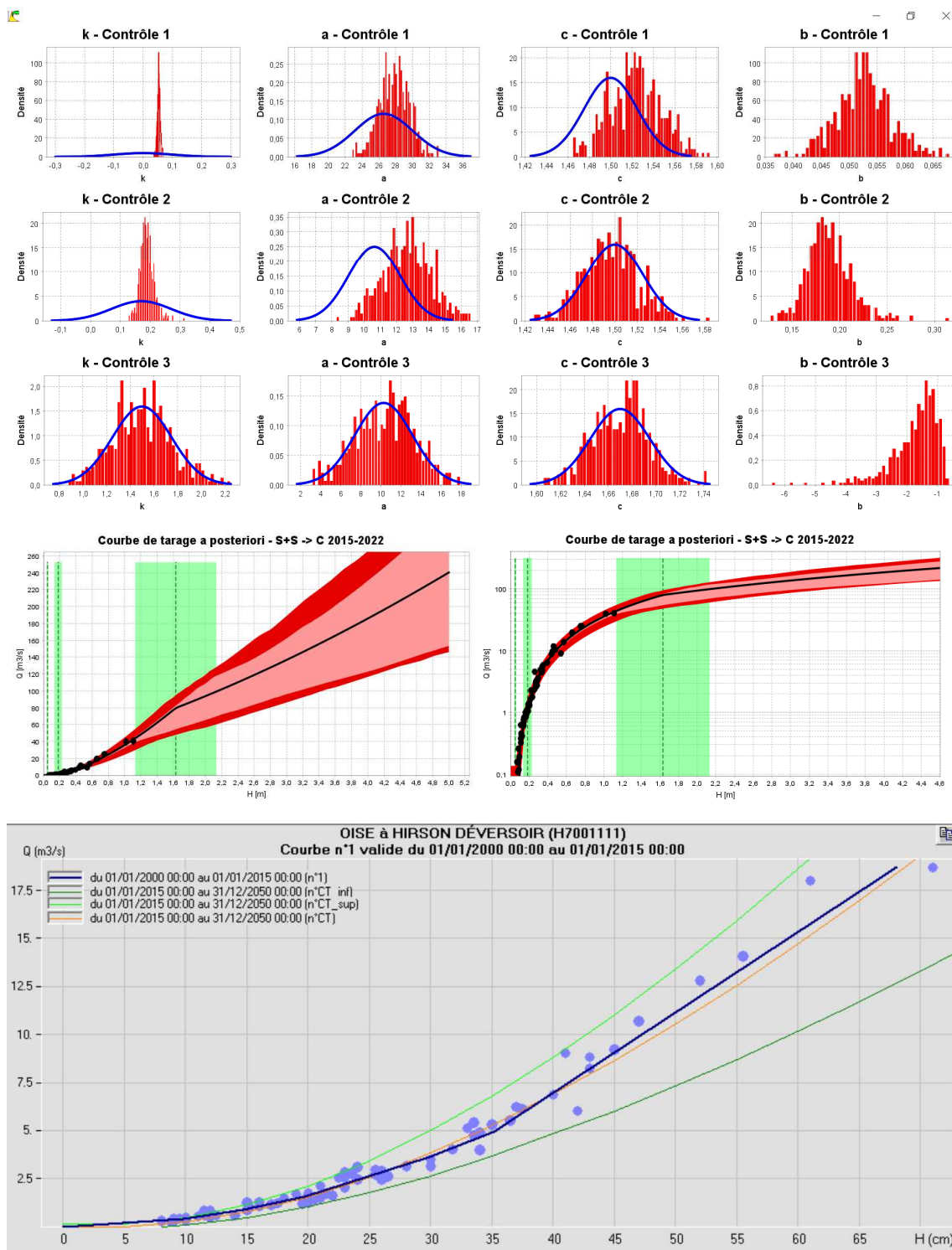


Fig. 9 – L'Oise à Hirson déversoir : courbe de tarage estimée avec BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 10).

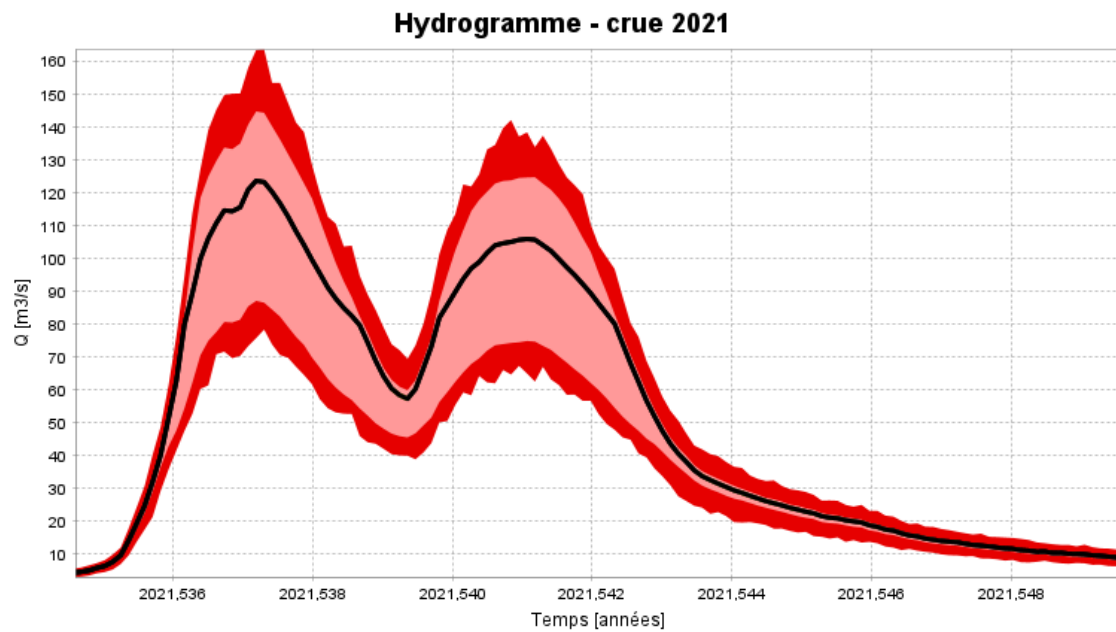


Fig. 10 – L'Oise à Hirson déversoir : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

2.4. L'Aisne à Berry au Bac, bras principal (H6321011)

La station est située au niveau du pont D1044 sur le bras principal de l'Aisne (Fig. 11) et ne mesure pas le débit transitant par le canal. Le chenal semble profond et il n'y a pas trace de contrôle par section qui jouerait en basses eaux. On suppose donc un modèle de contrôles simple : lit mineur + lit majeur rectangulaires.



Fig. 11 – Aisne à Berry-au-bac, bras principal : situation de la station et vues des contrôles en amont/aval

Les a priori définis sur ces deux contrôles sont très grossiers (déduts de Géoportail...).

Lit mineur :

- $k = 0 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$
- $B = 30 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$
- $K = 30 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.0005 \pm 0.001$

Lit majeur :

- $k = 3 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 400 \pm 200 \text{ m}$
- $K = 20 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.0005 \pm 0.001$

La courbe de tarage « normale » est estimée en utilisant les jaugeages 2017-2022 associés à la courbe de tarage en vigueur sans les 2 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 12). On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, avec un calage plus précis des paramètres du lit mineur. La courbe de tarage estimée avec BaRatin est très proche de la courbe de tarage en vigueur.

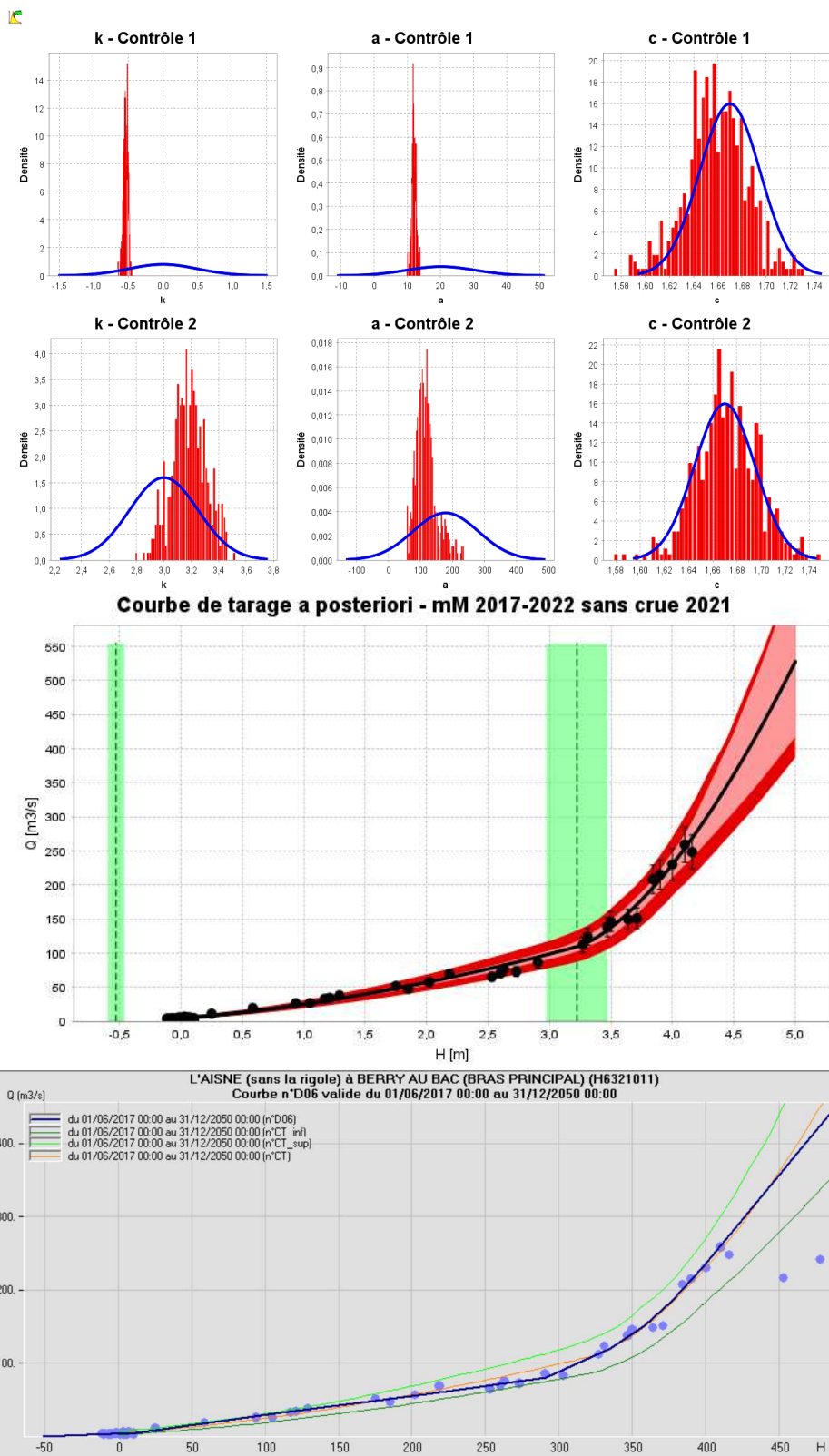


Fig. 12 – Aisne à Berry-au-bac, bras principal : courbes de tarage « normales » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

La courbe de tarage « juillet 2021 » est estimée en utilisant les mêmes jaugeages sauf ceux à cote supérieure à 3.1 m (avant débordement) et cette fois-ci avec les 2 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 13). Les a priori précédents sont conservés sauf la hauteur de débordement calée

précédemment ($k_2 = 3.22 \pm 0.25$ m a priori). En effet, on fait l'hypothèse que la cote de débordement du lit majeur ne change pas selon la saison, et on transfère cette information que les deux seuls jaugeages après débordement de juillet 2021 ne peuvent pas fournir.

On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, mais l'incertitude de la courbe de tarage est plus grande que précédemment, surtout en crue. La courbe de tarage estimée avec BaRatin s'écarte de la courbe de tarage en vigueur, qui sort de l'enveloppe d'incertitude. Pour le lit majeur, on trouve un coefficient $a_2 = 34 \pm 37$ pour la crue 2021 contre $a_3 = 123 \pm 67$ hors crue 2021, soit une réduction d'un facteur 3.6 environ. Le coefficient de Strickler supposé de $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ serait donc réduit à $5.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, toutes choses étant égales par ailleurs.

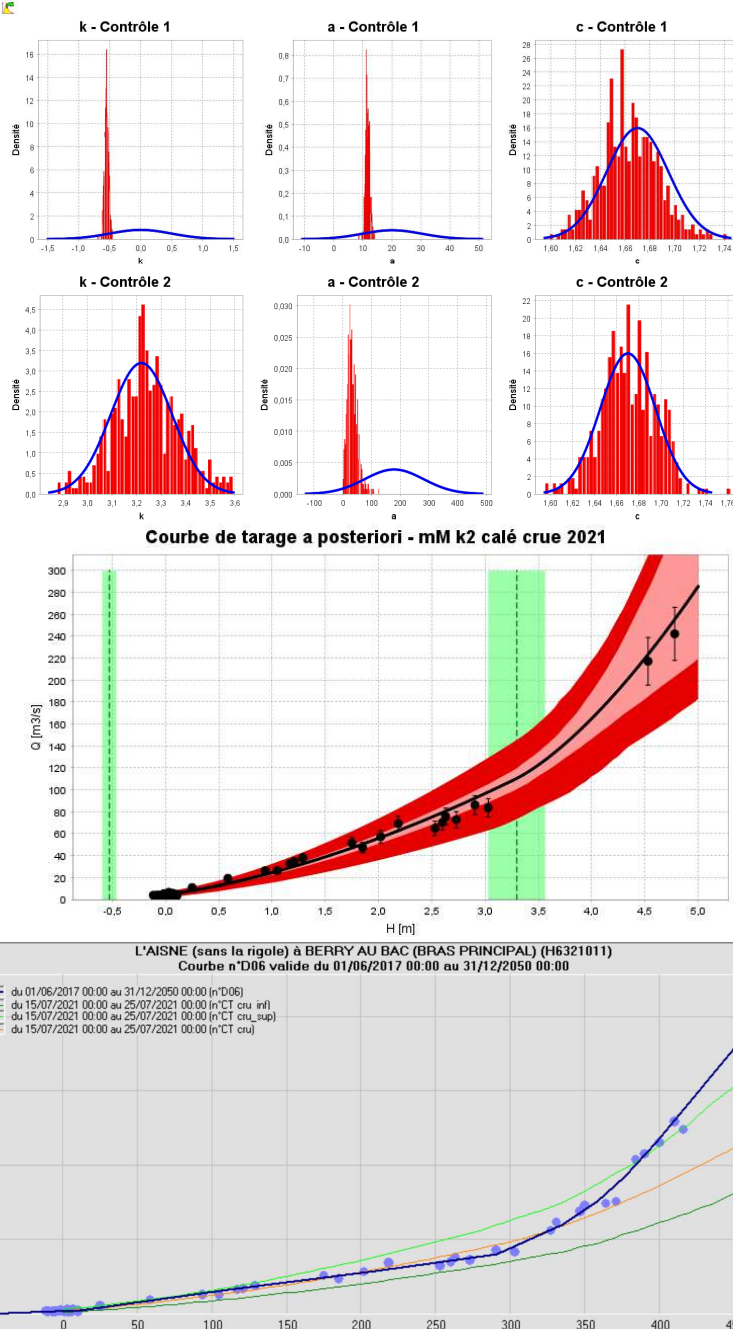


Fig. 13 – Aisne à Berry-au-bac, bras principal : courbes de tarage « juillet 2021 » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage « juillet 2021 » est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 14).

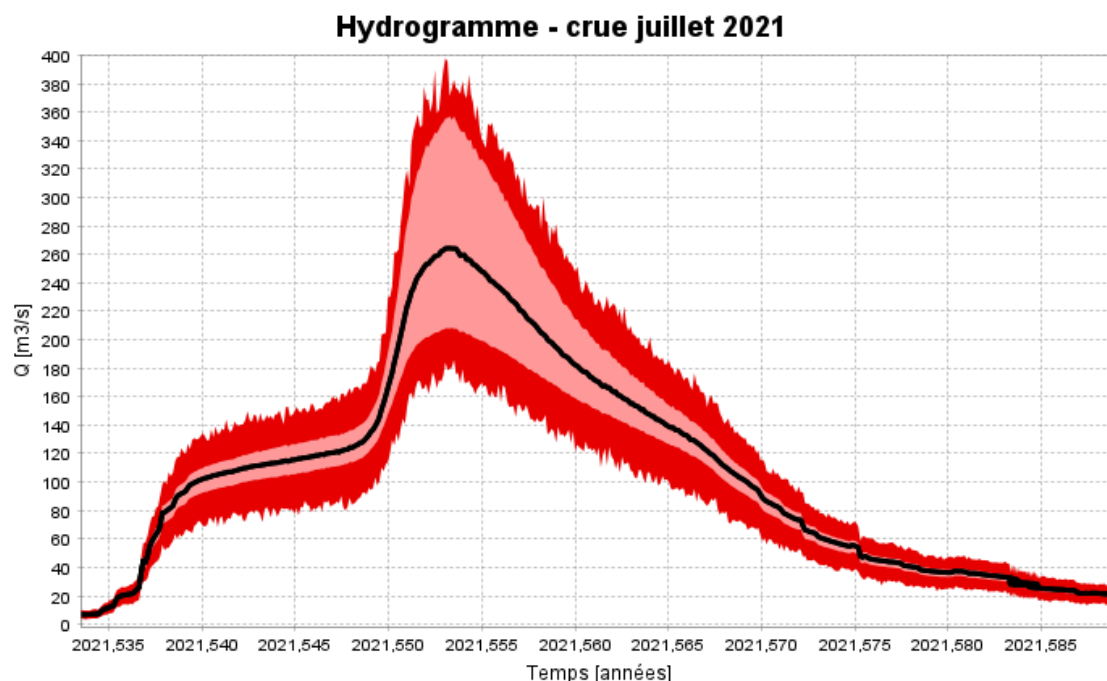


Fig. 14 – Aisne à Berry-au-bac, bras principal : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

2.5. L'Helpe majeure à Liessies (D0156510)

La station est située au niveau du Pont rue Roger Salengro (Fig. 15). Le chenal semble profond et il n'y a pas trace de contrôle par section qui jouerait en basses eaux. On suppose donc un modèle de contrôles simple : lit mineur + lit majeur rectangulaires.





Fig. 15 – L’Helpe majeure à Liessies (D0156510) : situation de la station et vues des contrôles en amont/aval

Les a priori définis sur ces deux contrôles sont très grossiers (dédits de Géoportail...).

Lit mineur :

- $k = 0.4 \text{ m} \pm 0.2 \text{ m}$
- $B = 12 \text{ m} \pm 3 \text{ m}$
- $K = 30 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.0005 \pm 0.001$

Lit majeur :

- $k = 3 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 400 \pm 200 \text{ m}$
- $K = 20 \pm 5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.0005 \pm 0.001$

Cependant, la courbe de tarage estimée avec ce modèle ne suit pas correctement les jaugeages. Ajouter un hypothétique contrôle par section en basses eaux (non identifié) n’améliore pas significativement les choses. On considère alors un modèle avec un changement des paramètres (coefficient a surtout) du lit mineur vers $k=2\pm1 \text{ m}$, ce qui pourrait s’expliquer par une rugosité moyenne du chenal plus élevée en raison de la végétation et de l’encombrement du haut des berges, par rapport au bas des berges. Les hydromètres indiquent également le remous exercé en crue par le pont surtout en rive, la station étant située juste en amont de ce pont.

Avec ce modèle à 3 contrôles, la courbe de tarage « normale » est estimée en utilisant les jaugeages 2010-2022 associés à la courbe de tarage en vigueur sans les 2 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 16). On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, avec un calage plus précis des paramètres du lit mineur. La courbe de tarage estimée avec BaRatin est très proche de la courbe de tarage en vigueur.

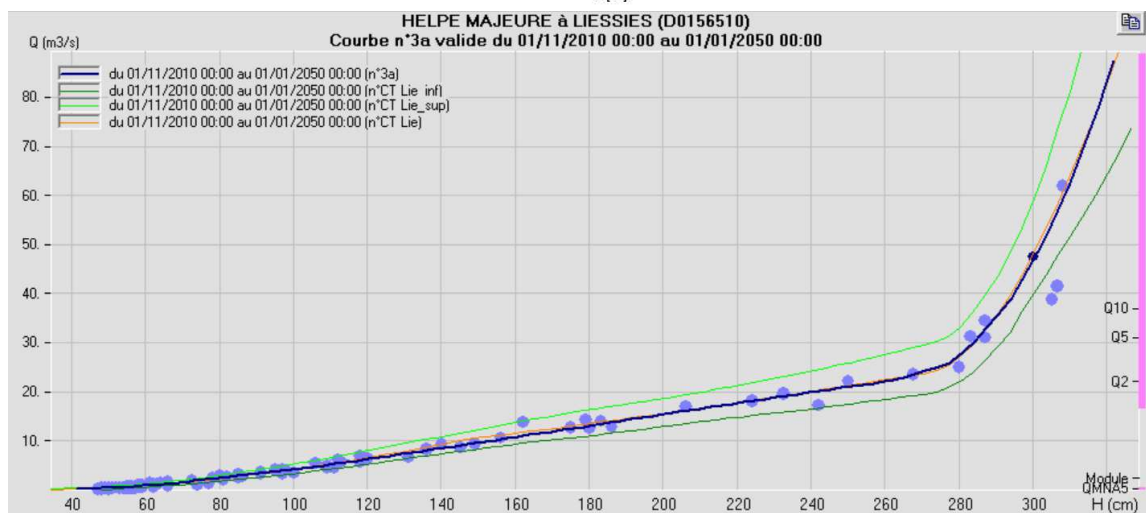
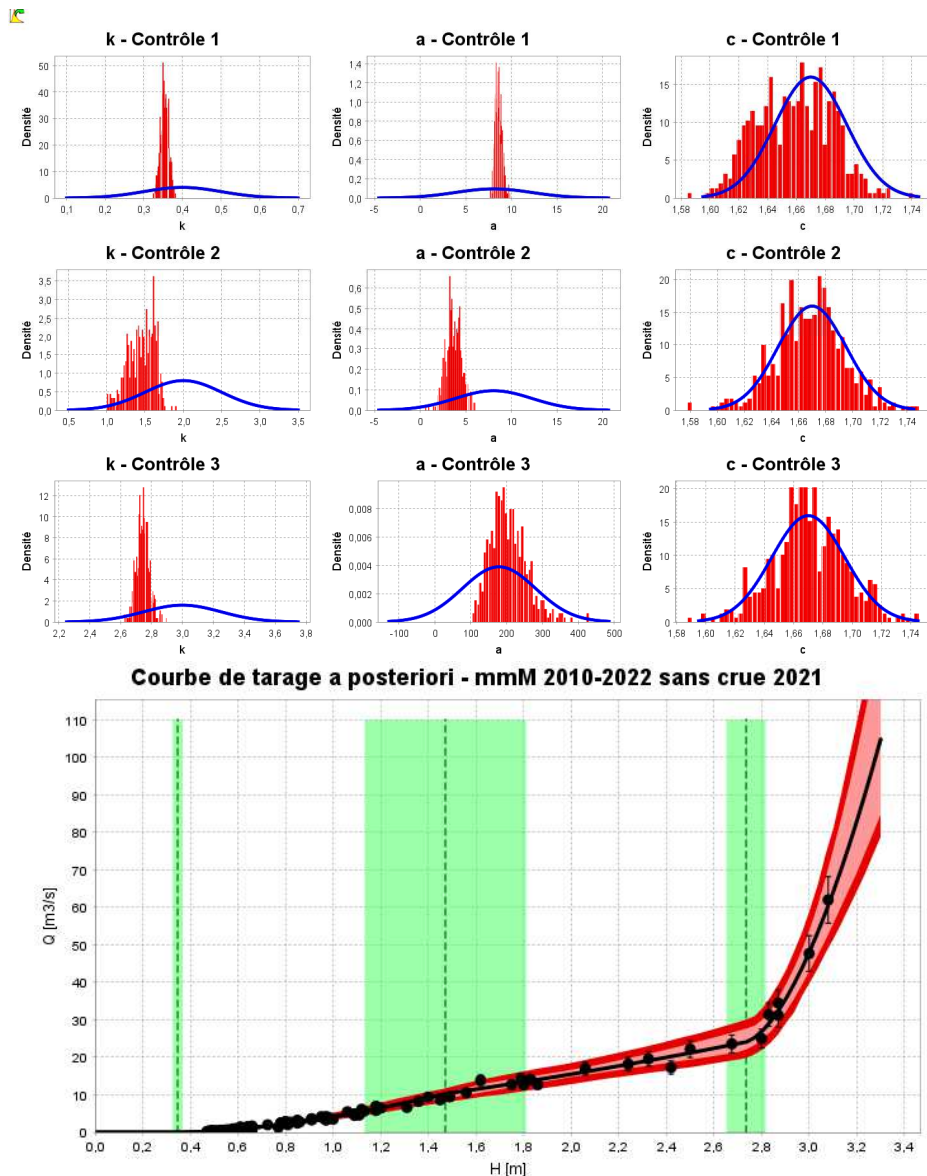
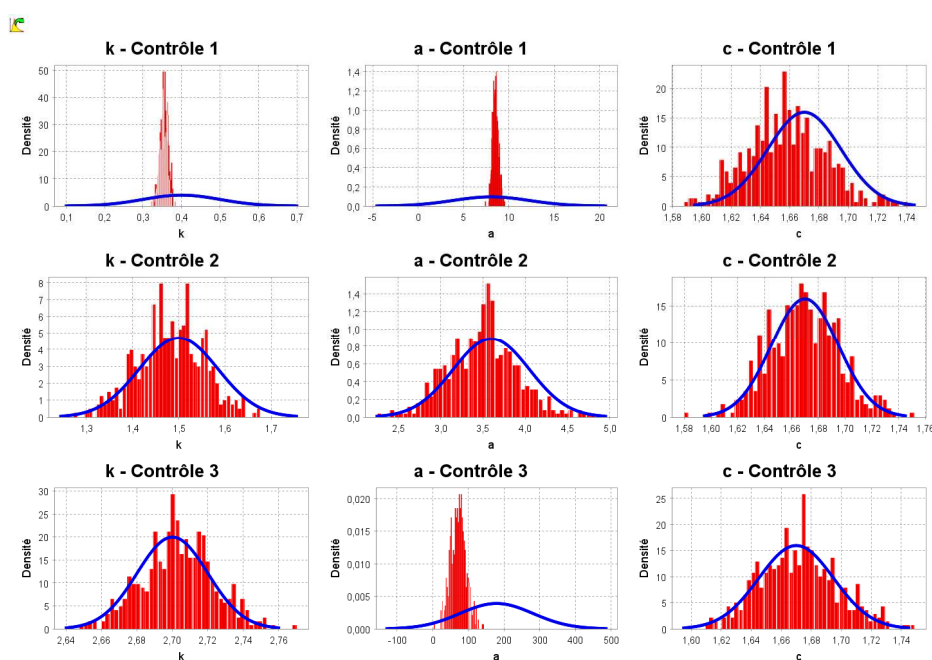


Fig. 16 – L'Helpe majeure à Liessies (D0156510) : courbes de tarage « normales » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

La courbe de tarage « juillet 2021 » est estimée en utilisant les mêmes jaugeages sauf ceux à cote supérieure à 2.6 m (avant débordement) et cette fois-ci avec les 2 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 17). Les a priori précédents sont conservés sauf la hauteur de débordement calée précédemment ($k_3 = 2.7 \pm 0.04$ m a priori) et les paramètres du deuxième contrôle calés précédemment ($a_2 = 3.6 \pm 0.9$ et $k_2 = 1.5 \pm 0.17$ m). En effet, on fait l'hypothèse que la cote de débordement du lit majeur ne change pas selon la saison, et on transfère cette information que les deux seuls jaugeages après débordement de juillet 2021 ne peuvent pas fournir. L'a priori sur k_2 est également fixé au calage précédent car ce paramètre est difficile à estimer sans les jaugeages de crue débordante.

On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, mais l'incertitude de la courbe de tarage est plus grande que précédemment, surtout en crue. La courbe de tarage estimée avec BaRatin s'écarte de la courbe de tarage en vigueur, qui sort de l'enveloppe d'incertitude.

Pour le lit majeur, on trouve un coefficient $a_3 = 67.5 \pm 43$ pour la crue 2021 contre $a_3 = 191.5 \pm 101$ hors crue 2021, soit une réduction d'un facteur 2.8 environ. Le coefficient de Strickler supposé de $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ serait donc réduit à $7 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, toutes choses étant égales par ailleurs.



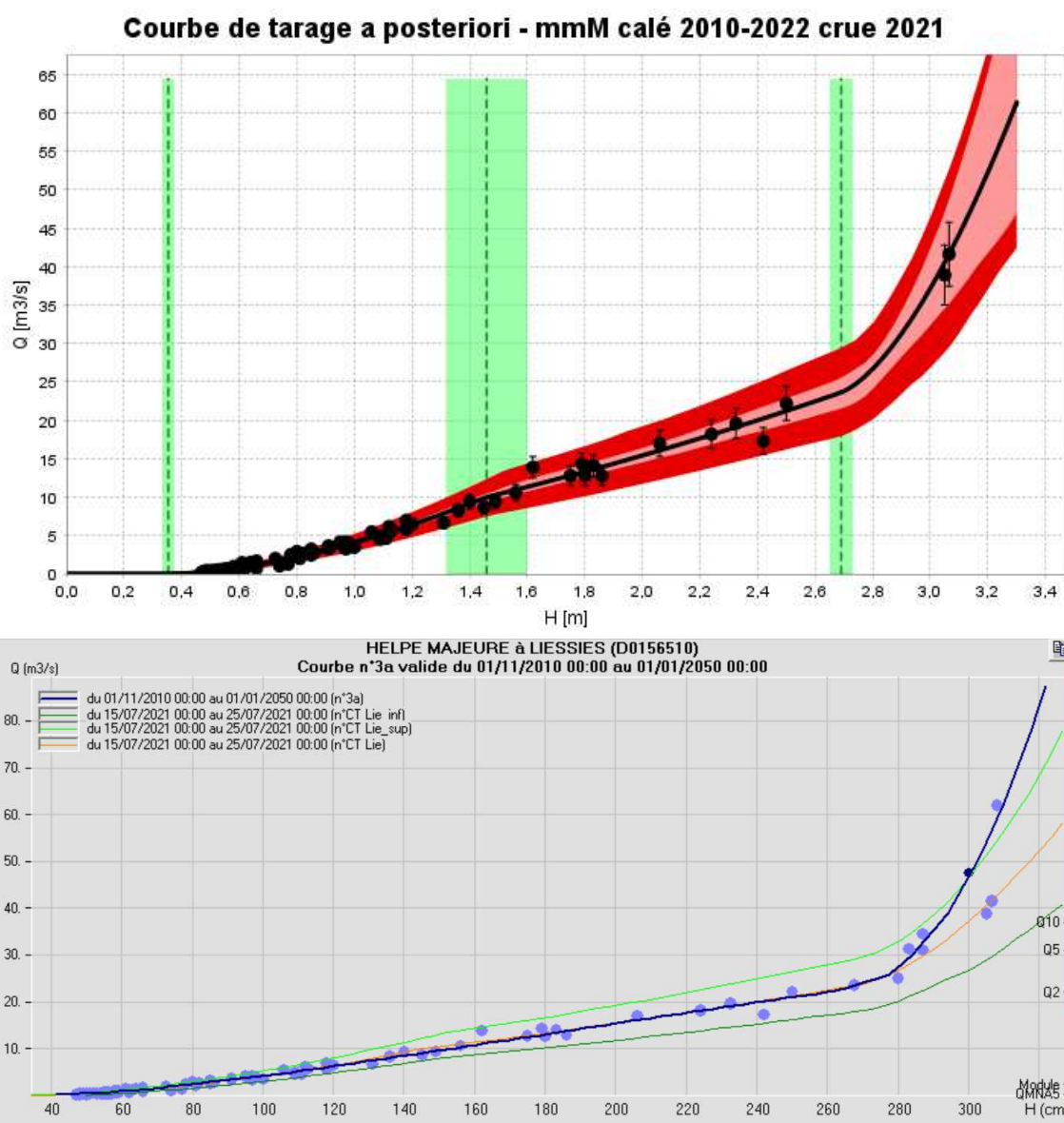


Fig. 17 – L'Helpe majeure à Liessies (D0156510) : courbes de tarage « juillet 2021 » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage « juillet 2021 » est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 18).

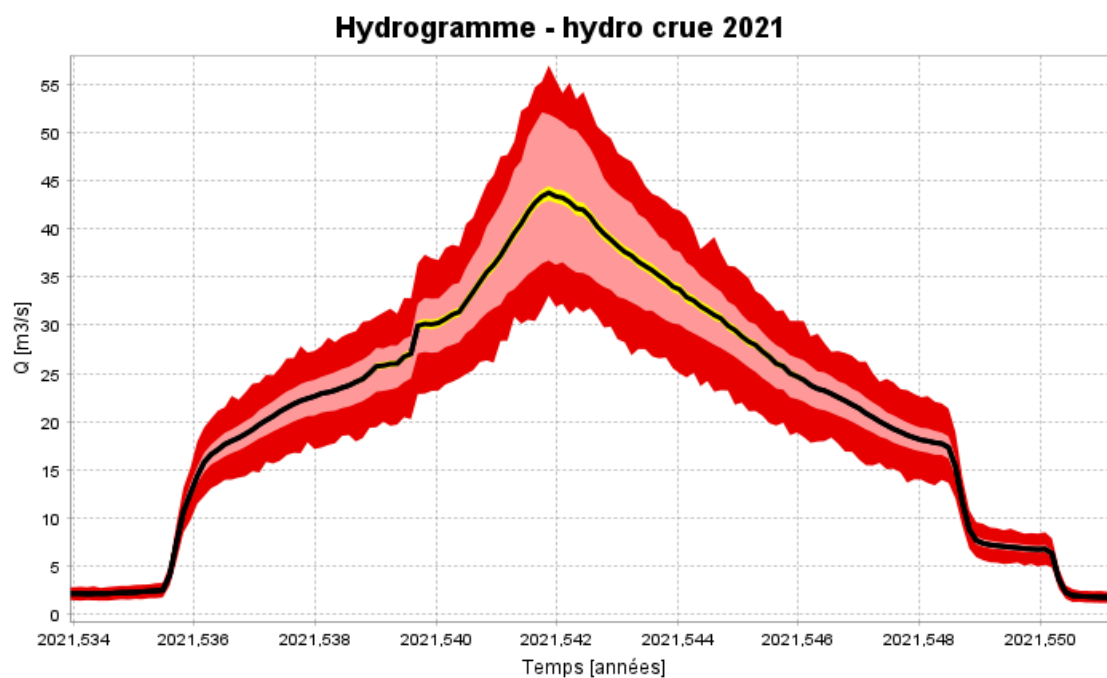
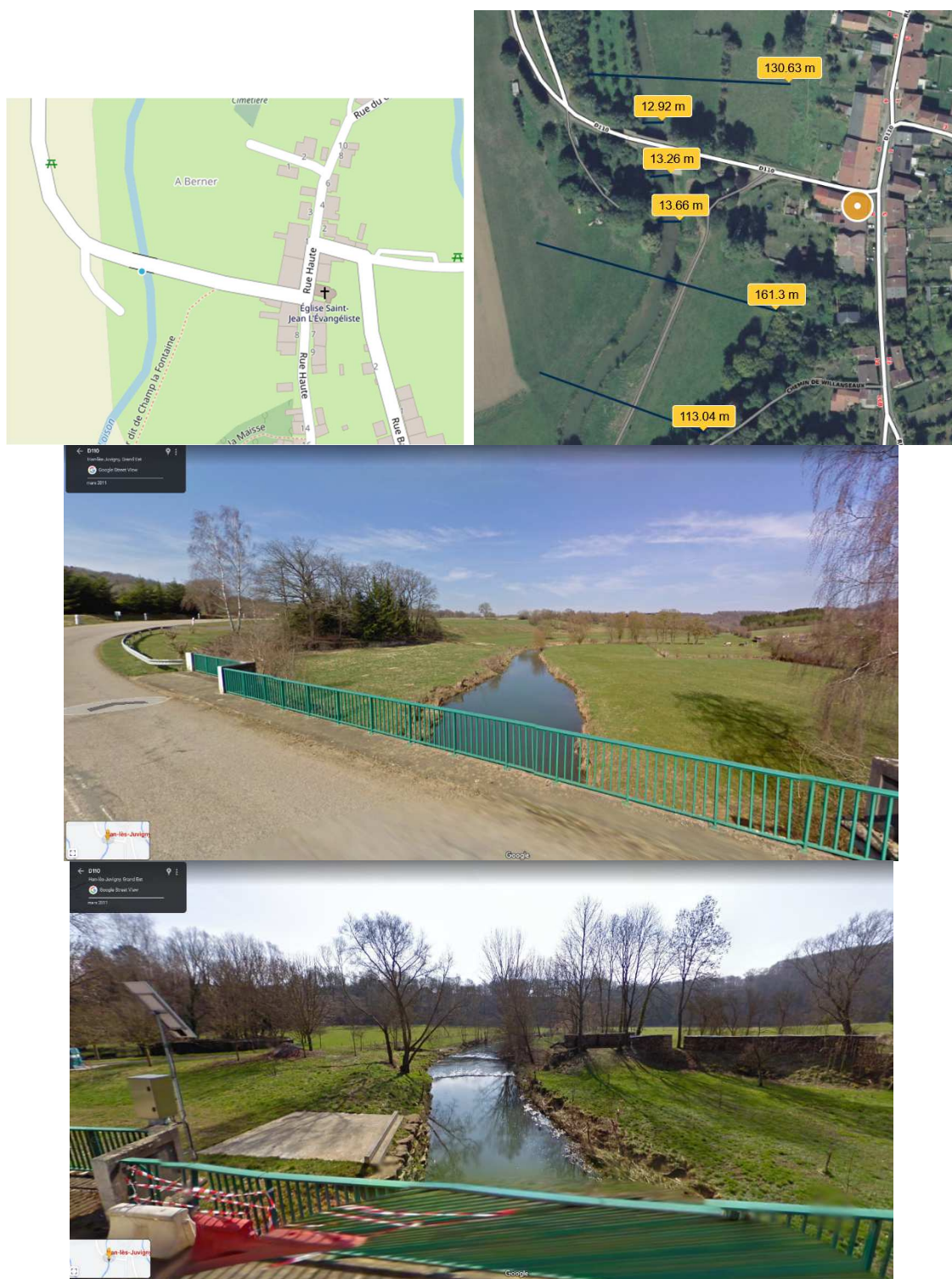


Fig. 18 – L'Helpe majeure à Liessies (D0156510) : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

2.6. Le Loison à Han-lès-Juvigny (B4572010)

La station est située au niveau du pont de la D110 (Fig. 19). Le chenal semble profond mais sur la vue aval (GoogleStreetView), on devine un contrôle naturel par section qui pourrait jouer en basses eaux, sur une gamme de hauteur sans doute limitée car la chute semble petite. On suppose donc un modèle de contrôles simple : seuil rectangulaire puis lit mineur + lit majeur rectangulaires.



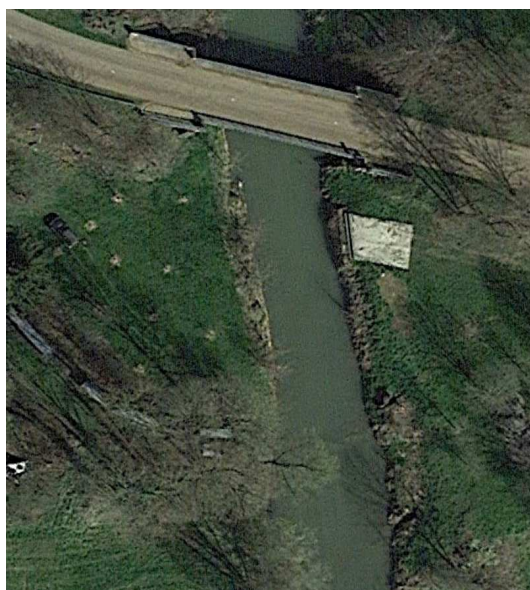


Fig. 19 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (B4572010) : situation de la station et vues des contrôles en amont/aval

Les a priori sont tirés de Geoportail et d'hypothèses sur la géométrie du chenal :

Seuil naturel :

- $k = 0 \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 12 \pm 3 \text{ m}$

Lit mineur :

- $k = 1 \pm 1 \text{ m}$
- $B = 12 \pm 3 \text{ m}$
- $K = 25 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$

Lit majeur :

- $k = 2.5 \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 100 \pm 50 \text{ m}$
- $K = 15 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$

La courbe de tarage « normale » est estimée en utilisant les jaugeages associés à la courbe de tarage en vigueur sans les 2 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 20). On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, sauf peut-être pour le coefficient a_1 du premier contrôle : la largeur efficace du seuil serait deux fois moins grande que les 12 m estimés d'après la largeur du chenal. On note également que la hauteur d'activation k_2 du deuxième contrôle, correspondant à la cote d'envolement du seuil, n'est pas mieux estimée que l'a priori avec les jaugeages. En fait, il n'y a pas de rupture visible dans les jaugeages et une courbe de tarage équivalente est obtenue si l'on omet le seuil dans le modèle des contrôles (résultat non montré ici). La courbe de tarage estimée avec BaRatin est très proche de la courbe de tarage en vigueur.

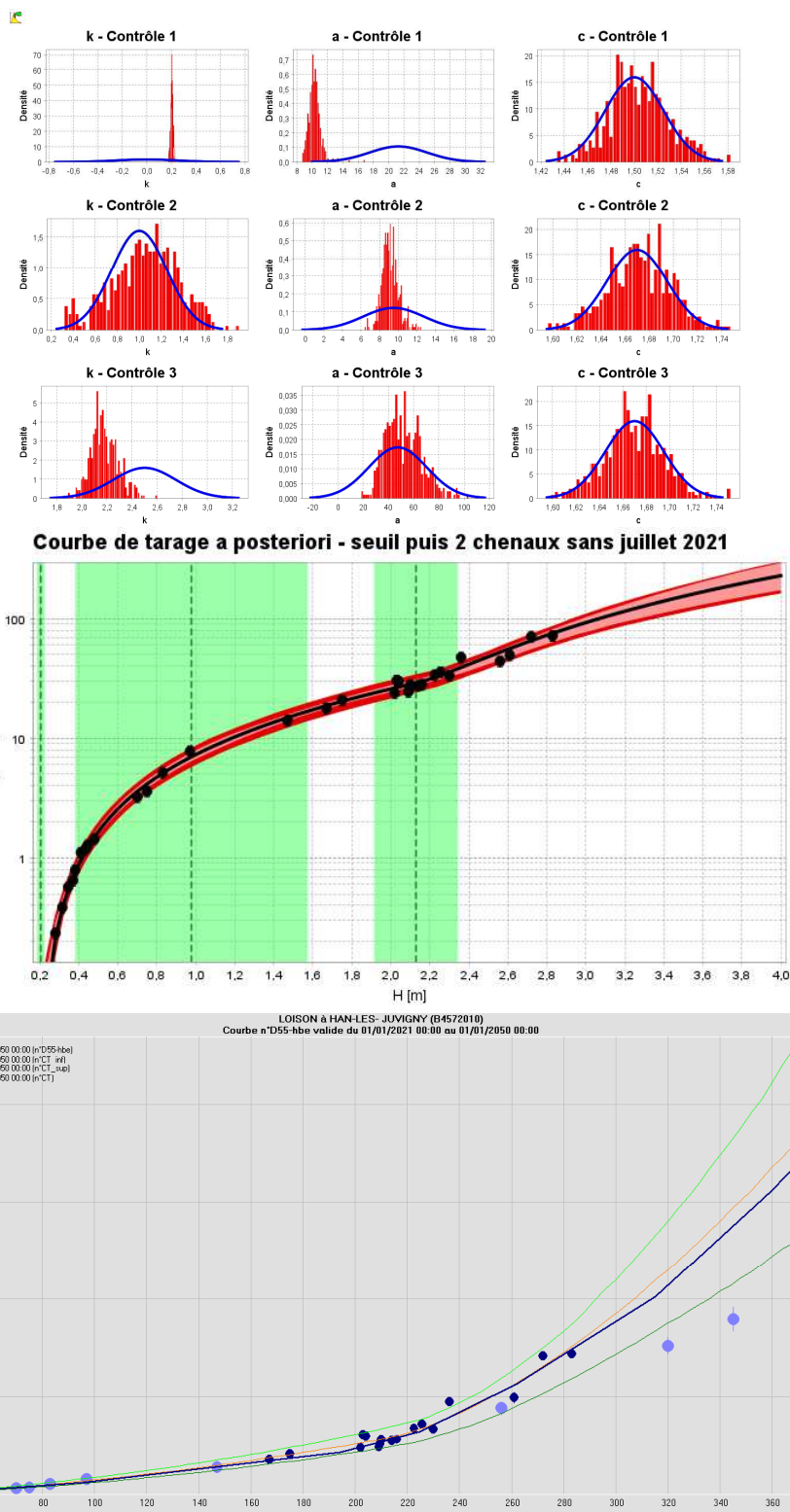
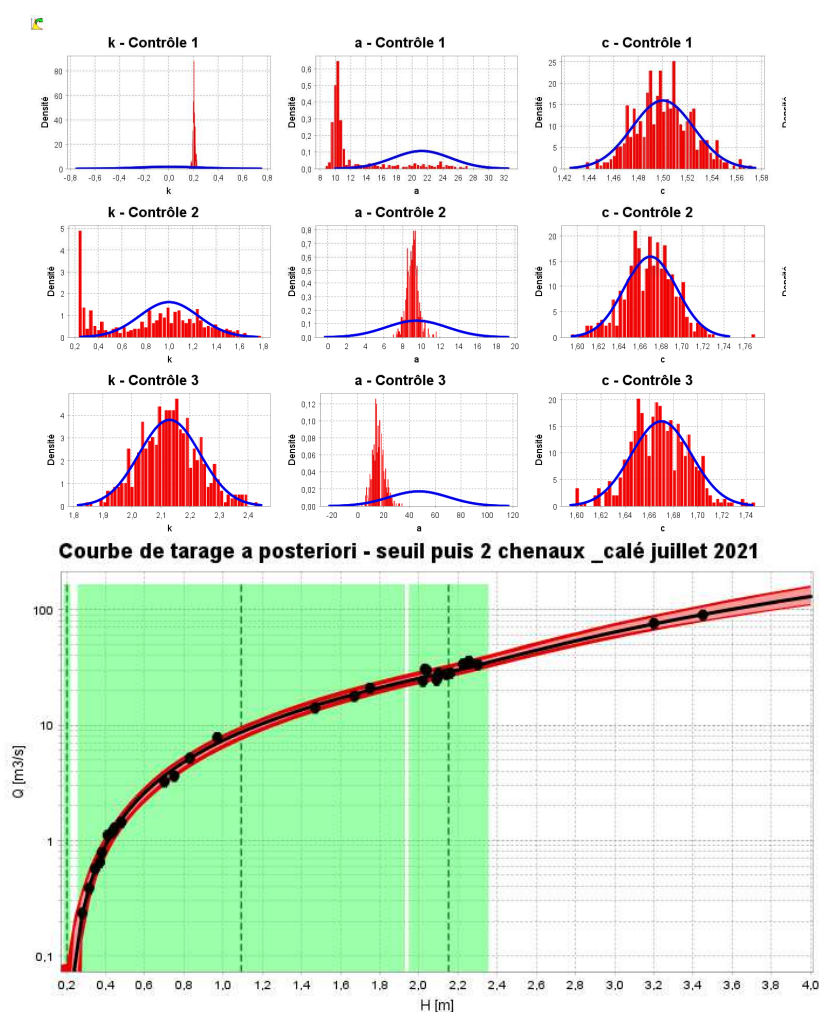


Fig. 20 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (B4572010) : courbes de tarage « normales » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

La courbe de tarage « juillet 2021 » est estimée en utilisant les mêmes jaugeages sauf ceux à cote supérieure à 2.3 m (avant débordement) et cette fois-ci avec les 2 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 21). Les a priori précédents sont conservés sauf la hauteur de débordement calée

précédemment ($k_2 = 2.16 \pm 0.2$ m a priori). En effet, on fait l'hypothèse que la cote de débordement du lit majeur ne change pas selon la saison, et on transfère cette information que les deux seuls jaugeages après débordement de juillet 2021 ne peuvent pas fournir.

On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori. La courbe de tarage estimée avec BaRatin s'écarte de la courbe de tarage en vigueur, qui sort de l'enveloppe d'incertitude. Pour le lit majeur, on trouve un coefficient $a_3 = 16.4 \pm 9.3$ pour la crue 2021 contre $a_2 = 50 \pm 29$ hors crue 2021, soit une réduction d'un facteur 3 environ. Le coefficient de Strickler supposé de $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ serait donc réduit à $5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, toutes choses étant égales par ailleurs.



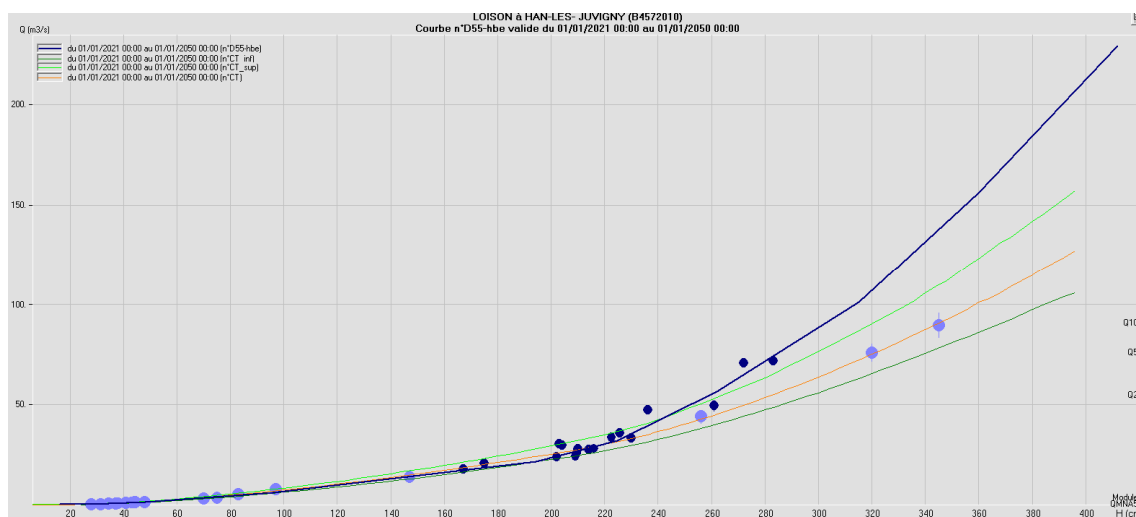


Fig. 21 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (B4572010) : courbes de tarage « juillet 2021 » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage « juillet 2021 » est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 22).

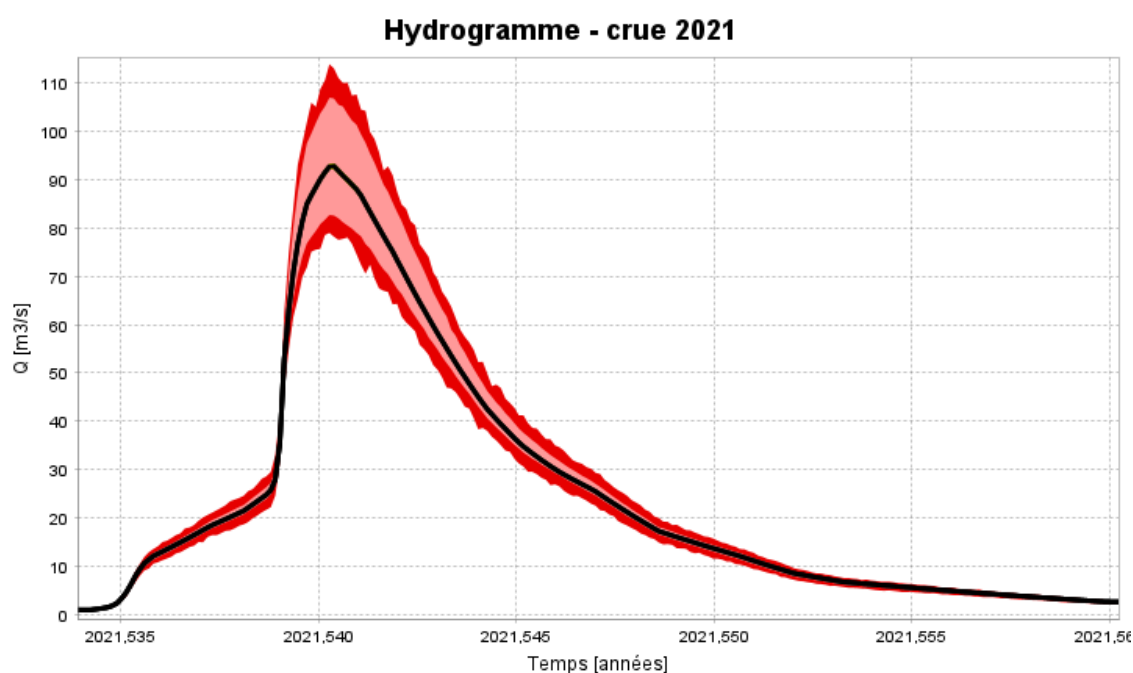


Fig. 22 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (B4572010) : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

2.7. La Chiers à Chauvency-le-Château (B4601010)

La station est située au niveau de l'amont du pont de la RD947, en amont du pont de la voie ferrée (Fig. 23). Ces deux ponts créent des rétrécissements (remblais) mais les principaux contrôles se situent néanmoins à l'aval, a priori. En étiage, on repère un seuil de moulin large situé en aval du pont suivant, au niveau du village (la dérivation variable par le moulin provoque des détarages, ainsi que les embâcles qui s'arrêtent sur le seuil). En crue, l'expansion dans le lit majeur cultivé en aval du pont ferroviaire impacte également la relation hauteur-débit au niveau de la station de mesure. On suppose donc un modèle simple à 3 contrôles: déversoir rectangulaire puis lit mineur + lit majeur rectangulaires.





Fig. 23 – La Chiers à Chauvency-le-Château (B4601010) : situation de la station et vues des contrôles en amont/aval

Les a priori sur ces 3 contrôles sont définis à partir de levés sur Géoportail :

Seuil :

- $k = 0 \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 80 \pm 10 \text{ m}$

Lit mineur :

- $k = 1 \pm 1 \text{ m}$
- $B = 25 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$
- $K = 30 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$ (estimée par défaut pour rivière de plaine, très incertain)

Lit majeur :

- $k = 1.5 \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 200 \pm 50 \text{ m}$
- $K = 20 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$

La courbe de tarage « normale » est estimée en utilisant les jaugeages associés à la courbe de tarage en vigueur sans l'unique jaugeage de la crue de juillet 2021 (Fig. 24). Les jaugeages sont réalisés au saumon par intégration (incertitude 10%) et par ADCP pour les plus récents (incertitudes QRevInt Oursin allant de 3% à 16%). Tous les jaugeages ont une incertitude fixée à 10% pour l'analyse BaRatin. On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, avec un calage plus précis des paramètres du lit mineur. La courbe de tarage estimée avec BaRatin est très proche de la courbe de tarage en vigueur.

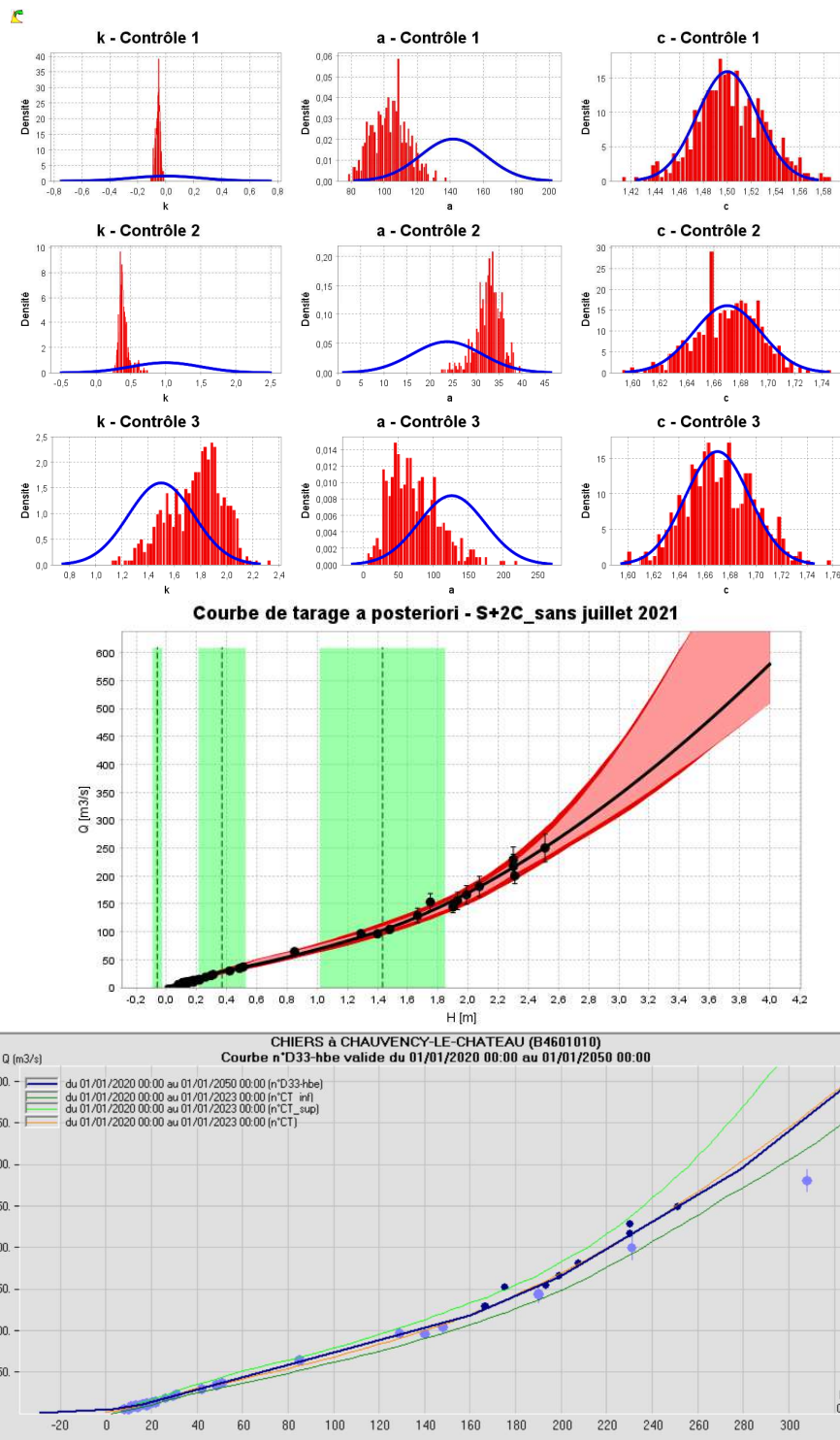


Fig. 24 – La Chiers à Chauvency-le-Château (B4601010) : courbes de tarage « normales » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

La courbe de tarage « juillet 2021 » est estimée en utilisant les mêmes jaugeages sauf ceux à cote supérieure à 1.5 m (avant débordement) et cette fois-ci avec le jaugeage de la crue de juillet 2021 (Fig. 25). Les *a priori* précédents sont conservés sauf la hauteur de débordement calée précédemment ($k_3 = 1.4 \pm 0.4$ m *a priori*). En effet, on fait l'hypothèse que la cote de débordement du lit majeur ne change pas selon la saison, et on transfère cette information que les deux seuls jaugeages après débordement de juillet 2021 ne peuvent pas fournir.

On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, mais l'incertitude de la courbe de tarage est plus grande que précédemment, surtout en crue. La courbe de tarage estimée avec BaRatin s'écarte de la courbe de tarage en vigueur, qui est proche du bord supérieur de l'enveloppe d'incertitude. Pour le lit majeur, on trouve un coefficient $a_3 = 2.5 \pm 15$ pour la crue 2021 contre $a_3 = 35 \pm 71$ hors crue 2021, soit une réduction d'un facteur 14 environ. Le coefficient de Strickler supposé de $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ serait donc réduit à $1.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ (valeur extrêmement faible !), toutes choses étant égales par ailleurs.

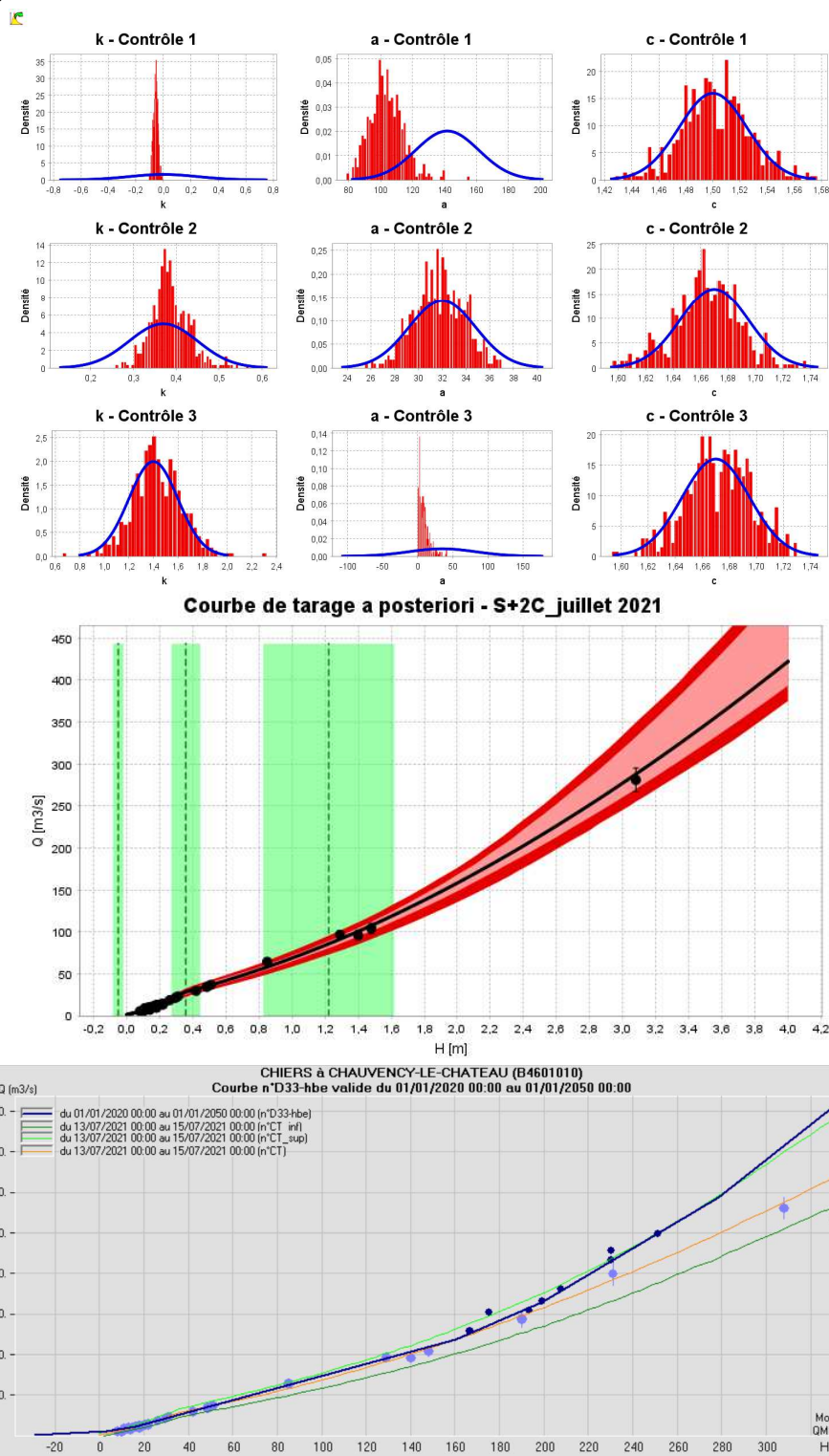


Fig. 25 – La Chiers à Chauvency-le-Château (B4601010) : courbes de tarage « juillet 2021 » : estimation BaRatin

avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage « juillet 2021 » est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 26).

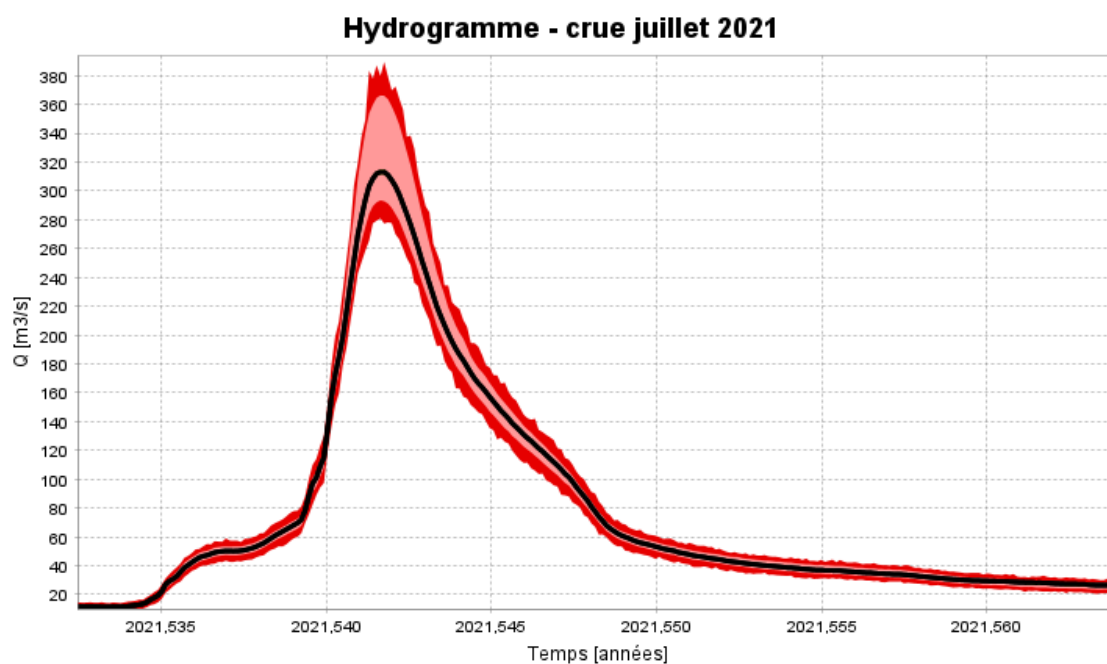


Fig. 26 – La Chiers à Chauvency-le-Château (B4601010) : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

2.8. L'Aisne à Mouron (H6201010)

La station est située au niveau du pont de la D121 (Fig. 27). Les contrôles supposés sont un lit mineur rectangulaire auquel s'ajoute un lit majeur rectangulaire.



Fig. 27 – L'Aisne à Mouron (H6201010) : situation de la station et vues des contrôles en amont/aval

Les a priori sont tirés de Geoportail et d'hypothèses sur la géométrie du chenal :

Lit mineur :

- $k = 0 \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 25 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$
- $K = 25 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$

Lit majeur :

- $k = 3 \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 300 \pm 200 \text{ m}$
- $K = 15 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$

La courbe de tarage « normale » est estimée en utilisant les jaugeages associés à la courbe de tarage en vigueur sans les 3 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 28). On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, avec un calage plus précis des paramètres du lit mineur. La courbe de tarage estimée avec BaRatin est proche de la courbe de tarage en vigueur.

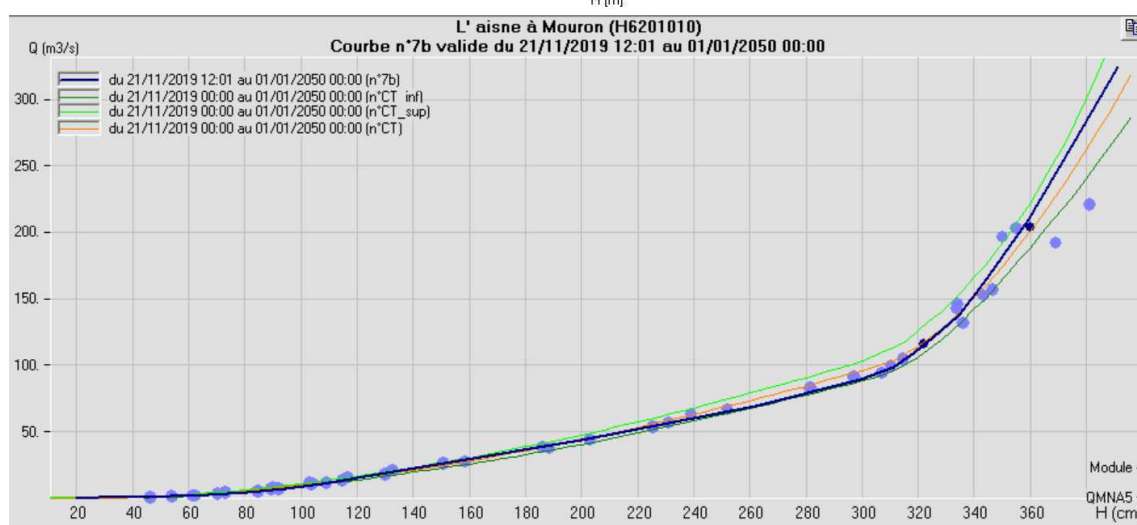
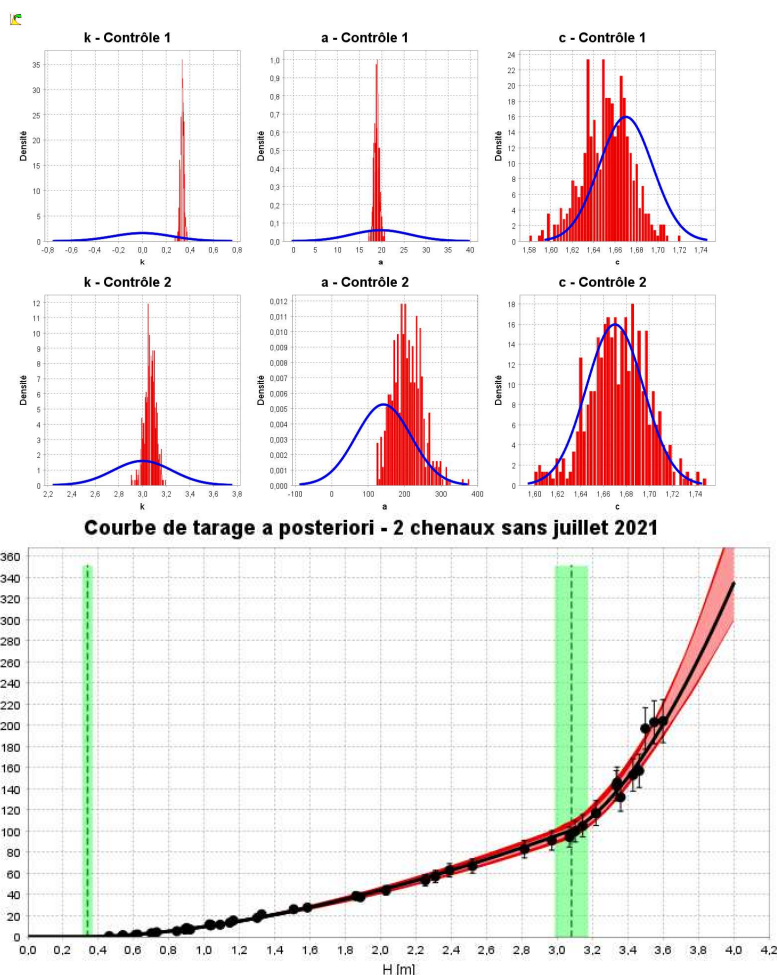
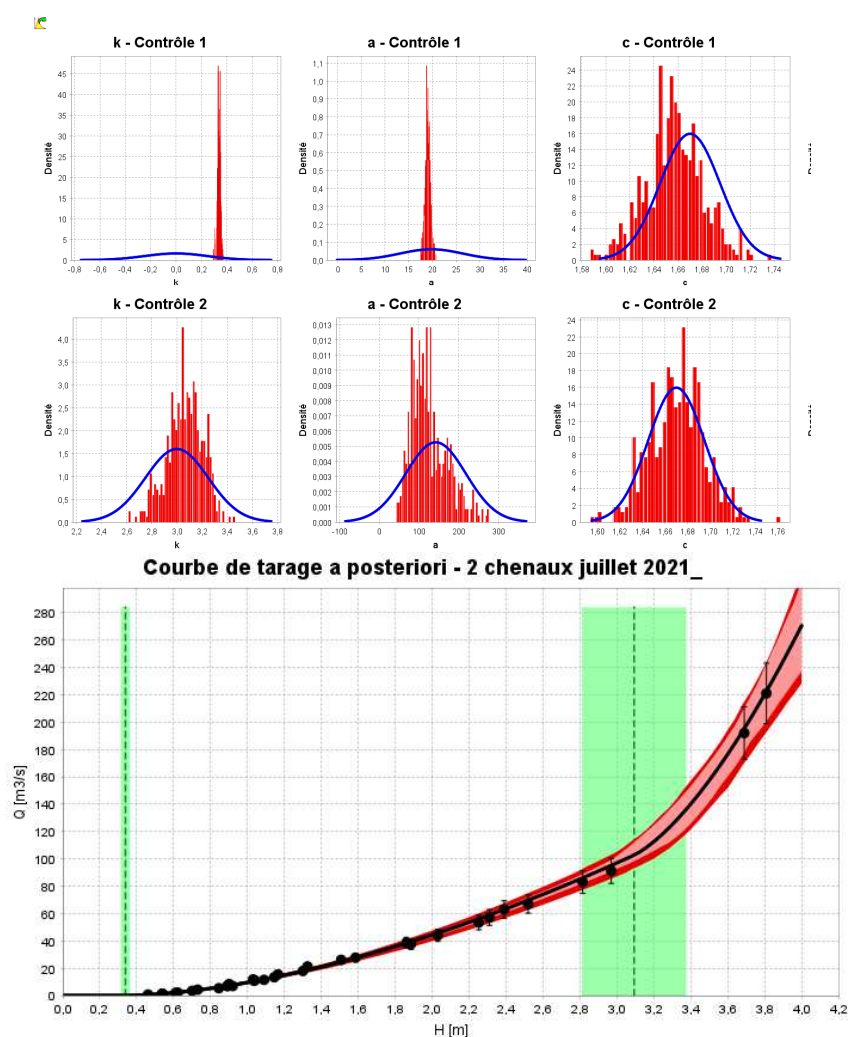


Fig. 28 – L'Aisne à Mouron (H6201010) : courbes de tarage « normales » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

La courbe de tarage « juillet 2021 » est estimée en utilisant les mêmes jaugeages sauf ceux à cote supérieure à 3 m (avant débordement) et cette fois-ci avec les 2 jaugeages de la crue de juillet

2021 (Fig. 29). Les a priori précédents sont conservés sauf la hauteur de débordement calée précédemment ($k_2 = XX \pm XX$ m a priori). En effet, on fait l'hypothèse que la cote de débordement du lit majeur ne change pas selon la saison, et on transfère cette information que les deux seuls jaugeages après débordement de juillet 2021 ne peuvent pas fournir.

On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, mais l'incertitude de la courbe de tarage est plus grande que précédemment, surtout en crue. La courbe de tarage estimée avec BaRatin s'écarte de la courbe de tarage en vigueur, qui sort de l'enveloppe d'incertitude. Pour le lit majeur, on trouve un coefficient $a_2 = 124 \pm 90$ pour la crue 2021 contre $a_2 = 197.5 \pm 81$ hors crue 2021, soit une réduction d'un facteur 1.6. Le coefficient de Strickler supposé de $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ serait donc réduit à $9 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, toutes choses étant égales par ailleurs.



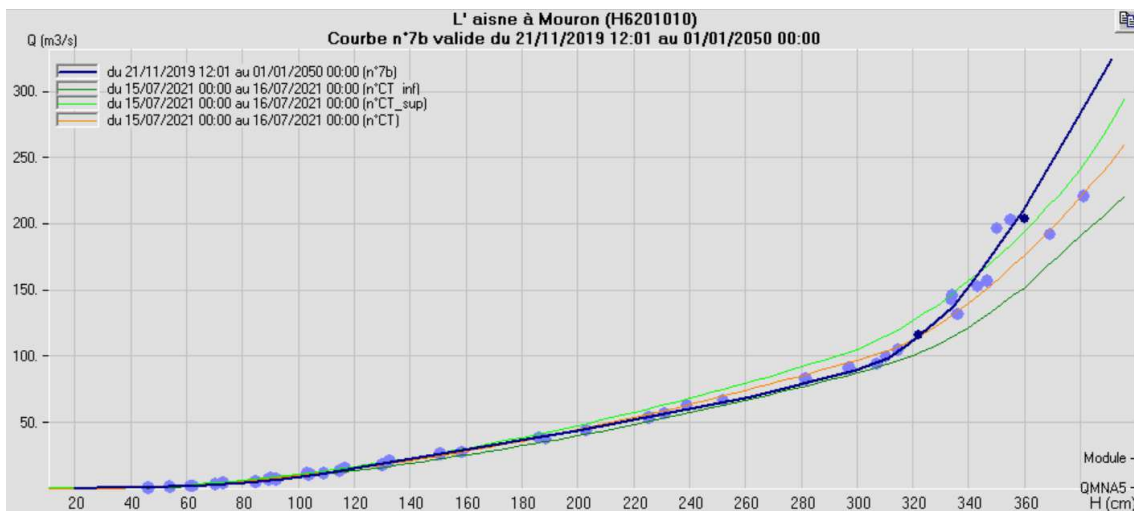


Fig. 29 – L'Aisne à Mouron (H6201010) : courbes de tarage « juillet 2021 » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage « juillet 2021 » est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 30).

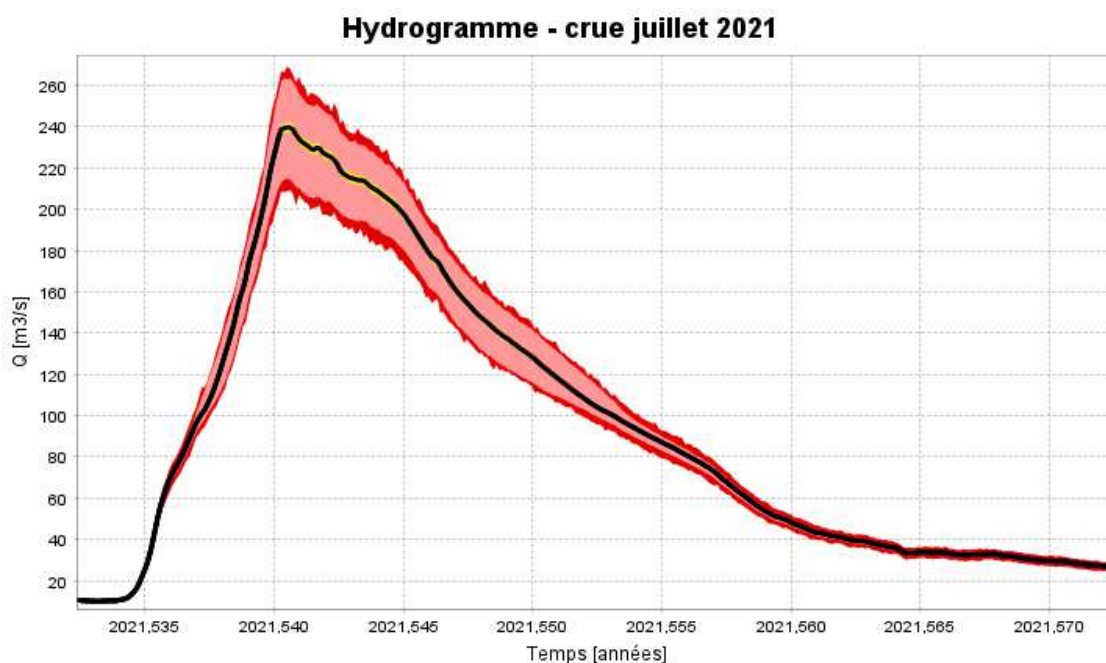


Fig. 30 – L'Aisne à Mouron (H6201010) : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

2.9. L'Aisne à Verrières (H6021020)

La station est située au niveau du pont de la rue du moulin de Bas (Fig. 31). Il semble y avoir un seuil ou radier peu élevé en aval du pont et de la station. Un lit majeur s'étend en rive droite sur environ 100 m de large, très grossièrement. On suppose donc un modèle simple à trois contrôles: déversoir rectangulaire puis lit mineur + lit majeur rectangulaires.



Fig. 31 – L'Aisne à Verrières (H6021020) : situation de la station et vues des contrôles en amont/aval

Les a priori définis sur ces trois contrôles sont déduits de Géoportail :

Seuil :

- $k = 0 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 14 \text{ m} \pm 4 \text{ m}$

Lit mineur :

- $k = 1 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$
- $B = 12 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$
- $K = 25 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$ (estimée par défaut pour rivière de plaine, très incertain)

Lit majeur :

- $k = 2.5 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 100 \pm 50 \text{ m}$
- $K = 20 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$

La courbe de tarage « normale » est estimée en utilisant les jaugeages associés à la courbe de tarage en vigueur sans l'unique jaugeage de la crue de juillet 2021 mesuré le 16/07/2021 (Fig. 32). On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, avec un calage plus précis des

paramètres du lit mineur. La courbe de tarage estimée avec BaRatin est très proche de la courbe de tarage en vigueur.

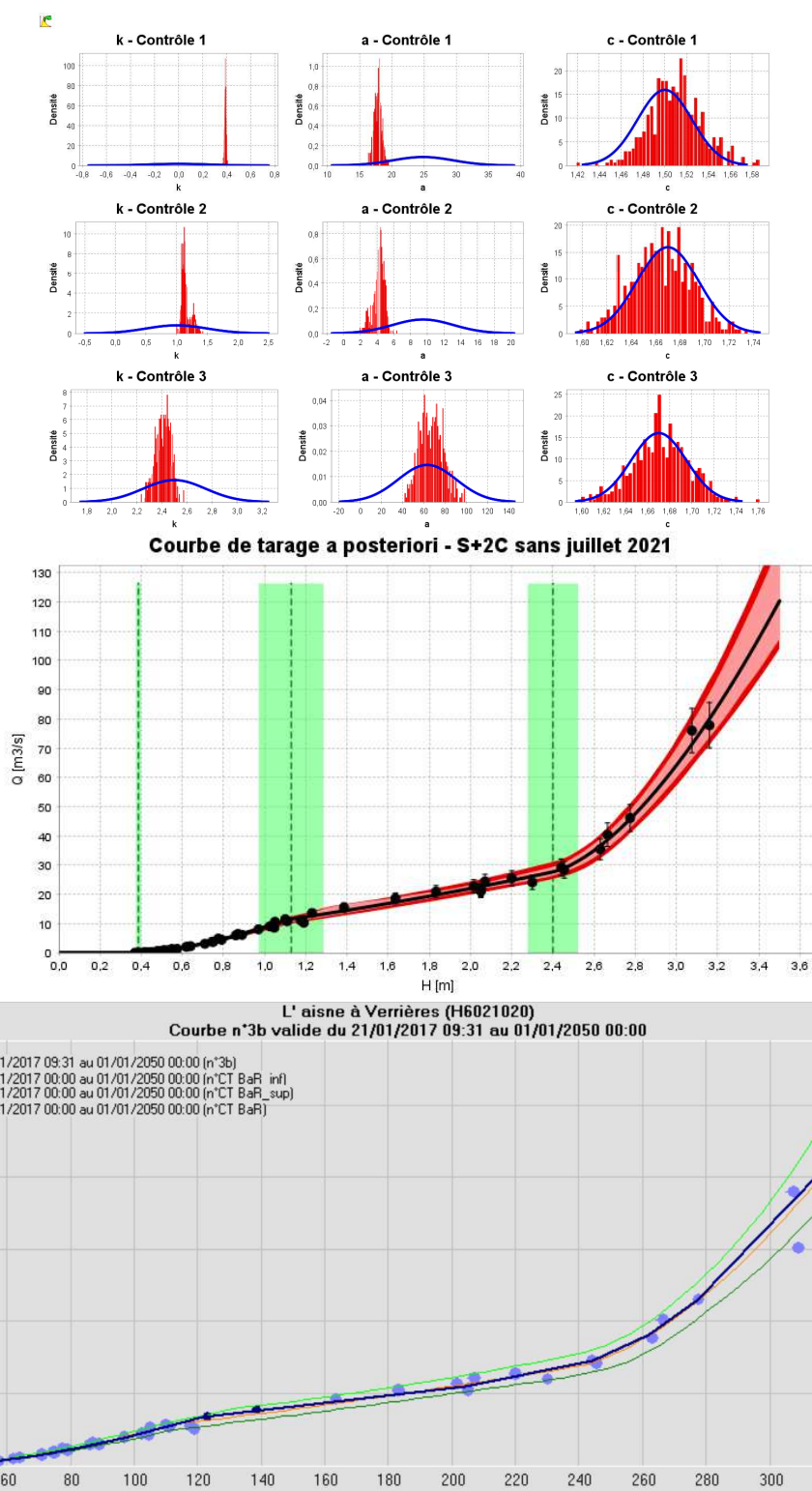
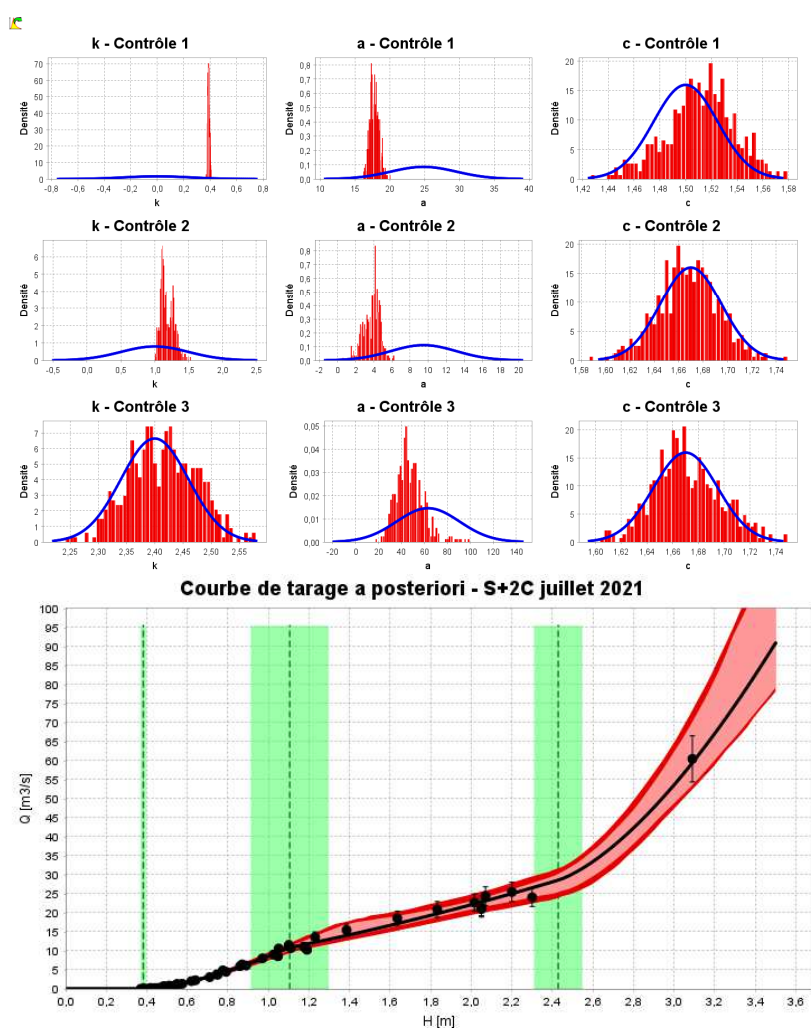


Fig. 32 – L'Aisne à Verrières (H6021020) : courbes de tarage « normales » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

La courbe de tarage « juillet 2021 » est estimée en utilisant les mêmes jaugeages sauf ceux à cote supérieure à 2.4 m (avant débordement) et cette fois-ci avec le jaugeage de la crue de juillet

2021 (Fig. 33). Les a priori précédents sont conservés sauf la hauteur de débordement calée précédemment ($k_3 = 2.4 \pm 0.12$ m a priori). En effet, on fait l'hypothèse que la cote de débordement du lit majeur ne change pas selon la saison, et on transfère cette information que le seul jaugeage après débordement de juillet 2021 ne peut pas fournir.

On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, mais l'incertitude de la courbe de tarage est plus grande que précédemment, surtout en crue. La courbe de tarage estimée avec BaRatin s'écarte de la courbe de tarage en vigueur, qui tome sur le bord supérieur de l'enveloppe d'incertitude. Pour le lit majeur, on trouve un coefficient $a_3 = 39 \pm 24$ pour la crue 2021 contre $a_3 = 63.5 \pm 22$ hors crue 2021, soit une réduction d'un facteur 1.6, exactement comme à Mouron plus en aval sur l'Aisne. Le coefficient de Strickler supposé de $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ serait donc réduit à $12.5 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, toutes choses étant égales par ailleurs.



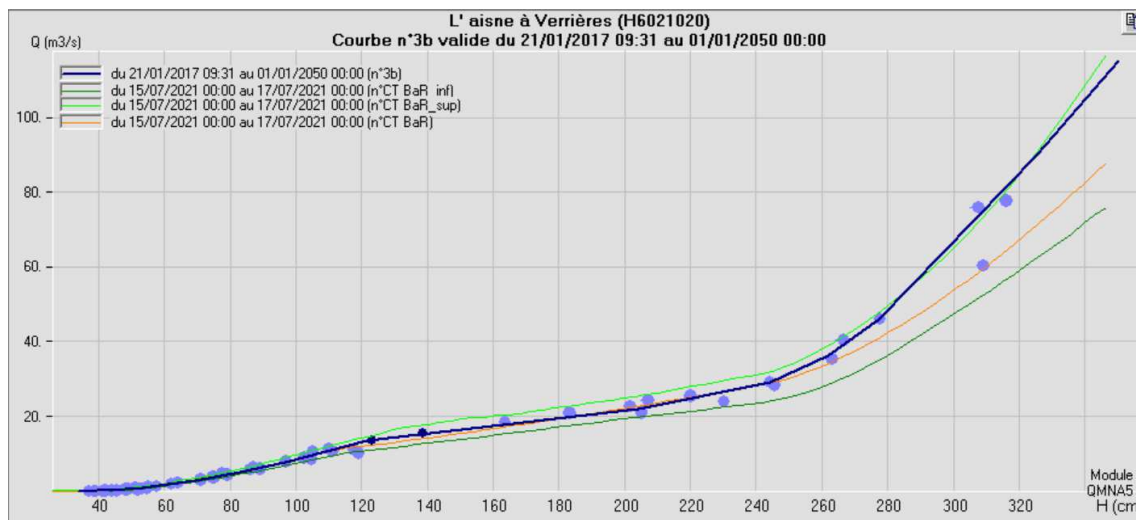


Fig. 33 – L'Aisne à Verrières (H6021020) : courbes de tarage « juillet 2021 » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage « juillet 2021 » est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 34).

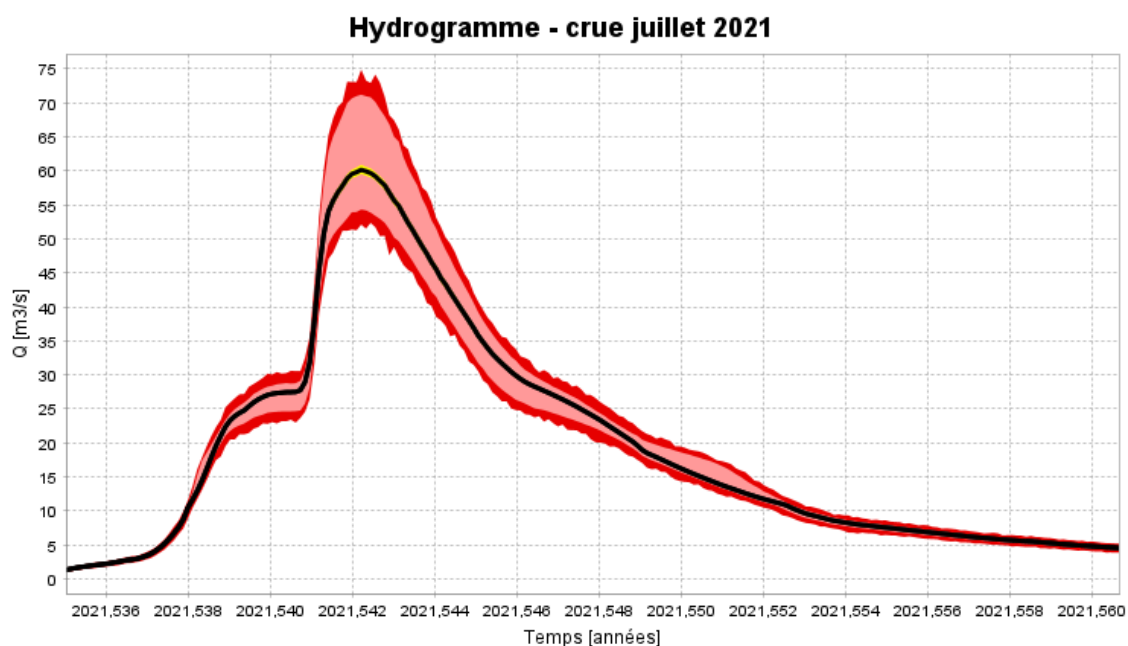


Fig. 34 – L'Aisne à Verrières (H6021020) : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

2.10. La Chiers à Montigny-sur-Chiers (B4031010)

La station est située au niveau du pont de la rue de la gare (Fig. 35). Il semble y avoir un possible contrôle par seuil ou radier peu élevé sous le pont pour les basses voire moyennes eaux. Un lit majeur s'étend sur environ 60-80 m de large en rive droite et 25-30 m en rive gauche, très grossièrement. Le lit mineur fait une quinzaine de mètres de large.

On suppose donc un modèle simple à trois contrôles: déversoir rectangulaire puis lit mineur + lit majeur rectangulaires.



Fig. 35 – La Chiers à Montigny-sur-Chiers (B4031010) : situation de la station et vues des contrôles en amont/aval

Les a priori définis sur ces trois contrôles sont déduits de Google Earth :

Seuil :

- $k = 0 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 15 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$

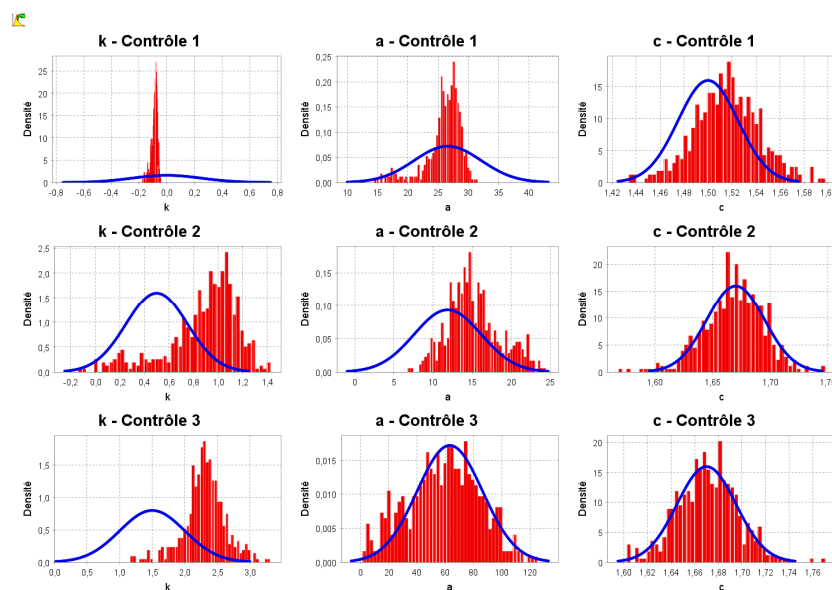
Lit mineur :

- $k = 0.5 \text{ m} \pm 0.5 \text{ m}$
- $B = 15 \text{ m} \pm 5 \text{ m}$
- $K = 25 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$ (estimée par défaut pour rivière de plaine, très incertain)

Lit majeur :

- $k = 1.5 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$
- $B = 100 \pm 20 \text{ m}$
- $K = 20 \pm 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$
- $S = 0.001 \pm 0.001$

La courbe de tarage « normale » est estimée en utilisant les jaugeages associés à la courbe de tarage en vigueur (plus deux jaugeages de moyennes eaux : 04/02/2020 et 28/01/2020) sans les deux jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 36). On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori. La courbe de tarage estimée avec BaRatin est proche de la courbe de tarage en vigueur, sauf pour la partie haute extrapolée, qui diverge et croise le bord inférieur de l'enveloppe d'incertitude vers une hauteur d'eau de 1.3 m.



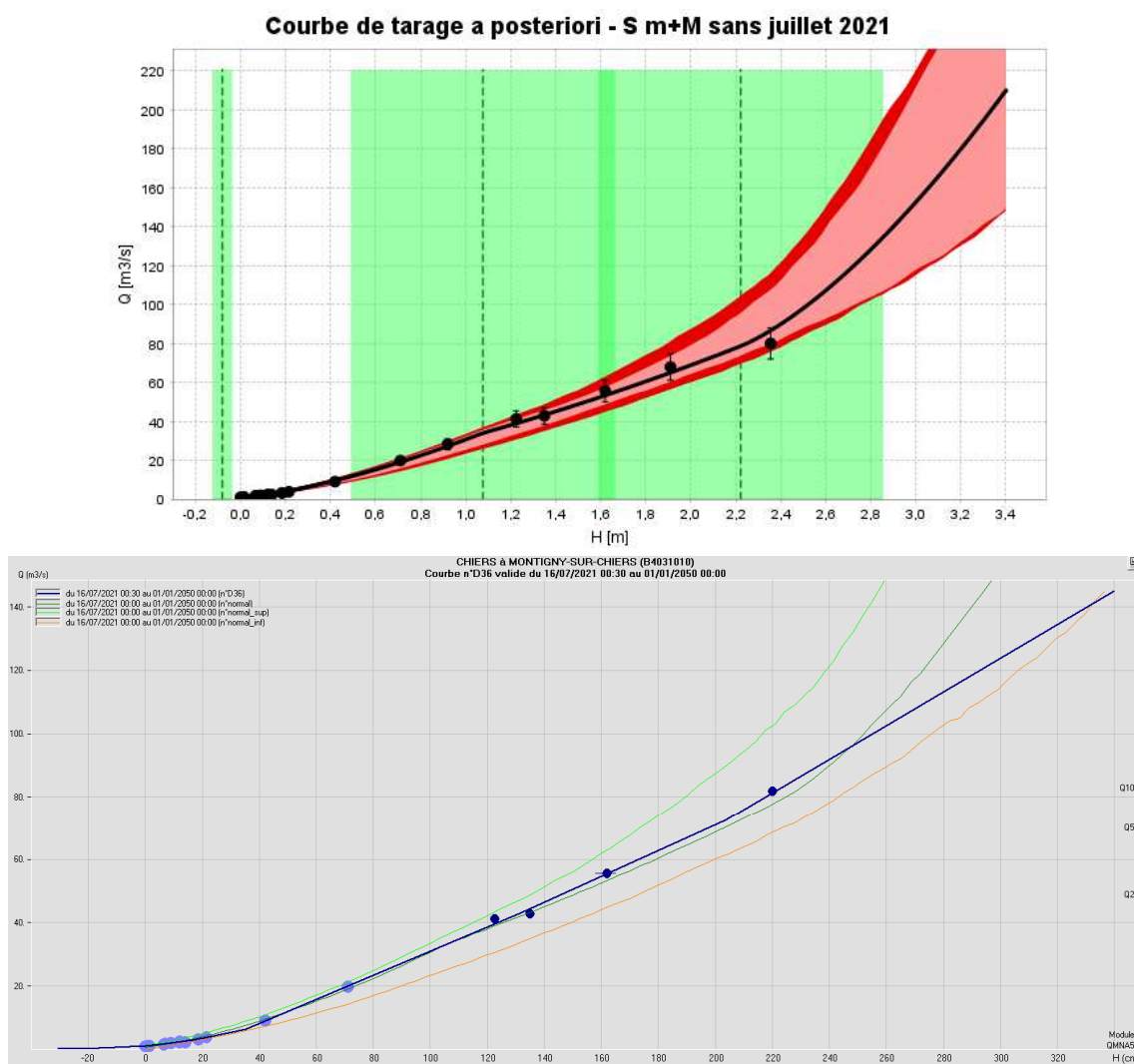


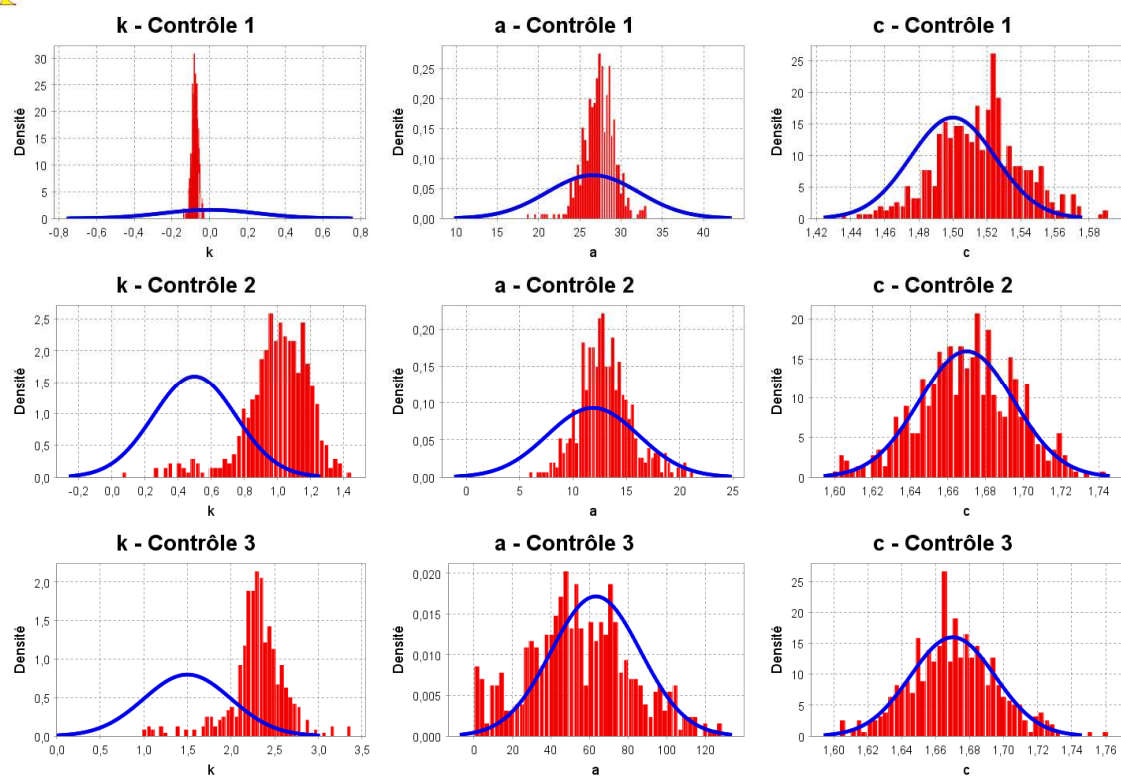
Fig. 36 – La Chiers à Montigny-sur-Chiers (B4031010) : courbes de tarage « normales » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

La courbe de tarage « juillet 2021 » est estimée en utilisant les mêmes jaugeages sauf ceux à cote supérieure à 2.2 m (avant débordement) et cette fois-ci avec les 2 jaugeages de la crue de juillet 2021 (Fig. 37). Les a priori précédents sont conservés sauf la hauteur de débordement calée précédemment ($k_3 = 2.22 \pm 0.6$ m a priori). En effet, on fait l'hypothèse que la cote de débordement du lit majeur ne change pas selon la saison, et on transfère cette information que le seul jaugeage après débordement de juillet 2021 ne peut pas fournir.

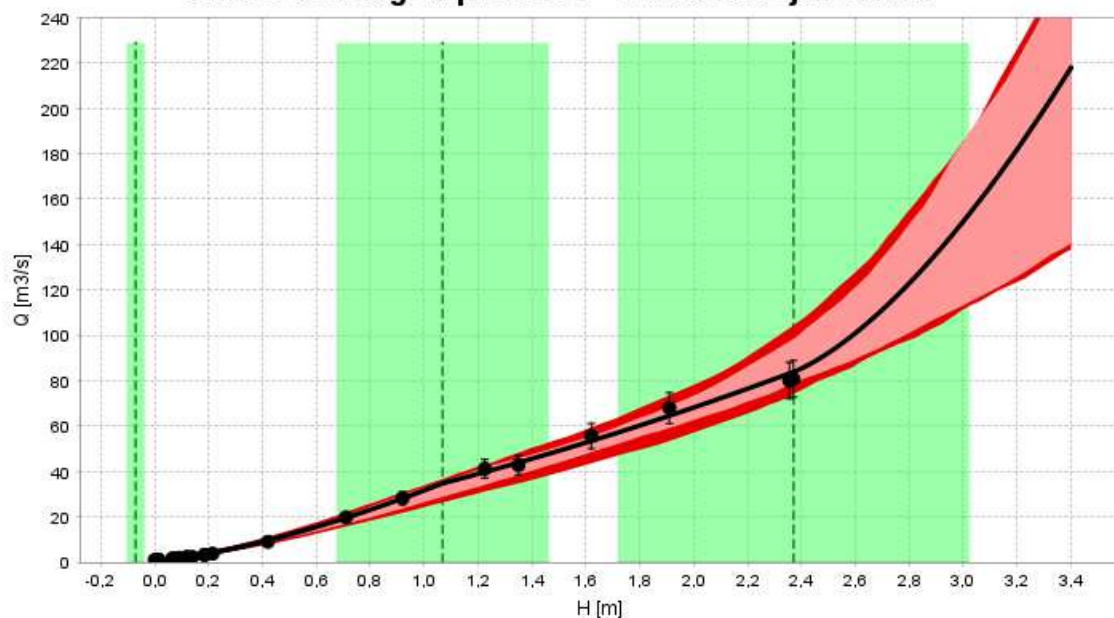
On ne constate pas de conflit entre les résultats a posteriori et les a priori, et l'incertitude de la courbe de tarage est équivalente à celle de la précédente, notamment en crue. La courbe de tarage ainsi estimée avec BaRatin est légèrement plus basse mais n'est pas significativement différente de la courbe de tarage « normale », eu égard à la large enveloppe d'incertitude. Comme pour la situation « normale », la courbe de tarage BaRatin est proche de la courbe de tarage en vigueur, sauf dans la partie extrapolée au-dessus des plus hauts jaugeages.

Faute de jaugeages en situation de débordement, le coefficient du lit majeur ne peut pas être estimé au-delà de l'information a priori, incertaine et surtout arbitraire. On trouve un coefficient $a_3 = 64 \pm 45$

pour la crue 2021 contre $a_3 = 54 \pm 50$ hors crue 2021, soit une légère augmentation, mais la différence n'est pas significative et ne peut pas être interprétée. S'il y a eu réduction de la débitance du lit majeur comme aux autres stations, ce qui est possible, cela ne s'est sans doute pas manifesté pendant cet événement en raison du débordement très limité.



Courbe de tarage a posteriori - S m+M crue juillet 2021



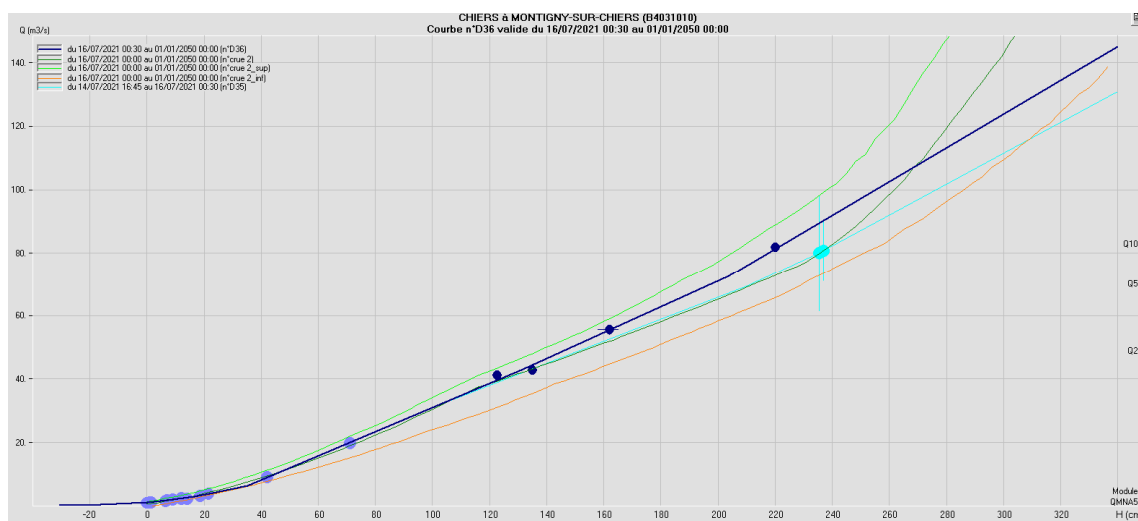


Fig. 37 - La Chiers à Montigny-sur-Chiers (B4031010) : courbes de tarage « juillet 2021 » : estimation BaRatin avec enveloppe d'incertitude paramétrique (rose) et totale (rouge), et comparaison avec la courbe de tarage de la base Barème

Cette courbe de tarage « juillet 2021 » est appliquée au limnigramme de la crue de juillet 2021 (incertitude supposée : 1 cm) exporté de l'Hydroportail (hauteurs instantanées horaires au mm) pour générer l'hydrogramme avec incertitudes (Fig. 38).

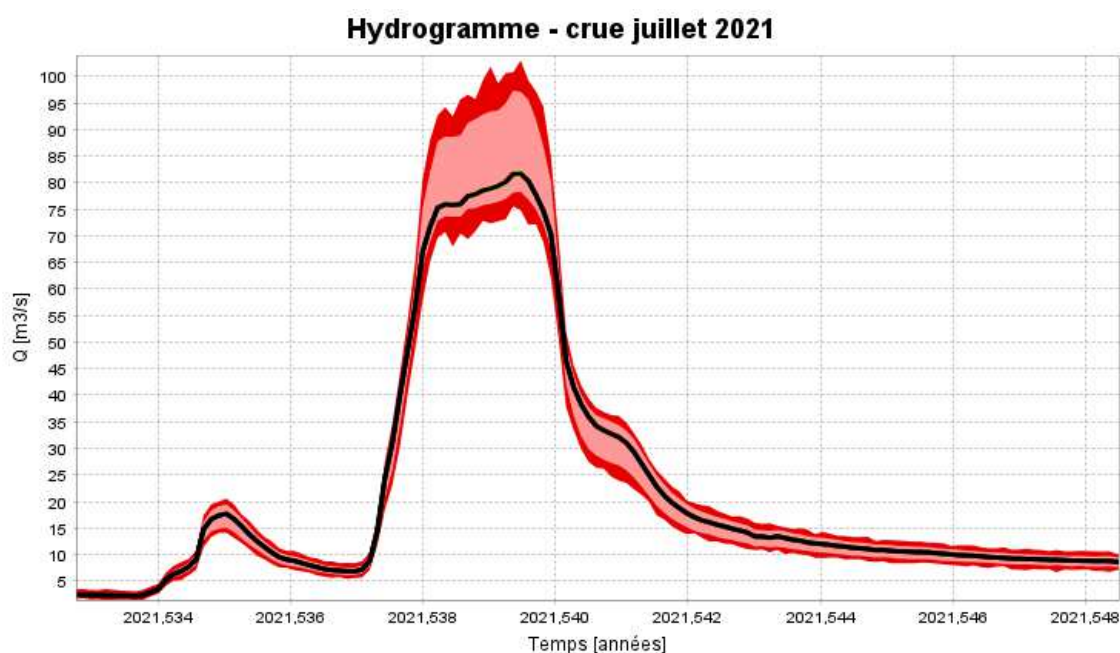


Fig. 38 - La Chiers à Montigny-sur-Chiers (B4031010) : hydrogramme de la crue de juillet 2021 estimé par BaRatin, avec enveloppe d'incertitude limnimétrique (jaune), paramétrique (rose) et totale (rouge) au niveau de probabilité de 95%

3. Analyse des causes possibles des détarages observés

3.1. Jaugeages biaisés ?

Une première cause des écarts constatés entre jaugeages et courbes de tarage pendant la crue de juillet 2021 pourrait naturellement être des erreurs de mesure sur les jaugeages. Néanmoins, ces écarts (de 10 à 60% voire plus) sont a priori bien plus grands qu'un éventuel biais des jaugeages ADCP réalisés par différentes équipes avec différents instruments, sur différentes stations. Une analyse complémentaire de certains jaugeages avec l'outil QRevlnt pourrait confirmer cela, si nécessaire.

A titre d'exemple, l'UH Meuse-Moselle a ainsi examiné ses jaugeages, faits avec différents modèles d'ADCP (Teledyne RDI RiverRay, Teledyne RDI Riverpro, SonTek M9) sur différents supports flottants (Qboat, planche Riverboard), en général en montée de crue. On a souvent observé du fond mobile en crue, avec des tests par boucle présentant un écart de 5% en général, souvent 10% en hiver à Chauvency, mais difficile à quantifier et corriger précisément. Ces tests de fond mobile n'ont pas pu être effectués lors de la crue de 2021 mais il y en avait sans doute à Chauvency. Une solution pour le fond mobile serait le jaugeage verticale par verticale (déploiement stationnaire), mais c'est plus long. Ces écarts induisent une sous-estimation du jaugeage (donc dans le sens des écarts constatés entre jaugeages et courbes de tarage) mais ils restent a priori faibles devant ces écarts. Les jaugeages ont également été post-traités et critiqués avec l'outil QRevlnt. Les débits ADCP en crue sont souvent ~10% plus faibles que les jaugeages faits à la cyclopotence (moulinet sur saumon suspendu) auparavant, mais cela est sans doute dû à un effet des piles de pont sur le jaugeage à la cyclopotence.

3.2. Effets d'hystérésis ?

Différents effets peuvent causer une hystérésis sur la relation hauteur-débit (ou courbes de tarage « en boucle », ou « en raquette »), c'est-à-dire une relation hauteur-débit non univoque, avec des débits différents pour une même hauteur d'eau, à différents instants de l'événement de crue. Ces différents effets hydrauliques sont généralement difficiles à démêler: propagation de l'onde de crue (effet souvent appelé « hystérésis »), végétation fléchie, stockage-déstockage en lit majeur, remous variable (influence aval), etc. Le premier effet semble a priori faible: on constate des débits jaugés systématiquement inférieurs à la courbe de tarage sur toutes les stations de l'étude, ce qui contredit un effet d'hystérésis. Cet effet pourrait être testé avec la formule de Jones, à partir des gradients hydrauliques dh/dt pendant la crue 2021 calculés à partir du limnigramme $h(t)$.

Petit test rapide pour Berry au bac, à partir des indications du fichier excel « Jaugeages » :

19/07 – 15h00 4,53 Montée
20/07 – 0h45 4,78 juste avant le pic

La formule de Jones (cf. Perret et al., 2022) donne :

dh/dt	7,12E-06 m/s
S	0,00024 m/m
K	30 m ^{1/3} /s
H-b	3 m

epsilon Jones 0,92 %

Soit un potentiel détarage $< 1\%$ donc négligeable.

En conclusion, l'hystérésis due à la propagation de l'onde de crue ne semble pas être la cause des écarts constatés, même si la crue est sans doute à montée plus rapide que d'habitude, et sur des chenaux à pente a priori très faible (deux critères qui augmentent l'effet d'hystérésis). Les autres effets évoqués ne semblent pas des explications réalistes des écarts non plus, selon les hydromètres locaux.

3.3. Encombrement inhabituel du lit majeur ?

C'est l'explication principale avancée par les hydromètres locaux et aussi la plus réaliste vu les estimations de courbes de tarage réalisées précédemment avec la méthode BaRatin, puisque les courbes de tarage spécifiques à la crue de juillet 2021, établies avec les jaugeages disponibles pour cette crue, présentent un coefficient du contrôle par le lit majeur fortement réduit par rapport aux courbes de tarage « normales » estimées avec des jaugeages d'hiver.

Cela amène néanmoins la question suivante : ***Une telle réduction du coefficient du lit majeur est-elle réaliste ?***

Pour répondre à cette question, nous pouvons nous référer aux valeurs typiques de coefficient de Strickler K_s (ou son inverse, le coefficient de Manning) en lit majeur avec ou sans culture rapportées dans des tables usuelles ou la littérature scientifique.

Par exemple, la **table de Chow (1959)** indique les valeurs suivantes pour des cours d'eau naturels - petits cours d'eau (largeur au plein bord < 30 m / 100 pieds), lits majeurs :

- $K_s = 33$ [25-50] pour surfaces cultivées, aucune culture
- $K_s = 25$ [20-33] pour surfaces cultivées, culture matures en champ, soit une réduction par 1.3
- $K_s = 10$ [6-14] pour broussailles moyennes à denses, en été, soit une réduction par 3.3-4
- $K_s = 7$ [5-9] pour saules denses, en été, alignés, soit une réduction par 5

Autre source classique, la **formule de Cowan (1956)** indique quant à elle, en lit majeur, avec les paramètres suivants :

- $N_b = 4$ (terre, et aussi sable/gravier)
- $N_1' = 3$ (irrégularités modérées)
- $N_3' = 1$ (obstacles négligeables)

Les coefficients de Strickler suivants :

- $N_4' = 0.1$ (végétation très faible) $\Rightarrow K_s = 26$
- $N_4' = 0.5$ (végétation faible) $\Rightarrow K_s = 21$
- $N_4' = 4$ (végétation très importante) $\Rightarrow K_s = 9$ (réduction par 2-3)
- $N_4' = 10$ (végétation extrême) $\Rightarrow K_s = 4$ (réduction par 5-6)

Avec les définitions suivantes :

- « végétation très importante » : Gazon poussant là où la profondeur de l'eau n'excède pas la moitié de la hauteur de la végétation, ou buissons denses ou modérément denses, ou bien d'importants peuplements d'arbres avec quelques arbres tombés et quelques broussailles ;

- « végétation extrême » : Broussailles denses de saules, prosopis, ou cèdre maritime (en plein feuillage), ou bien peuplement d'arbres important, quelques arbres à terre, la profondeur de l'eau atteignant les branches.

Enfin, le **rapport de l'USDA par Ree et Crow (1977)** est très intéressant car les valeurs de coefficient de résistance hydraulique ont été établies à partir d'expérience grandeur nature sur des parcelles cultivées mises en eau. Les résultats indiquent des coefficients de Strickler K_s de 5 à 3 pour des écoulements en champ de blé développé, et même $K_s=2$ pour d'autres cultures denses.

En conclusion, les réductions spectaculaires du coefficient de Strickler en lit majeur observés via les jaugeage et l'analyse BaRatin pour la crue de juillet 2021 sont possibles dans le cas de cultures hautes et denses, d'après les tables classiques. On peut néanmoins se demander si la ripisylve, qui semble border quasi continument les lits mineurs des sites étudiés, ne bloque pas davantage le débordement en été qu'en hiver, limitant ainsi l'export d'eau et de quantité de mouvement du mineur vers le majeur, et réduisant également la débitance du lit majeur en été.

4. Conclusions

Les analyses BaRatin présentées ici montrent que les grands écarts (20% à 60% typiquement) observés entre les jaugeages et les courbes de tarage de nombreuses stations du Nord-Est de la France lors de la crue exceptionnelle de juillet 2021 sont très probablement dus à une réduction du coefficient de débit des lits majeurs, souvent spectaculaire :

Stations baratinées	Coefficients de Strickler du lit majeur (normal / crue juillet 2021) en $m^{1/3}/s$	Facteur de réduction du coefficient du contrôle du lit majeur
L'Oise à Flavigny Le Grand	20 / 3.4	5.8
L'Oise à Hirson (Mire historique et Déversoir)		Pas de lit majeur
Aisne à Berry-au-bac, bras principal	20 / 5.5	3.6
L'Helpe majeure à Liessies	20 / 7	2.8
Le Loison à Han-lès-Juvigny	15 / 5	3
La Chiers à Chauvency-le-Château	20 / 1.5	14
L'Aisne à Mouron	15 / 9	1.6
L'Aisne à Verrières	20 / 12.5	1.6
La Chiers à Montigny-sur-Chiers		Non significatif

Les stations concernées ont connu un vaste débordement dans des lits majeurs larges et occupés par des cultures hautes et denses, non moissonnées en raison de la météo pluvieuse de ce mois de juillet 2021. Les valeurs de coefficient de Strickler et les facteurs de réduction sont cohérents avec les tables et études disponibles pour des lits majeurs très végétalisés, à part peut-être le cas extrême de la Chiers à Chauvency-le-Château où d'autres effets se sont peut-être ajoutés, comme une déconnexion du lit majeur par la ripisylve ou un remous dû aux ouvrages de franchissement.

Dans tous les cas, le retour d'expérience sur l'événement de juillet 2021 est précieux pour que les hydromètres et les prévisionnistes soient préparés à une telle possibilité de détarage en hautes eaux pour des crues d'été avec cultures hautes et denses en lit majeur. En pratique, des procédures pourraient être mises en place pour 1/ informer dès que possible la chaîne de prévision sur l'incertitude accrue sur les estimations de débit et 2/ mettre à jour le plus rapidement possible la courbe de tarage

quand des jaugeages de crue sont effectués. Cela peut passer par l'utilisation par défaut d'une courbe de tarage « crues estivales » différente de la courbe de tarage « normale » lorsque les cultures et la végétation sont développées dans le lit majeur. Cette courbe pourrait être celle calée sur l'événement de juillet 2021, qui semble (pour le moment !) être la situation la plus extrême possible (cultures pleinement développées et non moissonnées). Ou bien une courbe de tarage intermédiaire entre les deux situations (normale et crue 2021).

La méthode BaRatin appliquée dans cette étude présente plusieurs intérêts pour les services opérationnels. D'abord, sa base hydraulique simplifiée mais explicite permet d'interpréter directement les paramètres de la courbe de tarage, et notamment le coefficient du lit majeur qu'on peut supposer être le seul paramètre impacté pour des débordements en lit majeur végétalisé. En analysant les courbes de tarage des différentes stations, il est donc possible d'estimer l'ampleur potentielle de l'effet « lit majeur végétalisé » en regardant l'effet d'une variation du coefficient de Strickler du lit majeur, dans les gammes de valeur suggérées par les tables et études, et en particulier les valeurs obtenues sur les autres stations baratinées avec des jaugeages de la crue de juillet 2021. Cela permettrait d'identifier les stations à risque et l'incertitude associée. Il est ainsi possible de calculer une courbe de tarage « estivale » avant d'avoir des jaugeages, sur la base d'a priori sur le coefficient du lit majeur. Et la mise à jour de la courbe de tarage en cours d'événement pourrait être plus aisée et rapide via BaRatin puisque le modèle des contrôles serait déjà établi. Enfin, l'incertitude quantitative fournie par BaRatin est une information utile et pratique à transmettre aux prévisionnistes, en temps réel et à mesure que de nouveaux jaugeages et recalages sont disponibles.

5. Références

Chow, V.-T. (1959). Open-channel hydraulics. NewYork, NY: McGraw-Hill.

Cowan, W. L. (1956) Estimating hydraulic roughness coefficients. Agricultural Engineering, 37(7), 473-475.

Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. Journal of Hydrology, 509, 573-587.

Ree W. O., Crow, F. R. (1977) Friction Factors for Vegetated Waterways of Small Slope, Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Southern Region, 56 pages.



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**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

Programme MTE (DGPR/SRNH) – INRAE 2021

Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique par décision de subvention n°2102897179.



Action 2 - Prévision des inondations

EXPERT : Analyse des crues de juillet 2021
Volet modélisation hydraulique

Auteur : Benoît Camenen (INRAE, février 2023)

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Modélisation hydraulique de la Marne Amont.....	3
2.1. Documentation consultée.....	3
2.2. Problématique de modélisation de la crue de 2021.....	3
2.3. Géométrie pour la construction du modèle Mascaret.....	4
2.3.1. Densité des transects.....	5
2.3.2. Description des transects.....	5
2.3.3. Limite entre lit mineur et lit majeur.....	7
2.4. Propagation de la crue de juillet 2021 sur la Marne moyenne.....	9
2.4.1. Discussion sur les données officielles.....	9
2.4.2. Impact de la courbe de tarage à Frignicourt.....	10
2.5. Modélisation de la crue de juillet 2021 avec le modèle Mascaret.....	11
2.5.1. Rejeu du modèle avec les bonnes données d'entrée.....	11
2.5.2. Quelles améliorations du modèle Mascaret ?.....	12
3. Modélisation de l'Oise.....	15
3.1. Documentation consultée.....	15
3.2. Problématique de modélisation de la crue de 2021.....	15
3.3. Modèle de l'Aisne et de l'Oise.....	15
4. Conclusion sur les modélisations hydrauliques.....	17
5. Références.....	18

Analyse de la modélisation numérique unidimensionnelle des crues de juillet 2021 sur la Marne et l'Aisne

1. Introduction

« En juillet, des crues exceptionnelles pour la saison se sont produites dans le nord-est de la France. Leur caractère exceptionnel a rendu plus difficile la compréhension de leur déroulement, et entraîné une modification de la relation hauteur-débit et du temps de propagation. Cela a par conséquent compliqué le travail de prévision et dégradé la qualité des informations fournies. La présence de végétation a sans doute joué un rôle, mais ce n'est sans doute pas le seul élément ayant eu une influence. Une expertise du fonctionnement de ces rivières est utile à la fois pour améliorer les prévisions sur ces secteurs, mais aussi sur d'autres territoires ayant un fonctionnement similaire. Les cours d'eau les plus concernés par le côté exceptionnel sont l'Aisne et l'Oise, et la Marne et la Chiers. »

Ce rapport présente une discussion de la modélisation 1D de la Marne pour laquelle le modèle Mascaret (EDF) a été mis à disposition. Concernant la modélisation 1D de l'Oise, elle est réalisée à l'aide du modèle Hydra d'Hydratec qui n'est pas ouvert. Nous avons donc simplement discuté des résultats de cette modélisation.

2. Modélisation hydraulique de la Marne Amont

2.1. Documentation consultée

- *REX 3 mois juillet21 SAMA VF.pdf* : REX SPC Seine Amont Marne Amont (46 p.)
- Rapport de calage, modélisation et test temps réel du modèle MASCARET « Marne Moyenne », SPC SAMA (J. Habert), 2010
- Thèse de doctorat de Johan Habert (2016) : « Prévisions des crues en temps réel sur le bassin de la Marne : assimilation in situ pour la correction du modèle hydraulique mono-dimensionnel Mascaret »

2.2. Problématique de modélisation de la crue de 2021

Les remarques suivantes indiquent les difficultés de modélisation lors de cette crue de juillet 2021 : « Cependant, la cinétique de la crue a été plus lente qu'en période hivernale, notamment à cause de la végétation, la crue a de ce fait été beaucoup plus lente à se propager. Ces modèles ont été calés avec des crues hivernales, qui n'ont pas la même cinétique que des crues estivales, ce qui a rendu plus compliqué l'analyse des modèles. En effet, la présence très importante de la végétation (contrairement à une crue hivernale) en lit mineur avec la présence d'herbiers et en lit majeur avec des cultures a eu pour principale conséquence de changer la cinétique de la crue. Ainsi la propagation a été plus lente que lors d'un épisode hivernal, et les niveaux atteints pour un débit donné ont été plus importants, ce qui a rendu plus compliqué la prévision précise des hauteurs d'eau attendues. »

La Figure 1 présente ainsi un exemple de résultat de Mascaret en comparaison les observations et prédictions GRP à la station de Châlons-en-Champagne. Le modèle Mascaret sur-estime le pic de débit à Châlons-en-Champagne de plus de 100 m³/s avec une anticipation de 24 h. L'écroulement de la crue n'a donc pas été pris en compte du fait a priori d'une rugosité plus élevée (végétation plus dense en été sur les berges et le lit majeur actif) mais peut-être aussi d'une sous-estimation des débordements dans le lit majeur.

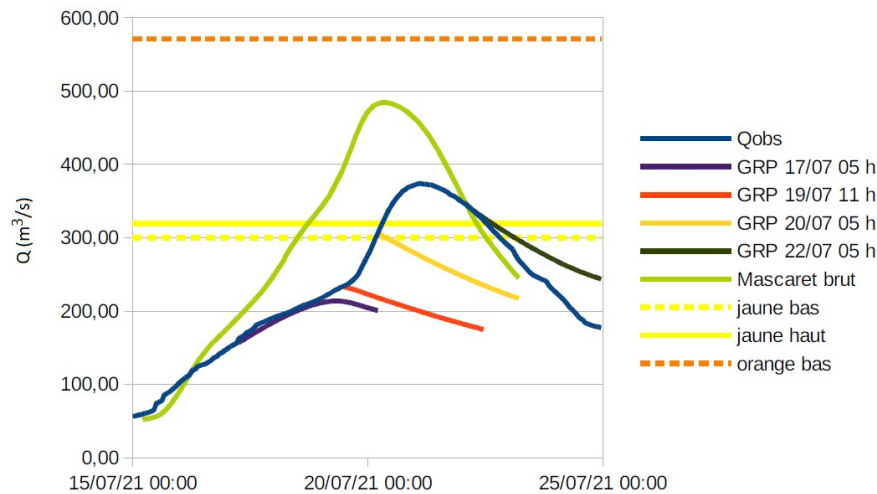


Figure 1: Rejeux en débit des modèles Mascaret (brut) et GRP (scénario RR3) à la station de Châlons-en-Champagne (Heure en TU).

Il est important de noter que nous nous focalisons ici au secteur modélisé avec un modèle unidimensionnel en aval du lac Marne (ou lac du Der-Chantecoq, Figure 2). La problématique de gestion du lac Marne n'est donc pas discutée ici. La Figure 2 indique la position des principales stations hydrométriques sur le bief étudié de la Marne moyenne.



Figure 2: Localisation du bief de la Marne moyenne étudié et des stations hydrométriques utilisées (points rouges).

2.3. Géométrie pour la construction du modèle Mascaret

Le modèle Mascaret de la Marne moyenne a été fourni (J. Habert, SPC SAMA). Il inclut trois biefs : une partie amont de la Marne de Frignicourt à la confluence avec la Saulx, un court bief de la Saulx de la station de Vitry-en-Perthois à la confluence avec la Marne, et le bief de la Marne de la confluence avec la Saulx jusqu'à l'aval de Meaux (PK160) (Figure 2).

2.3.1. Densité des transects

Avant même de discuter les modélisations, il est important de noter que le modèle actuel est loin d'être optimisé : on ne retrouve en moyenne qu'un transect tous les 900 m avec de nombreux transects séparés de plus de 2 km (Figure 3) mais aussi de nombreux transects avec une distance inférieure à la largeur du lit mineur (environ 80m). Un exemple assez critique : les transects 8 (PK=17737) et 9 (PK=1759) sont séparés de 22 m alors même que ces transects font plusieurs km de largeur ! Les PK 104 et 105 ne sont séparés que de 1 m ! Il semblerait que cela corresponde à un ouvrage. Cependant, il serait plus opportun de ne pas résoudre les équations de Barré-de-Saint-Venant sur l'ouvrage mais d'imposer une loi d'ouvrage.

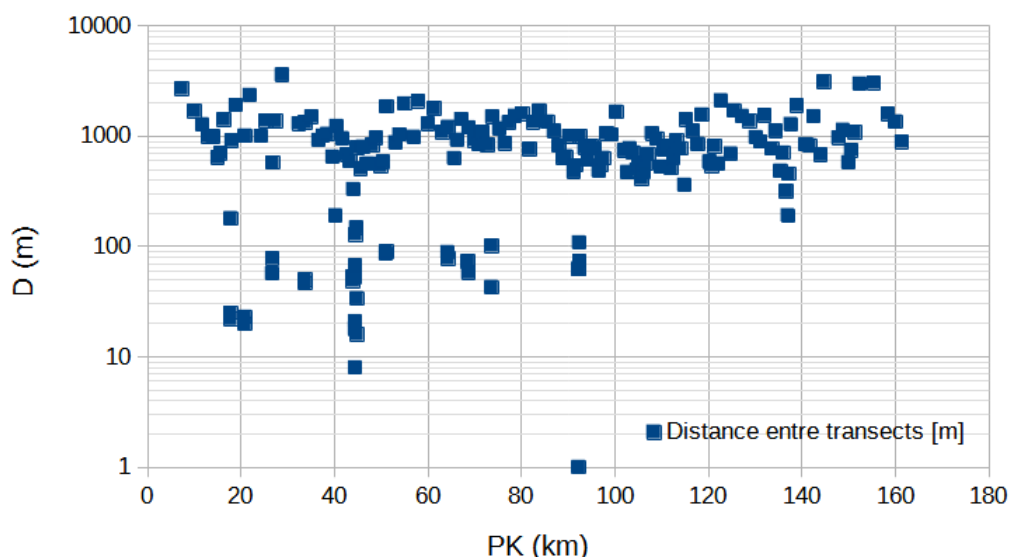
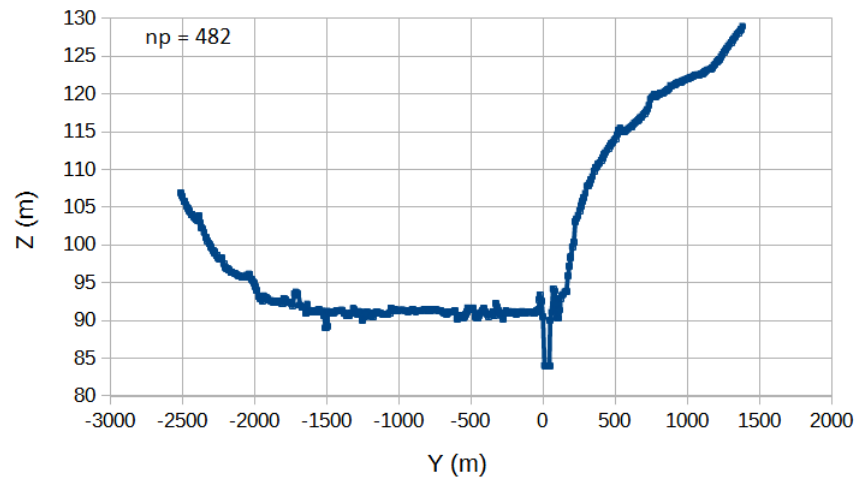


Figure 3: Distance entre transects du modèle Mascaret de la Marne moyenne

2.3.2. Description des transects

Les transects en eux-même décrivent de façon succincte le lit mineur (en 4-5 points sur certains transects) alors que le lit majeur peut être détaillé avec plusieurs centaines de points dont de nombreux sont situés à une cote bien au-delà de la plus grosse crue jamais calculée. A titre d'exemple, le transect n°15 (PK 20,841) est présenté Figure 4. Ce transect est composé de 482 points dont 8 pour décrire le lit mineur (5 d'entre ayant la même cote, soit un lit mineur de forme rectangulaire). La largeur du transect fait près de 4 km pour un lit mineur de 50 m de largeur et la cote du point le plus haut est située 45 m au dessus du fond du lit mineur. Une telle largeur du lit majeur n'a ici plus de signification physique car la modélisation numérique du débordement va se faire automatiquement sur les 2 km de largeur du lit majeur.

(a)



(b)

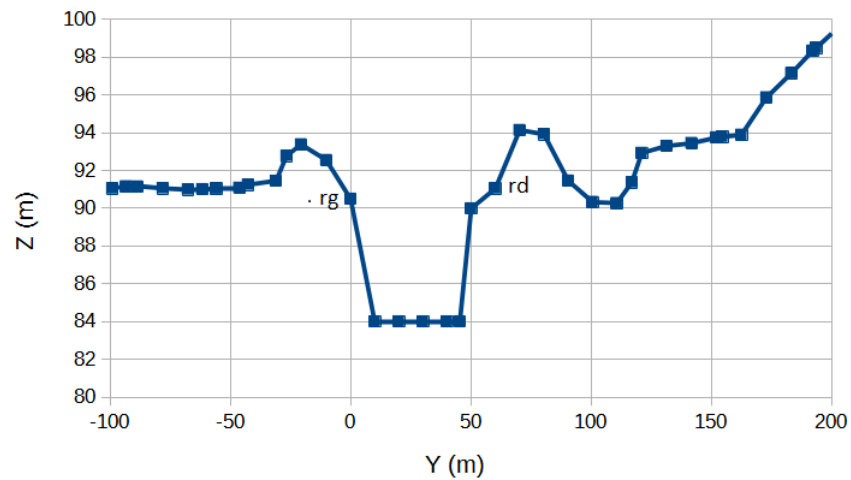


Figure 4: Exemple de transect (PK 20,841) du modèle Mascaret de la Marne présenté dans son ensemble (a) et zoomé sur le lit mineur (b)

Les deux exemples présentés Figure 5 présentent quelques autres problématiques de modélisation que l'on retrouve dans le modèle. Ainsi le transect 39 (PK 43,926, Figure 5a) présente un lit mineur en rive droite plus bas que les directrices rg et rd encadrant le lit mineur. Aussi, ce transect est très différent des deux transects l'encadrant (PK 43,873 et PK 43,975, très proches) qui laisse suspecter la présence d'un ouvrage. On retrouve cette même problématique pour le transect 60 (PK 51,042, Figure 5b) avec un transect situé 5 m plus haut que les transects amont et aval et la présence d'ouvertures verticales. Cela donne à penser qu'un ouvrage a été représenté ici. Comme discuté précédemment, il serait a priori plus judicieux d'imposer une loi d'ouvrage plutôt que de résoudre les équations de Barré-de-Saint-Venant sur une telle série de transects. Cela peut en effet induire des instabilités numériques. A noter aussi que ces trois transects sont représentés avec plus de 4500 points !

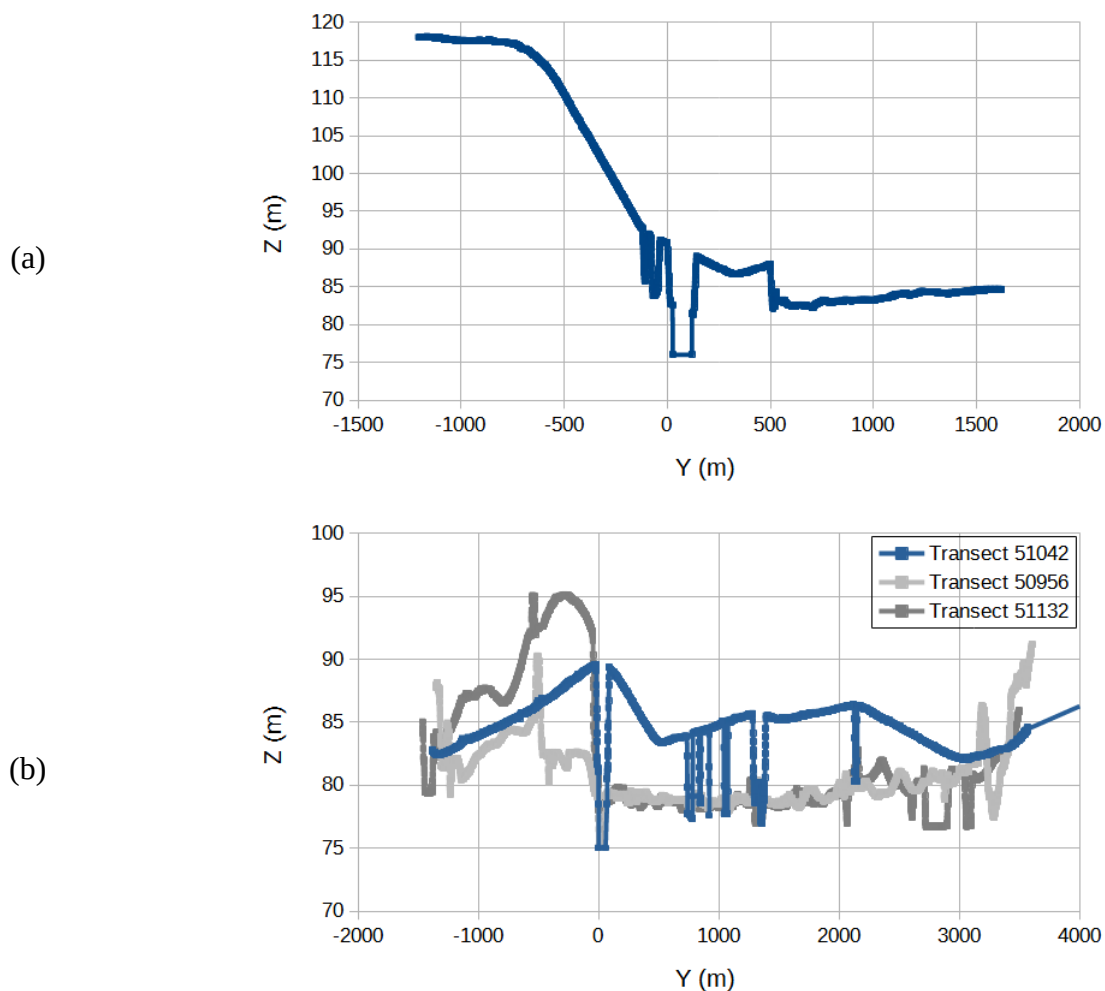


Figure 5: Exemples de transects du modèle Mascaret de la Marne avec une problématique de représentation du lit majeur potentiellement incomplète (a : PK 43,926) ou avec une certaine incohérence avec les transects amont et aval (b : PK 51,042).

2.3.3. Limite entre lit mineur et lit majeur

Il serait aussi important de savoir comment sont représentés dans le calcul de Mascaret les points du lit majeur plus bas que les berges hautes du lit mineur. En effet, le lit mineur inclut la description de nombreux plans d'eau et autres bras morts qui n'ont pas vraiment de sens à être représenté alors même que le lit mineur méandre au sein du lit majeur. Dans une modélisation 1D, la prise en compte d'un lit majeur n'a de sens que si ce lit majeur est actif lors d'un débordement. Dans le cas contraire, il faudrait construire des casiers.

La description du lit a donc une importance fondamentale. Dans de nombreux modèles, le calcul se fait en abscisse-cote après transformation de la géométrie réelle. Le positionnement des directrices séparant le lit mineur et le lit majeur (rg : rive gauche et rd : rive droite) est fondamental. En effet, dans certains modèles, tout point situé plus bas en altitude que ceux décrits par les directrices sont inclus dans le lit mineur même s'il correspond a priori à une description du lit majeur (chenal secondaire, plan d'eau, etc.). Dans d'autres modèles, la cote de ces points est automatiquement remontée à la cote limite entre le lit mineur et le lit majeur (de la directrice la plus proche) afin de conserver ces points dans le lit majeur.

On retrouve ainsi cette problématique Figure 6a (PK 16,316) où plusieurs chenaux secondaires (ou

plans d'eau) sont juxtaposés au lit mineur avec des cotes des directrices rg et rd au dessus du niveau du fond de ces formes situées dans le lit majeur. On retrouve la même problématique au transect suivant Figure 6b (PK 17,737) avec la présence d'un plan d'eau (a priori) de plus de 300 m de largeur avec une cote du fond inférieure aux cotes des directrices rg et rd. A noter de plus la problématique de distance entre deux transects ici, comment interpoler entre ces deux sections pour créer le maillage alors qu'elles n'ont plus grand-chose en commun ?

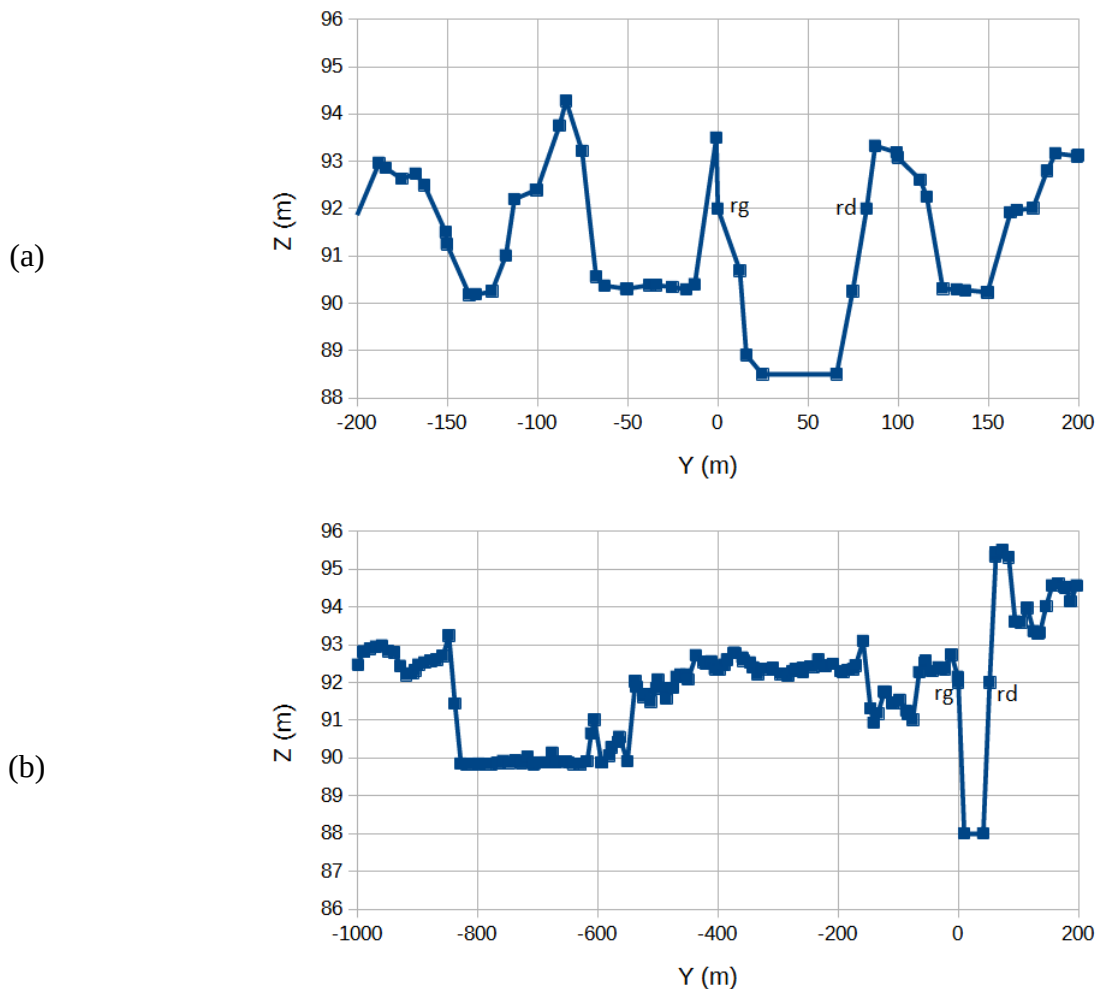
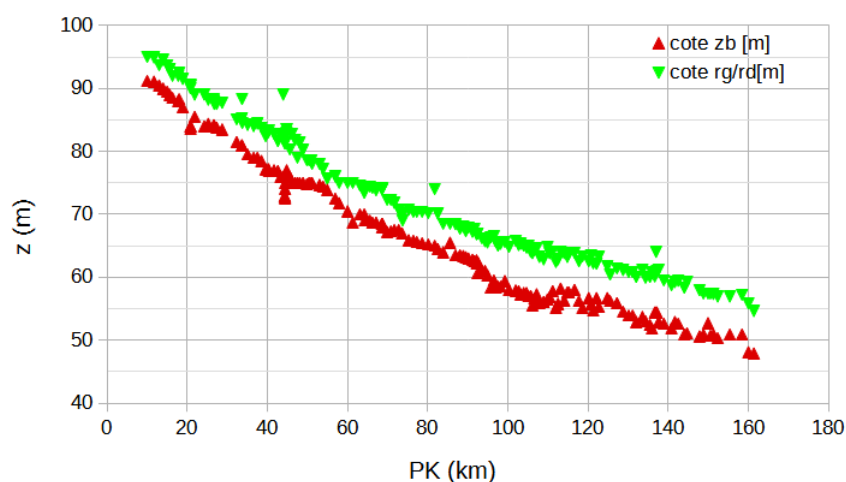


Figure 6: Exemples de deux transects consécutifs zoomés autour du lit mineur (a : PK 16,316 ; b:17,737) du modèle Mascaret de la Marne.

La Figure 7 indique les cotes du thalweg et de la limite lit-mineur / lit majeur ainsi que la largeur du lit mineur à cette dernière cote. La cote du thalweg suit une pente d'environ 0,038 % sur les 70 premiers kilomètre puis diminue à 0,014 % sur la seconde partie du bief. Il est à noter toutefois que la géométrie du lit mineur est très souvent décrite de façon succincte, voire même artificiellement reproduite (section rectangulaire). La pente de la limite lit-mineur / lit majeur suit logiquement la pente du fond avec une hauteur d'eau dans le « lit mineur » de 4-5 m sur la partie amont et de 6-8 m sur la partie aval. La largeur du lit mineur reste très variable (Figure 7b) entre 30 et 200 m mais la tendance tend à augmenter entre 60 m en amont et 80 m en aval.

(a)



(b)

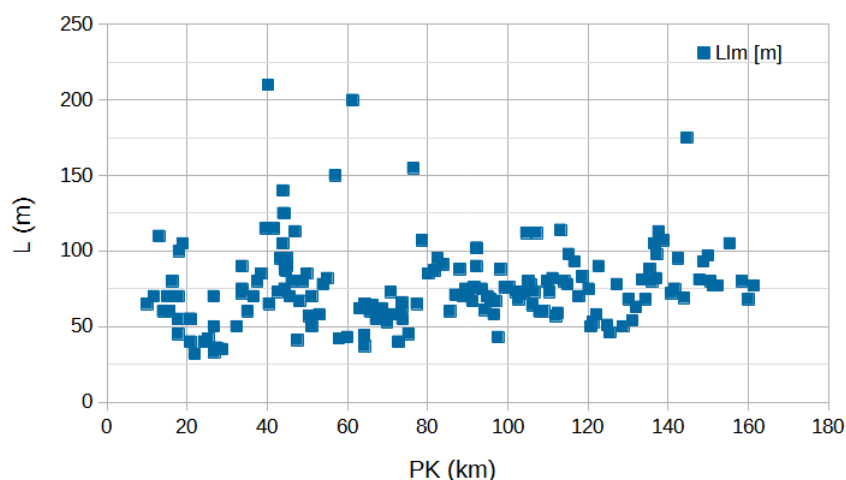


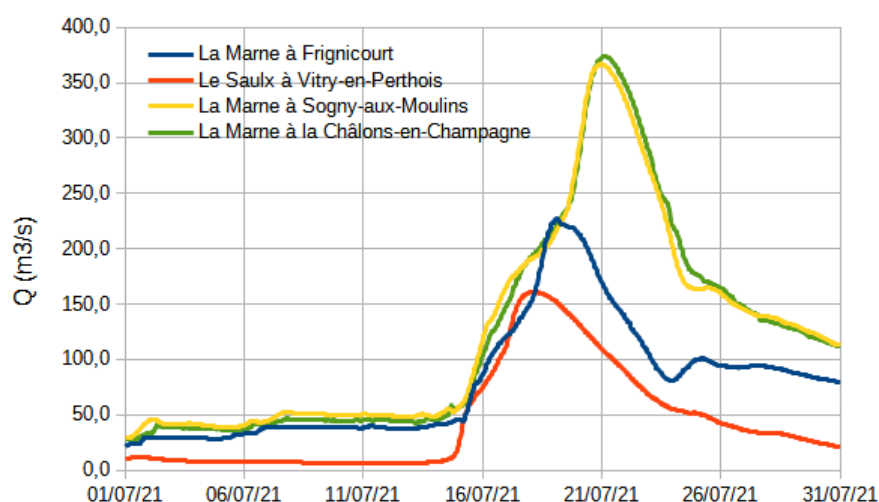
Figure 7: Cote du thalweg et de la limite lit mineur / lit majeur du modèle Mascaret de la Marne (a) ainsi que les largeurs du lit à cette limite lit mineur / lit majeur.

2.4. Propagation de la crue de juillet 2021 sur la Marne moyenne

2.4.1. Discussion sur les données officielles

Une première discussion peut se faire à partir des données mesurées et courbes de tarage officielles pour les débits (soit les données recalées). La Figure 8 présente les mesures de niveaux d'eau et débits (lorsqu'une courbe de tarage est établie) sur le tronçon d'étude soit sur la Marne moyenne entre Frignicourt et Châlons-en-Champagne avec l'apport de la Saulx à Vitry-en-Perthois. Le positionnement des stations est présenté en Figure 2. Il est à noter que la station de La-Chaussée-sur-Marne ne présente pas de courbe de tarage du fait des nombreux débordements existants autour de cette station. Sur la Figure 8 et le Tableau 1 récapitulatif, on peut voir que la crue arrive plus vite sur la Saulx que sur la Marne avec un front de crue sensiblement plus raide. On observe une propagation de la crue relativement lente de Frignicourt (PK0,1 du modèle) à La-Chaussée-sur-Marne (PK 24 du modèle), puis avec un certain raidissement de la montée des débits à Sogny-aux-Moulins (PK 36 du modèle) et Châlons-en-Champagne (PK 42 du modèle). Ceci laisse à penser qu'il y a de nombreux débordements sur la partie amont de ce bief impliquant un ralentissement et un écrêtement de la crue. Ces débordements seraient a priori moins nombreux en aval de La-Chaussée-sur-Marne.

(a)



(b)

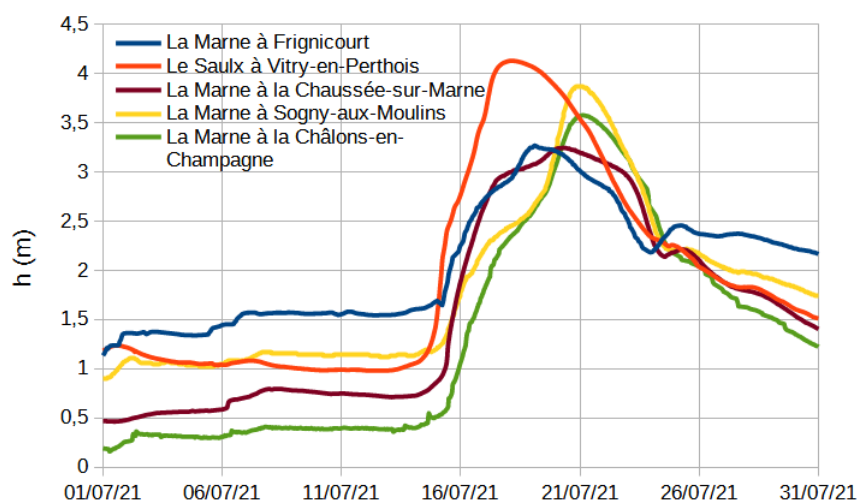


Figure 8: Propagation de la crue sur la Marne moyenne entre Frignicourt et Châlons-en-Champagne avec l'apport de la Saulx à Vitry-en-Perthois : (a) débits, (b) hauteurs.

Sur la base des résultats présentés au Tableau 1, on peut estimer une propagation de crue avec une célérité d'environ 0,8 km/h entre Frignicourt et La-Chaussée-sur-Marne, 0,7 km/h entre La-Chaussée-sur-Marne et Sogny-les-Moulins, et 2,4 km/h entre Sogny-les-Moulins et Châlons-en-Champagne (à noter que les incertitudes sont beaucoup plus élevées pour cette dernière estimation du fait des distances relativement plus courtes).

Tableau 1: Caractérisations des débits et niveaux de pointe lors de la crue de juillet 2021 (la confluence entre la Saulx et la Marne se situe au PK 7,3 de la Marne).

Station	PK (km)	Pic de niveau Hauteur (m)	Date	Pic de débit Débit (m³/s)	Date
Vitry-en-Perthois (Saulx)	-8,0	4,130	18/07/21 04:00	161,2	18/07/21 02:30
Frignicourt (Marne)	0,1	3,268	19/07/21 02:30	227,8	19/07/21 02:00
La-Chaussée-sur-Marne (Marne)	24,3	3,246	20/07/21 07:00	-	
Sogny-les-Moulins (Marne)	35,8	3,871	21/07/21 00:00	366,6	21/07/21 00:00
Châlons-en-Champagne (Marne)	42,3	3,577	21/07/21 02:45	374,3	21/07/21 02:00

2.4.2. Impact de la courbe de tarage à Frignicourt

Une des explications de la surestimation du débit simulé à Châlons par le modèle Mascaret (Figure

1) serait une surestimation du débit injecté à Frignicourt du fait d'une potentielle non validité de la courbe de tarage en été. Cette surestimation ne se serait cependant pas répercutée sur le limnigramme de la Chaussée car au-delà de 3.2m la majeure partie du lit majeur est mobilisée et l'écoulement n'est plus concentré en rive gauche au niveau de la station de la Chaussée mais réparti sur les deux ou trois km de lit majeur. Cette courbe de tarage n'a malheureusement pas été réanalysée dans le cadre de cette expertise (Le Coz, 2023). Cependant, une courbe de tarage « été » pour la station de Frignicourt a été fournie par J. Habert.

La Figure 9 présente les chroniques de débit de la crue de juillet 2021 en comparant les deux courbes de tarages à Frignicourt (la courbe originelle « hiver » utilisée lors de la simulation présentée Figure 1) et la courbe de tarage modifiée suite à la crue « été ». En sommant les débits de la Marne à Frignicourt et du Saulx à Vitry-en-Perthois, on retrouve bien les débits mesurés sur la Marne à Châlons-en-Champagne en prenant un décalage temporel de 2 jours et 5 heures, ce qui correspond approximativement au décalage des pics de crue observés (Tableau 1). Si on utilise la courbe de tarage « hiver » à Frignicourt, on observe bien une très forte surestimation des débits à Châlons-en-Champagne. Cela confirme donc qu'une large partie des erreurs issues de la modélisation avec Mascaret provenait de la donnée d'entrée du modèle.

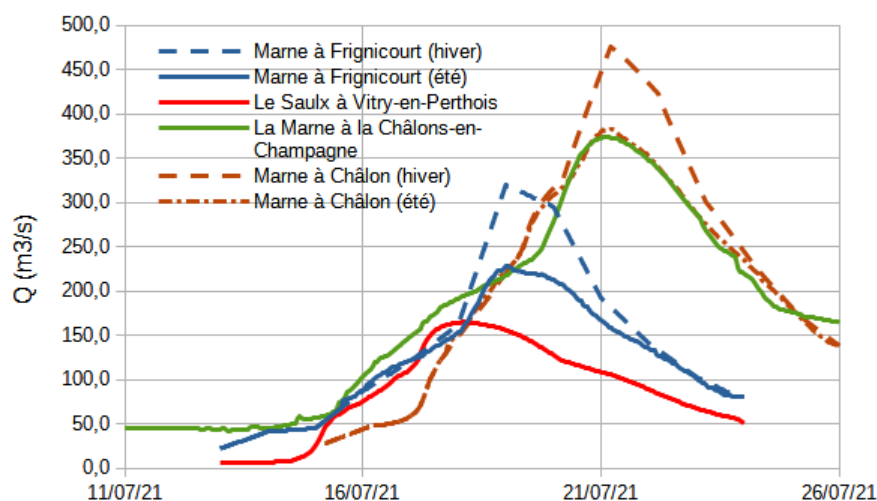


Figure 9: Propagation de la crue sur la Marne moyenne entre Frignicourt et Châlons-en-Champagne avec l'apport de la Saulx à Vitry-en-Perthois : test sur les différentes courbes de tarage (été/hiver) à Frignicourt et de sa propagation.

2.5. Modélisation de la crue de juillet 2021 avec le modèle Mascaret

2.5.1. Rejeu du modèle avec les bonnes données d'entrée

Le modèle Mascaret de la Marne a ainsi été rejoué en utilisant les données d'entrée à la station de Frignicourt selon les deux courbes de tarage (« été » et « hiver », résultats fournis par J. Habert). Les résultats présentés Figure 10 indiquent bien une nette amélioration de la simulation des débits à Châlons-en-Champagne même si la vitesse de propagation reste largement surestimée pour les débits supérieurs à 200 m³/s. Cette amélioration des conditions aux limites amont (valeurs plus faibles) induit au final une prédiction du pic de crue avec une avance de 16h (au lieu de 12h pour la simulation avec la courbe de tarage « hiver »). Les effets sur les hauteurs d'eau sont moins flagrants mais aussi améliorés dans le même sens avec une réduction des niveau d'eau simulés de 20 cm correspondant au mesure et toujours un pic en avance d'environ un jour. Ces résultats indiquent donc que les coefficients de Strickler du lit majeur doivent être réévalués pour la période estivale

(plus faibles) du fait d'une végétation beaucoup plus abondante. Cela va bien dans le sens des suggestions issues du REX.

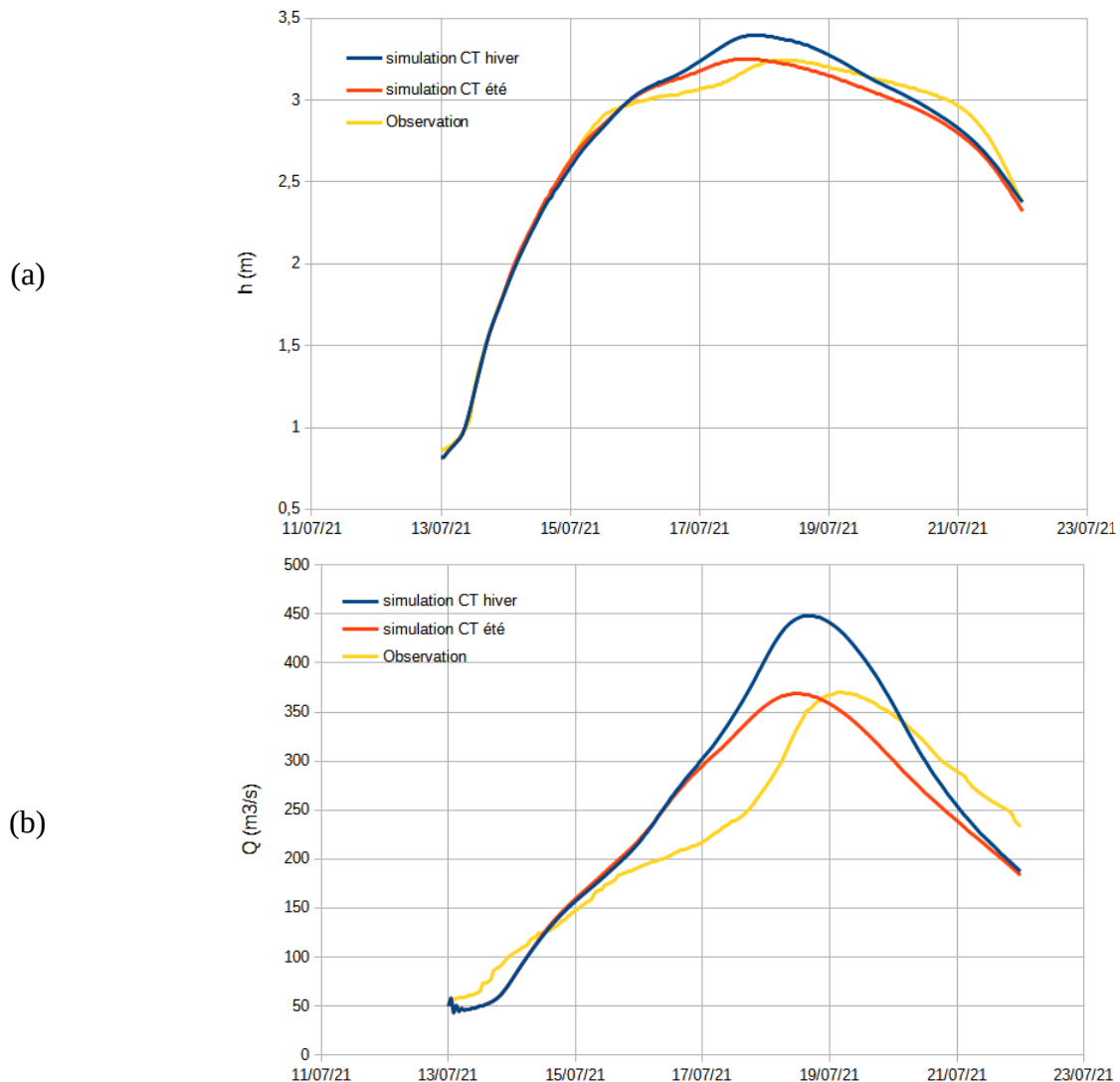


Figure 10: Rejeux du modèle Mascaret à la station de la Chaussée (a, hauteur d'eau) et à la station de Châlons-en-Champagne (b, débits) (Heure en TU)

2.5.2. Quelles améliorations du modèle Mascaret ?

Les coefficients de Strickler ont été distribués sur les lit mineur et lit majeur en suivant le calage proposé par J. Habert (thèse 2016, cf. Tableau 2). Un recalage de ce modèle pour la période estivale impliquerait donc une modification des coefficients de Strickler du lit majeur entre les stations amont au modèle et la station de Châlons-en-Champagne. Sur le Saulx et la Marne amont, la valeur est élevée ($K_{sM} = 30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$) ; en réduire la valeur pourrait donc améliorer les résultats bien que le lit majeur sur le Saulx reste limité (de faible largeur) sur deux des trois tronçons mesurés. Sur la Marne aval pour un PK entre 7,3 et 42,3 km, K_{sM} entre 12 et $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$; ces valeurs n'ont déjà plus de significations physiques (pour un frottement à la paroi) mais peuvent encore être réduites afin d'améliorer les résultats de simulation en reproduisant un frottement équivalent moyen d'une végétation haute.

Tableau 2: Coefficients de Strickler du modèle de la Marne moyenne.

Bief	Caractéristiques du sous-bief			Coefficient de Strickler ($m^{1/3}/s$)	
	PK amont (km)	PK aval (km)	L (km)	Lit mineur	Lit majeur
1 : Saulx	186,6	190,3	3,7	40	30
2 : Marne amont	0,1	7,3	7,1	40	30
3 : Marne aval	7,3	21,3	3,0	30	13
	21,3	24,3	3,0	26	12
	24,3	39,3	15,0	27	12
	39,3	42,3	3,0	40	15
	42,3	89,3	47,0	40	15
	89,3	92,3	3,0	40	15
	92,3	162,2	70,0	40	20

Afin de tester l'impact du coefficient de Strickler, des calculs de sensibilité ont été réalisés en réduisant l'ensemble des Strickler du lit majeur sur le tronçon d'étude par un facteur 1,3 (30%), 2, et 4. La Figure 11 présente les résultats obtenus.

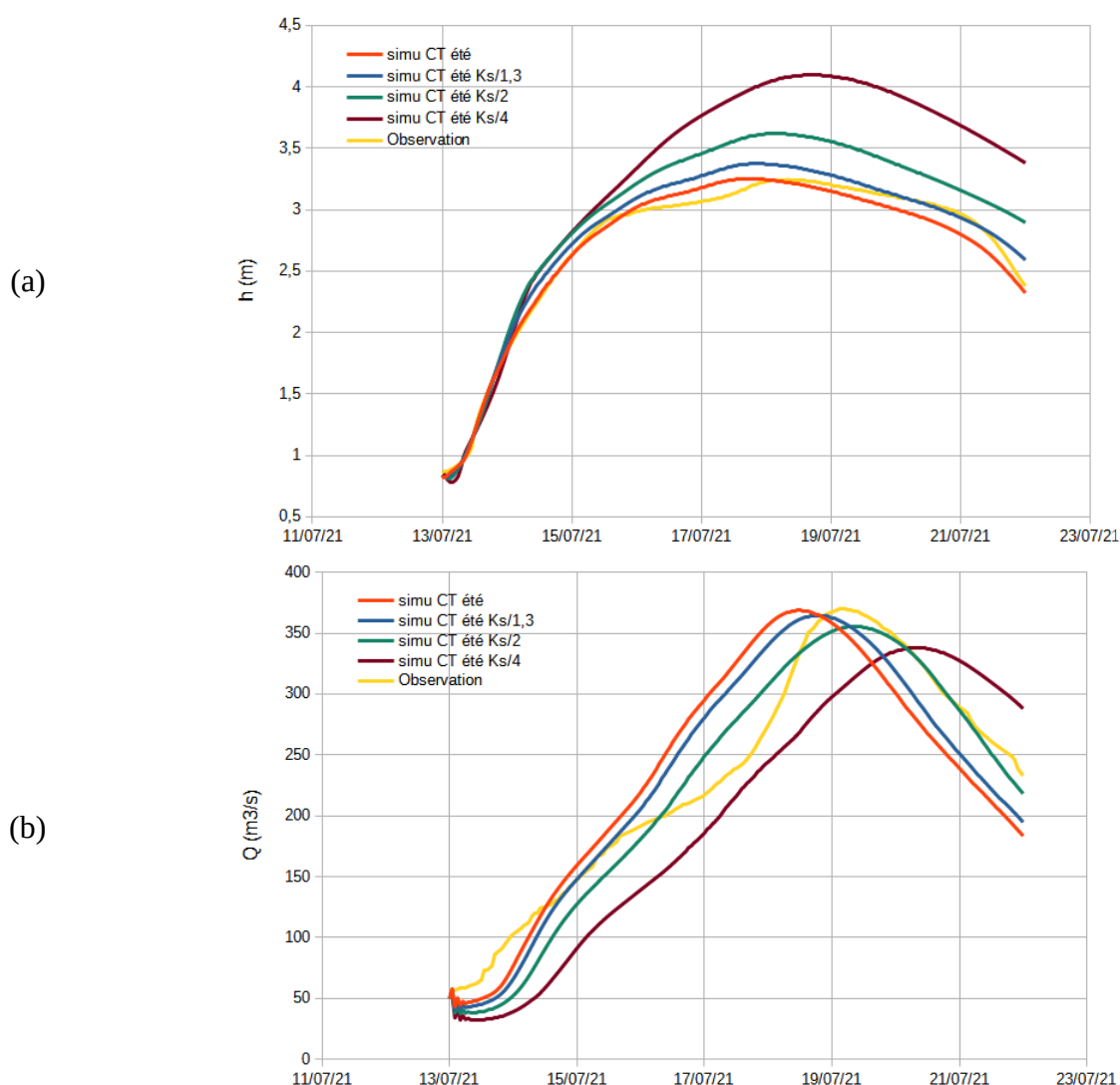


Figure 11: Tests de sensibilité sur les coefficients de Strickler avec le modèle Mascaret à la station de la Chaussée (a, hauteur d'eau) et à la station de Châlons-en-Champagne (b, débits) (Heure en TU)

Si pour les hauteurs d'eau à la Chaussée, le coefficient de Strickler original induit les meilleurs résultats ; une réduction des coefficients de Strickler par un facteur 1,3 améliore les résultats sur la seconde partie de la crue mais induit une légère surestimation en début de crue. Concernant les débits à Châlons, les simulations avec un Strickler réduit par un facteur 1,3 et 2 donnent les résultats les plus probants.

Il apparaît donc que les résultats peuvent être clairement améliorés en ajustant les coefficients de Strickler. Plus spécifiquement, ce recalage mériterait une légère réduction des coefficients de Strickler sur le tronçon Frignicourt-La Chaussée (inférieure à 30%) et une réduction plus élevée des coefficients de Strickler sur le tronçon La Chaussée-Châlons (a priori d'un facteur 2). Ces calculs nécessitent cependant d'être affinés car si la réduction des coefficient de Strickler permet de mieux capturer le temps de passage de la crue, elle induit aussi une élévation des niveaux d'eau qui n'est pas nécessairement en accord avec les observations sur la station de la Chaussée.

Il est à noter que le choix des directrices pour séparer les lits mineur et majeur (rg et rd) peut aussi très largement impacter les résultats. Il est important de savoir comment les codes de calcul gèrent la géométrie dans ce cas. En effet, certains codes (Mage d'INRAE par exemple) considèrent tout point à une cote inférieure à celle de RG et RD (point le plus bas entre les deux directrices) est inclus dans le lit mineur suite à la transformation de la géométrie en abscisse-cote (Figure 12). D'autres codes (Rubar3 d'INRAE ; Mascaret ?) remplissent artificiellement les zones du lit majeur sous le point le plus bas entre RG et RD (Figure 12). Comme présenté en Figure 12, le choix du positionnement des deux lignes directrices RG et RD va impacter sur la taille de la section mouillée du lit majeur par rapport à la section mouillée du lit mineur (et donc sur le calage des coefficients de Strickler). A noter aussi, il y a un impact non-négligeable de la transformation induite de la géométrie en fonction des codes de calcul sur ces sections mouillées. Du fait de la très grande largeur du lit majeur sur le modèle de la Marne (cf. section 2.3.), il pourrait être utile de revoir la cohérence du choix des limites entre le lit mineur et le lit majeur, en vérifiant l'étendue des surfaces mouillées à partir de potentielles photographies aériennes prise lors de crues.

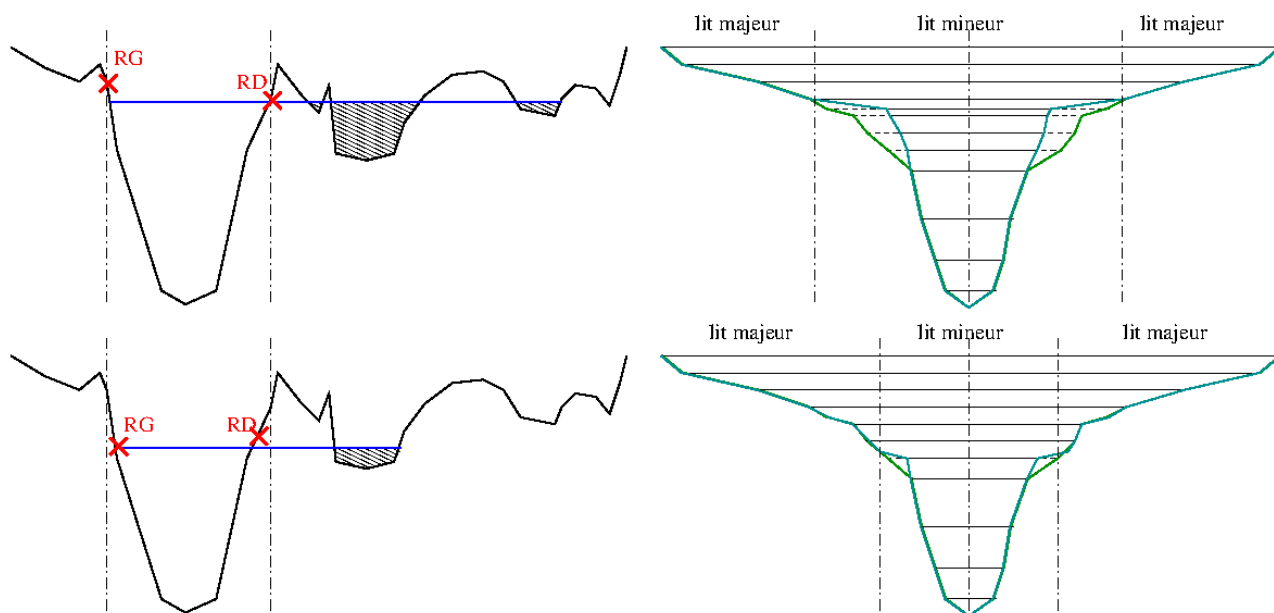


Figure 12: Schématisation des représentations de la géométrie (réelle à gauche / abscisse-cote à droite) entre fonction des codes et du positionnement des directrices (RG et RD) séparant le lit mineur du lit majeur.

Dans le même sens, il serait intéressant d'avoir une estimation des zones de réels écoulements. En effet, la loi Debord utilisée dans Mascaret n'a de sens que si l'écoulement dans le lit majeur se fait

majoritairement dans la direction de la pente de la rivière. Si ce n'est pas le cas, il pourrait être judicieux de créer des systèmes de casiers. De plus, s'il existe des chenaux secondaires en crue avec un lit qui diffère très largement du lit mineur (en plan), une réflexion peut se faire sur la création d'un réseau maillé.

3. Modélisation de l'Oise

3.1. Documentation consultée

- Rapport Hydratec, Reprise du calage du modèle hydraulique de l'Oise (2013)
- rex_spcbn_1mois_juillet_2021.pdf : Rex SPC Bassins du Nord (47 p.)
- rex_hydrometrie_oise_aisne_v2.odt : Rex UH Haut de France

3.2. Problématique de modélisation de la crue de 2021

Il est encore une fois fait état d'un épisode de crue atypique (crues d'été très rares sur ce territoire). Les modélisations utilisées ont été calées sur des épisodes de crue d'hiver. Les prévisions indiquent de fortes sur-estimations de niveaux (Figure 13). Tout comme le modèle Mascaret de la Marne, l'écêtement de la crue ne semble pas avoir été pris en compte du fait a priori d'une rugosité plus élevée (végétation plus dense en été sur les berges et le lit majeur actif) mais peut-être aussi d'une sous-estimation des débordements dans le lit majeur.

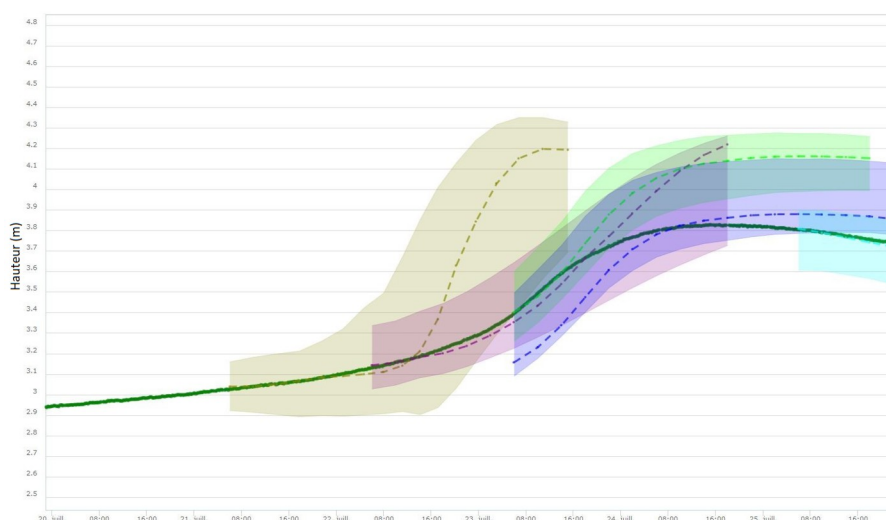


Figure 13: Prévisions sur la station de Soissons sur l'Aisne aval du 20 au 25/07/2021 (Prévisions en pointillés et niveau observé en vert).

3.3. Modèle de l'Aisne et de l'Oise

La DREAL utilise un modèle Hydra (Hydratec) sur l'Oise et l'Aisne. Nous n'avons pas accès à ce modèle qui est fermé. Le Tableau 3 présente les principaux biefs de ce modèle avec leurs limites amont et aval.

Tableau 3: Principaux biefs du modèle Hydra de l'Aisne et de l'Oise.

Désignation	Vallée	Limite amont	Limite aval
AAM	Aisne amont	Mouron	Givry
AME	Aisne moyenne	Givry	Soissons
OAM	Oise amont	Hirson	Origny

OME	Oise moyenne	Origny	Sempigny
OAV	Oise aval	Sempigny/Soissons	Creil
OCS	Oise dans dépt 95	Creil	Andresy
BOV	Thérain amont	Bonnières/StOmer	Beauvais
MAY	Thérain aval	Beauvais	Maysel
SAM	Serre amont	Hurtaut	Mortiers
SAV	Serre aval	Mortiers	Confluence Oise

Dans le cadre de cette expertise, seul le modèle AME est discuté car c'est sur ce secteur que les principales difficultés ont été observées. Les données d'entrée sont les sorties du modèle AAM, à Givry.

La Figure 14 présente les mesures a posteriori sur les stations de Givry et Soissons (issues de GeoPortail). On peut voir une très forte atténuation du pic de débit mesuré à Givry une fois arrivé à Soissons. Aussi, les hauteurs d'eau à Soissons varient très peu indiquant une largeur de section beaucoup plus élevée et potentiellement de nombreux échanges avec le lit majeur. Ceci peut expliquer l'atténuation du pic de crue et donc éventuellement un ralentissement de la propagation de l'onde de crue.

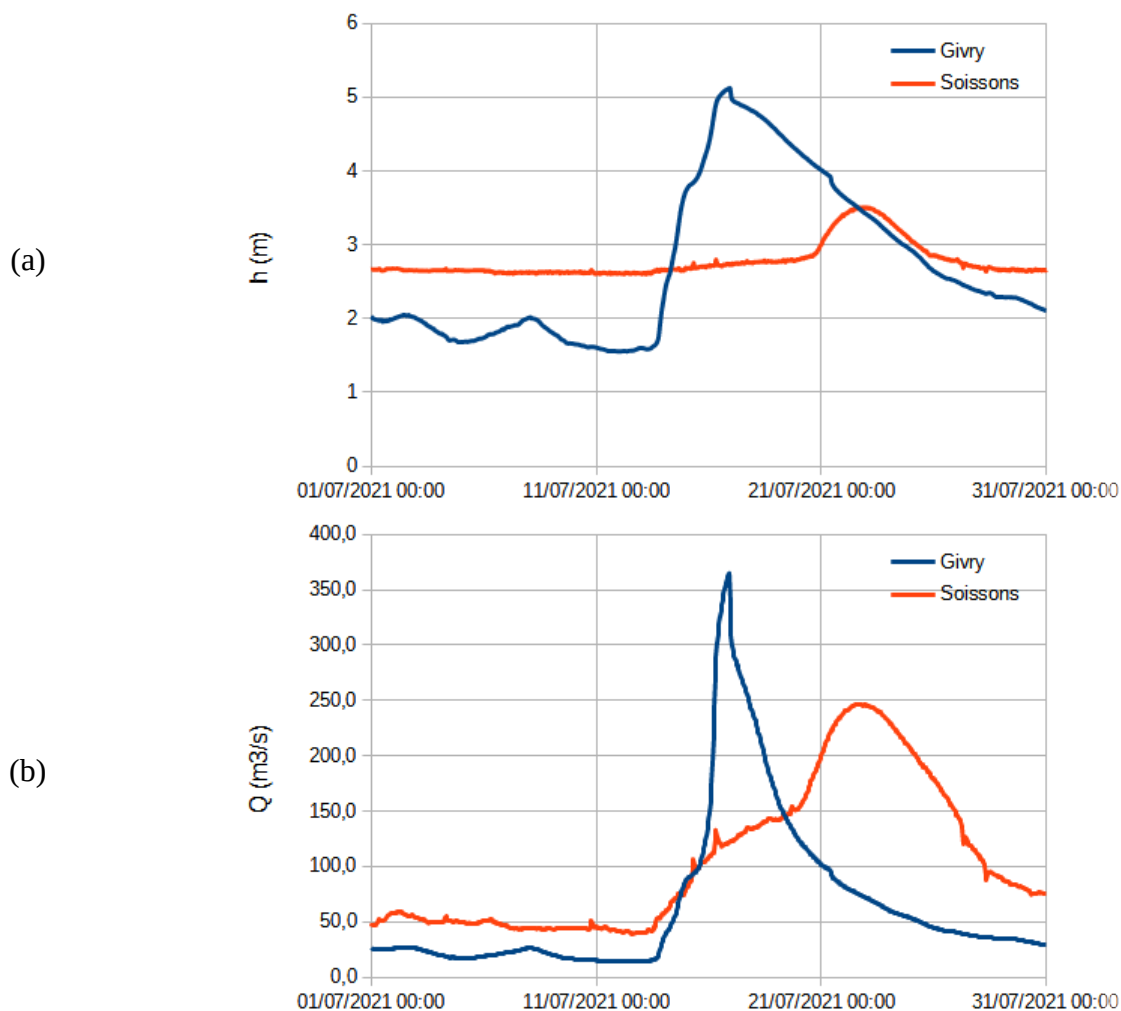


Figure 14: Mesures issues d'HydroPortail aux stations de Givry et Soissons (Aisne) : (a) hauteurs d'eau, (b) débits.

La Figure 15 présente les résultats de calcul en données parfaites, soit avec en entrée les données

mesurées (résultats fournis par O. Antoine, DREAL Hauts-de-France). Nous retrouvons clairement la problématique observée pour la Marne. Il semble qu'un fort débordement n'est pas pris en compte par la modélisation pouvant expliquer l'écèlement de la crue. Cet écèlement est très clair en Figure 15b où une masse importante d'eau a dû être déversée vers la plaine d'inondation jusqu'au 23 mai environ puis restituée vers le lit mineur de l'Aisne. En toute logique le volume écéléte devrait être totalement restitué (aires entre les courbes avant et après le point d'intersection identiques). Il semblerait cependant qu'un volume plus faible ait été restitué indiquant potentiellement qu'une quantité d'eau non-négligeable a été capturée par la plaine d'inondation (restitution à la rivière très lente) comme suggéré aussi par les mesures (Figure 14). La fréquence de sortie des résultats numériques (toutes les 4h) ne permet pas clairement de confirmer cette observation.

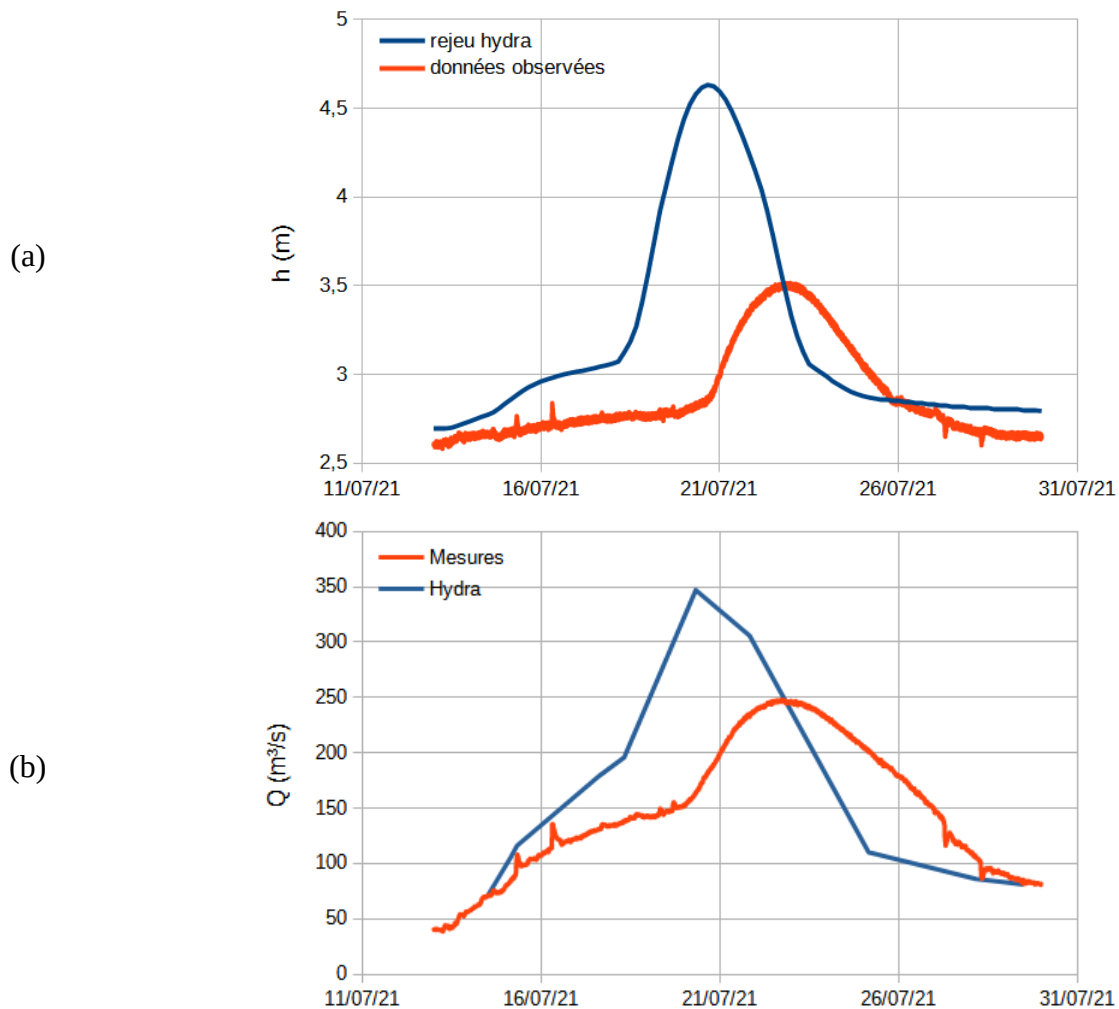


Figure 15: Comparaison entre les résultats du modèle Hydra et les observations à la station de Soissons (Aisnes), (a) hauteurs d'eau, (b) débits.

Une amélioration de la modélisation semble donc être possible :

- en vérifiant bien que les données d'entrée du modèle sont cohérentes avec les mesures de débit lors de la crue de 2021 ; dans le cas contraire, un recalage des courbes de tarage au moins pour la période estivale serait nécessaire (Le Coz, 2023).
- en réduisant le coefficient de Strickler (augmentation des frottements) du lit majeur sur la partie amont à Soissons avec l'hypothèse que la végétation estivale impacte largement ces

frottements. Bien évidemment, cela impliquerait un jeu de Strickler variable selon les saisons. De la même manière que pour le modèle Mascaret de la Marne, le choix des lignes directrices séparant les lits mineur et majeur peut aussi influencer les résultats selon la manière que le code de calcul retranscrit cette hypothèse.

- En créant potentiellement un certain nombre de casiers (dans les zones où les débordements ont été observés avec un écoulement très faible) si la réduction du coefficient de Strickler ne suffit pas.

4. Conclusion sur les modélisations hydrauliques

Sur la base des résultats obtenus avec le modèle de la Marne utilisant le code Mascaret, il apparaît qu'une des principales problématiques liées aux simulations est les conditions d'entrée du modèle pouvant être très largement erronées (courbe de tarage sensiblement variable selon les saisons, résultats du modèle GRP incertains si utilisés pour les simulations hydrauliques). Une meilleure prédiction de ces conditions amont permet de nettement améliorer la prédiction du débit de pic de crue mais tend ici à avancer encore plus le temps de passage de la crue (déjà surestimé).

En conséquence, il y a aussi un clair besoin de recalibrer les coefficients Strickler du lit majeur pour la période estivale, afin d'affiner le temps de propagation de la crue, soit donc de disposer différents jeux de coefficient de Strickler selon les saisons. Aussi, les modèles mériteraient peut-être quelques améliorations comme la construction de casiers voir la création d'un réseau maillé pour la Marne (écoulement dans le lit majeur non parallèle à celui du lit mineur).

5. Références

Habert, J. (2016). « Prévisions des crues en temps réel sur le bassin de la Marne : assimilation in situ pour la correction du modèle hydraulique mono-dimensionnel Mascaret », Thèse de doctorat de l'université de Toulouse. 228 p.

Le Coz, J. (2023). Analyse des crues de juillet 2021 – Volet hydrométrie : courbes de tarage. Rapport d'expertise GGPR/SRNH-INRAE



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**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE
la science pour la vie, l'humain, la terre

Programme MTE (DGPR/SRNH) – INRAE 2021

Connaissance et prévention des risques naturels et hydrauliques

Ces travaux bénéficient du soutien du ministère chargé de la transition écologique par décision de subvention n°2103343215.



Action 2 – Prévision des inondations

Analyse des crues de juillet 2021 - volet hydrologie

HYCAR Antony

Contributeurs

François Bourgin – francois.bourgin@inrae.fr

Vazken Andréassian – vazken.andreassian@inrae.fr

Olivier Delaigue – olivier.delaigue@inrae.fr

Paul Astagneau – paul.astagneau@inrae.fr

Remerciements

Nous remercions les collègues de l'équipe RIVERLY d'INRAE, et l'ensemble des personnes – notamment Bruno Janet du SCHAPI, Guillaume Principato du SPC Meuse-Moselle et Océane Antoine du SPC Bassins du Nord – ayant participé à cette action pour les échanges qui ont permis d'affiner les analyses présentées dans ce rapport.

Table des matières

1. Contexte et objectifs	1
2. Zones d'étude, données et modèles	1
2.1. Bassins versants et données	1
2.2. Mise en place d'une modélisation hydrologique	3
3. Résultats	3
3.1. Simulations sur la période de calage	3
3.1.1. Chroniques	3
3.1.2. Critères de performance	5
3.2. Simulations de la crue de juillet 2021	6
4. Conclusions	11
5. Références	12

1. Contexte et objectifs

Les crues de juillet 2021 qui se sont produites dans le nord-est de la France présentent un caractère exceptionnel qui questionne les capacités prédictives des modèles hydrauliques et hydrologiques utilisées au sein du réseau national de prévision des crues et des inondations. Des difficultés liées à l'hydrométrie, avec notamment des modifications importantes des courbes de tarage, à l'estimation des temps de propagation des ondes de crues de l'amont vers l'aval, et au comportement insuffisamment réactif des modèles hydrologiques utilisés ont été identifiées. Dans ce contexte, le SCHAPI a sollicité les équipes de RIVERLY et HYCAR d'INRAE pour réaliser une expertise aidant à un retour d'expérience.

Ce rapport présente le volet hydrologie de l'analyse des crues de juillet 2021 menée dans le cadre de cette expertise. Les travaux se concentrent sur l'analyse d'une modélisation hydrologique mise en place au pas de temps horaire pour 9 bassins versants situés sur les secteurs de la Chiers, de l'Aisne et de l'Oise amont. Les principaux objectifs sont de caractériser les performances et d'analyser le comportement de deux versions des modèles GR pour les crues de juillet 2021 au regard des crues les plus importantes de ces vingt dernières années.

2. Zones d'étude, données et modèles

2.1. Bassins versants et données

Les bassins versants étudiés ont été choisis après plusieurs échanges avec l'ensemble des participants et les services de prévision des crues concernés, Meuse-Moselle (MM) et Bassins du Nord (BN). Ils se répartissent sur les secteurs de la Chiers, de l'Aisne amont et de l'Oise amont. La liste des stations est présentée dans le Tableau 1. Les stations identifiées par la colonne *BaRatin* ont fait l'objet, dans le cadre du volet hydrométrie de la présente expertise, d'une analyse détaillée des courbes de tarage utilisées pour les crues de juillet 2021 avec le logiciel BaRatin. La colonne *GRP SPC* indique si un modèle GRP est utilisé par les services opérationnels. Les stations sont identifiées par un rectangle rouge sur les cartes des Figure 1 et Figure 2.

Tableau 1 - Liste des stations étudiées

Code station	Libellé	BaRatin	GRP SPC
B402101001	La Chiers à Longwy	0	MM
B457201001	Le Loison à Han-lès-Juvigny	1	
B460101001	La Chiers à Chauvency-le-Château	1	MM
H602102001	L'Aisne à Verrières	1	BN
H610201001	L'Aire à Beausite [Amblaincourt]	0	BN
H612201001	L'Aire à Varennes-en-Argonne	0	BN
H620101001	L'Aisne à Mouron	1	BN
H702101001	L'Oise à Hirson	0	BN
H710202001	La Serre à Montcornet	0	BN

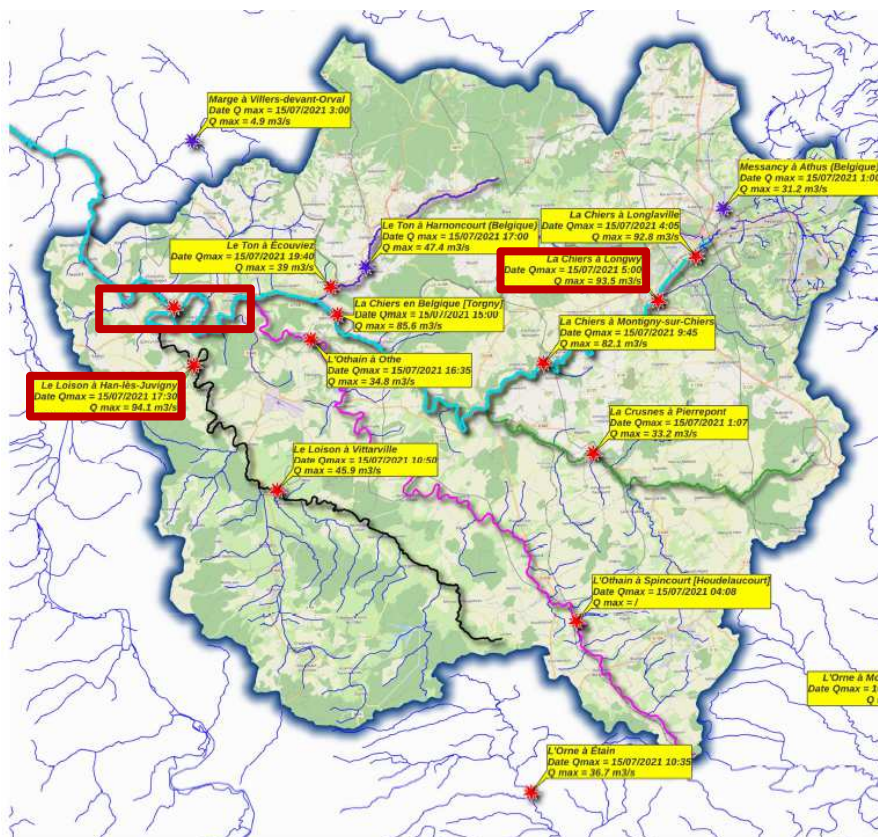


Figure 1 - Identification des trois stations étudiées sur le secteur de la Chiers ; la carte provient du rapport Analyse de l'événement de juillet 2021 produit par DHE (2022).



Figure 2 - Identification des six stations étudiées sur les secteurs de l'Aisne amont et de l'Oise amont ; la carte a été produite par le SPC Bassins du Nord.

Une base de données au pas de temps horaire a été constituée pour alimenter une modélisation hydrologique globale sur les 9 bassins étudiés. Les données de précipitations sont issues de la réanalyse Comephore de Météo-France (Tabary et al., 2012), les données de température qui permettent de calculer l'évaporation potentielle (Oudin et al., 2005) sont issues de la réanalyse Safran de Météo-France (Vidal et al., 2010) et les débits proviennent d'une extraction de l'HydroPortail. Les contours des bassins versants et les courbes hypsométriques proviennent de la base de données constituée au sein de notre unité HYCAR (Delaigue et al., 2020).

2.2. Mise en place d'une modélisation hydrologique

Dans la continuité des travaux récents menés par Paul Astagneau dans le cadre de son doctorat (2019-2022) et de son post-doctorat (en cours), nous avons choisi d'utiliser les modèles hydrologiques GR5H et GR5H_RI. Le modèle GR5H_RI est une évolution de GR5H qui permet de moduler les fonctions de production et de routage en fonction de l'intensité des précipitations (Astagneau et al., 2022).

Les paramètres des deux modèles sont estimés à l'aide de la procédure de calage disponible dans le logiciel airGR (Coron et al. 2017, 2023) et sa version modifiée par Paul Astagneau ; cette procédure vise à identifier des valeurs de paramètres qui maximisent une fonction objectif, à partir d'une exploration initiale de l'espace des paramètres qui est suivie d'un algorithme d'optimisation locale. Nous avons choisi d'utiliser le critère de performance KGE' comme fonction objectif ; la période de calage 2002-2020 est précédée d'une période de mise en route 1997-2001.

Le modèle GR5H_RI utilise trois paramètres supplémentaires par rapport au modèle GR5H. Les travaux de Paul Astagneau ont montré qu'il pouvait être difficile de les identifier et des valeurs fixes ont été proposées pour deux de ces trois paramètres ; cette version à 6 paramètres libres est notée GR5H_RI_FIX.

La prise en compte des processus d'accumulation et de fonte de neige a été réalisée au pas de temps journalier avec la version à deux paramètres du modèle CemaNeige, en utilisant une discrétisation en 5 bandes d'altitude et les deux paramètres fixes habituels. Pour répartir au pas de temps horaire la fonte de neige calculée au pas de temps journalier, nous avons suivi l'approche utilisée pour l'estimation de l'évaporation au pas de temps horaire à partir d'une valeur journalière.

Enfin, pour analyser les simulations produites par la modélisation hydrologique en période de crues, nous avons sélectionné pour chaque station, de manière automatique, les 32 événements les plus importants en terme de valeurs maximales de débits. La procédure de sélection est décrite dans le manuscrit de thèse de Paul Astagneau (2022).

3. Résultats

3.1. Simulations sur la période de calage

3.1.1. Chroniques

La visualisation des chroniques de débits observés et simulés pour chaque station sur l'ensemble de la période permet de contrôler la bonne capacité générale des modèles à caractériser la réponse hydrologique des bassins étudiés. La Figure 3 présente un extrait de ces chroniques pour la station de la Chiers à Longwy ; pour faciliter la visualisation, toutes les chroniques sont rassemblées dans un fichier

placé en Annexe.

B402101001 – La Chiers à Longwy (212 km²)

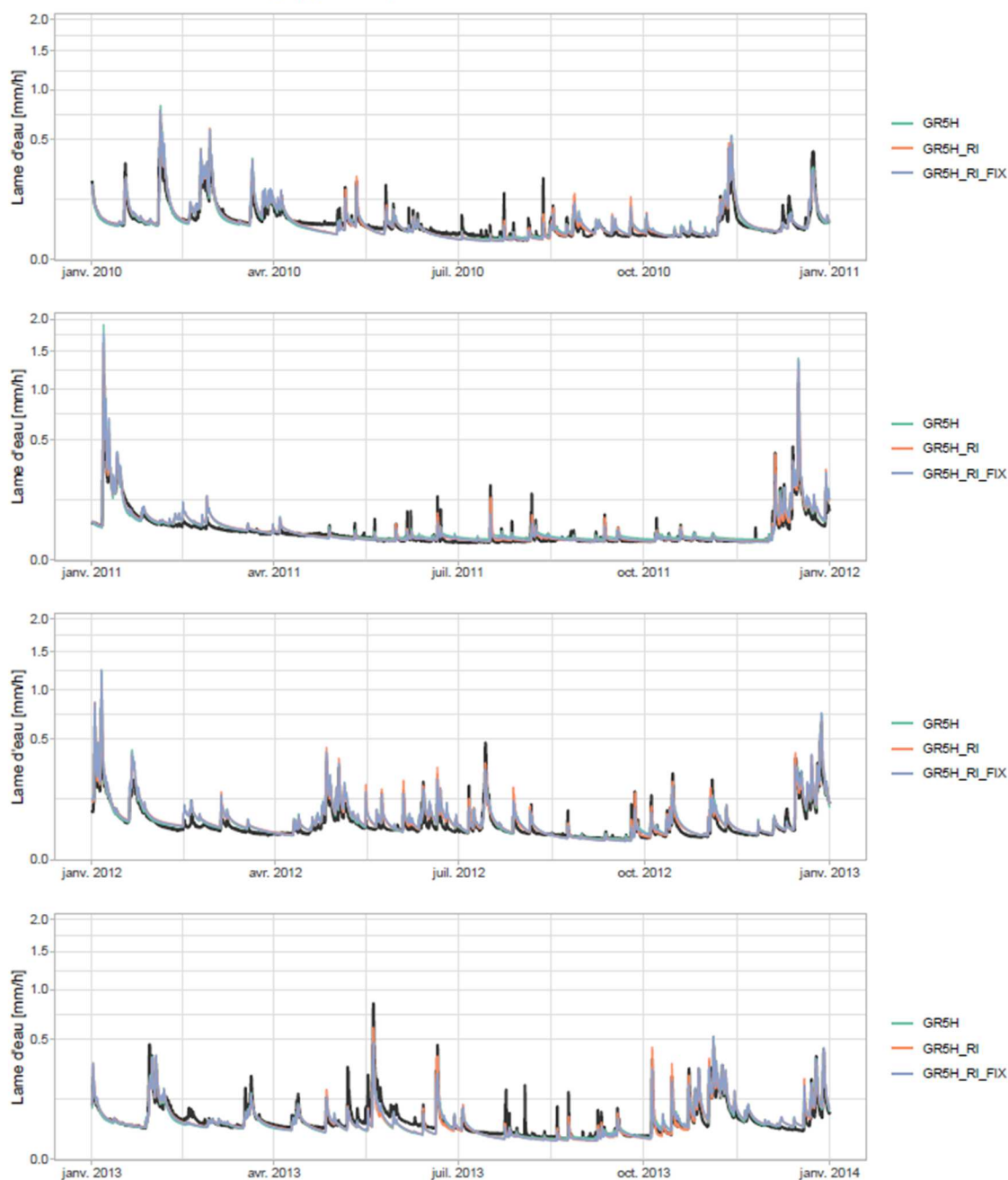


Figure 3 - Chroniques de débits observés et simulés pour 4 années à la station de la Chiers à Longwy.

Dans l'ensemble, on constate une bonne capacité des modèles à restituer la dynamique des crues et des étiages. Pour certaines périodes, comme 2005-2006 pour l'Oise à Hirson, juin 2003 et janvier 2009 pour la Serre à Montcornet ou encore juillet 2005 pour le Loison à Han-lès-Juvigny, les chroniques de débits observés peuvent sembler douteuses, mais ces périodes restent limitées et leur impact sur l'estimation des paramètres et les critères de performance a été jugé suffisamment négligeable pour ne pas faire l'objet d'un traitement spécifique. Les simulations produites par les trois versions des deux modèles utilisés sont en général assez proches les unes des autres, avec quelques différences plus marquées sur certaines crues et récessions.

3.1.2. Critères de performance

Le Tableau 2 présente les critères de performance NSE et KGE' obtenus pour les trois versions des modèles sur la période de calage. Les valeurs sont élevées pour toutes les stations, ce qui correspond bien à l'impression visuelle obtenue avec les chroniques de débits. On constate que les performances obtenues avec les différentes versions des modèles sont très proches, quand elles ne sont pas identiques.

Tableau 2 – Critères de performance NSE et KGE' obtenus pour les trois versions des modèles sur la période de calage.

Code station	Libellé	GR5H		GR5H_RI		GR5H_RI_FIX	
		NSE	KGE'	NSE	KGE'	NSE	KGE'
B402101001	La Chiers à Longwy	0.85	0.92	0.86	0.93	0.85	0.93
B457201001	Le Loison à Han-lès-Juvigny	0.85	0.92	0.86	0.93	0.86	0.93
B460101001	La Chiers à Chauvency-le-Château	0.92	0.96	0.91	0.95	0.91	0.96
H602102001	L'Aisne à Verrières	0.87	0.93	0.89	0.94	0.88	0.94
H610201001	L'Aire à Beausite [Amblaincourt]	0.91	0.95	0.92	0.96	0.92	0.96
H612201001	L'Aire à Varennes-en-Argonne	0.90	0.95	0.92	0.96	0.91	0.96
H620101001	L'Aisne à Mouron	0.91	0.96	0.94	0.97	0.92	0.96
H702101001	L'Oise à Hirson	0.82	0.91	0.82	0.91	0.81	0.91
H710202001	La Serre à Montcornet	0.81	0.91	0.81	0.91	0.81	0.90

Le Tableau 3 présente les critères de performance NSE et KGE' obtenus pour les trois versions des modèles sur les événements de crues sélectionnés sur la période de calage. Les valeurs sont moins élevées que celles obtenues sur l'ensemble de la période, ce qui était attendu. On remarque en particulier que les scores de NSE obtenus pour le Loison à Han-lès-Juvigny et la Serre à Montcornet sont nettement plus faibles que ceux obtenus pour les autres stations. Les performances obtenues avec le modèle GR5H_RI sont meilleures que celles obtenues avec le modèle GR5H pour l'ensemble des stations, notamment sur l'Aire à Beausite et à Varennes-en-Argonne. Ces améliorations confirment l'intérêt des modifications proposées dans les travaux de Paul Astagneau.

Tableau 3 - Critères de performance NSE et KGE' obtenus pour les trois versions des modèles sur les événements de la période de calage.

Code station	Libellé	GR5H		GR5H_RI		GR5H_RI_FIX	
		NSE	KGE'	NSE	KGE'	NSE	KGE'
B402101001	La Chiers à Longwy	0.62	0.76	0.68	0.82	0.64	0.79
B457201001	Le Loison à Han-lès-Juvigny	0.31	0.62	0.41	0.69	0.41	0.68
B460101001	La Chiers à Chauvency-le-Château	0.69	0.83	0.72	0.83	0.71	0.83
H602102001	L'Aisne à Verrières	0.70	0.78	0.74	0.79	0.70	0.76
H610201001	L'Aire à Beausite [Amblaincourt]	0.64	0.72	0.71	0.81	0.71	0.79
H612201001	L'Aire à Varennes-en-Argonne	0.63	0.74	0.74	0.86	0.70	0.81
H620101001	L'Aisne à Mouron	0.78	0.84	0.83	0.89	0.80	0.87
H702101001	L'Oise à Hirson	0.79	0.88	0.80	0.90	0.79	0.90
H710202001	La Serre à Montcornet	0.51	0.71	0.56	0.72	0.54	0.72

3.2. Simulations de la crue de juillet 2021

Les simulations obtenues pour la crue de juillet 2021 avec les paramètres estimés sur la période de calage 2002-2020 sont présentées sur les Figure 4, Figure 5 et Figure 6 pour les secteurs de la Chiers, de l'Aisne et de l'Oise. Les débits observés issus de l'extraction de l'HydroPortail sont tracés en noir, et la bande d'incertitudes estimée à l'aide du logiciel BaRatin est tracée en gris lorsqu'elle est disponible (cf. Tableau 1). Ces estimations ont été réalisées par Jérôme Le Coz de l'unité RIVERLY dans le cadre du volet hydrométrie de la présente expertise. On note en particulier une nette correction pour la station de l'Aisne à Mouron. Les lames d'eau issues de la réanalyse Comephore sont également tracées, en utilisant un ratio 1/10 pour faciliter la visualisation des précipitations et des débits sur les mêmes graphiques. A noter que nous ne disposons pas de bande d'incertitudes pour les pluies (ce qui ne signifie bien sûr pas que les estimations de pluies sont certaines).

Les Figure 4, Figure 5 et Figure 6 montrent des performances variables selon les stations, avec une tendance à la sous-estimation des crues, tant en volume que par rapport à la valeur maximale. La crue est nettement sous-estimée par tous les modèles aux stations de Longwy, Beausite, Hirson et Montcornet ; elle est mieux représentée avec le modèle GR5H_RI aux stations de Chauvency-le-Château et Moncornet, et avec le modèle GR5H à Varennes-en-Argonne.

Il faut également noter que certaines chroniques extraites de l'HydroPortail sont improbables au sens de l'analyse d'incertitude BaRatin (cf. en particulier l'Aisne à Mouron en Figure 5).

Afin d'évaluer le caractère atypique de la réponse hydrologique des crues de juillet 2021, nous avons regardé les chroniques de débits observés et simulés pour l'ensemble des événements sélectionnés sur la période d'étude. A titre d'exemple, la Figure 7 présente les événements de crues à la station de Longwy ; l'ensemble des figures est rassemblé dans un fichier placé en Annexe. Ces figures permettent de constater la variabilité des réponses hydrologiques pour chaque station : certaines crues sont sous-estimées, d'autres bien simulées, et il est difficile de distinguer la réponse de la crue de juillet 2021 par rapport aux autres crues majoritairement hivernales. Les crues de juillet 2021 sont bien atypiques en raison de leur occurrence en été, mais il ne semble pas que les modèles hydrologiques soient de manière systématique nettement moins performants pour cette crue que pour les principaux événements de crues de ces vingt dernières années.

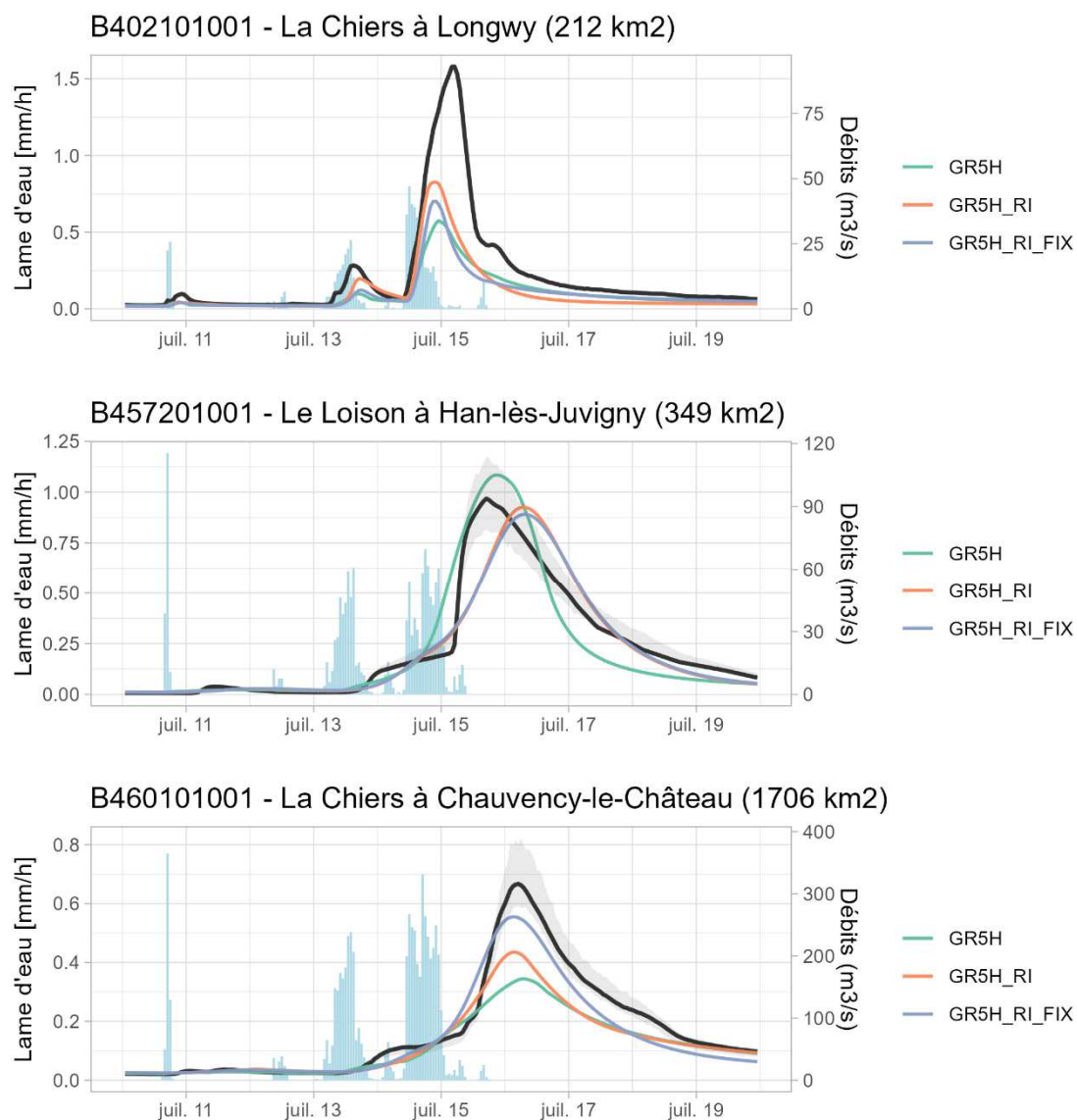


Figure 4 - Simulations de la crue de juillet 2021 sur le secteur de la Chiers.

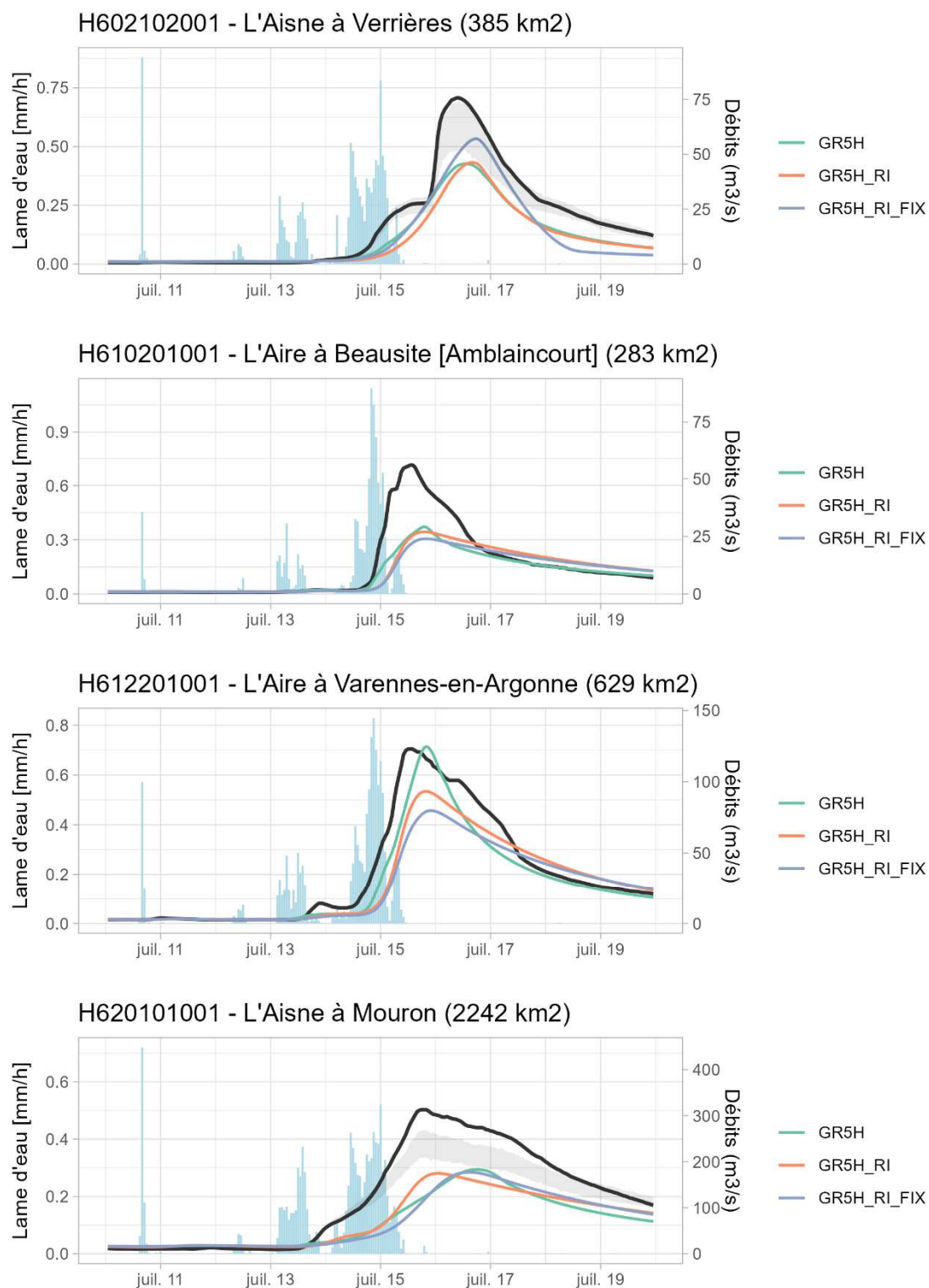


Figure 5 - Simulations de la crue de juillet 2021 sur le secteur de l'Aisne.

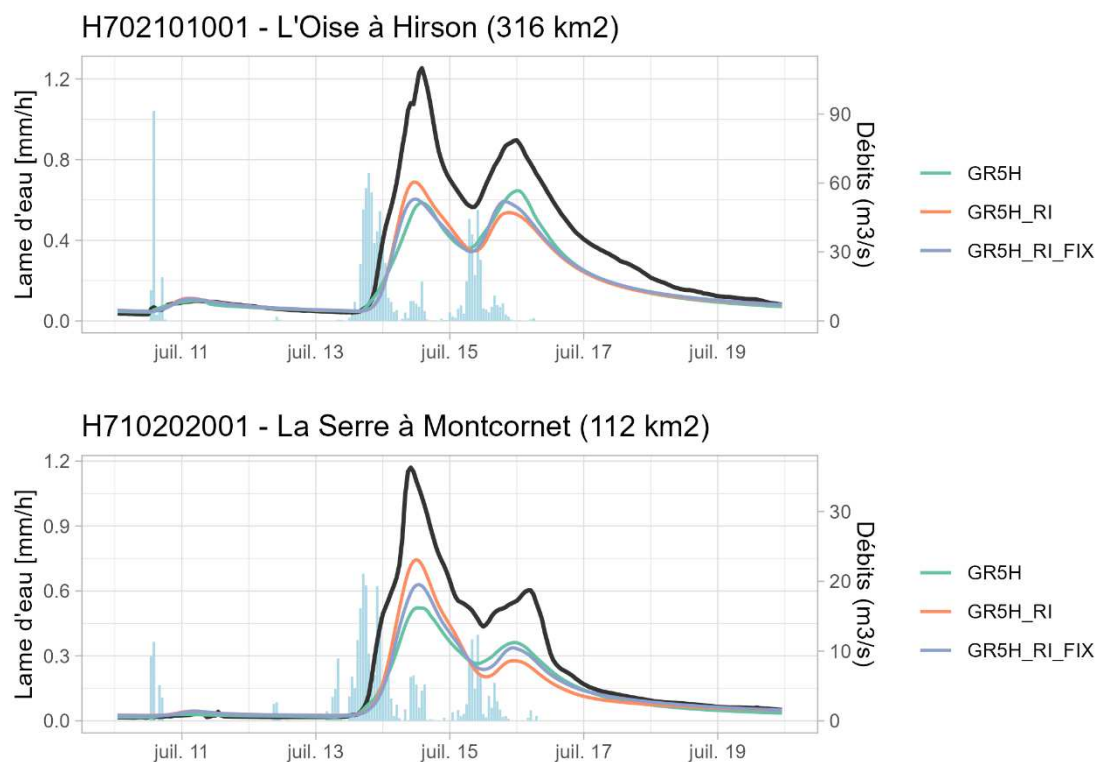


Figure 6 - Simulations de la crue de juillet 2021 sur le secteur de l'Oise.

B402101001 - La Chiers à Longwy (212 km²)

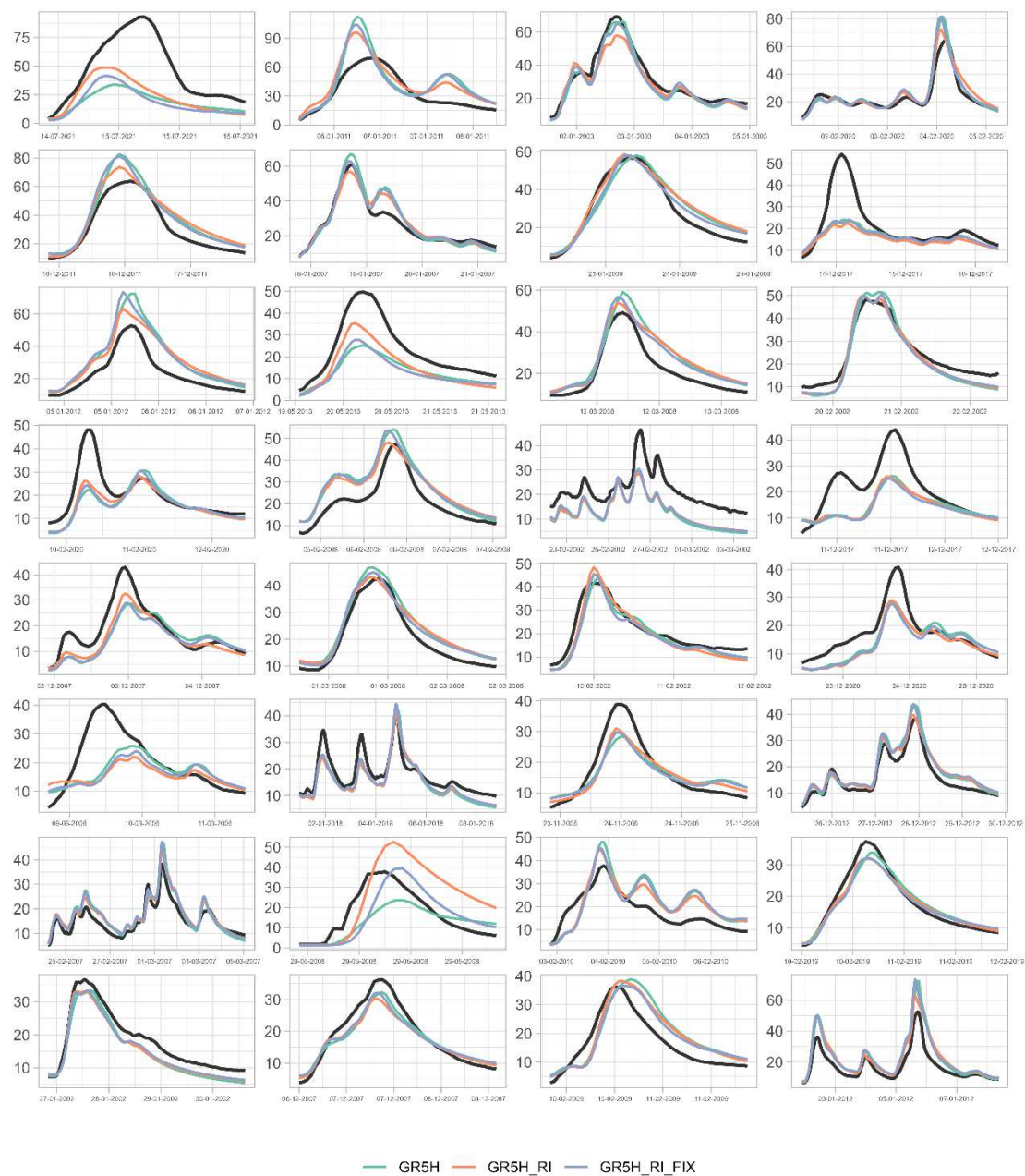


Figure 7 - Simulations sur une sélection d'événements de crues pour la station de Longwy.

4. Conclusions

Les crues de juillet 2021 qui se sont produites dans le nord-est de la France présentent un caractère exceptionnel qui questionne les capacités prédictives des modèles hydrauliques et hydrologiques utilisés au sein du réseau national de prévision des crues et des inondations. Le volet hydrologie de l'analyse des crues de juillet 2021 menée dans le cadre de cette expertise s'est concentré sur l'analyse d'une modélisation hydrologique mise en place au pas de temps horaire pour 9 bassins versants situés sur les secteurs de la Chiers, de l'Aisne et de l'Oise amont.

L'analyse des performances et du comportement de deux versions des modèles GR pour les crues de juillet 2021 révèle une tendance à la sous-estimation des crues, avec néanmoins une variabilité importante selon les stations. La version GR5H_RI qui correspond à une évolution du modèle GR5H permet dans certains cas d'obtenir une réaction hydrologique plus importante qu'avec le modèle GR5H et de limiter les sous-estimations. Les performances obtenues pour les crues de juillet 2021 ne semblent pas particulièrement atypiques au regard d'un historique des événements de crues les plus importants de ces vingt dernières années, ce qui peut s'expliquer par des conditions d'humidité des sols inhabituelles pour la saison estivale mais assez représentatives des conditions hivernales sur les bassins étudiés. Des travaux complémentaires sur un échantillon plus grand de stations sont actuellement menés dans le cadre du post-doctorat de Paul Astagneau. Ces travaux permettront notamment d'évaluer la capacité prédictive des modèles GR dans un contexte de prévision des crues, c'est-à-dire en bénéficiant des stratégies d'assimilation de données utilisées par exemple dans le modèle opérationnel de prévision des crues GRP, dans des conditions hydro-climatiques variées, représentatives de la variabilité rencontrée sur le territoire national (Astagneau et al., 2023).

Notons pour conclure l'importance de l'étude d'incertitude menée sur les courbes de tarage, qui permet de mieux qualifier les difficultés des modèles hydrologiques. Au regard des circonstances météorologiques tout à fait exceptionnelles ayant prévalu lors de l'événement de juillet 2021, il reste possible que les estimations de la réanalyse Coméphore utilisées pour forcer les modèles hydrologiques soient elles aussi entachées d'une incertitude non négligeable.

5. Références

- Astagneau, P. C., Bourgin, F., Andréassian, V., Perrin, C. (2022). Catchment response to intense rainfall: evaluating modeling hypotheses, 36, e14676, Hydrological Processes, <https://doi.org/10.1002/hyp.14676>.
- Astagneau, P.C., Bourgin, F., Andréassian, V., Perrin, C. (2023). Impact hydrologique de fortes intensités de pluie : application à la prévision des crues. Colloque SHF "Prévision des crues et des inondations – Avancées, valorisation et perspectives", Toulouse, 28-30 novembre 2023.
- Astagneau, P.C. (2022). Pistes d'amélioration de la généralité et de l'efficacité d'un modèle opérationnel de prévision des crues. Thèse de doctorat, INRAE (Antony), Sorbonne Université (Paris), GRNE (Paris), 212 pp.
- Coron L, Thirel G, Delaigue O, Perrin C, Andréassian V (2017). The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. Environmental Modelling and Software, 94, 166-171. doi:10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
- Coron L, Delaigue O, Thirel G, Dorchies D, Perrin C, Michel C (2023). airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. doi:10.15454/EX11NA, R package version 1.7.4, <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>.
- Delaigue, O., Génot, B., Lebecherel, L., Brigode, P., and Bourgin, P. (2020). Database of watershed-scale hydroclimatic observations in France. <https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees>.
- DHE (2022). Analyse de l'évènement de juillet 2021. Bassin versant de la Chiers. Rapport, 28 pp.
- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. Journal of Hydrology, 303(1), 290–306. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.
- Tabary, P., Dupuy, P., L'Henaff, G., Gueguen, C., Moulin, L., Laurantin, O., Merlier, C., & Soubeyroux, J.-M. (2012). A 10-year (1997–2006) reanalysis of quantitative precipitation estimation over France: Methodology and first results (Vol. 351, pp. 255–260). IAHS Publication.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M., & Soubeyroux, J.-M. (2010). A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. International Journal of Climatology, 30(11), 1627–1644. <https://doi.org/10.1002/joc.2003>.



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**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

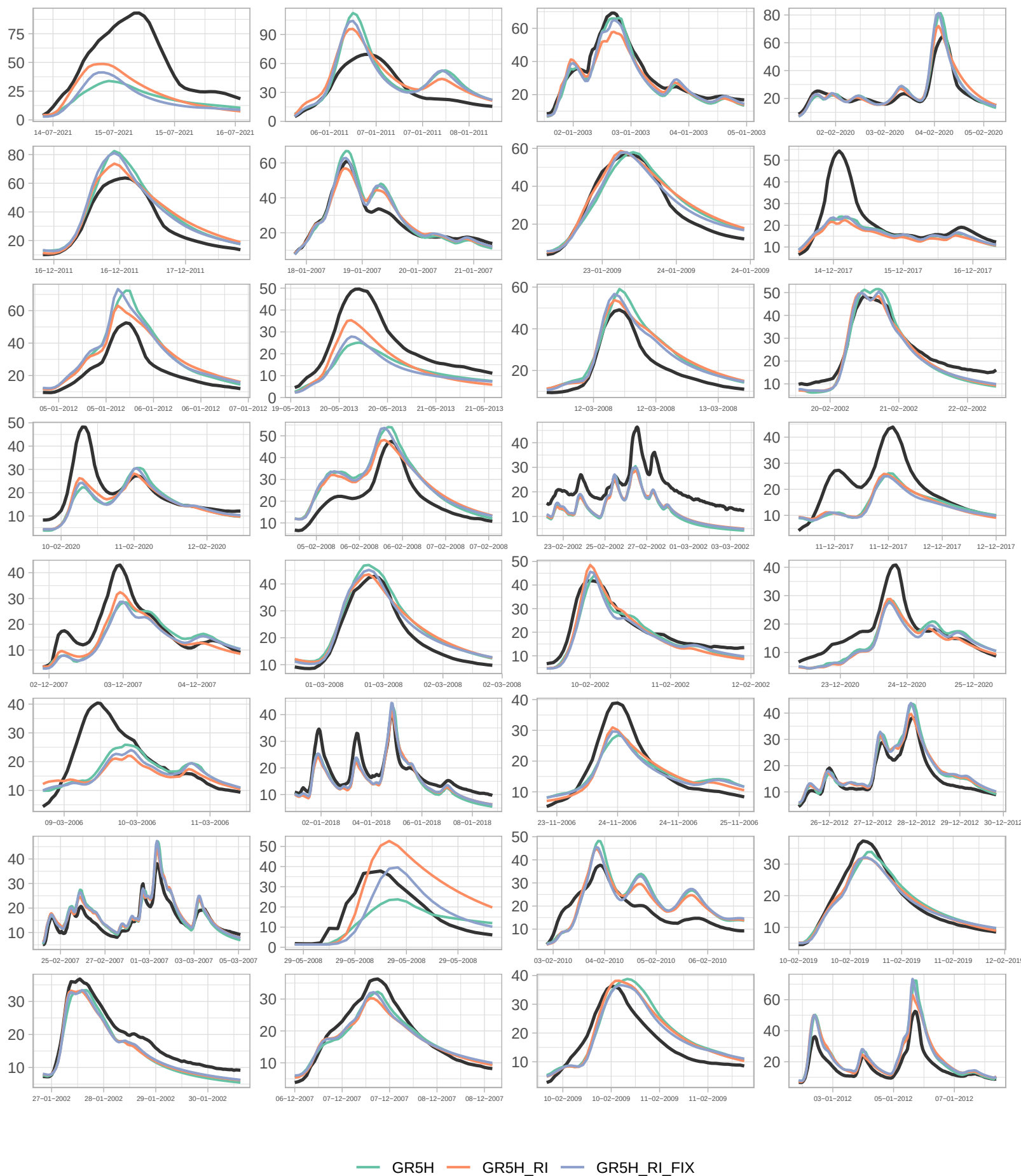


**RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE**

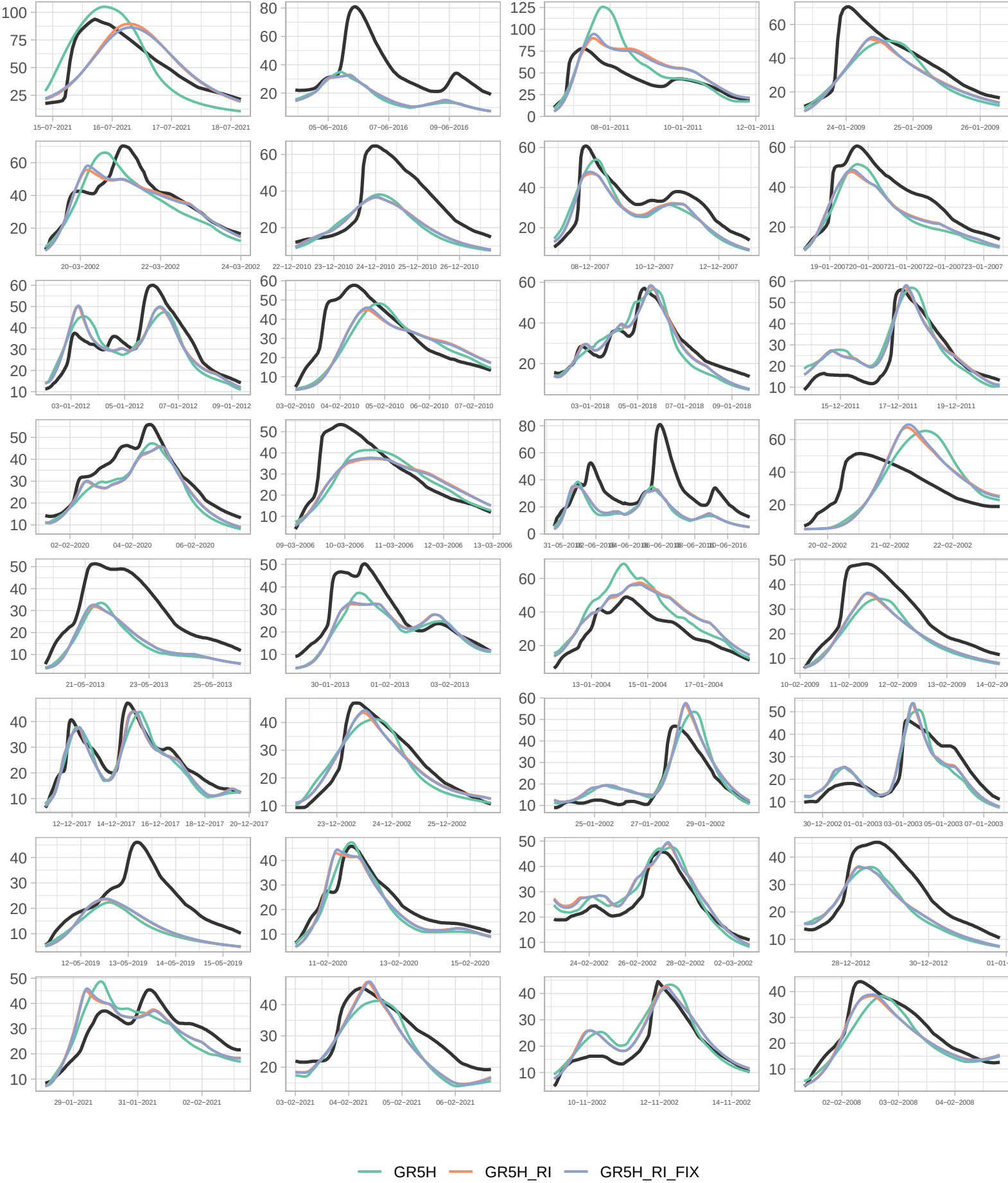
*Liberté
Égalité
Fraternité*

INRAE

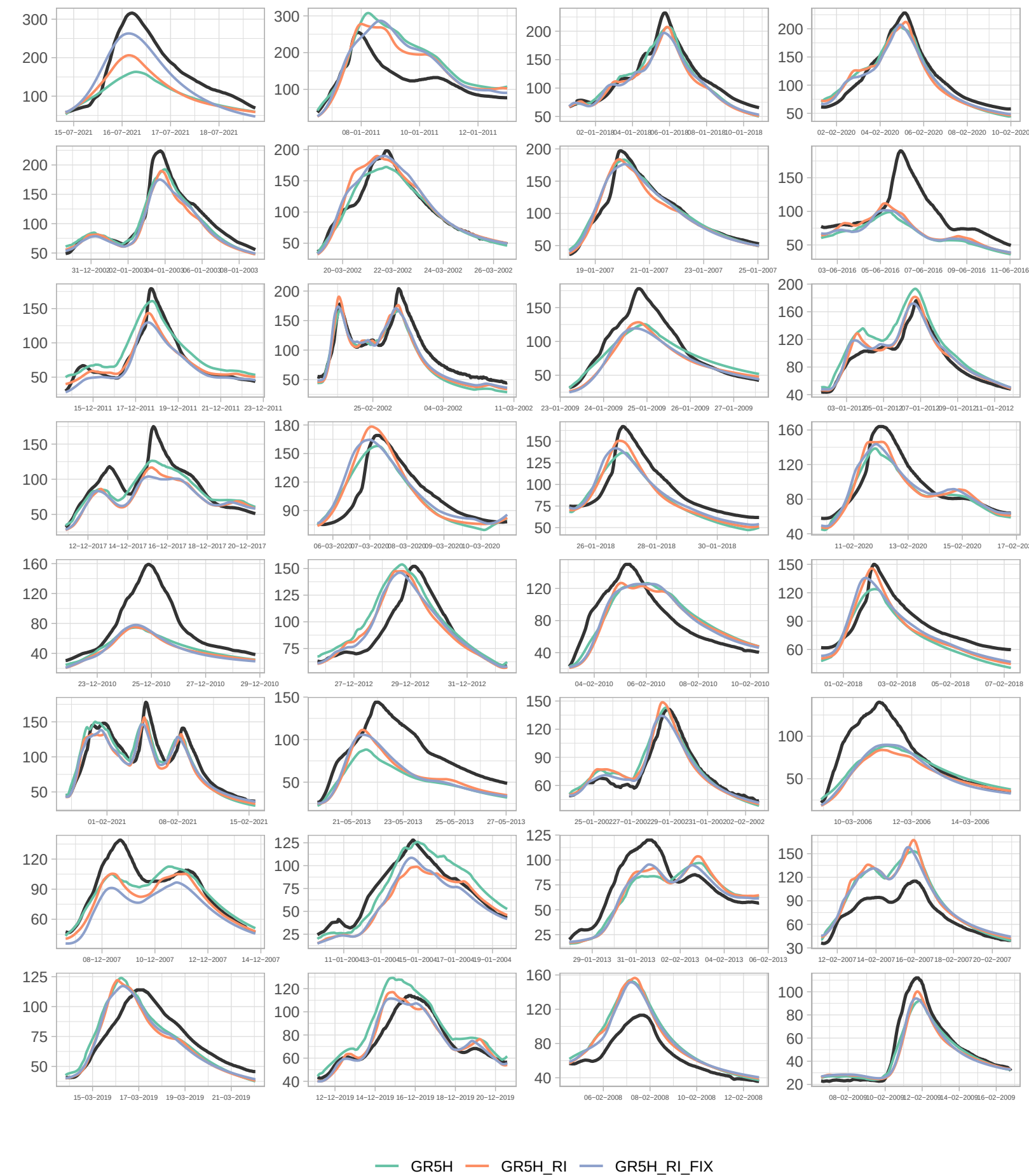
B402101001 – La Chiers à Longwy (212 km2)



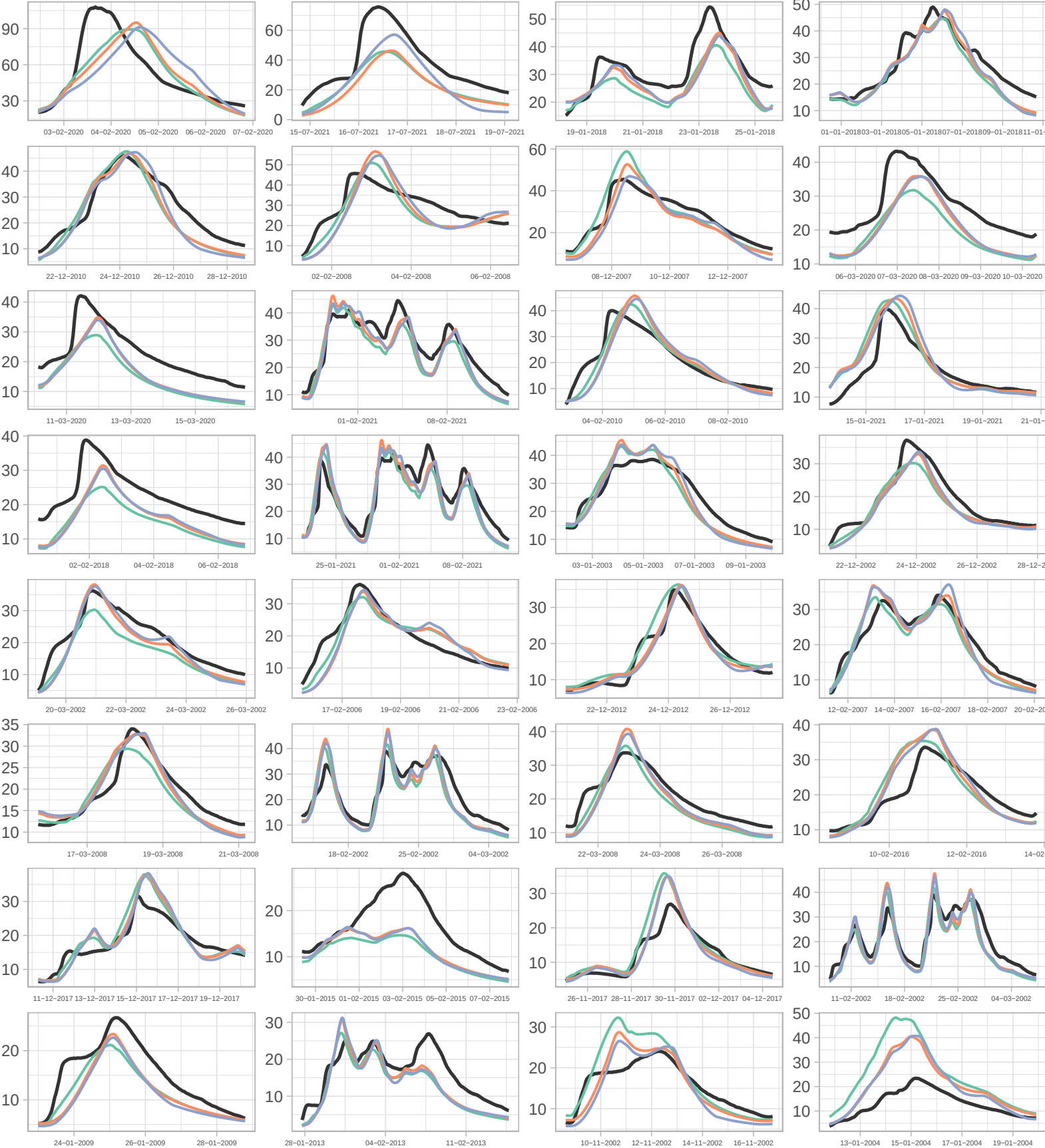
B457201001 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (349 km2)



B460101001 – La Chiers à Chauvency-le-Château (1706 km2)

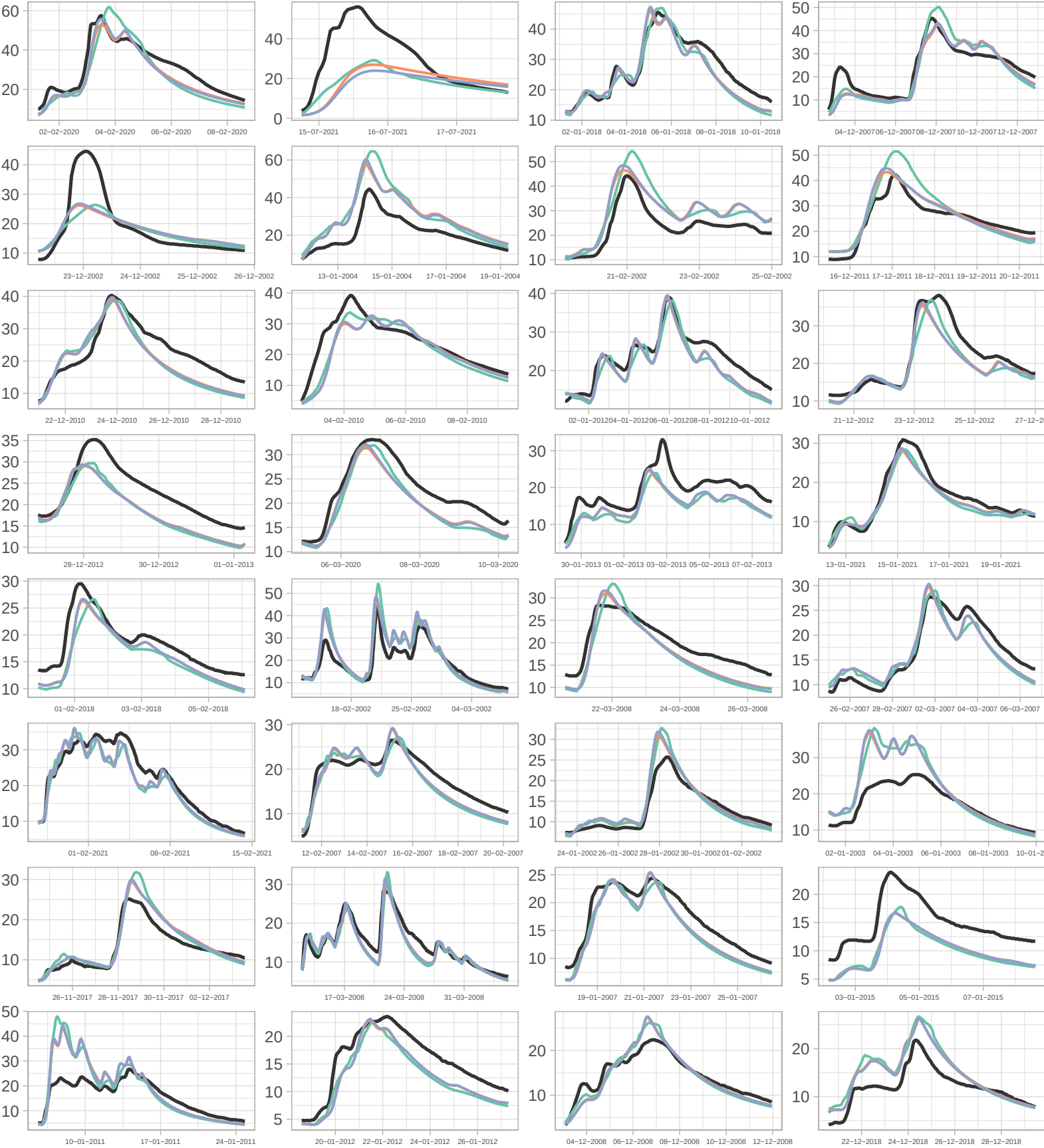


H602102001 – L'Aisne à Verrières (385 km2)



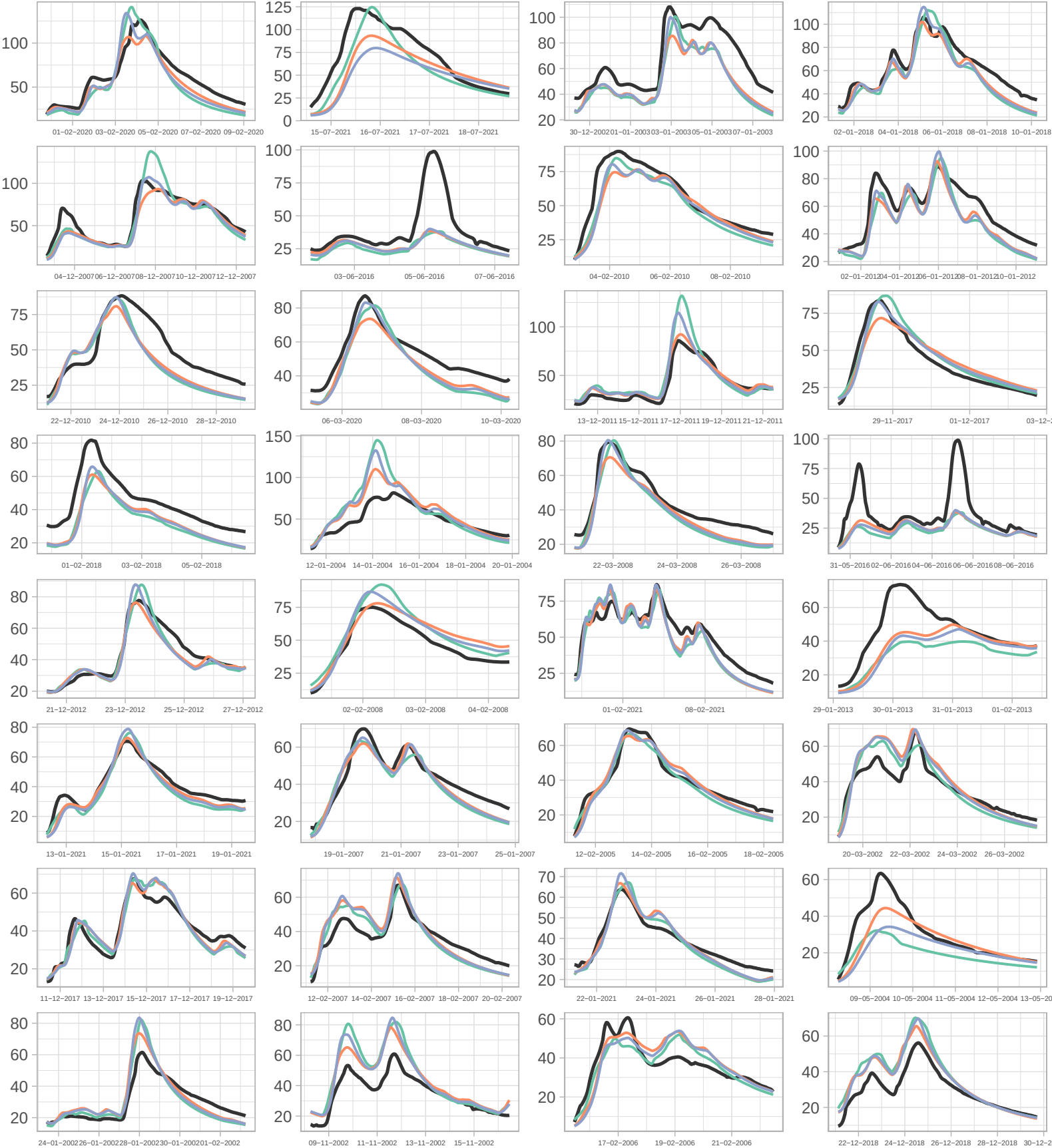
GR5H GR5H_RI GR5H_RI_FIX

H610201001 – L'Aire à Beausite [Amblaincourt] (283 km2)



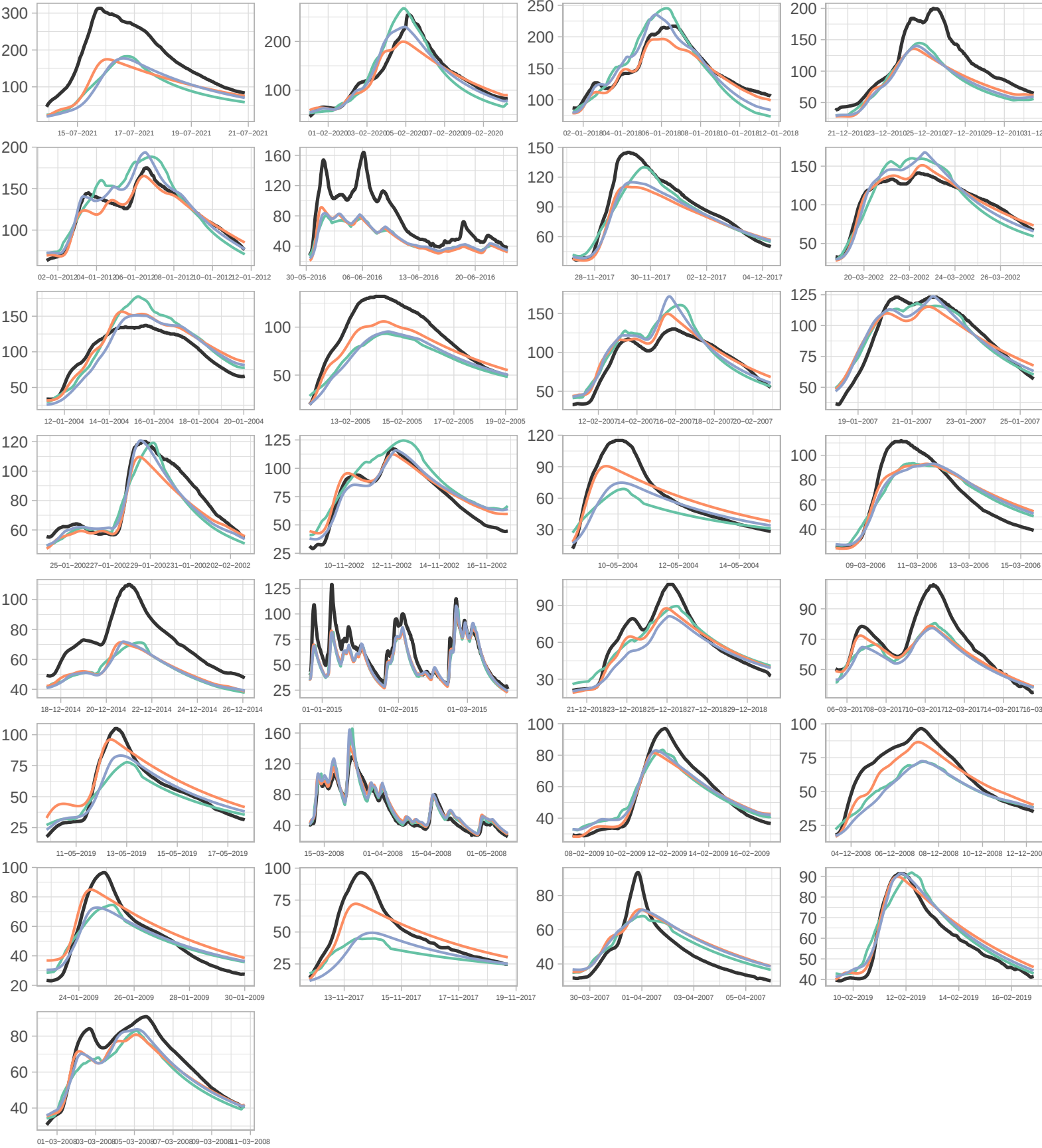
GR5H GR5H_RI GR5H_RI_FIX

H612201001 – L'Aire à Varennes-en-Argonne (629 km2)



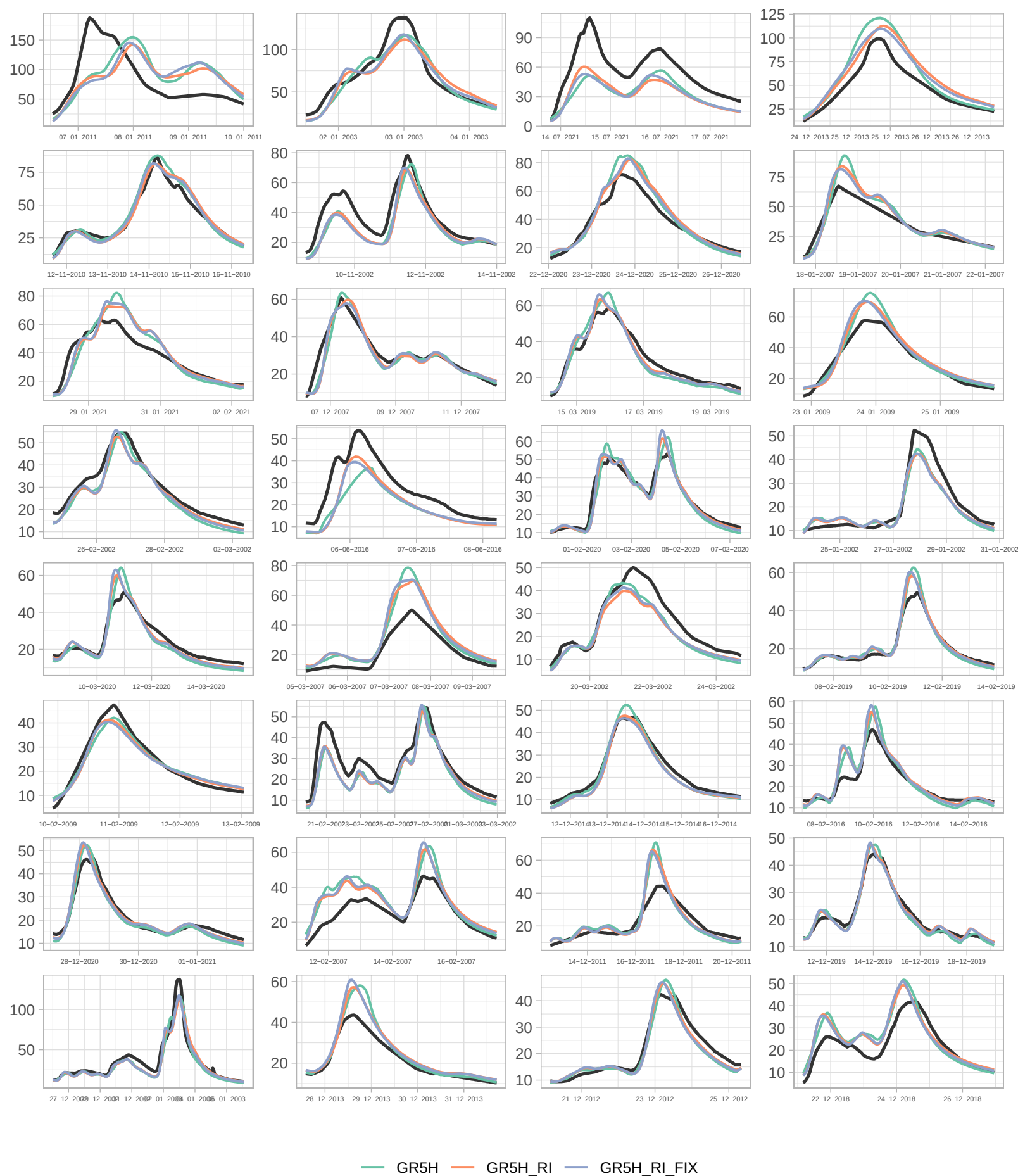
GR5H GR5H_RI GR5H_RI_FIX

H620101001 – L'Aisne à Mouron (2242 km2)

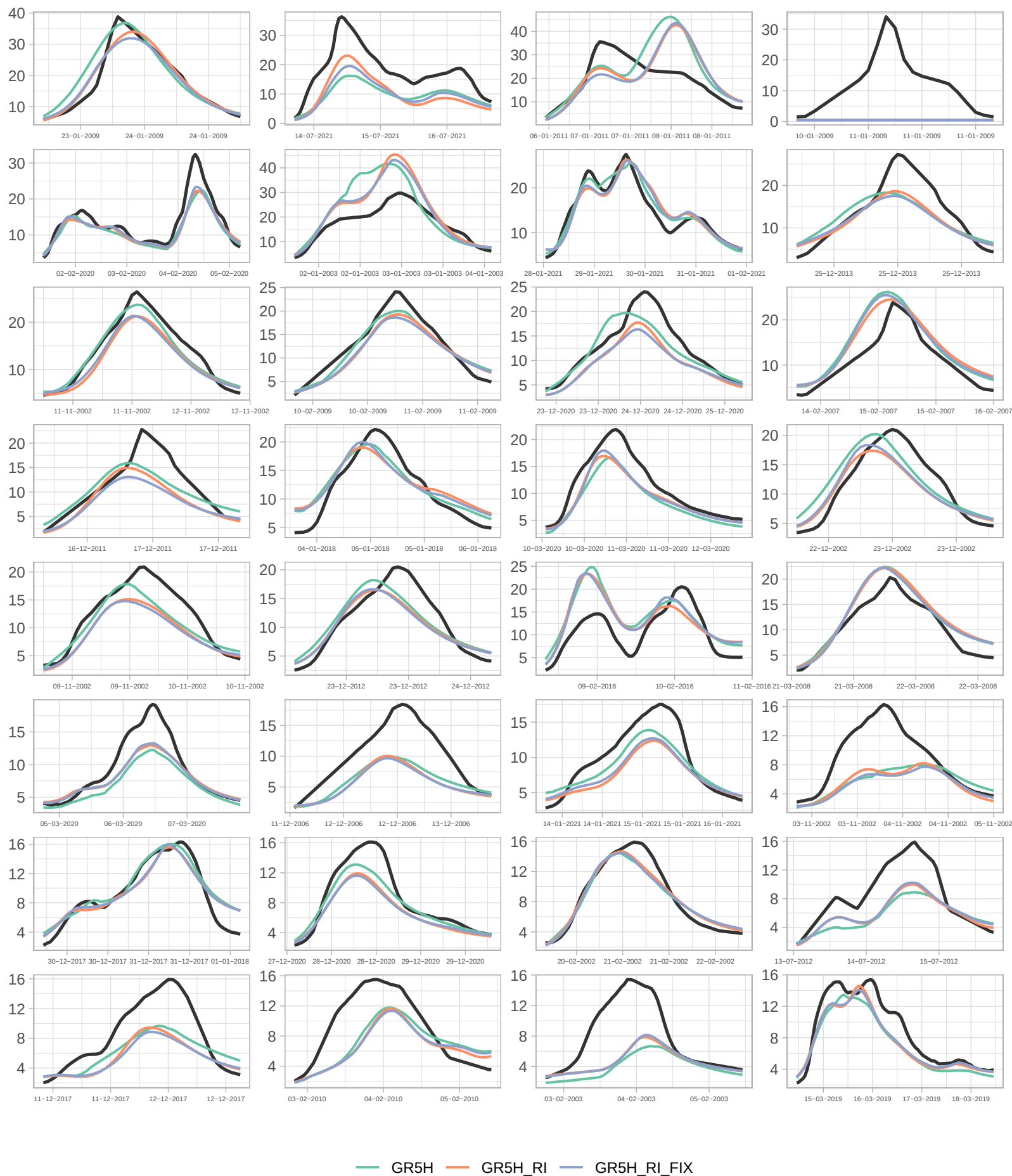


GR5H GR5H_RI GR5H_RI_FIX

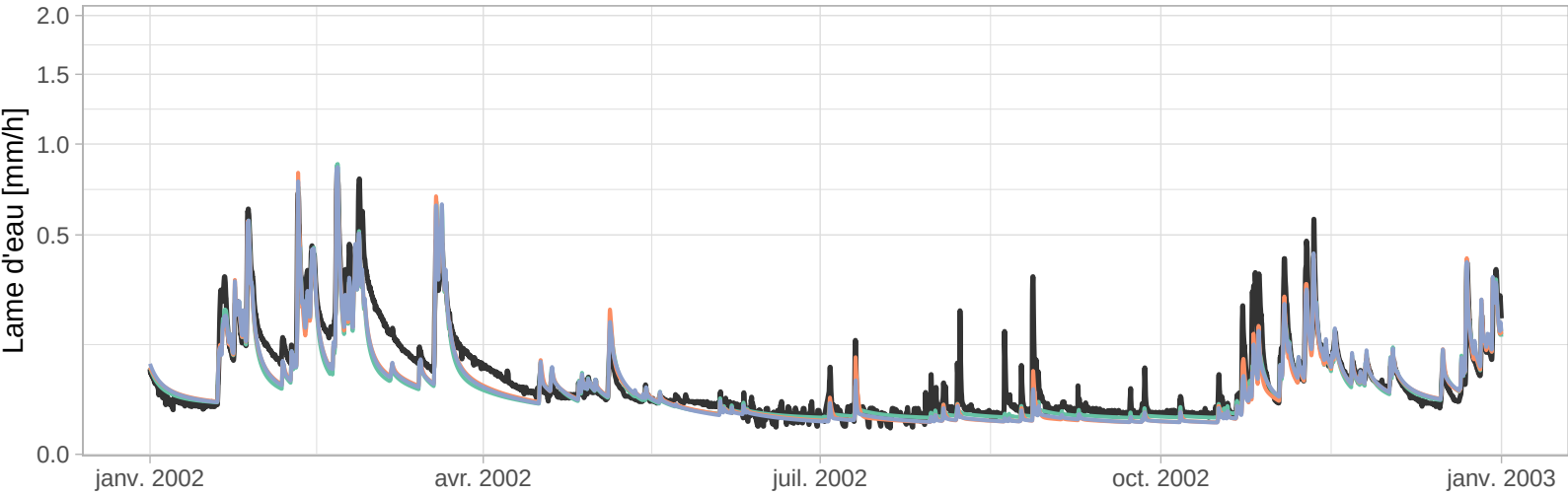
H702101001 – L'Oise à Hirson (316 km2)



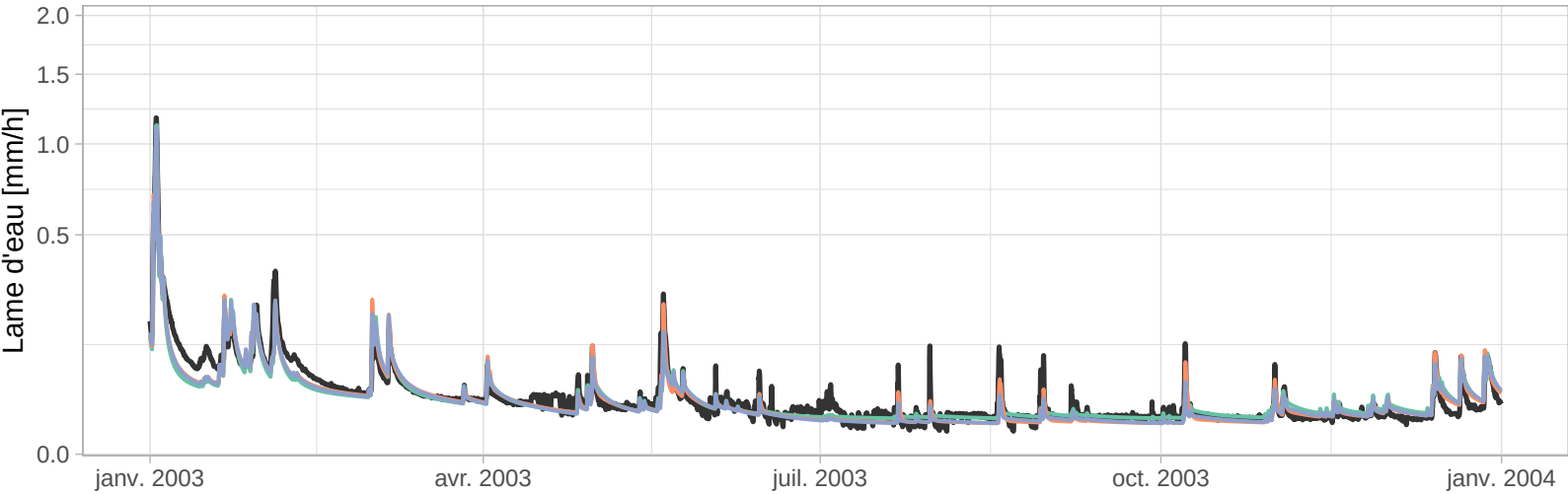
H710202001 – La Serre à Montcornet (112 km2)



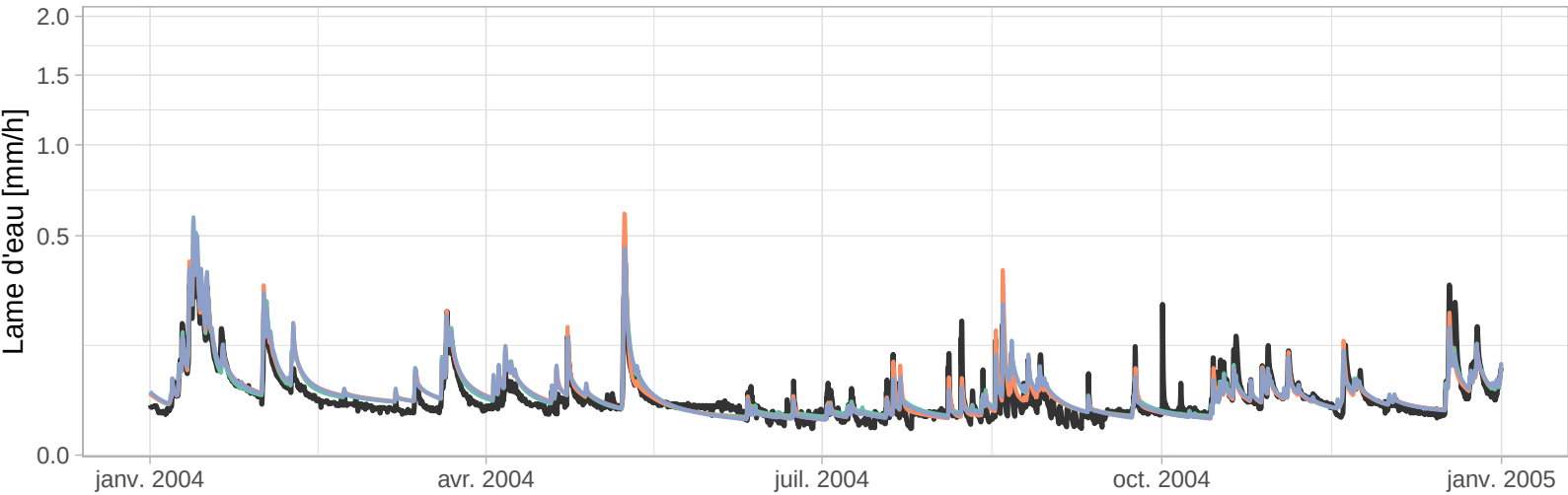
B402101001 – La Chiers à Longwy (212 km2)



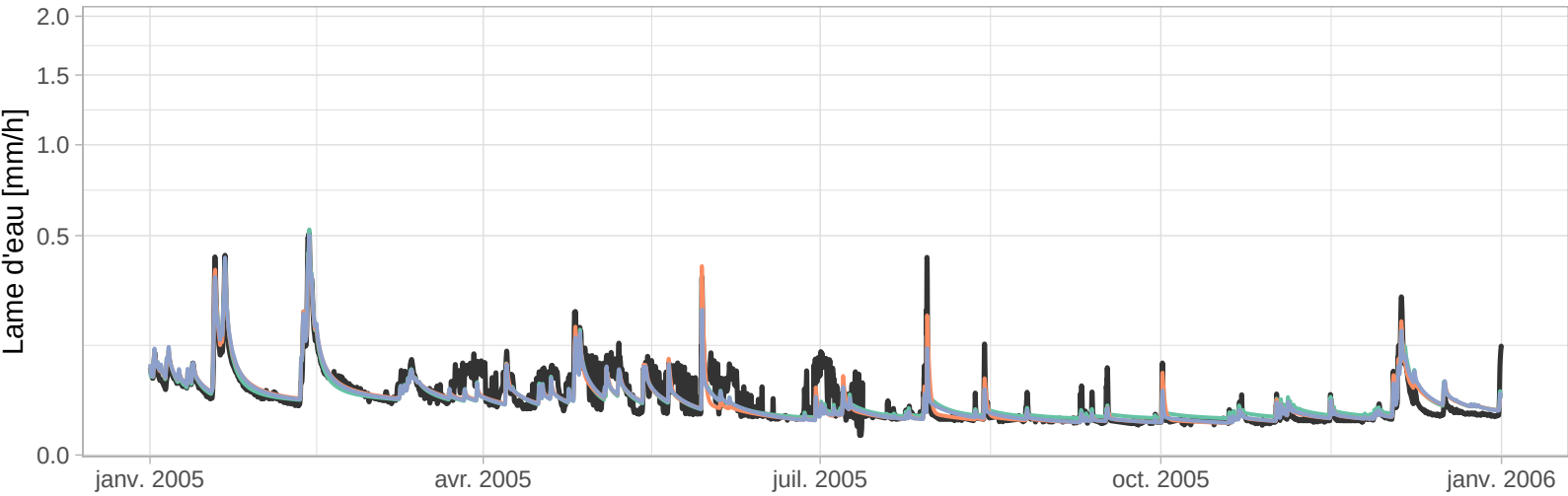
GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX



GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX

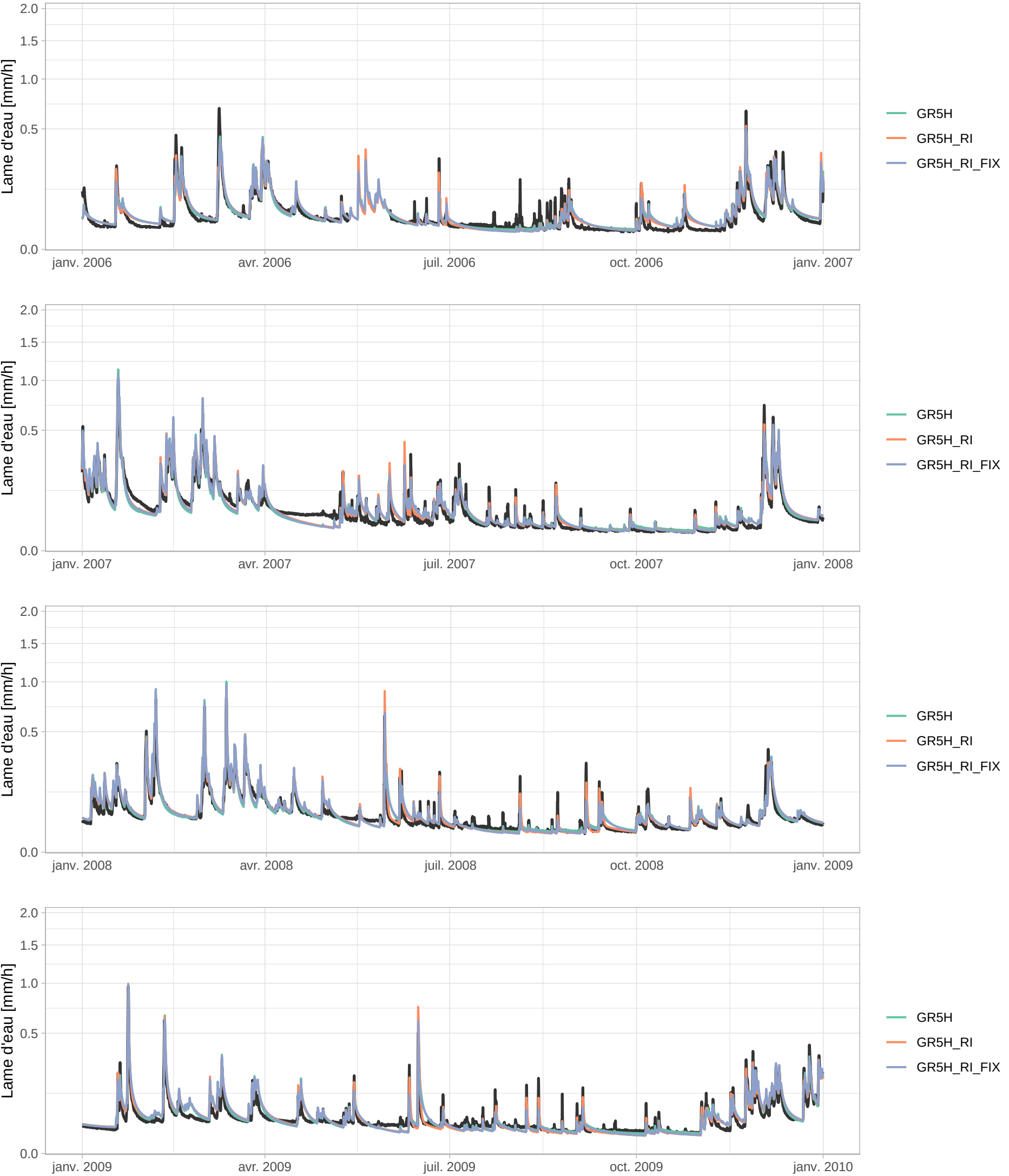


GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX

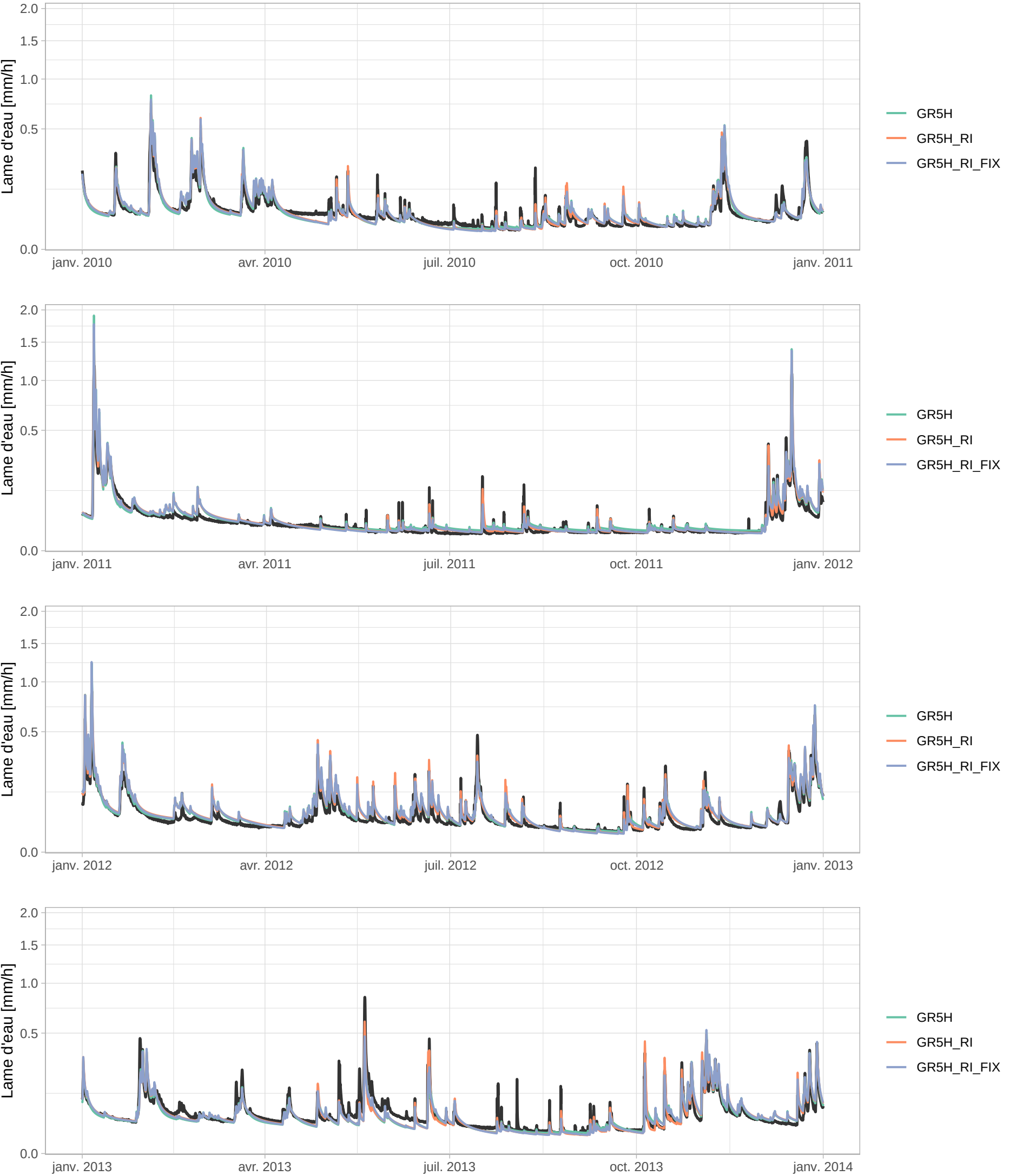


GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX

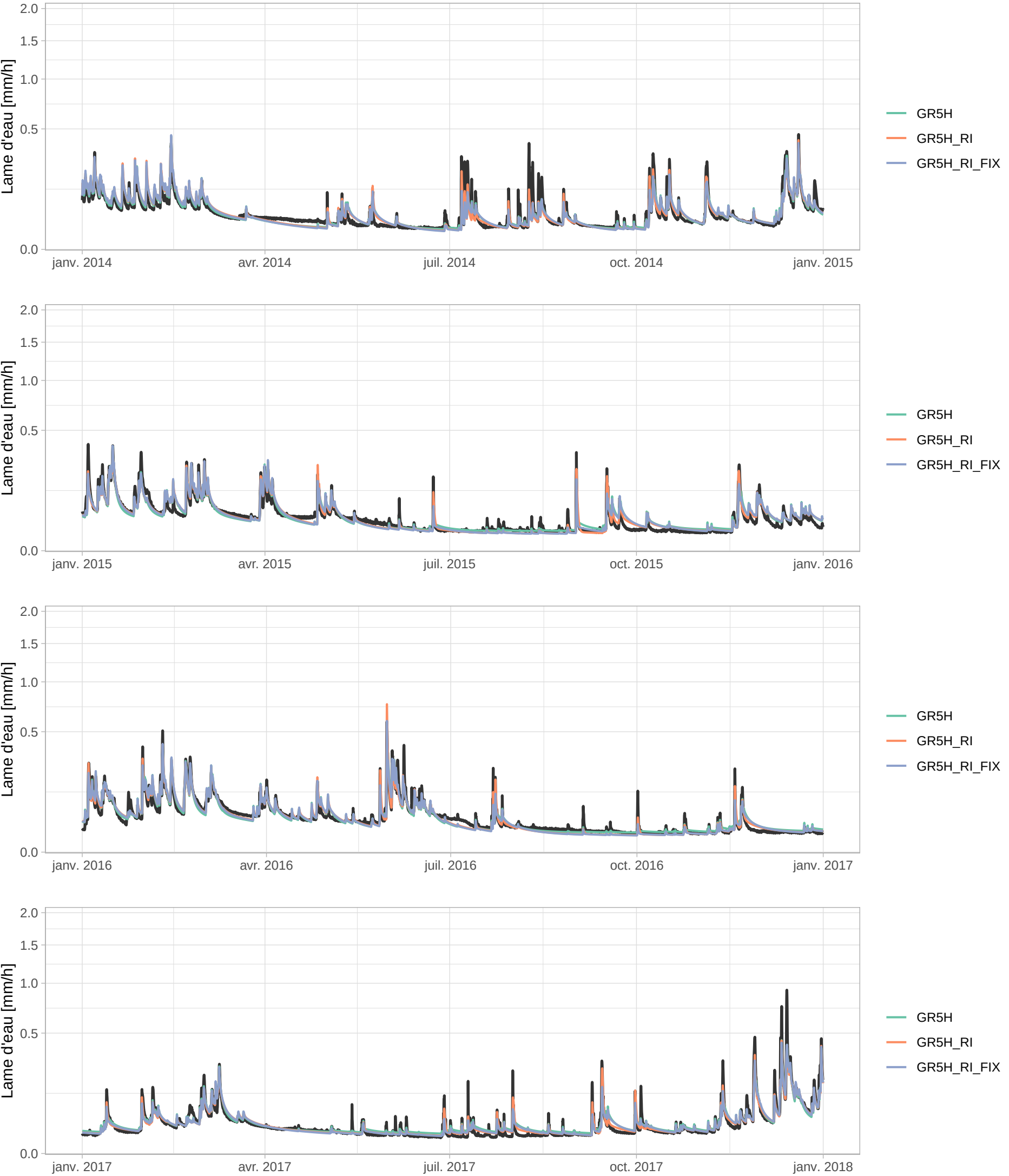
B402101001 – La Chiers à Longwy (212 km2)



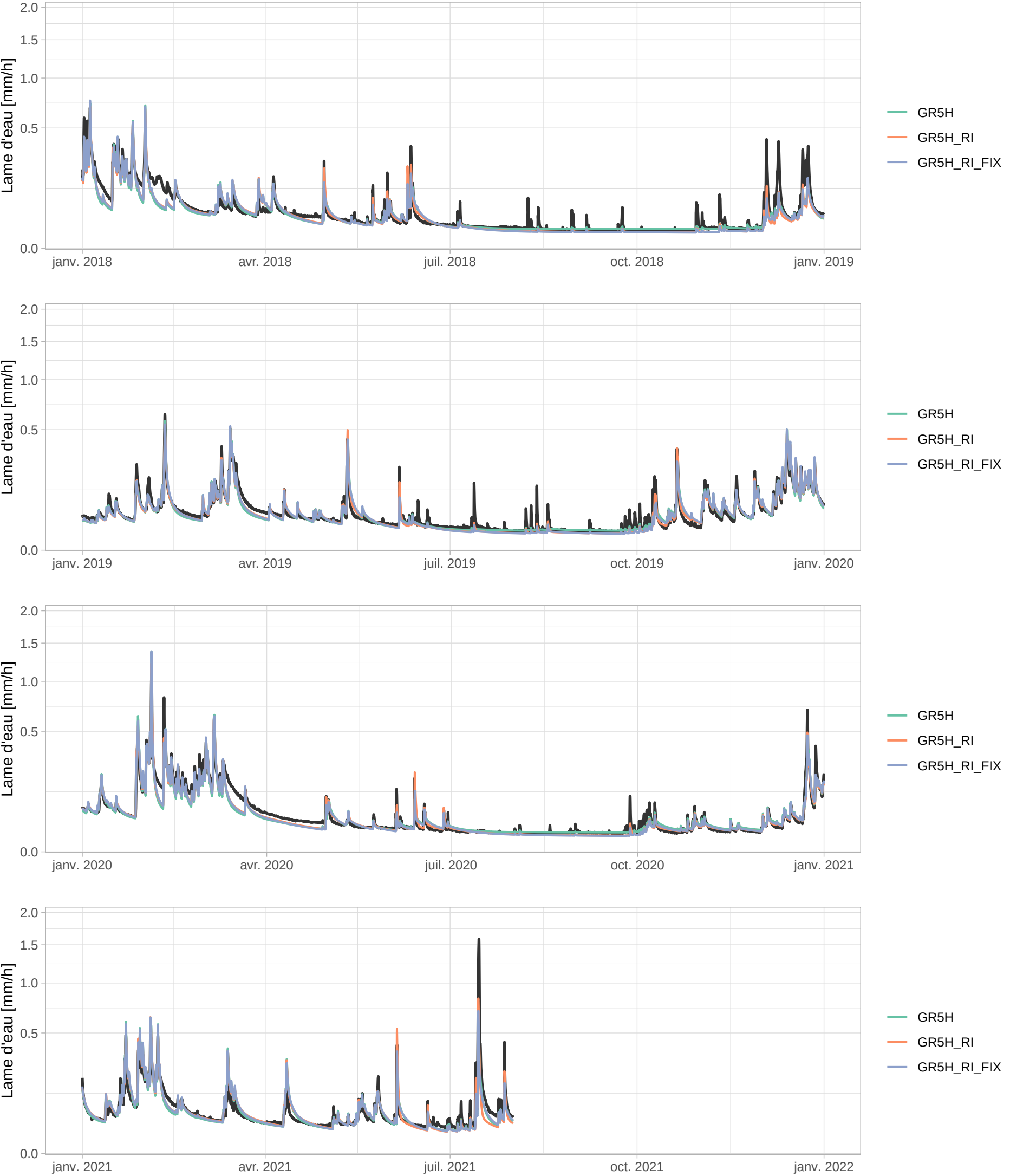
B402101001 – La Chiers à Longwy (212 km2)



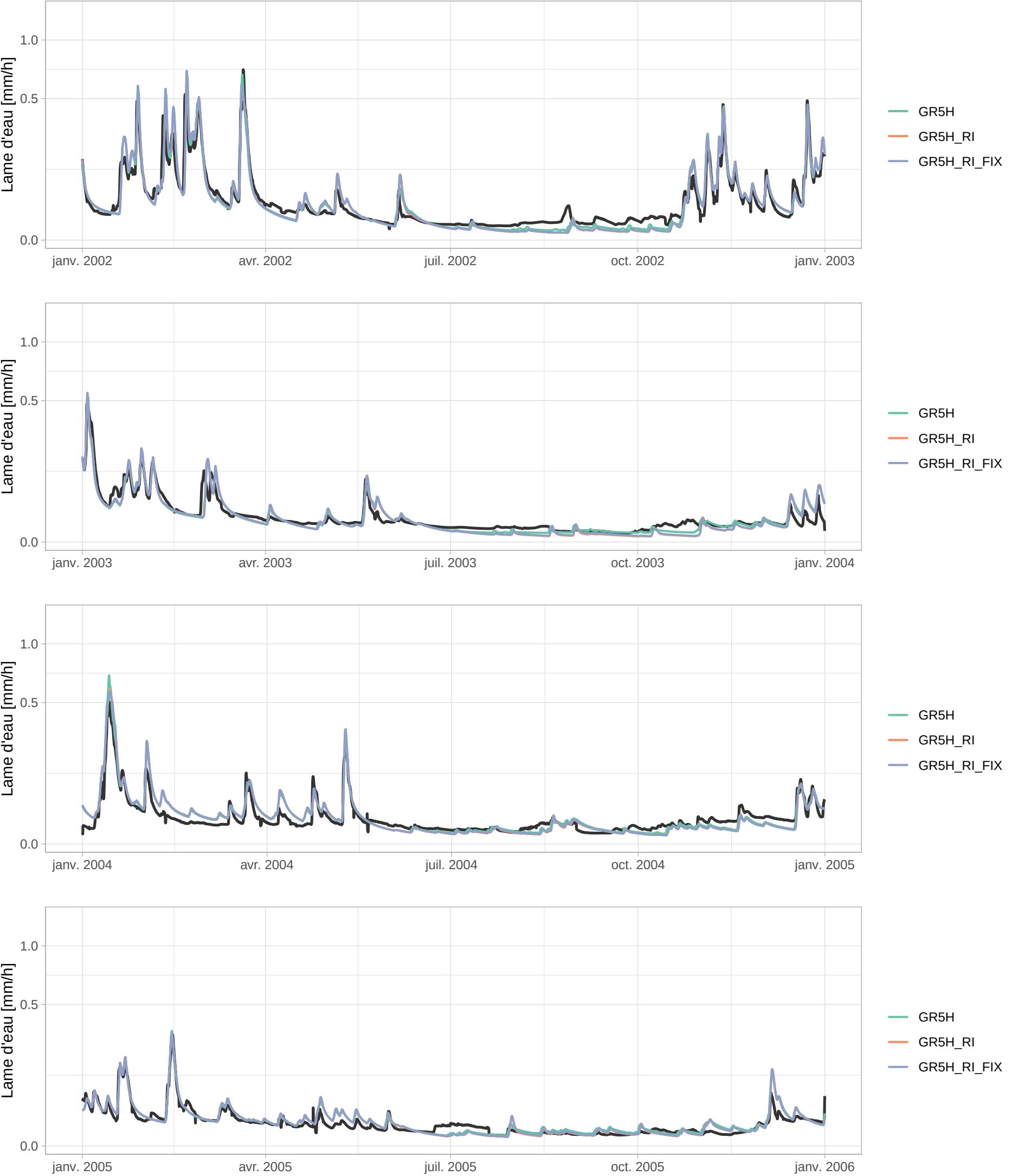
B402101001 – La Chiers à Longwy (212 km2)



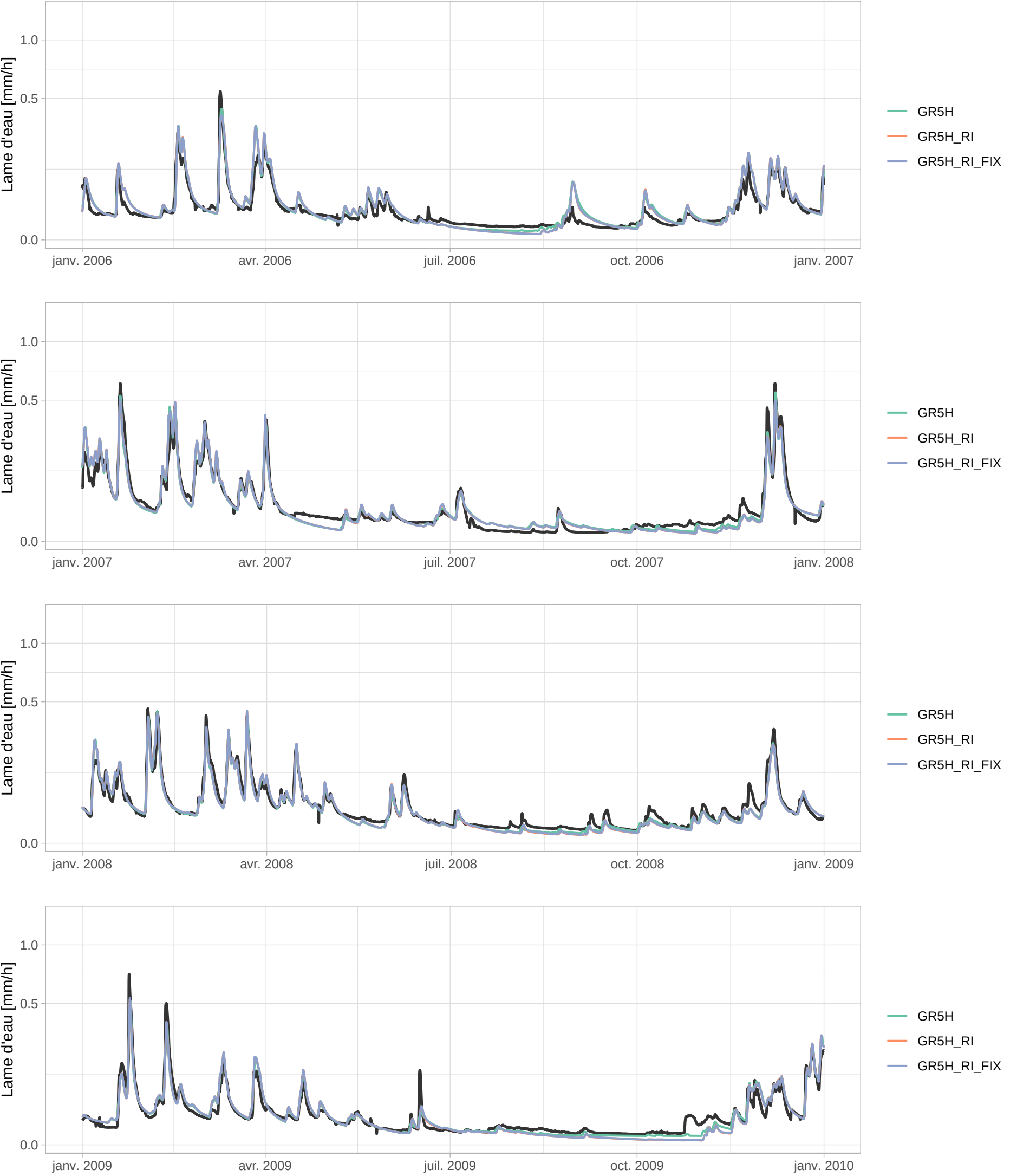
B402101001 – La Chiers à Longwy (212 km2)



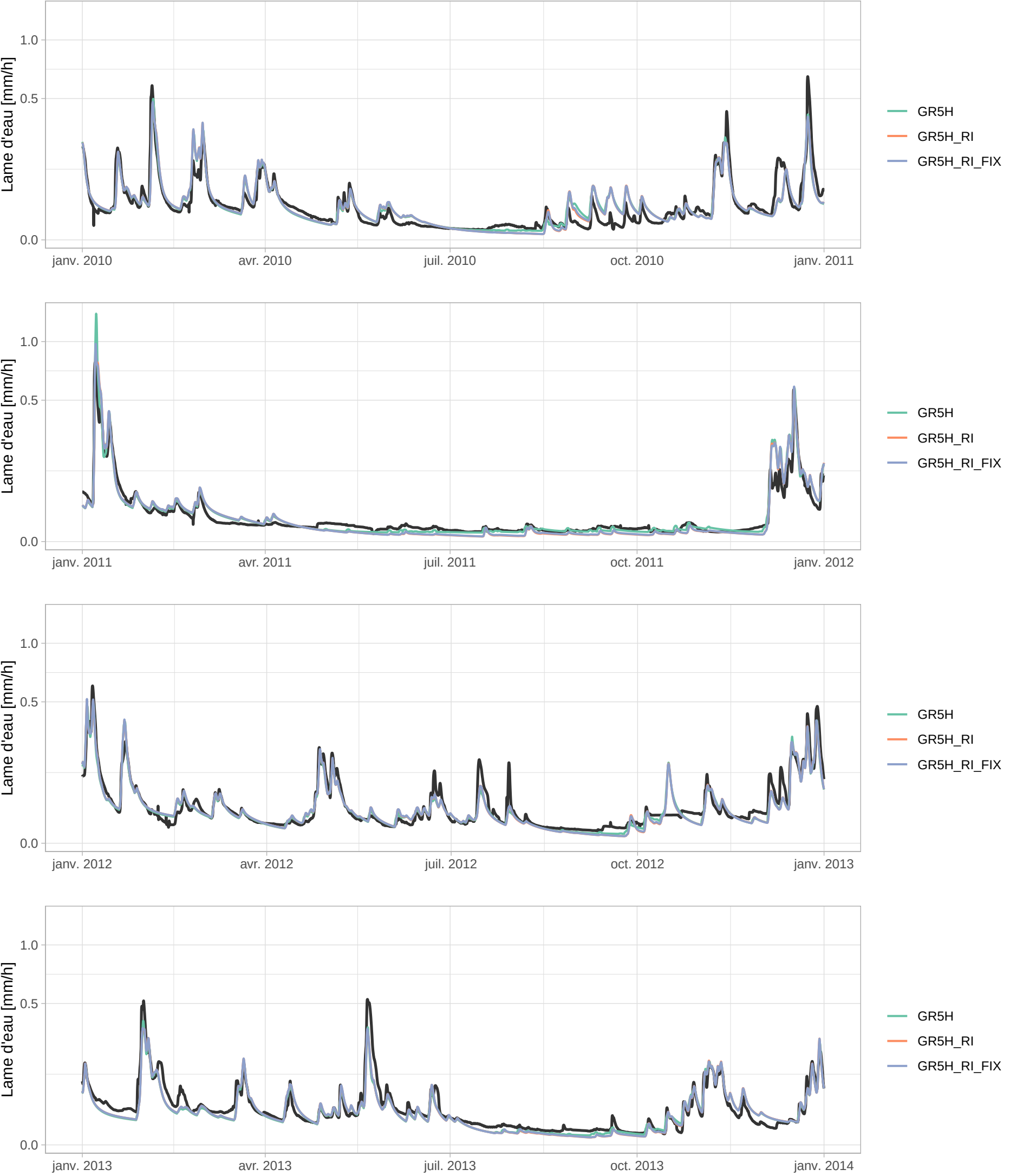
B457201001 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (349 km2)



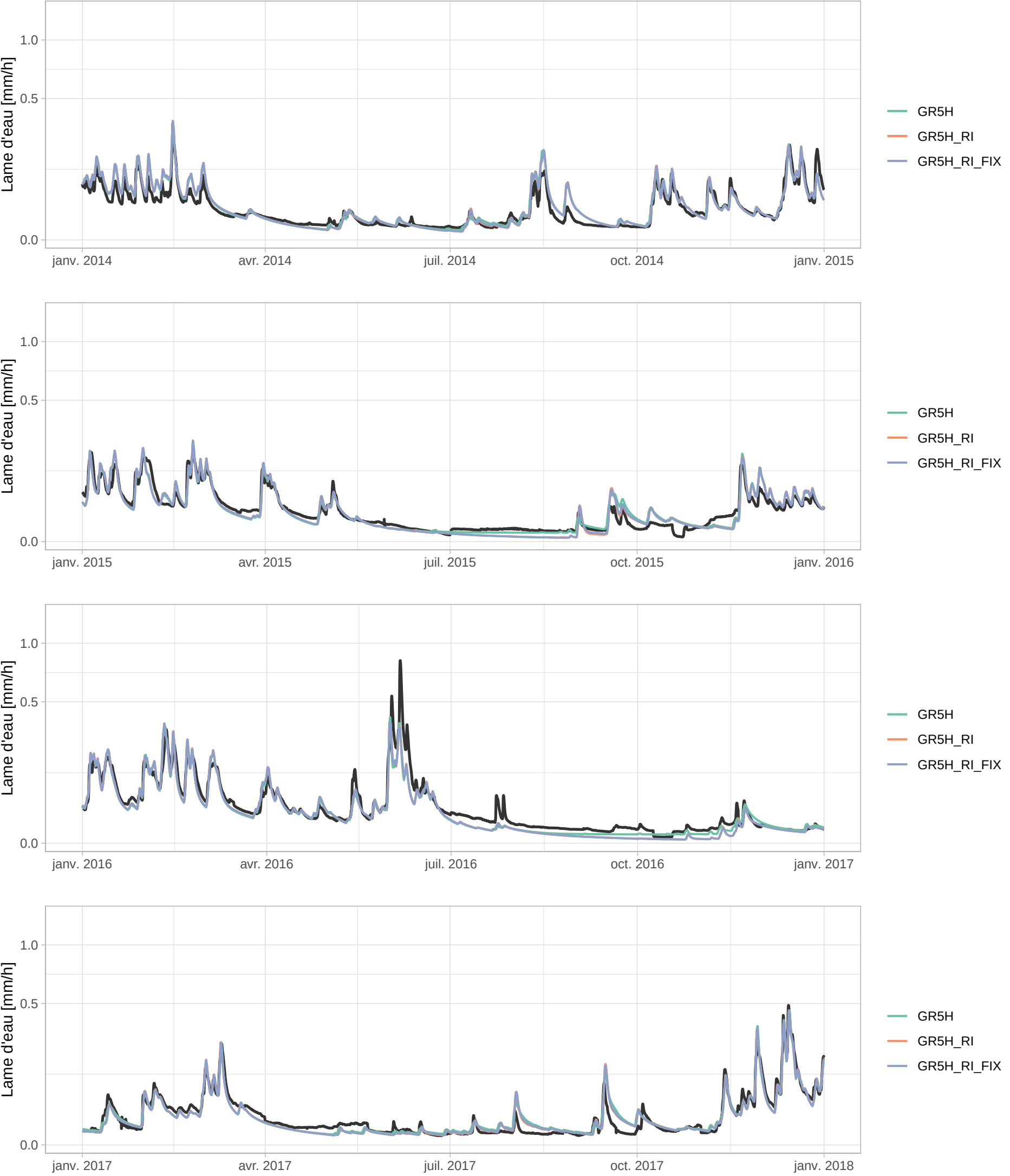
B457201001 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (349 km2)



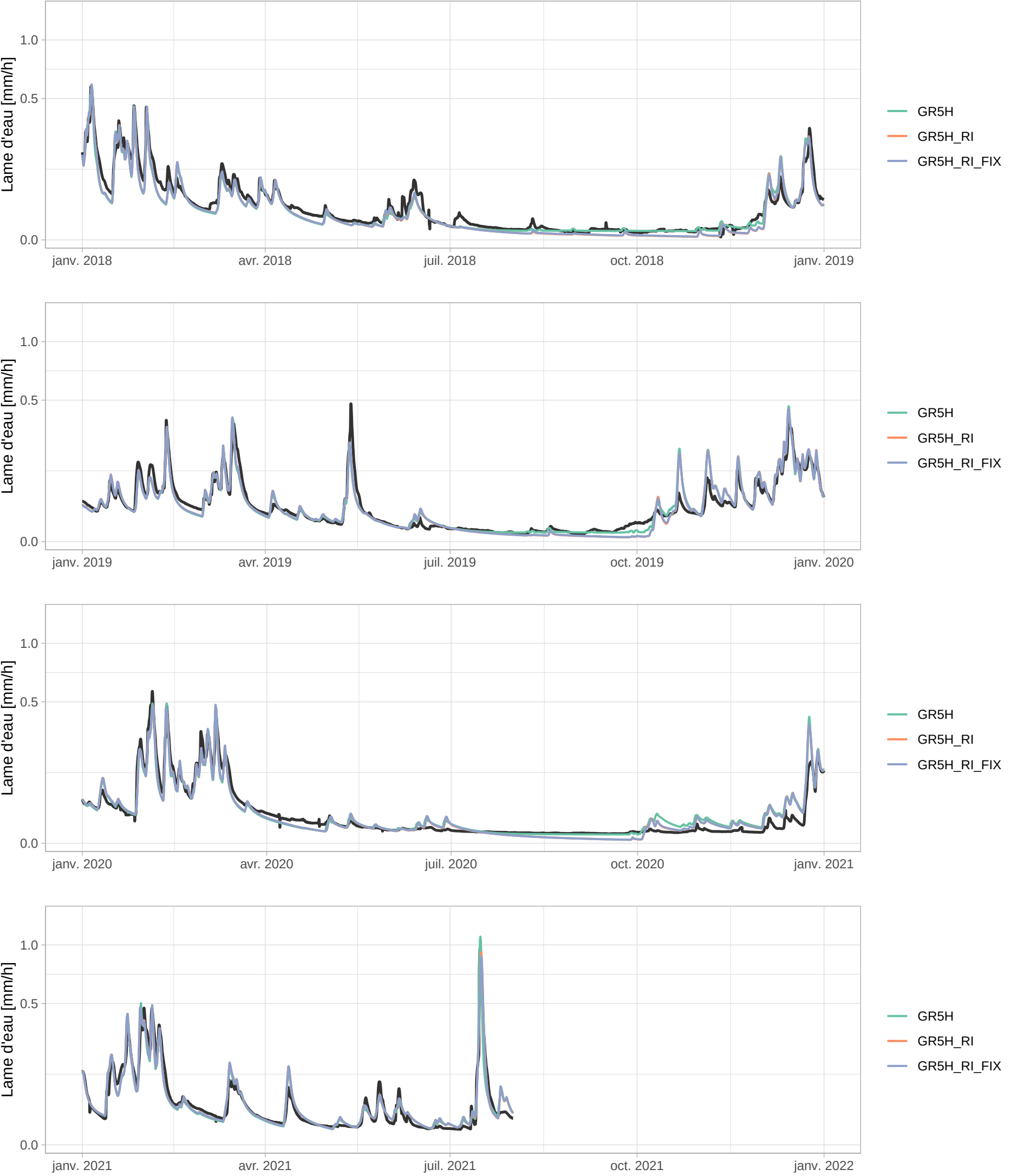
B457201001 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (349 km2)



B457201001 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (349 km2)



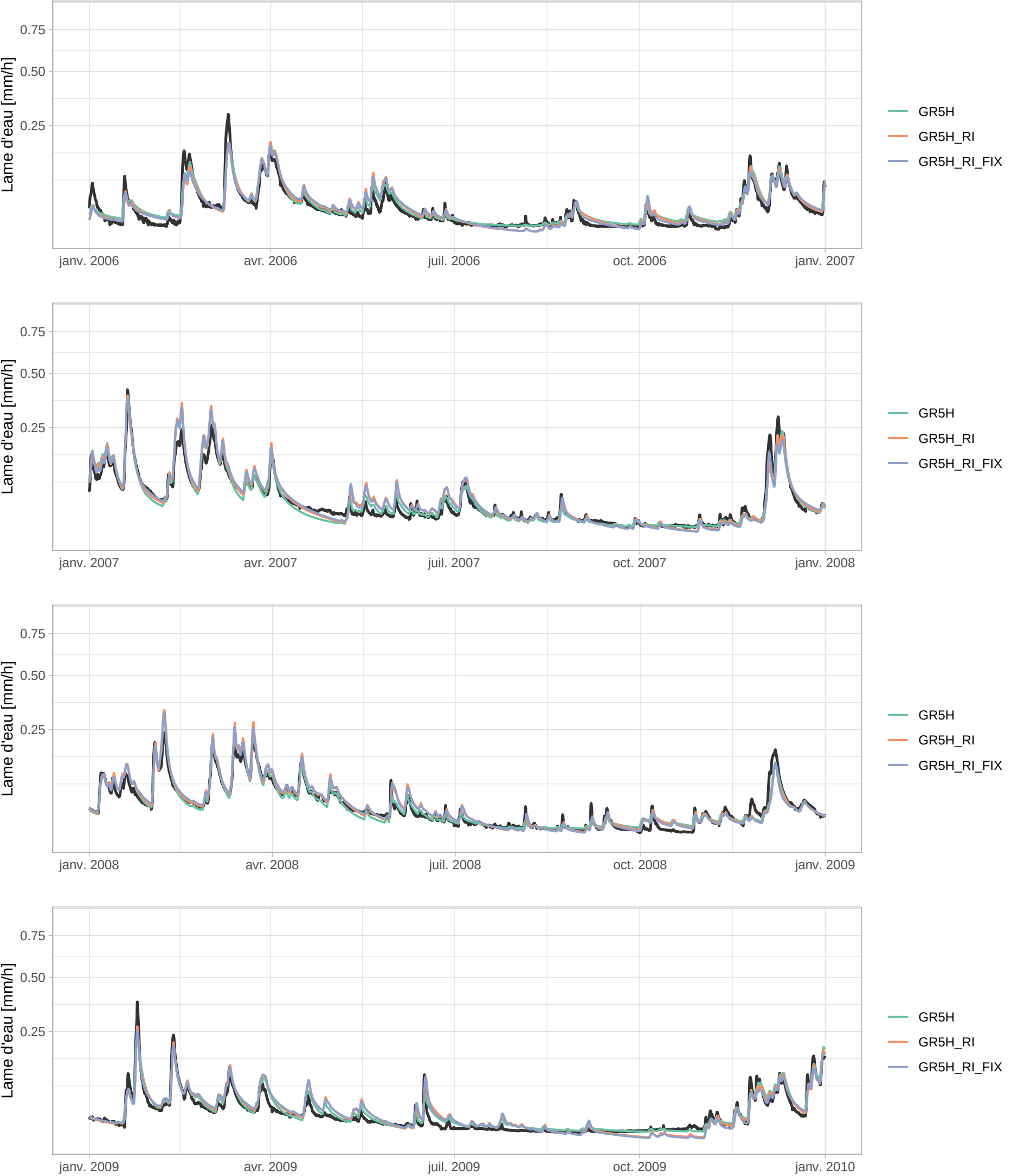
B457201001 – Le Loison à Han-lès-Juvigny (349 km2)



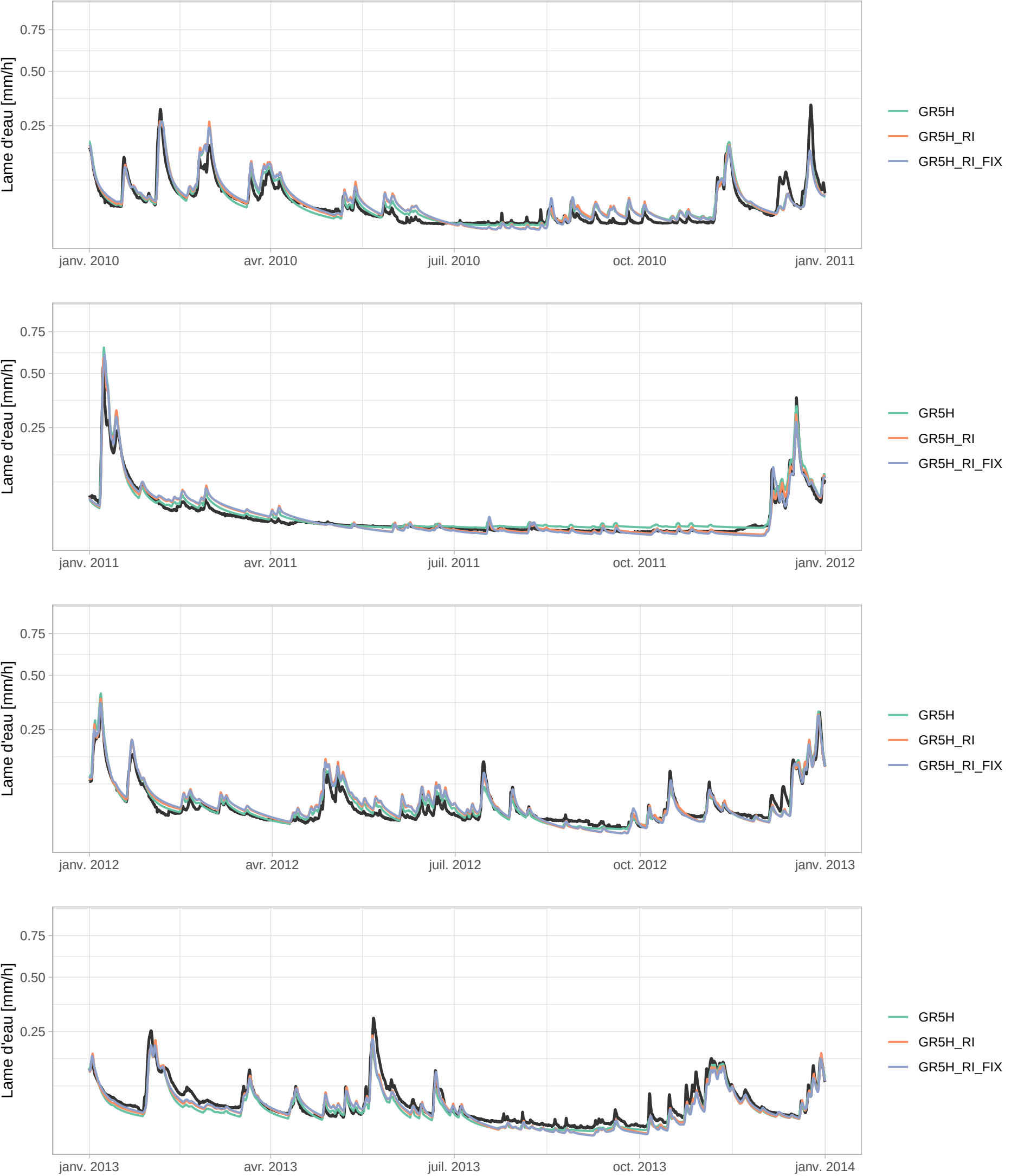
B460101001 – La Chiers à Chauvency-le-Château (1706 km2)



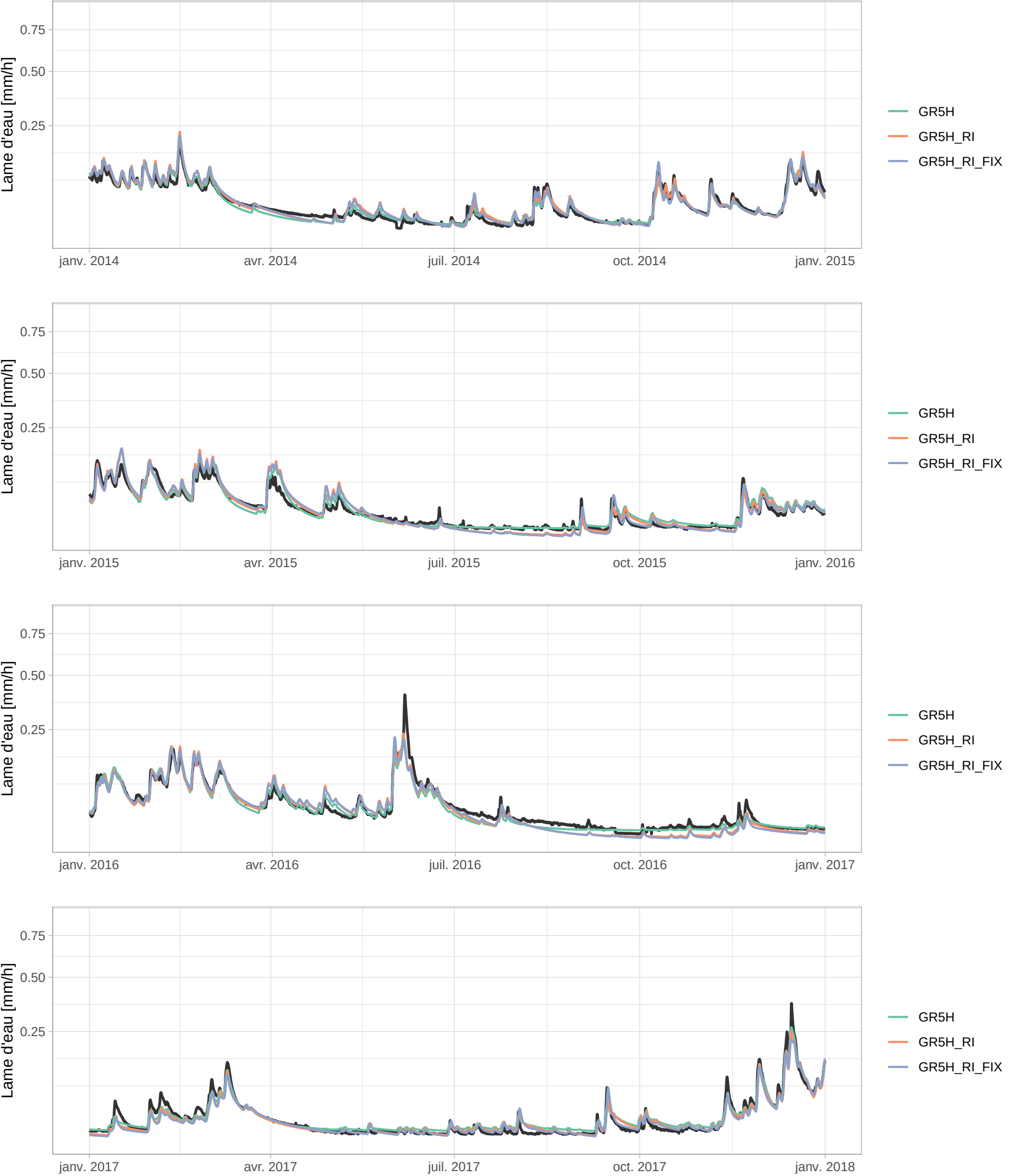
B460101001 – La Chiers à Chauvency-le-Château (1706 km2)



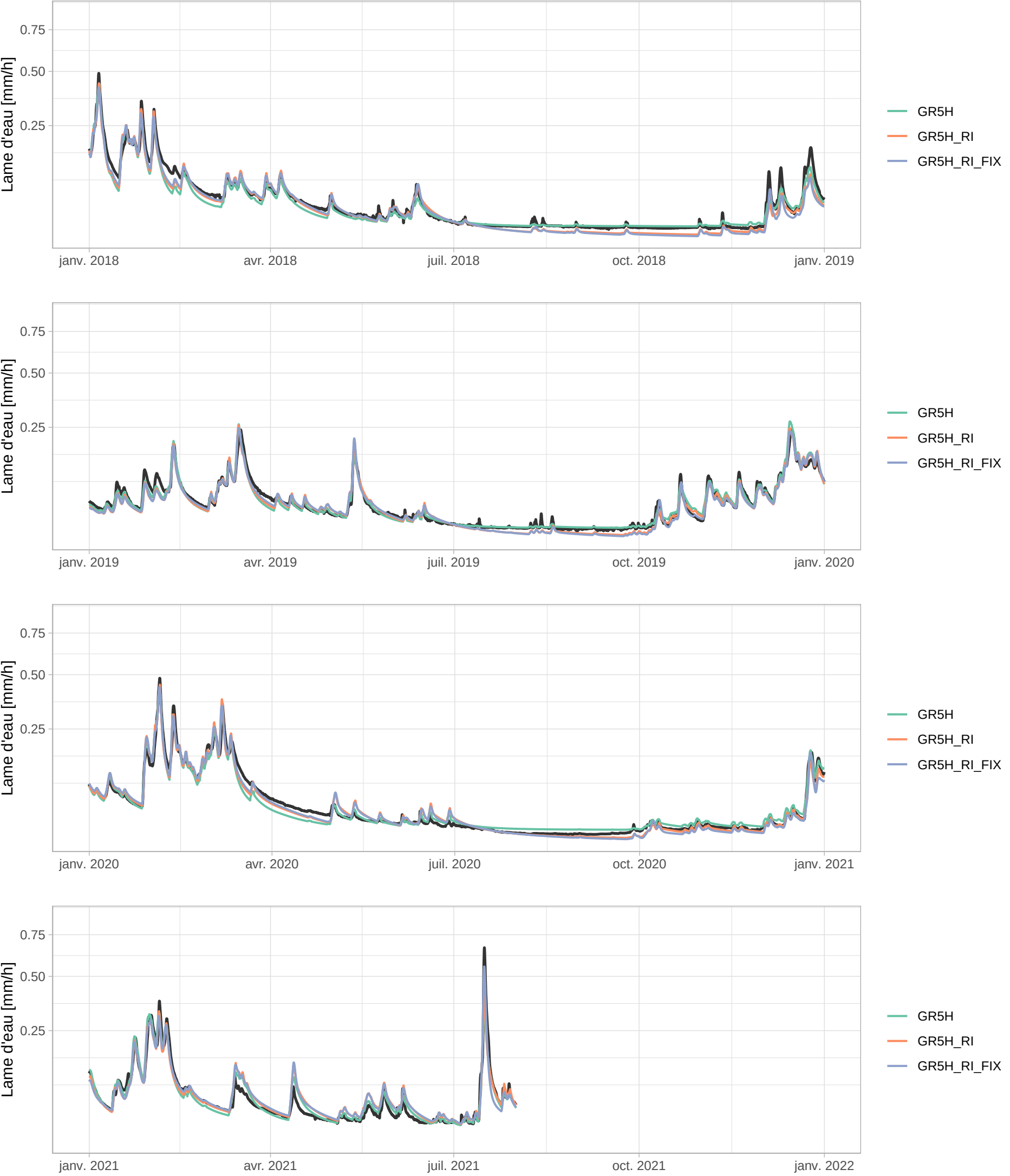
B460101001 – La Chiers à Chauvency-le-Château (1706 km2)



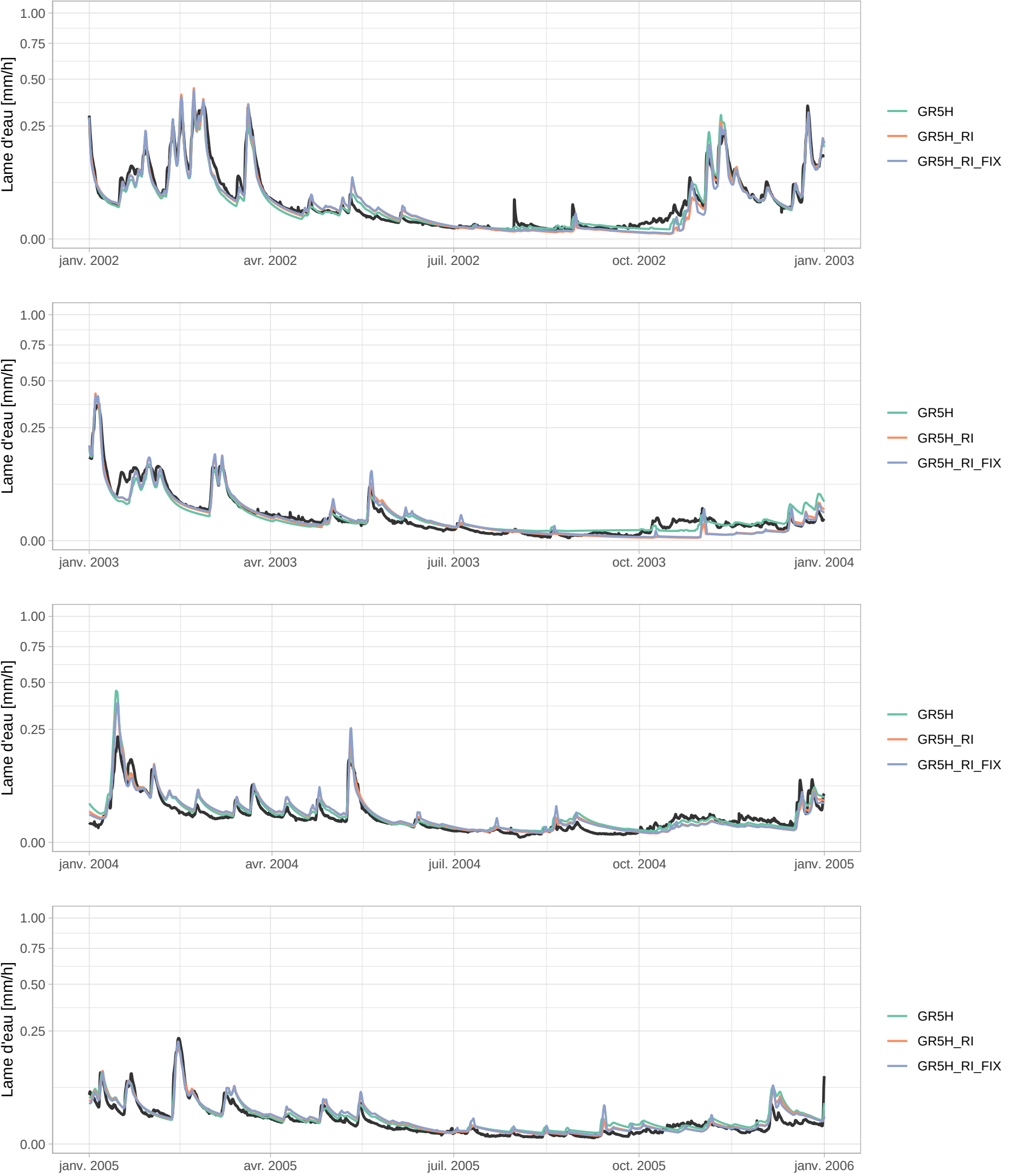
B460101001 – La Chiers à Chauvency-le-Château (1706 km2)



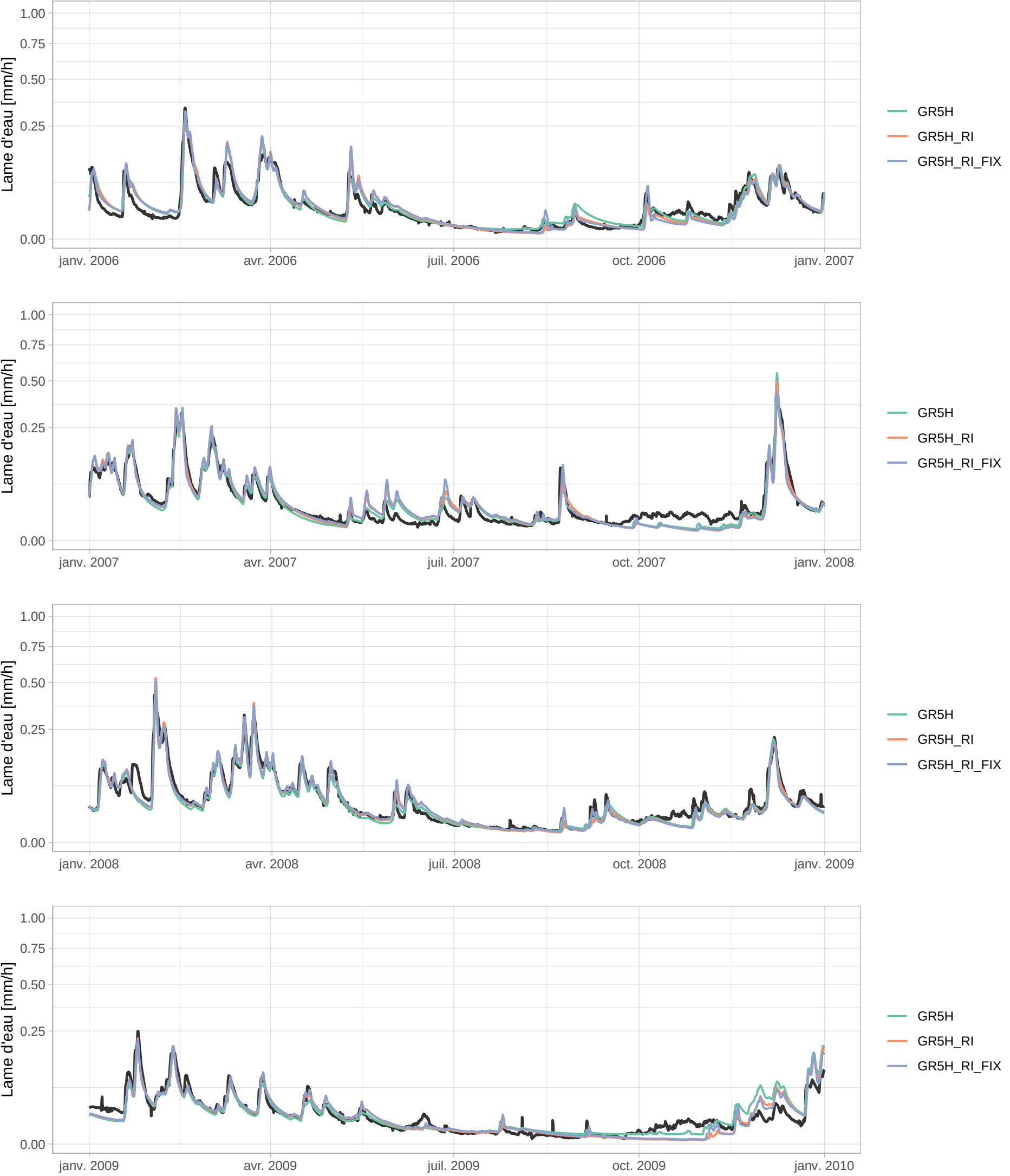
B460101001 – La Chiers à Chauvency-le-Château (1706 km2)



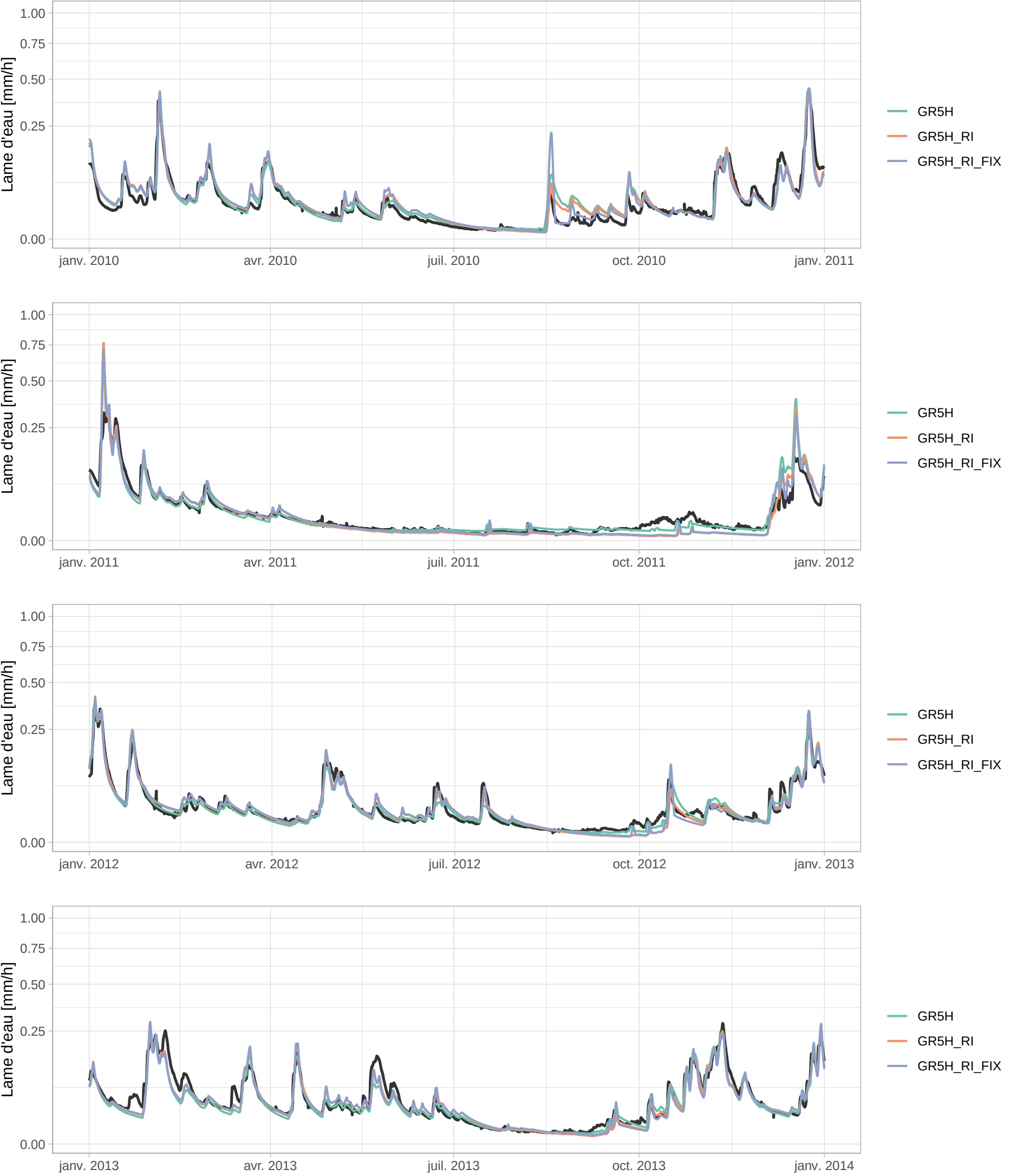
H602102001 – L'Aisne à Verrières (385 km2)



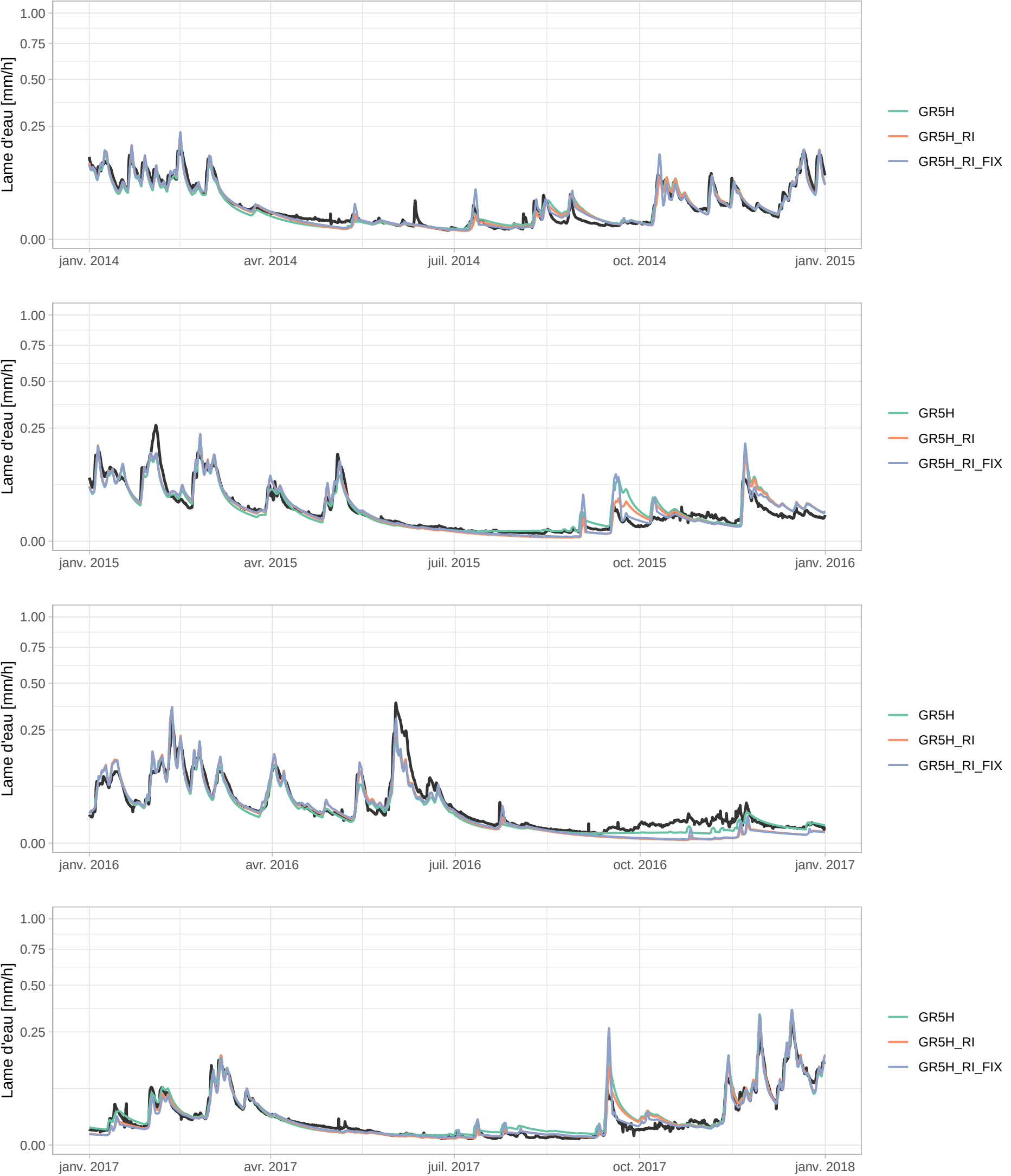
H602102001 – L'Aisne à Verrières (385 km2)



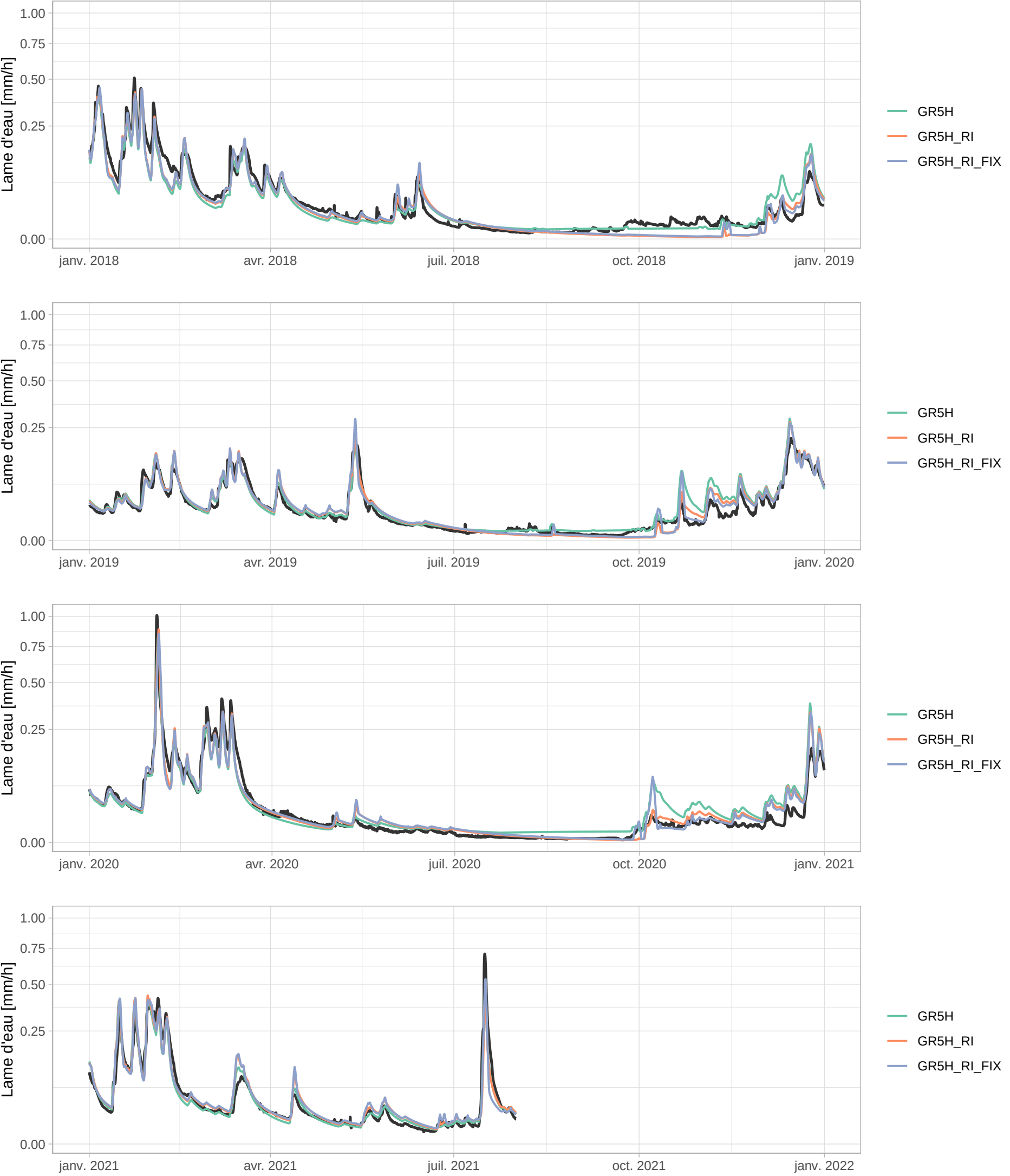
H602102001 – L'Aisne à Verrières (385 km2)



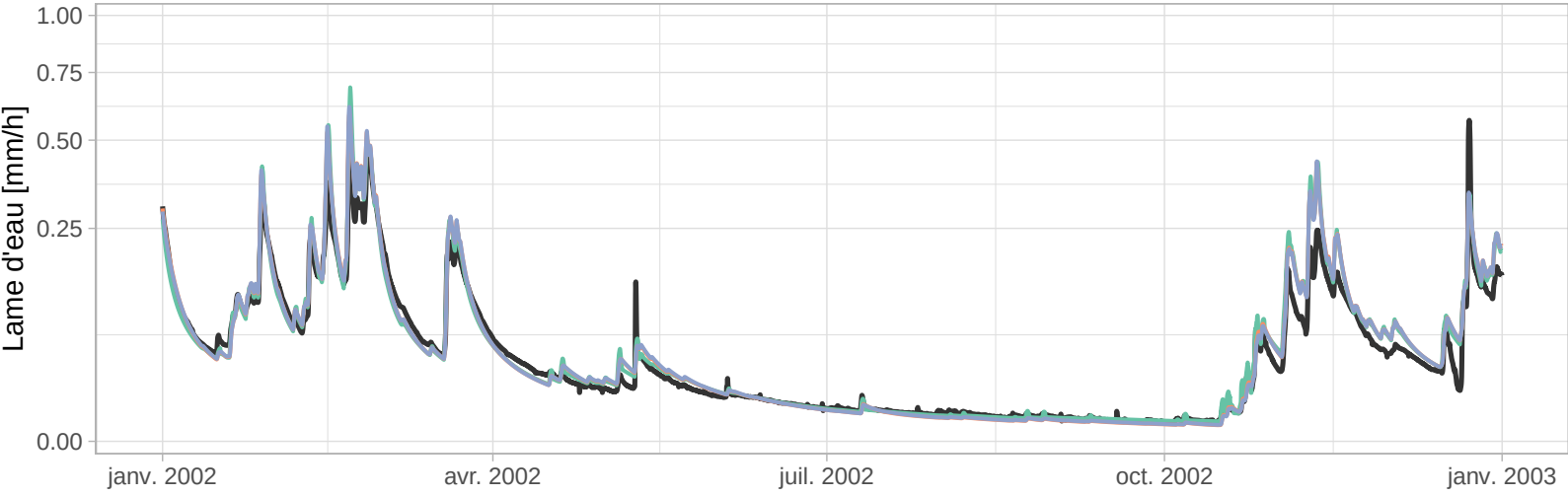
H602102001 – L'Aisne à Verrières (385 km2)



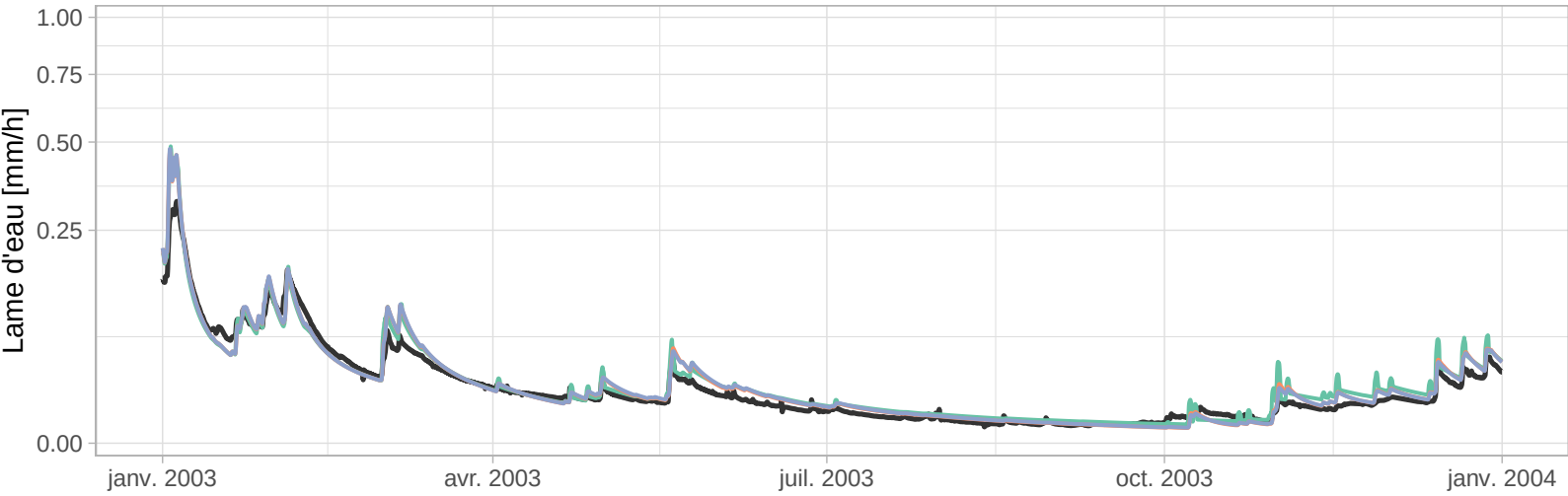
H602102001 – L'Aisne à Verrières (385 km2)



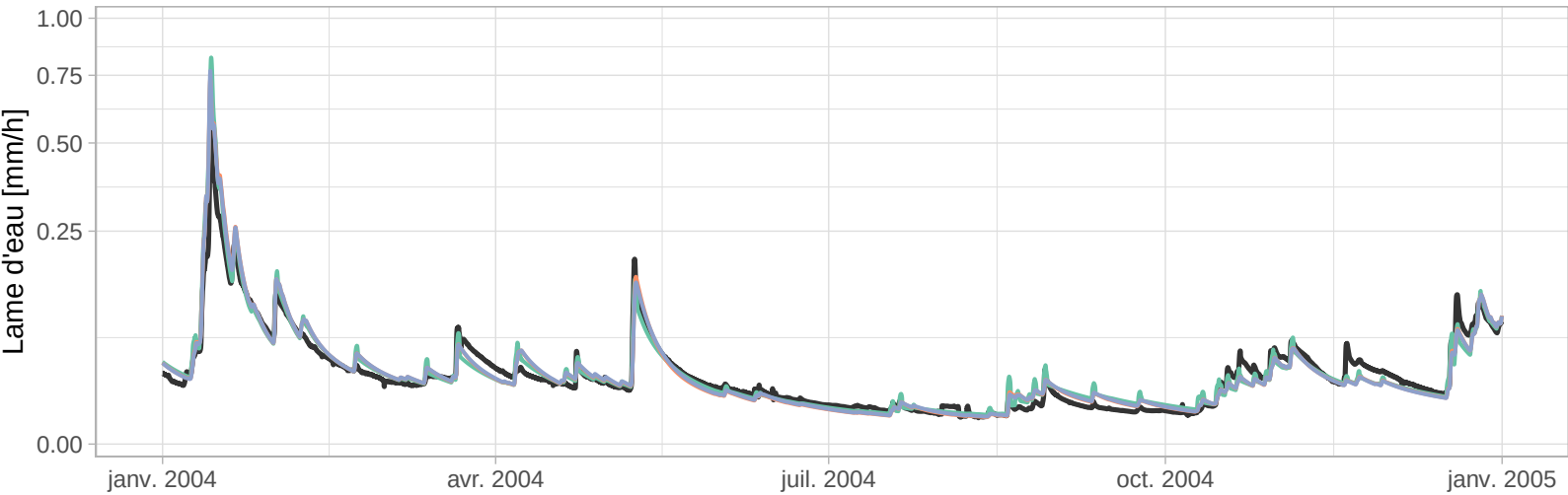
H610201001 – L'Aire à Beausite [Amblaincourt] (283 km2)



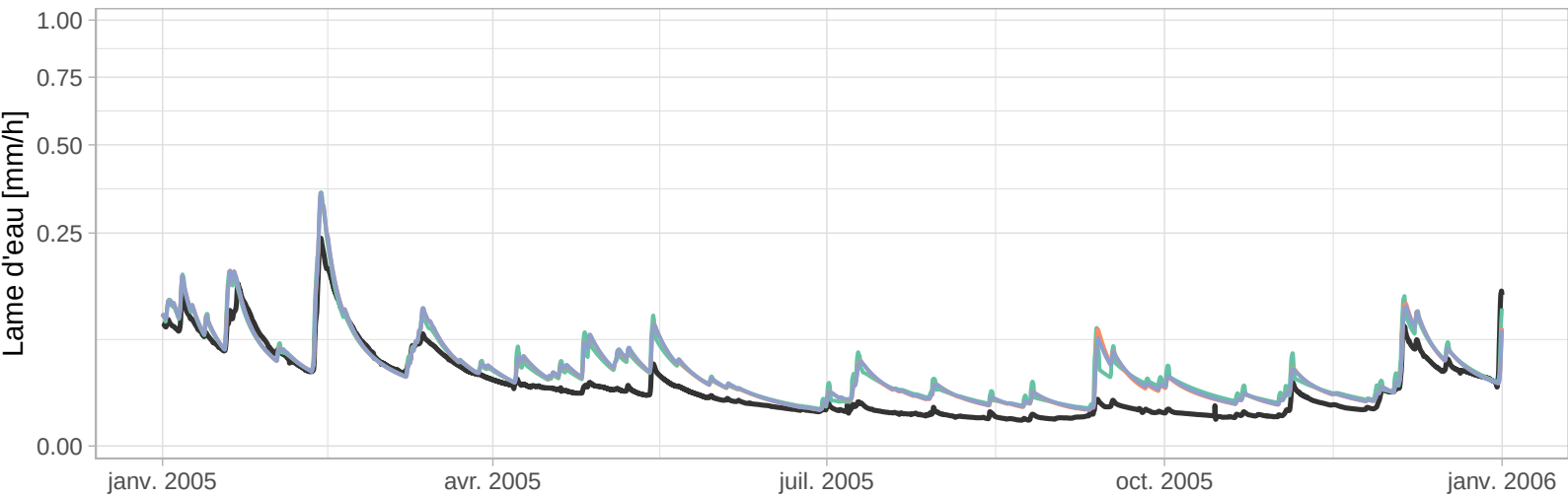
- GR5H
- GR5H_RI
- GR5H_RI_FIX



- GR5H
- GR5H_RI
- GR5H_RI_FIX

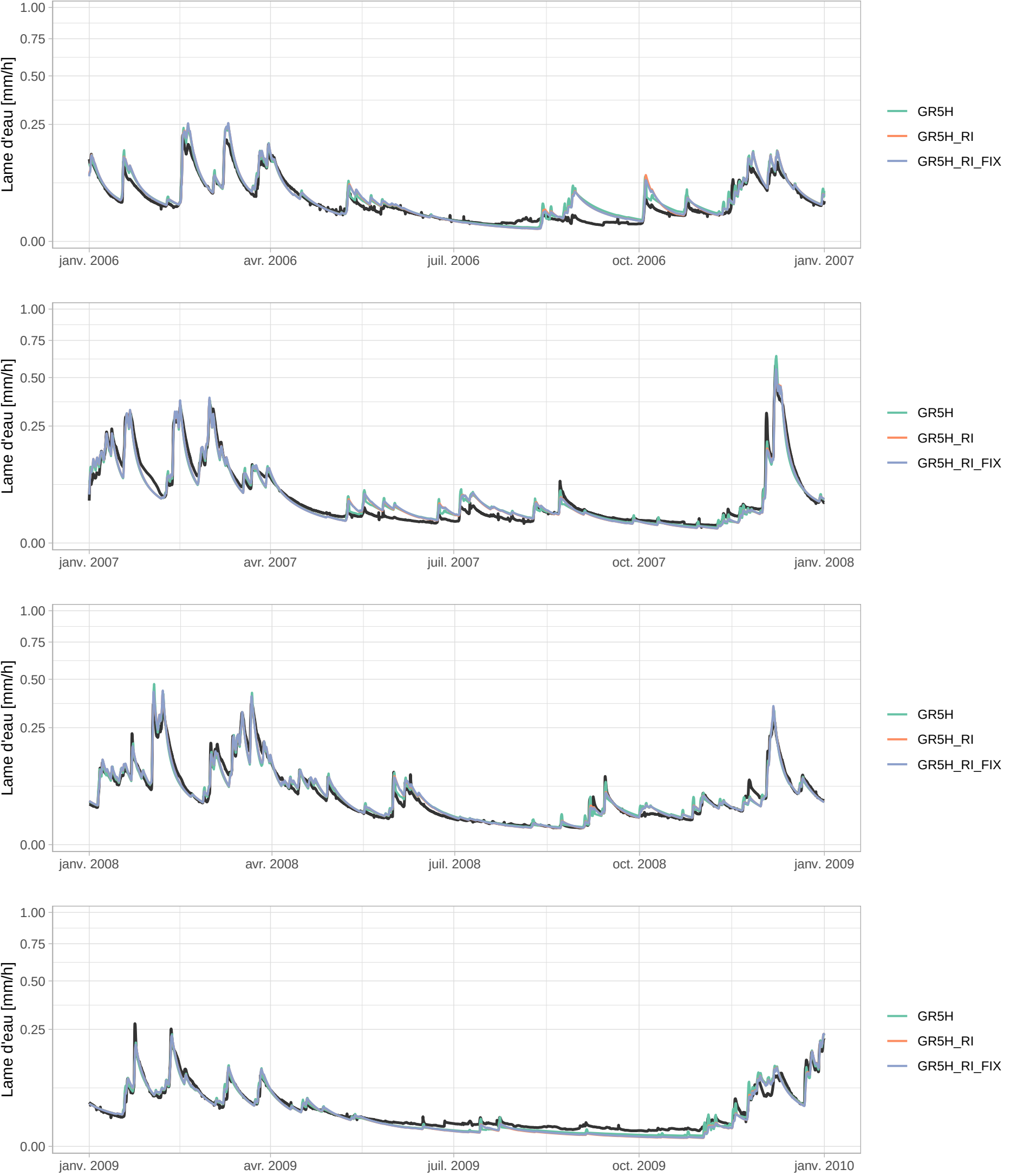


- GR5H
- GR5H_RI
- GR5H_RI_FIX

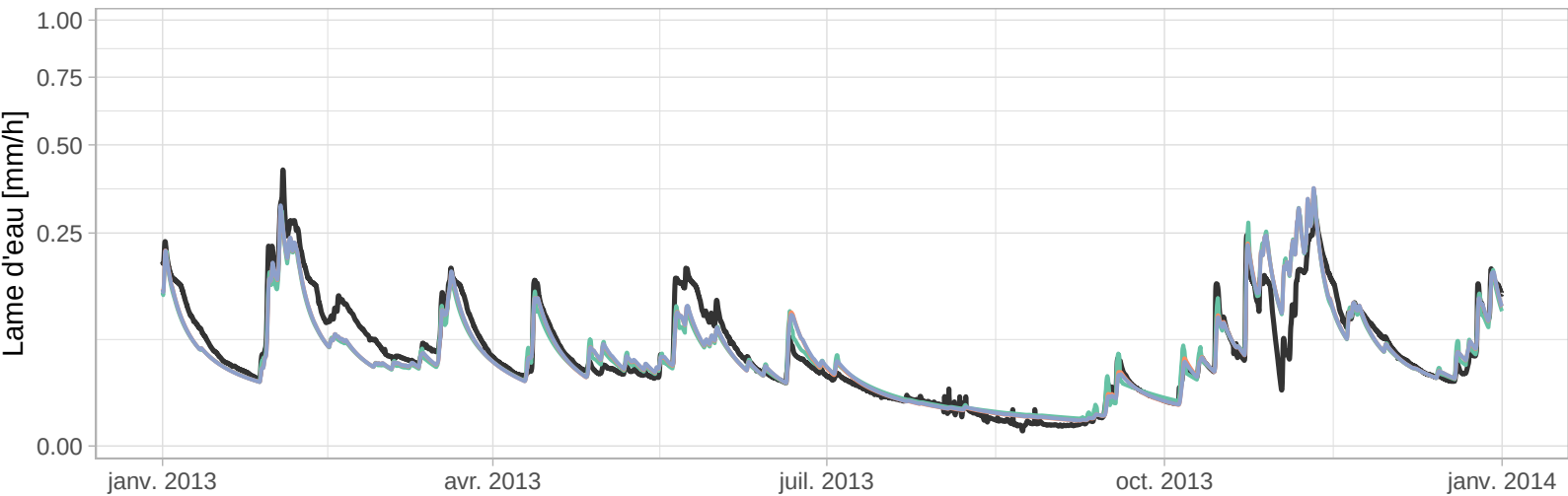
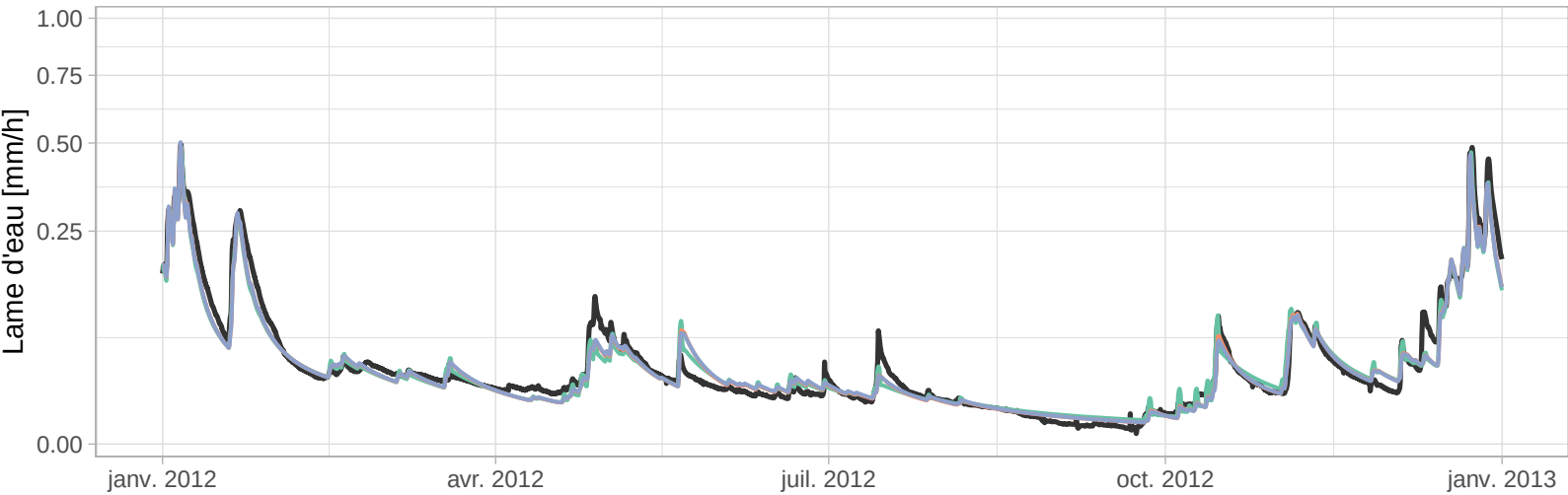
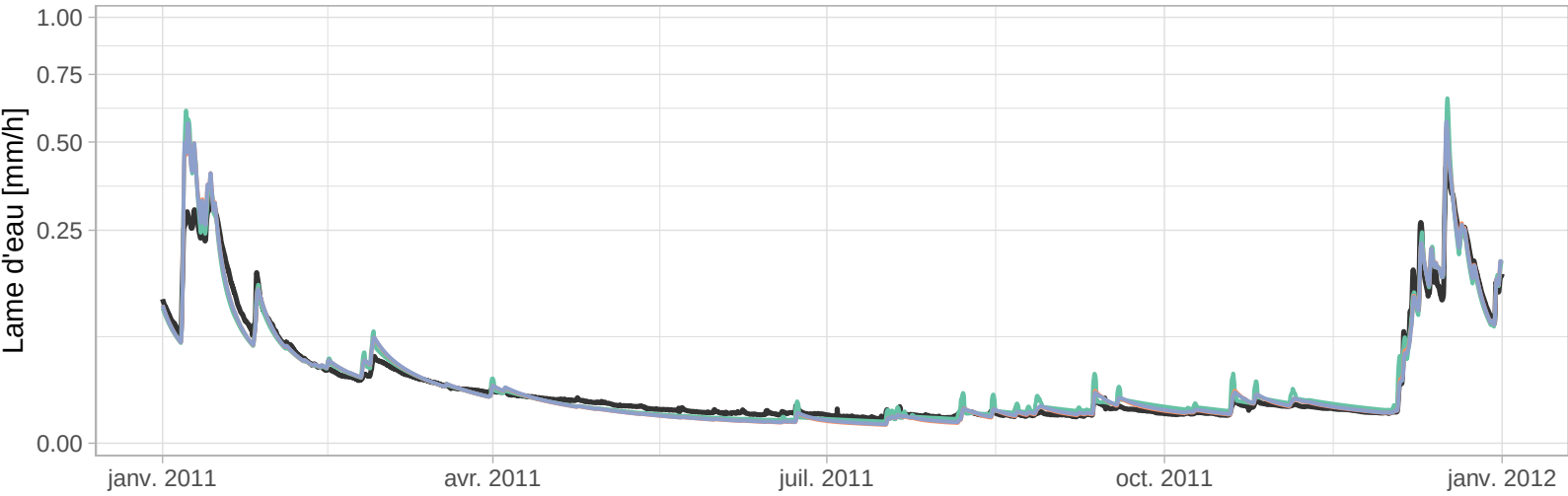
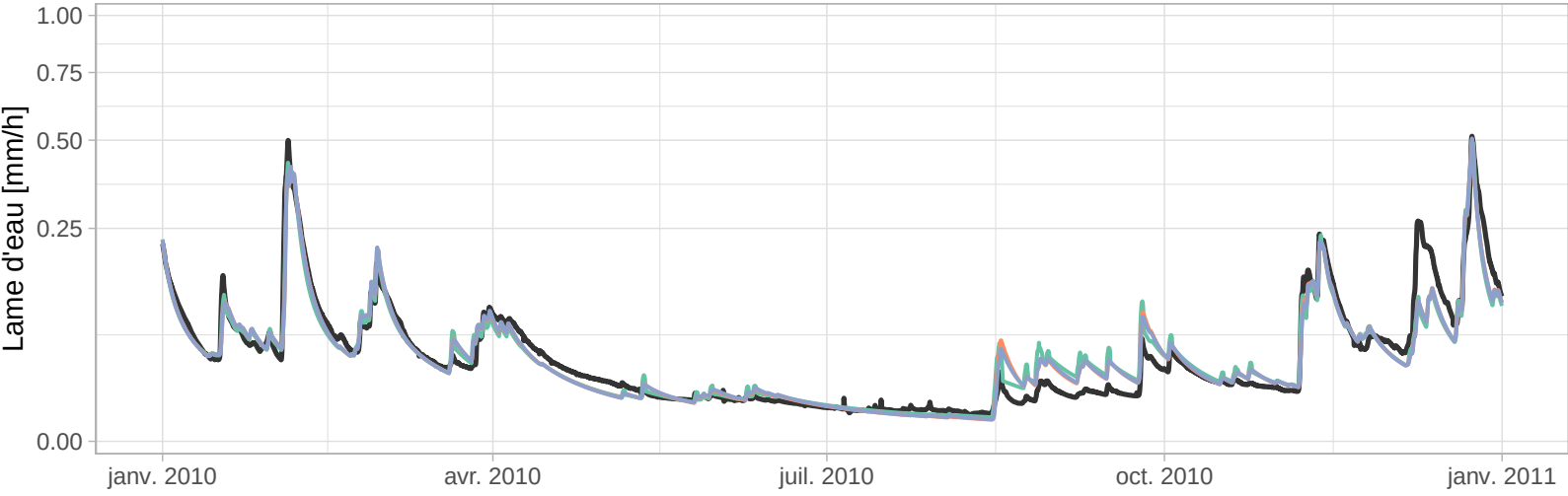


- GR5H
- GR5H_RI
- GR5H_RI_FIX

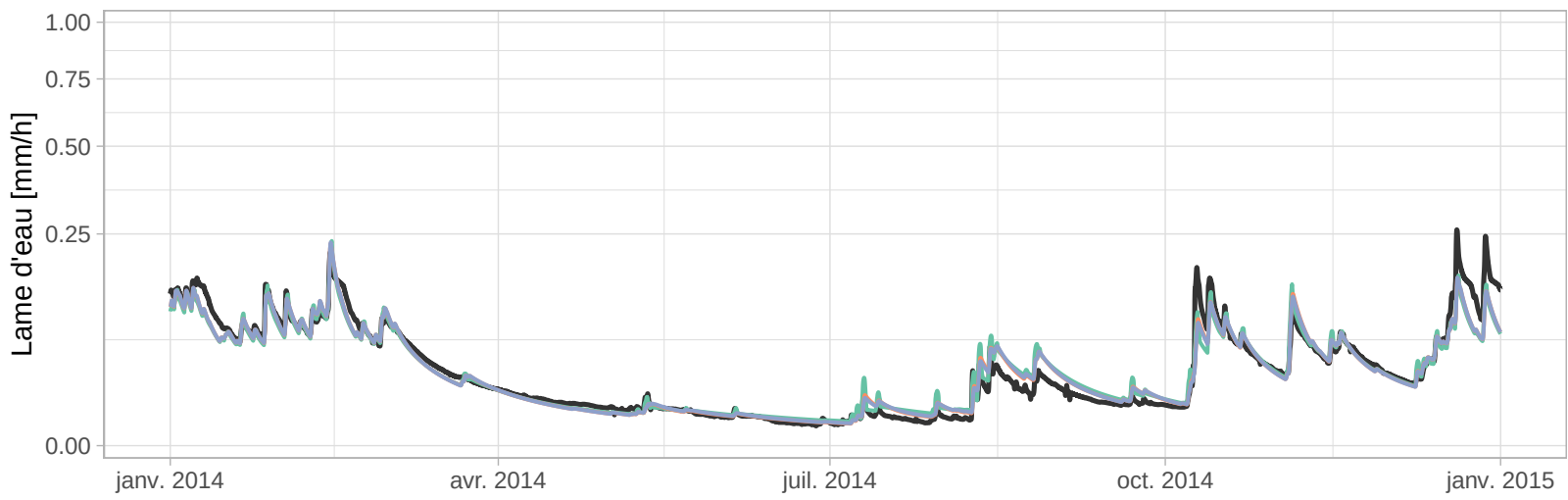
H610201001 – L'Aire à Beausite [Amblaincourt] (283 km2)



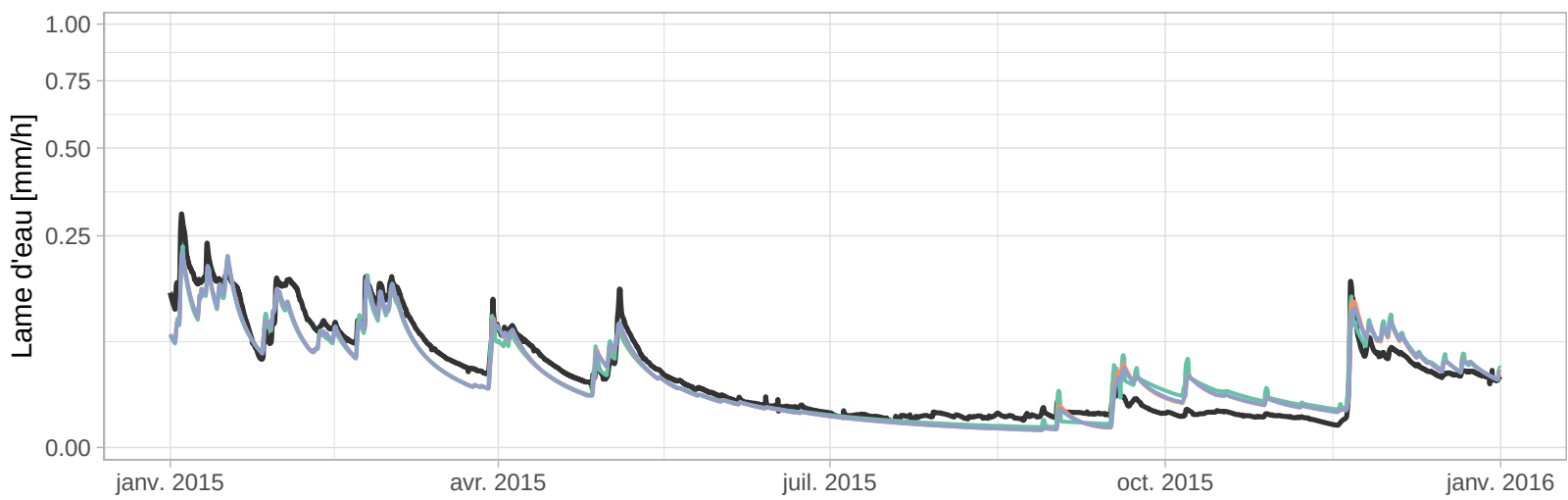
H610201001 – L'Aire à Beausite [Amblaincourt] (283 km2)



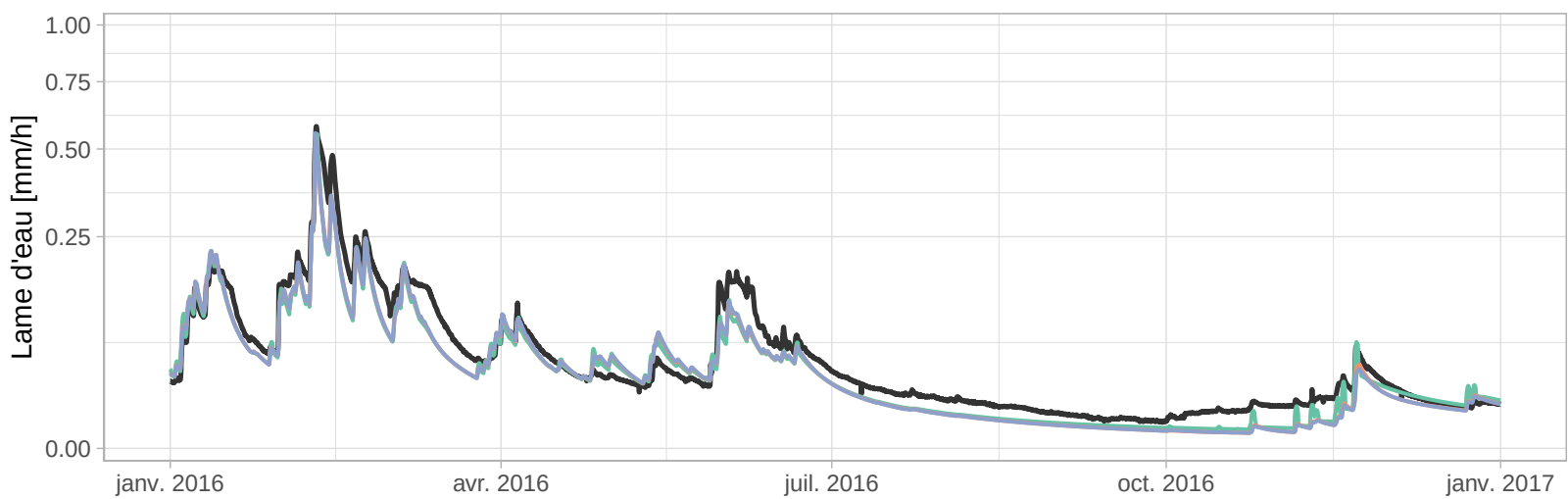
H610201001 – L'Aire à Beausite [Amblaincourt] (283 km2)



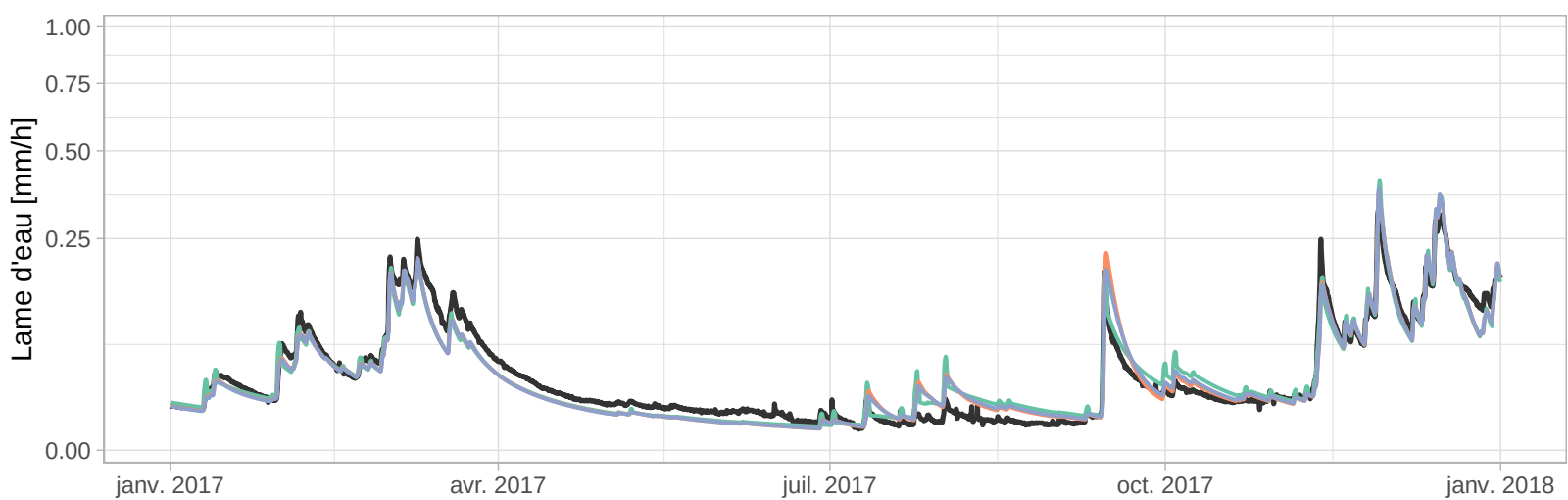
GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX



GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX

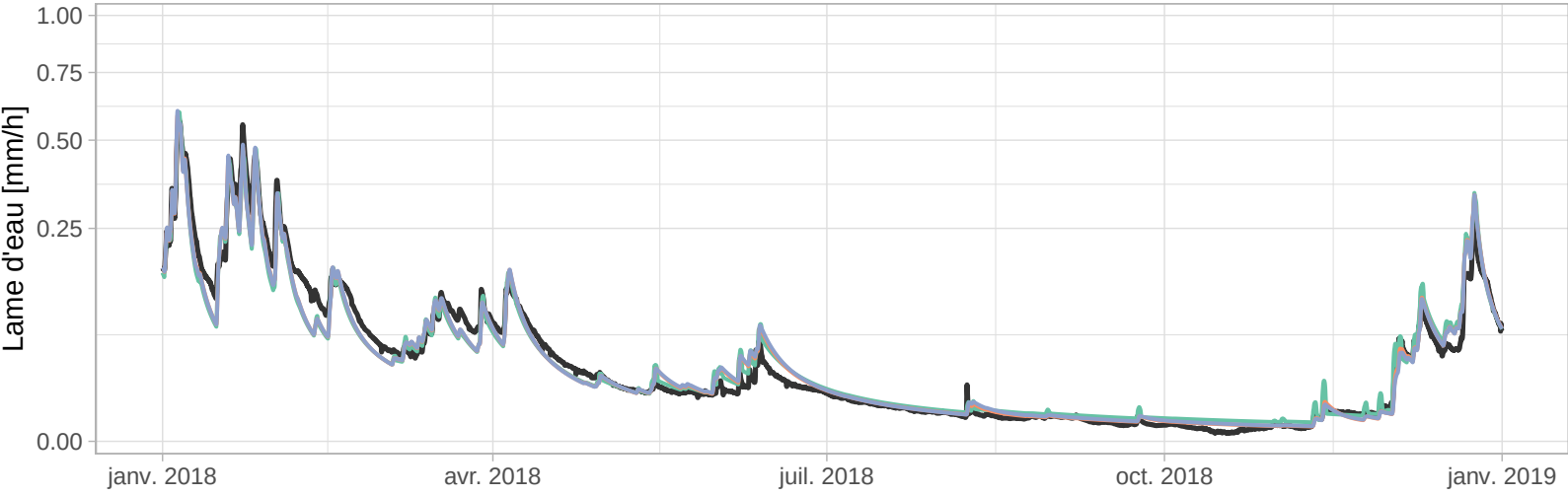


GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX

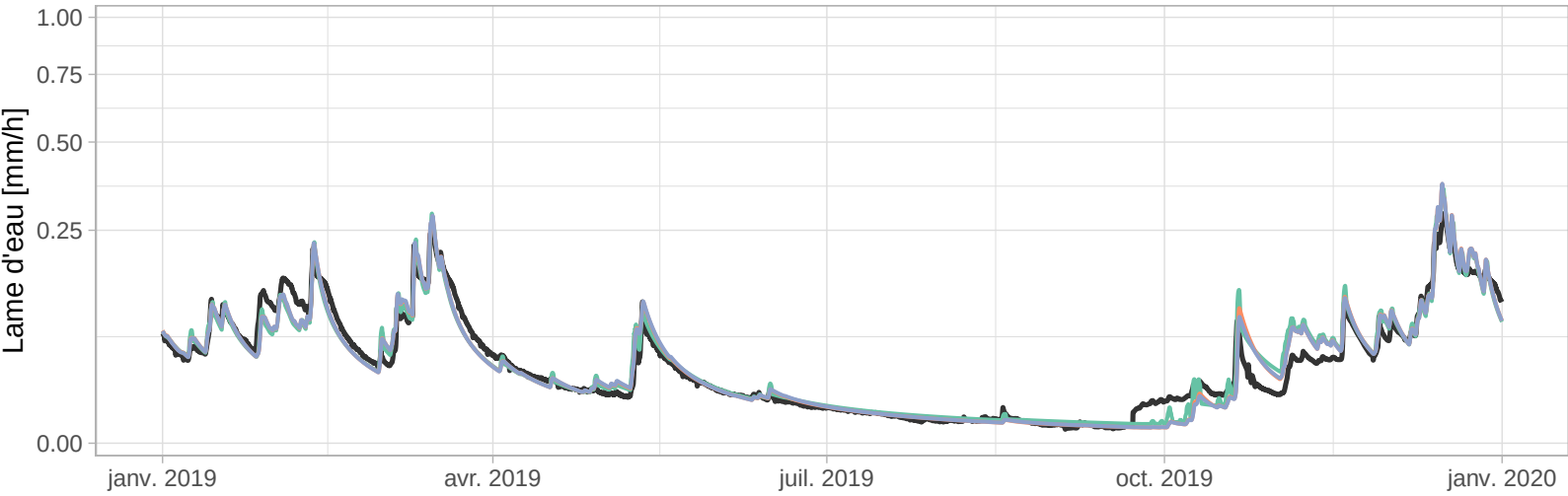


GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX

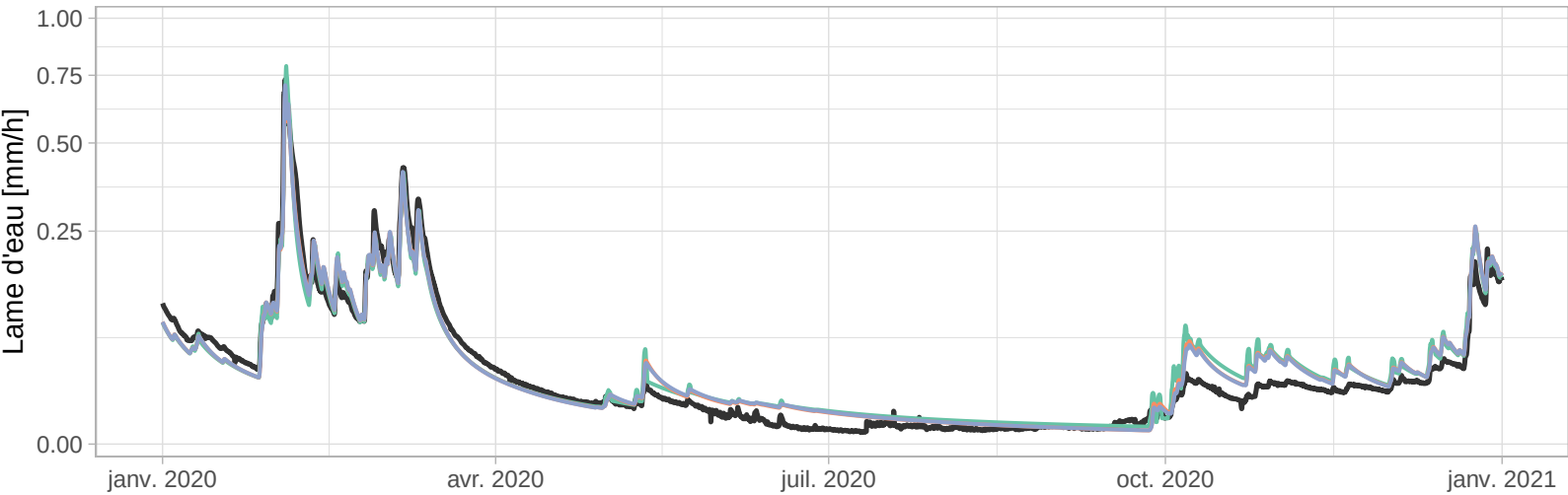
H610201001 – L'Aire à Beausite [Amblaincourt] (283 km2)



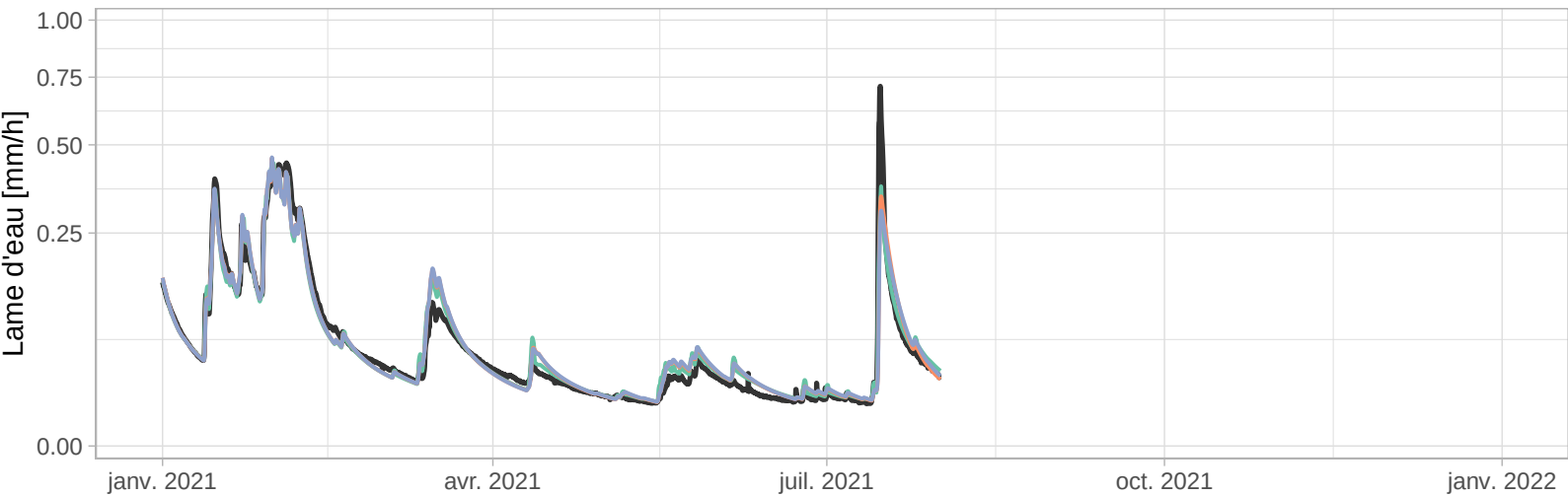
- GR5H
- GR5H_RI
- GR5H_RI_FIX



- GR5H
- GR5H_RI
- GR5H_RI_FIX

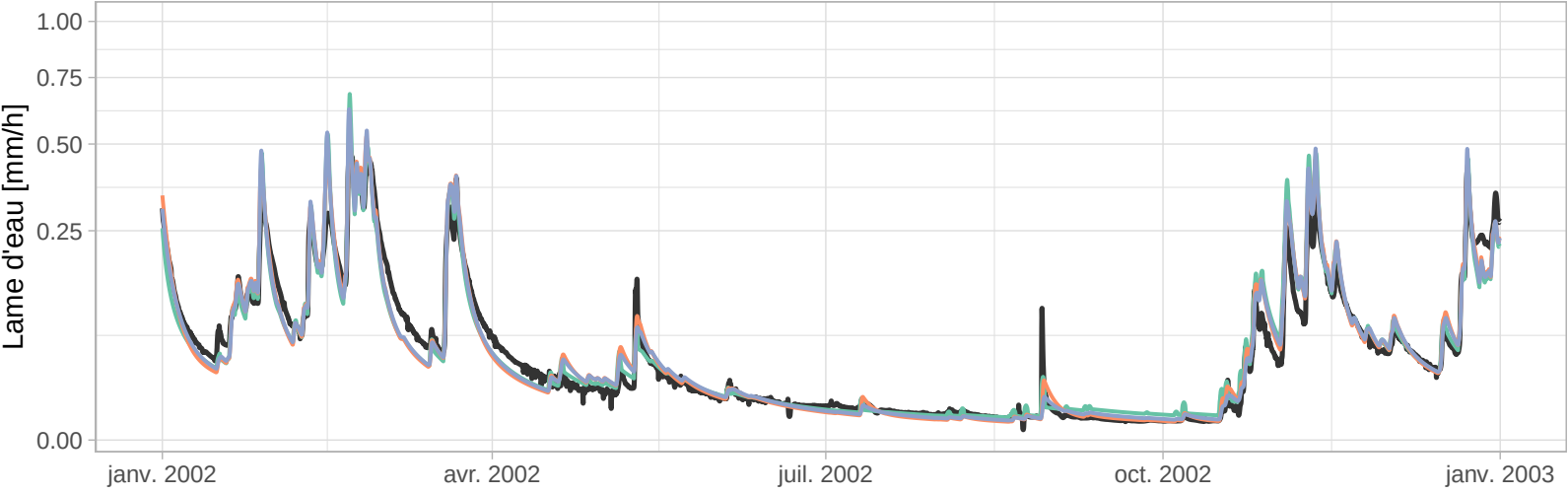


- GR5H
- GR5H_RI
- GR5H_RI_FIX

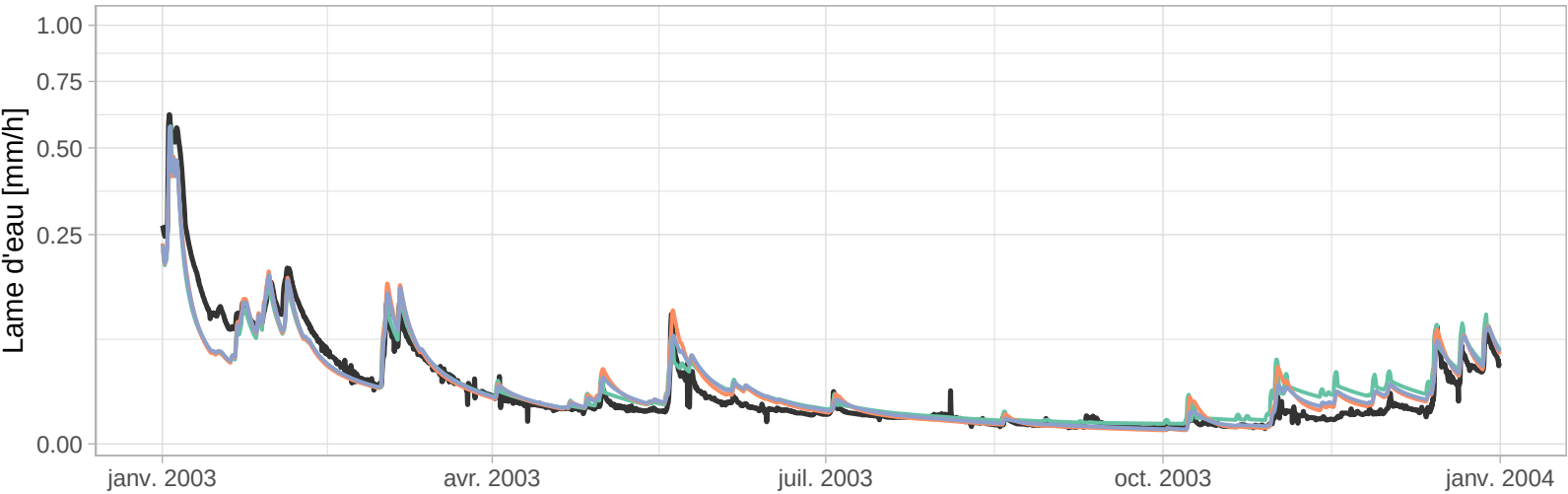


- GR5H
- GR5H_RI
- GR5H_RI_FIX

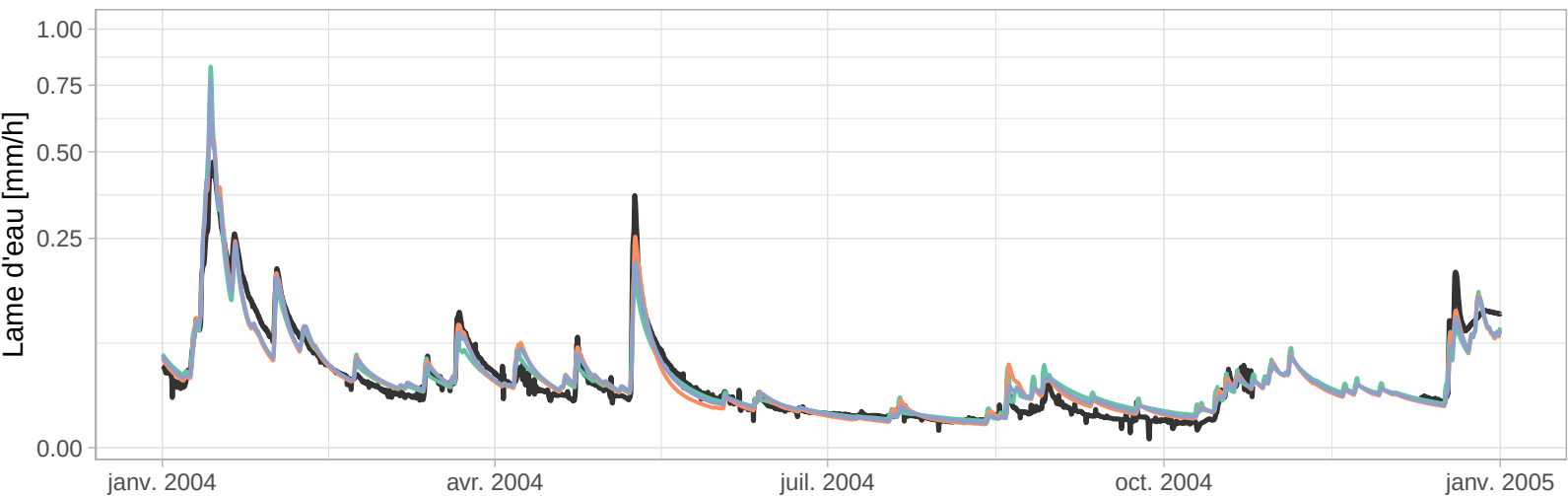
H612201001 – L'Aire à Varennes-en-Argonne (629 km2)



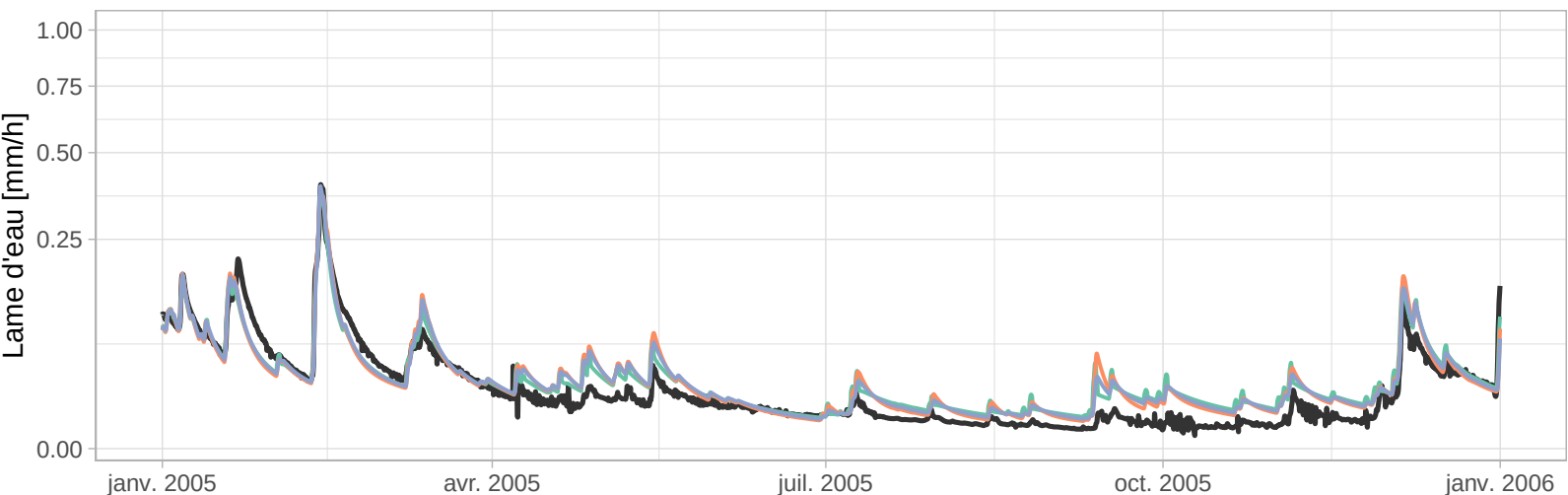
GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX



GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX

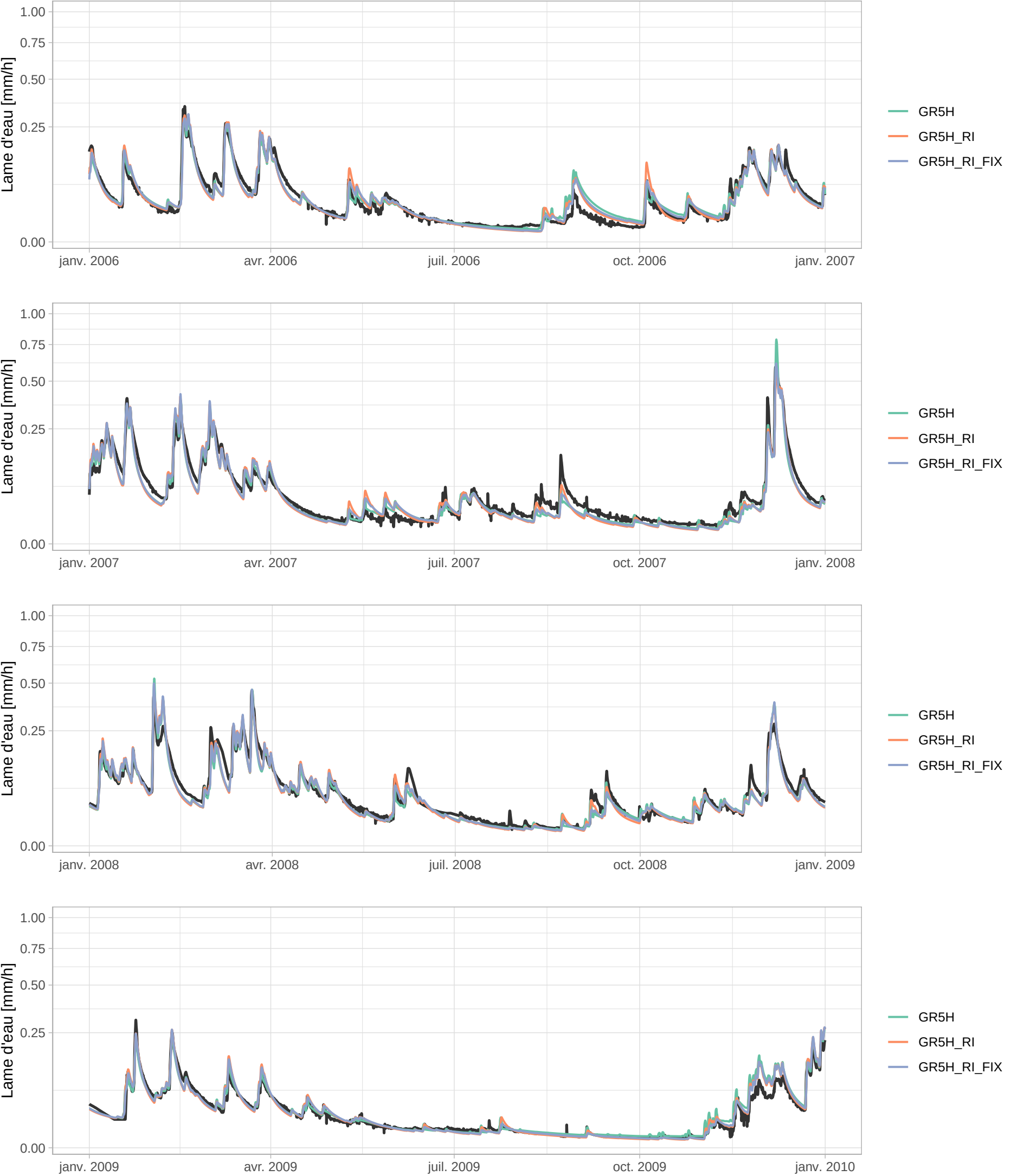


GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX

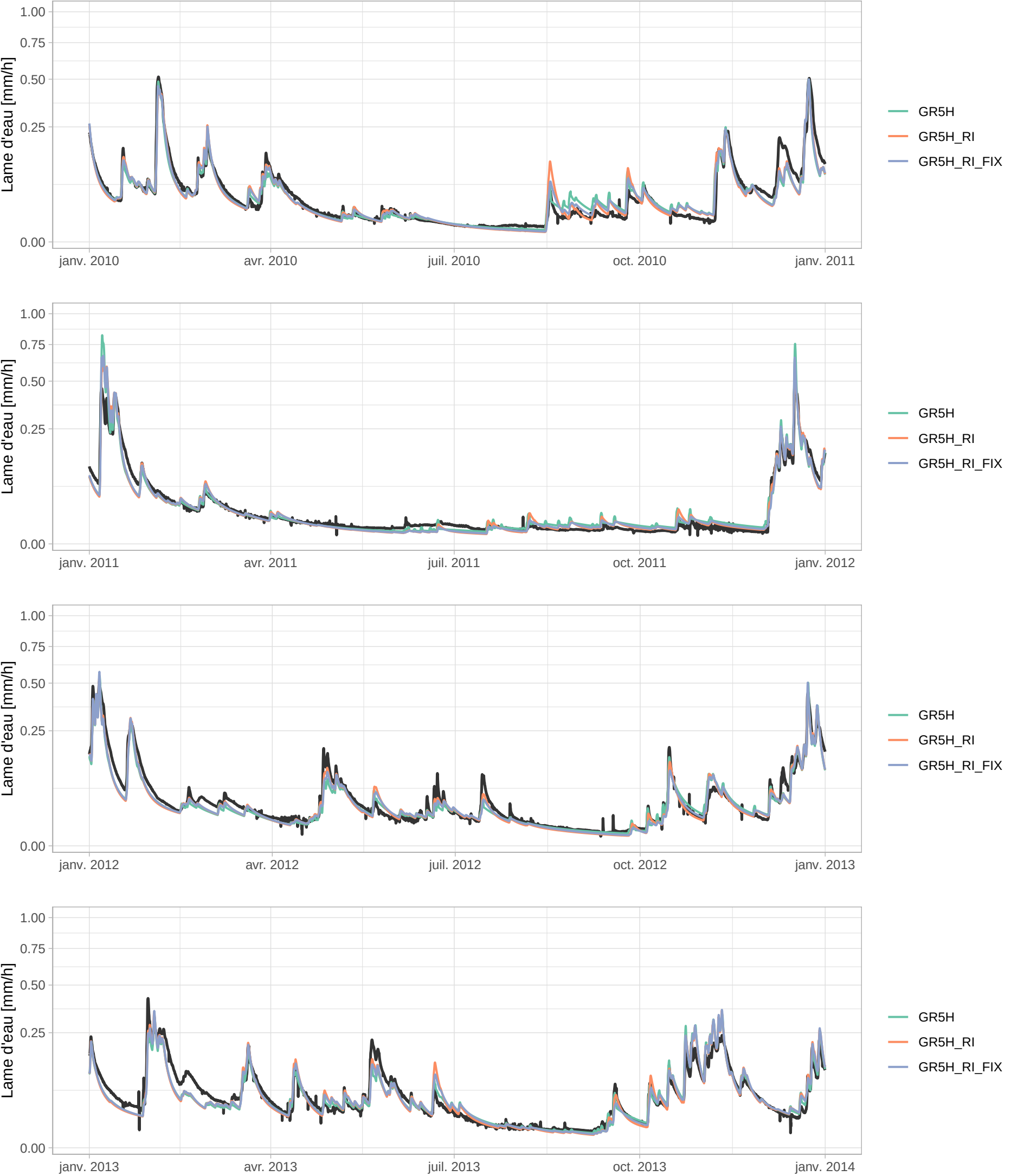


GR5H
GR5H_RI
GR5H_RI_FIX

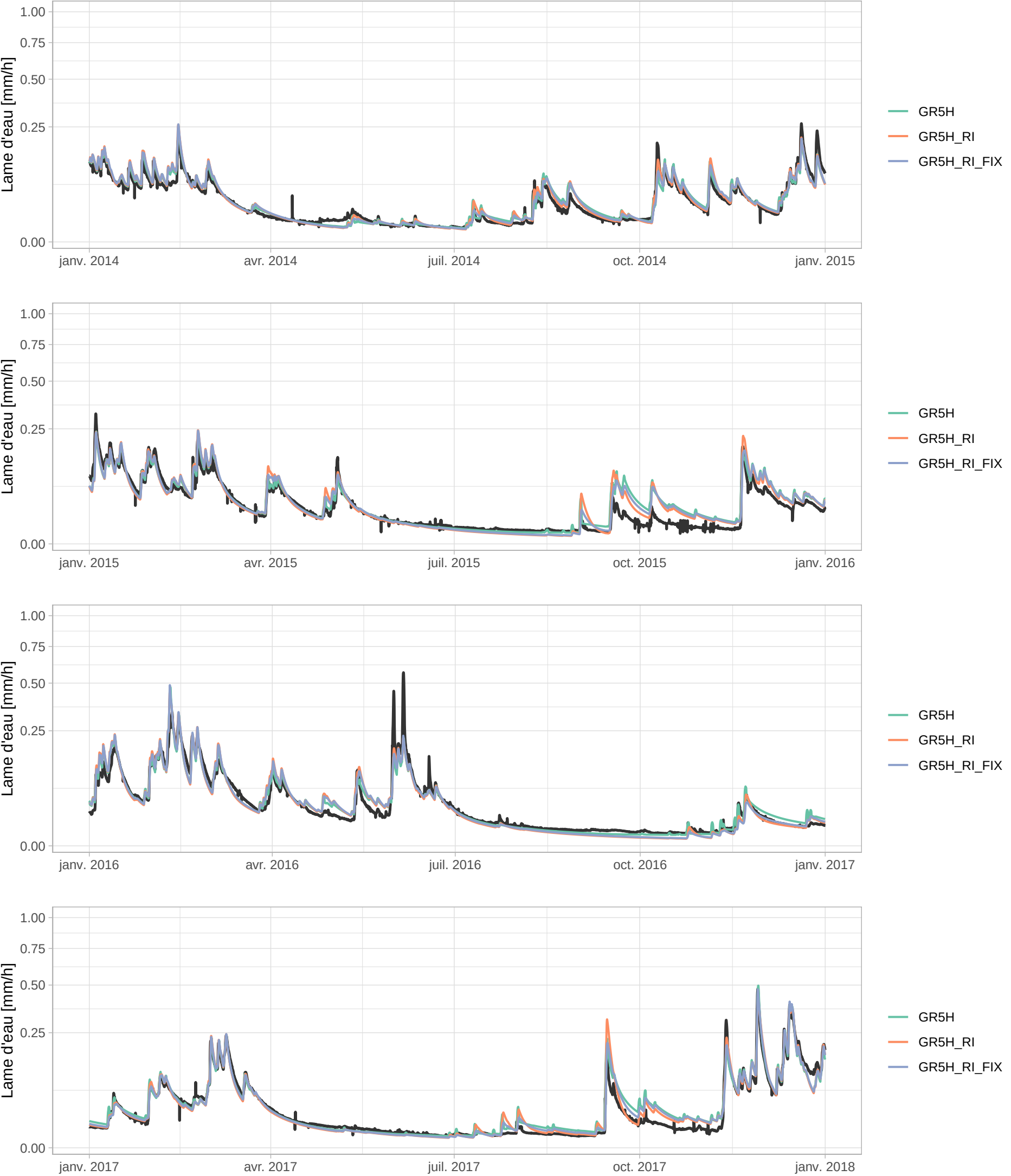
H612201001 – L'Aire à Varennes-en-Argonne (629 km2)



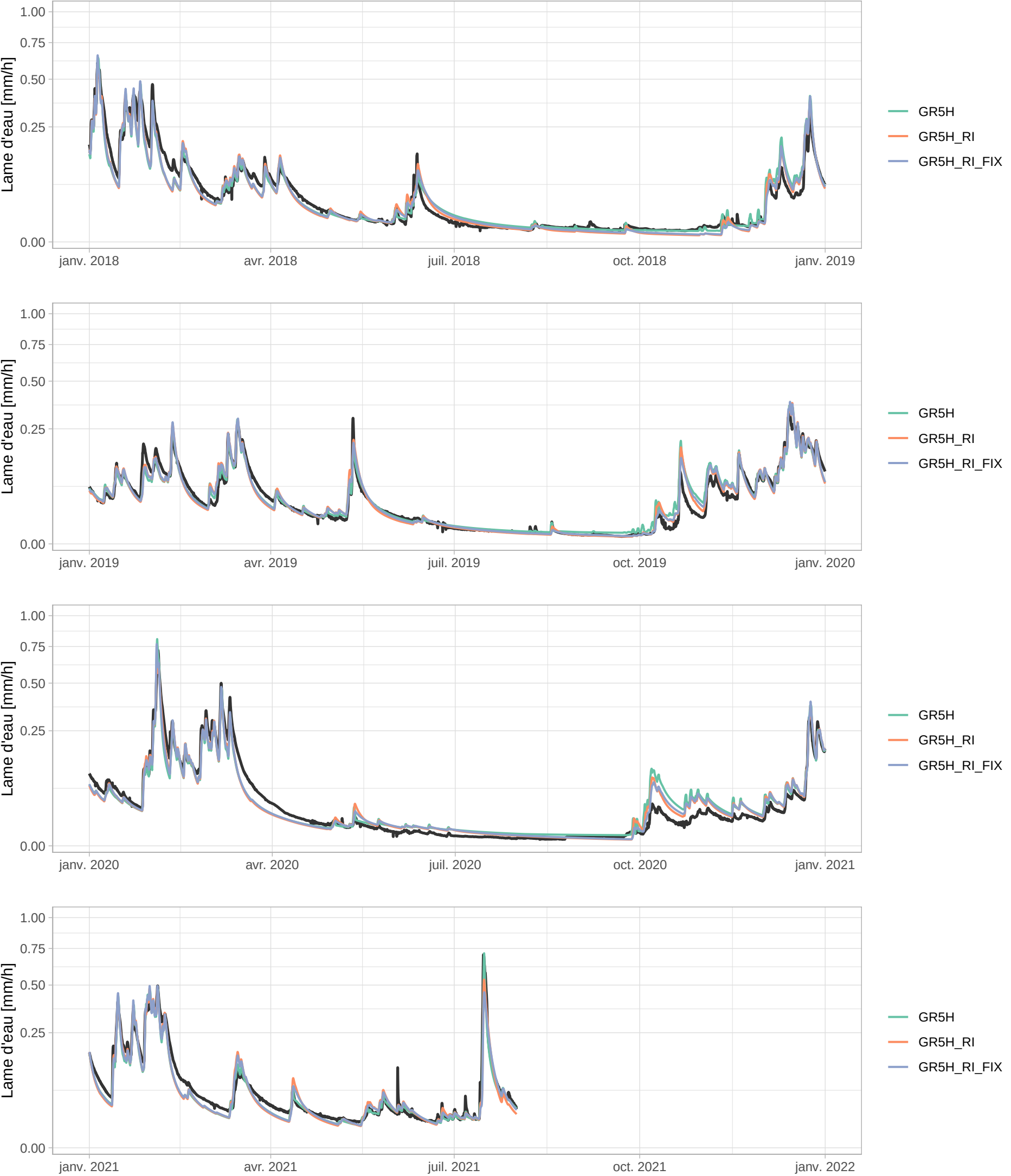
H612201001 – L'Aire à Varennes-en-Argonne (629 km2)



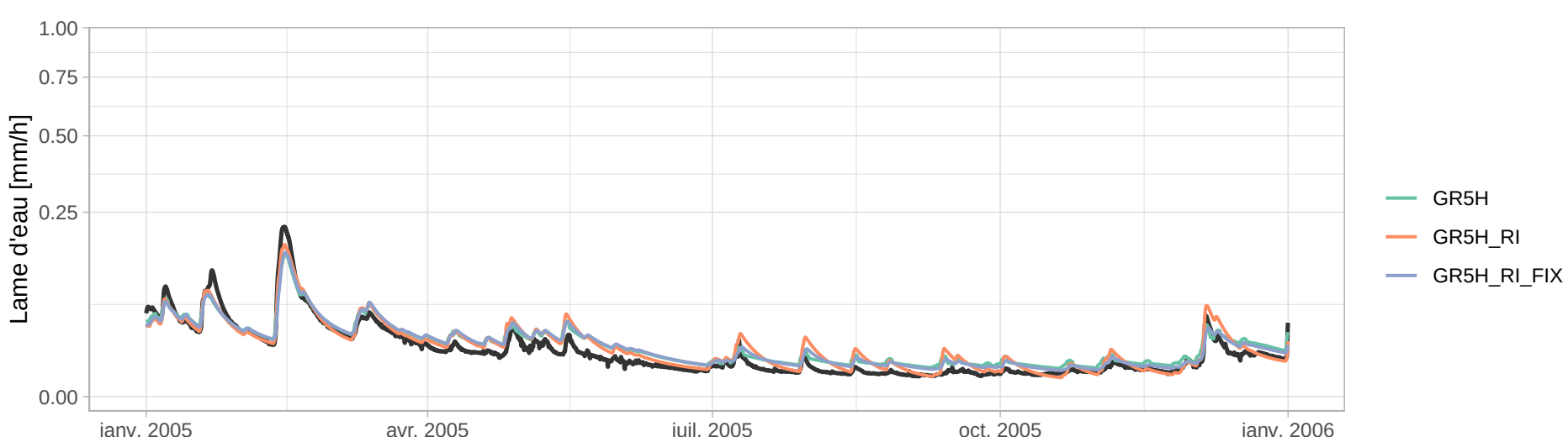
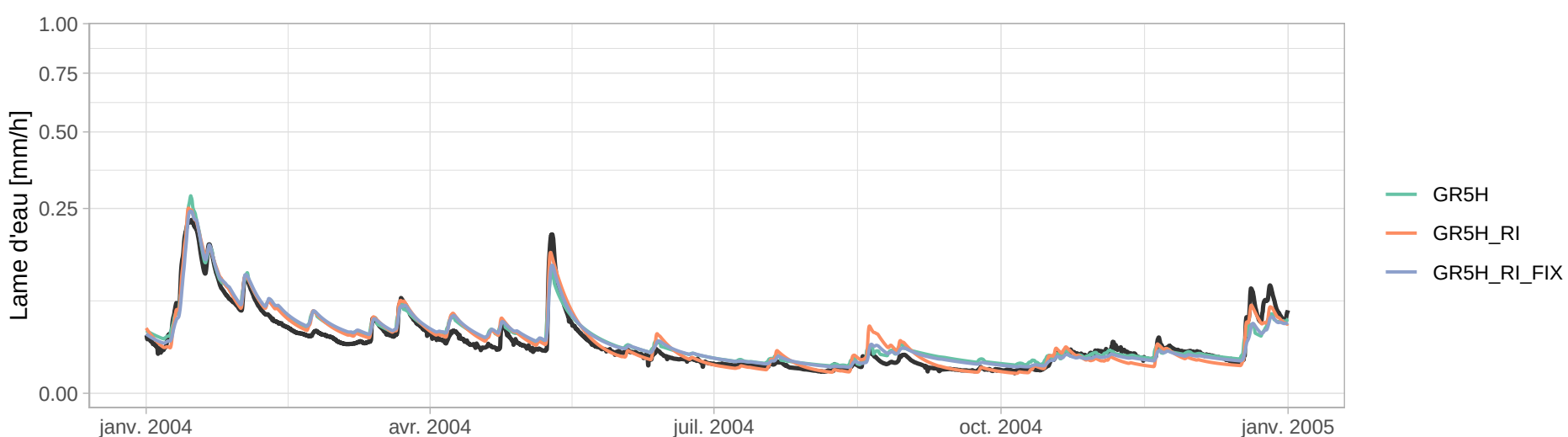
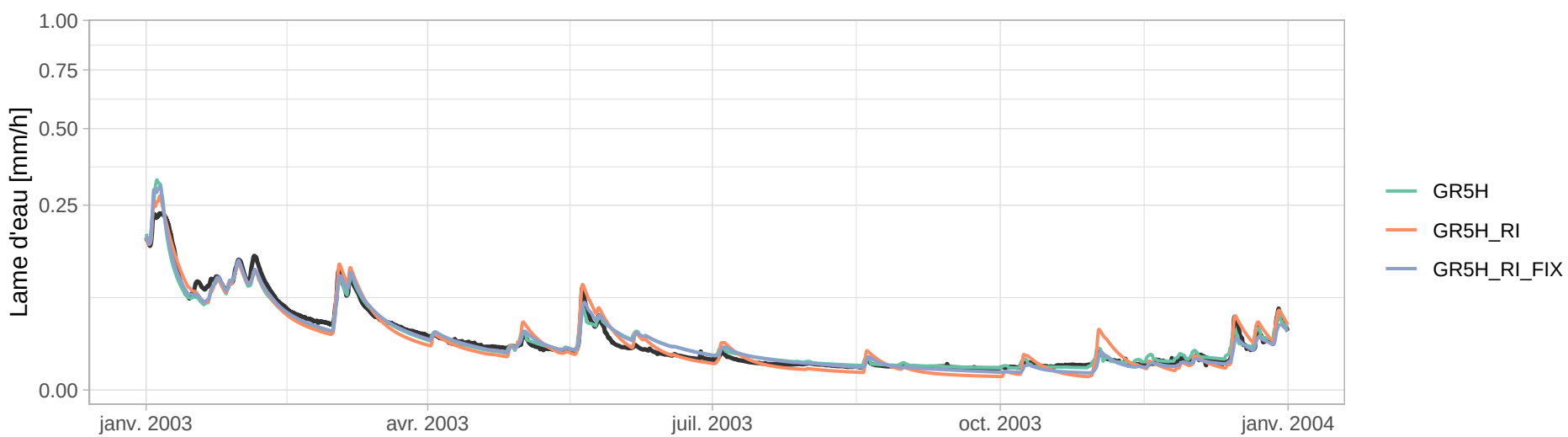
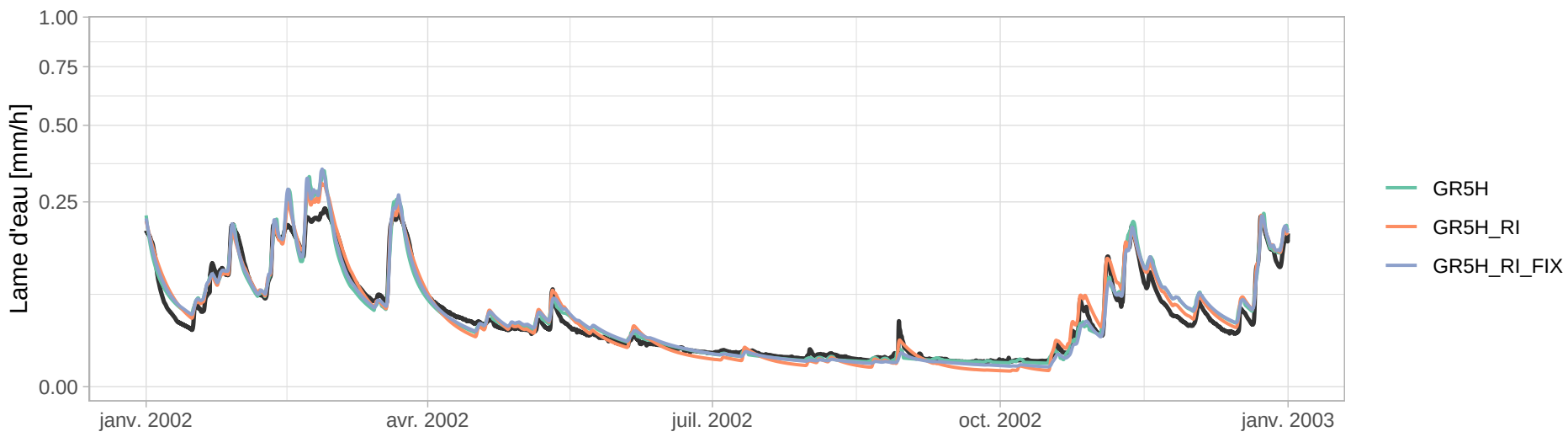
H612201001 – L'Aire à Varennes-en-Argonne (629 km2)



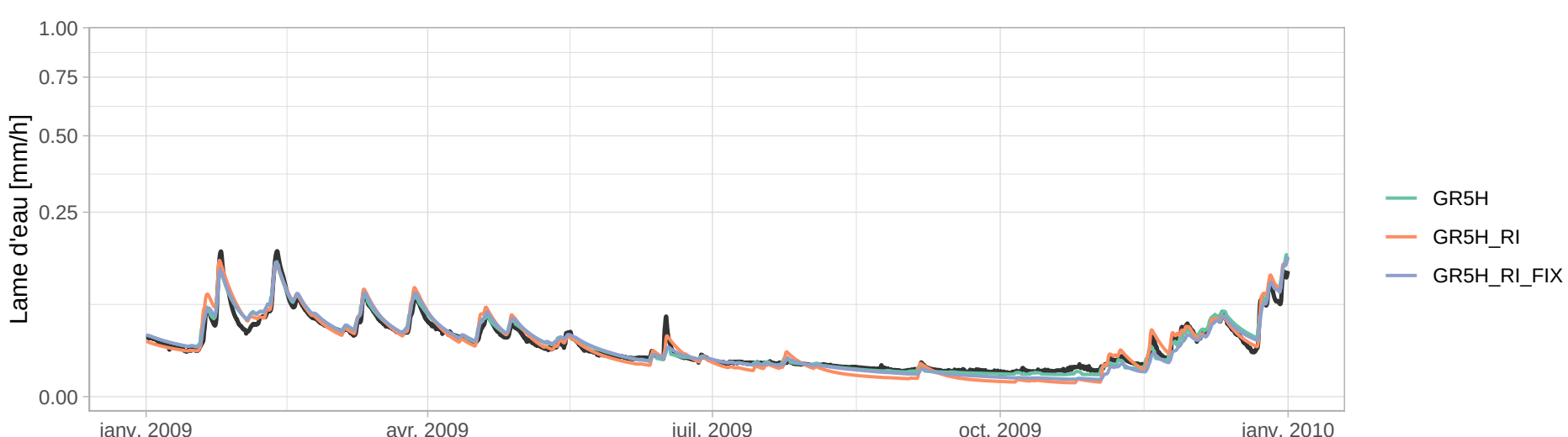
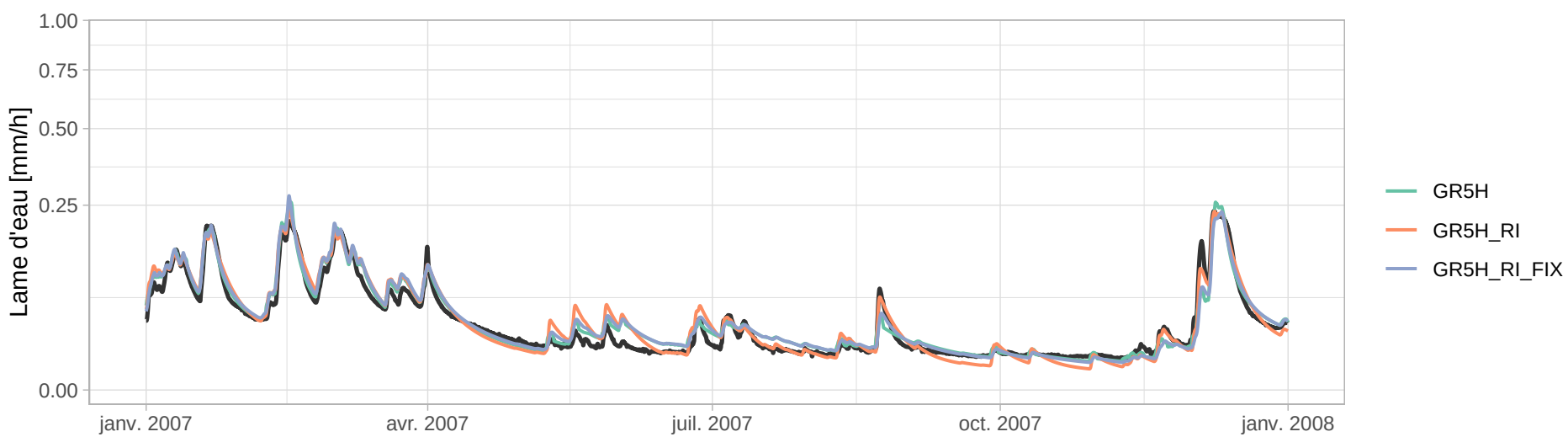
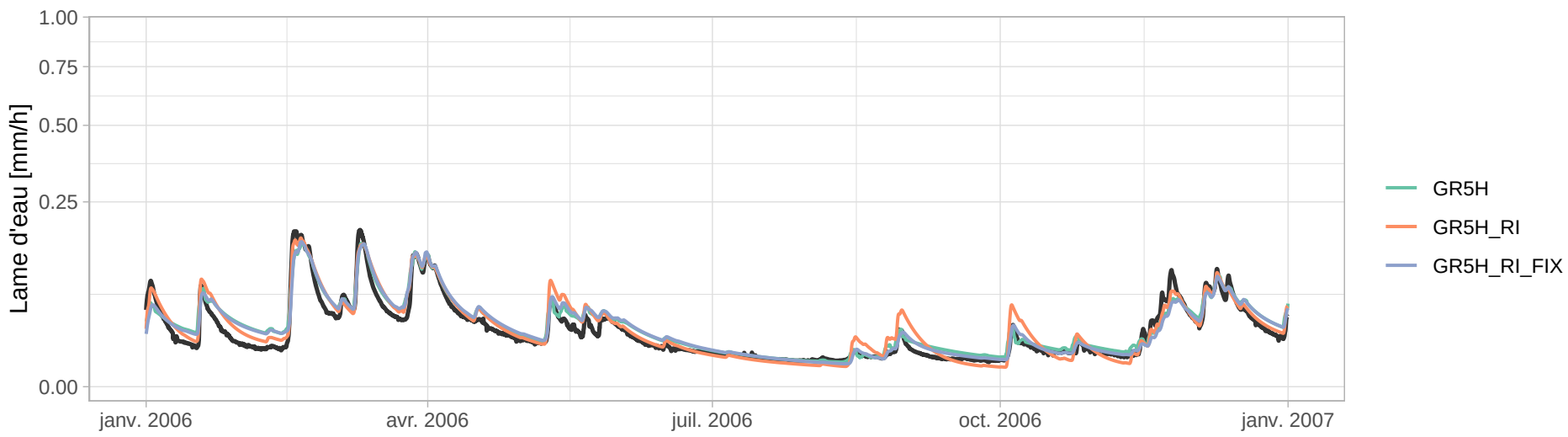
H612201001 – L'Aire à Varennes-en-Argonne (629 km2)



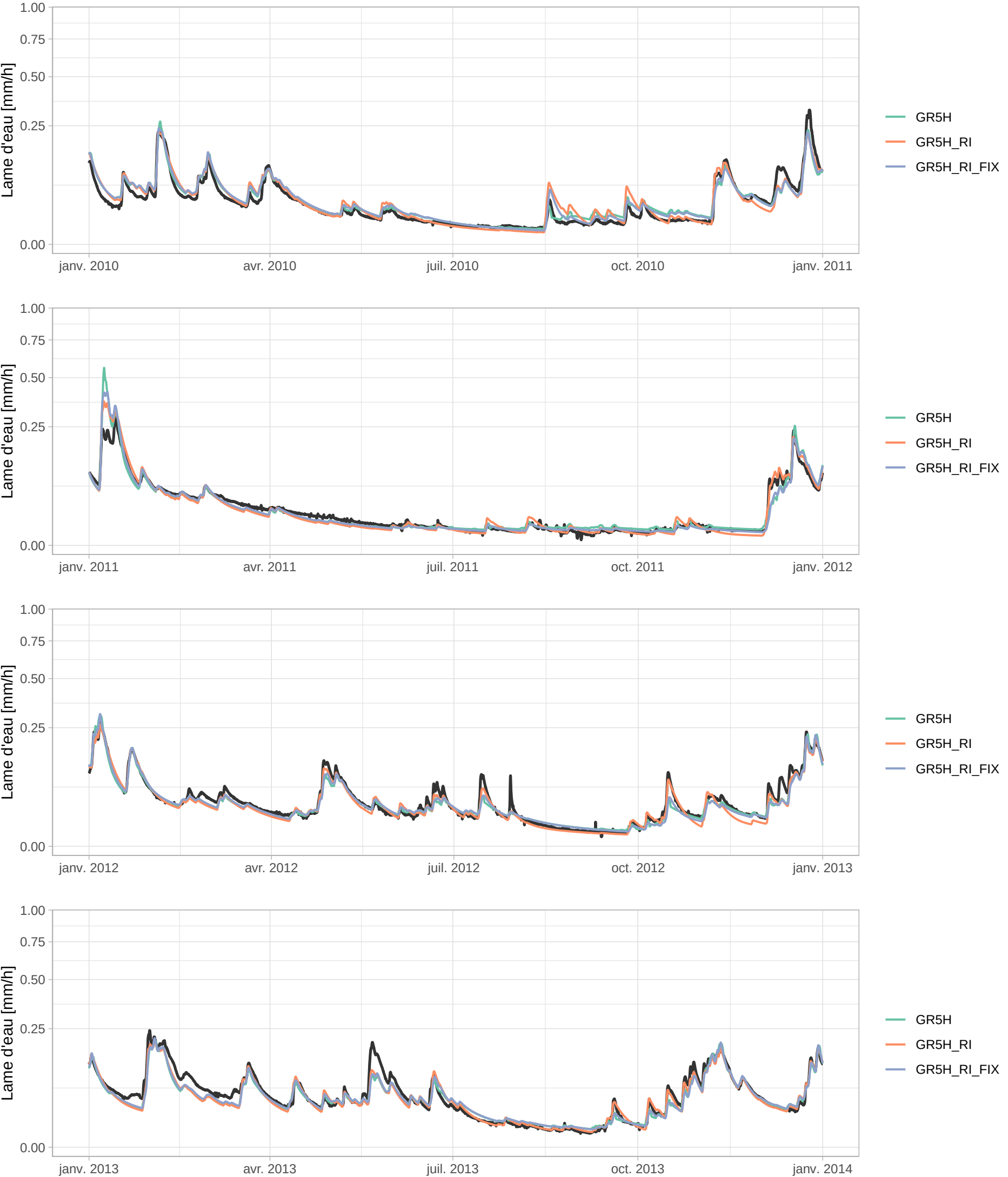
H620101001 – L'Aisne à Mouron (2242 km2)



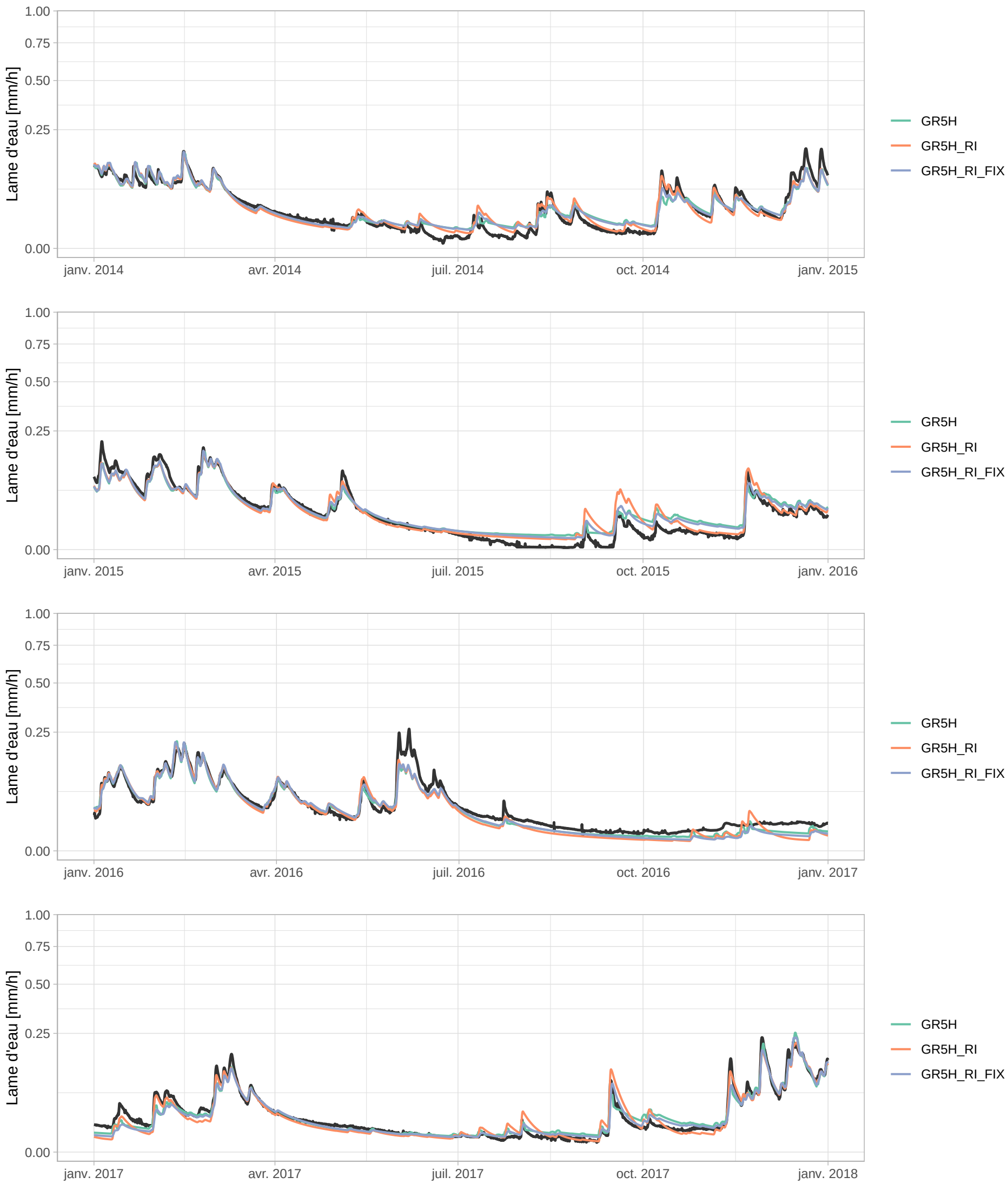
H620101001 – L'Aisne à Mouron (2242 km2)



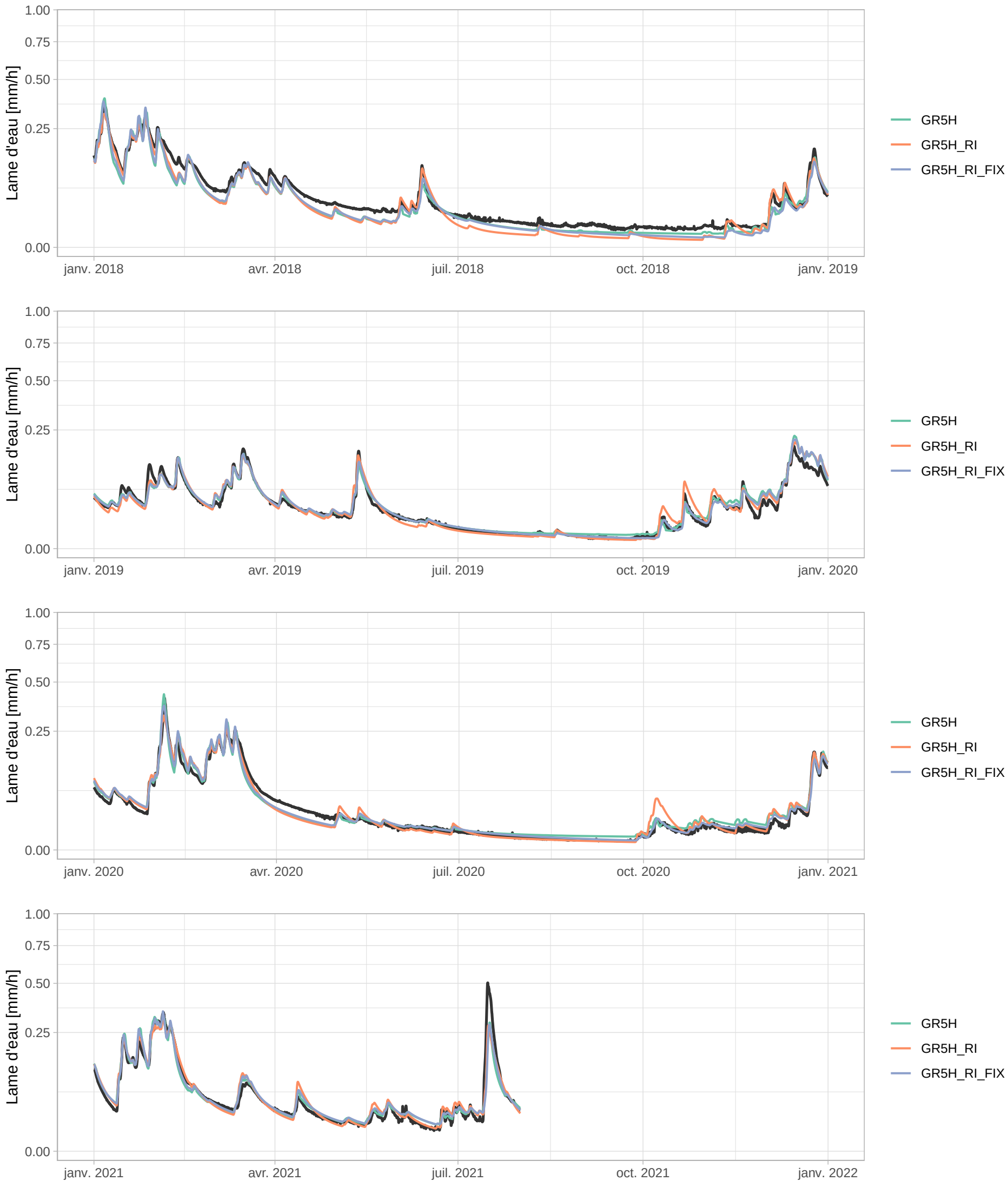
H620101001 – L'Aisne à Mouron (2242 km2)



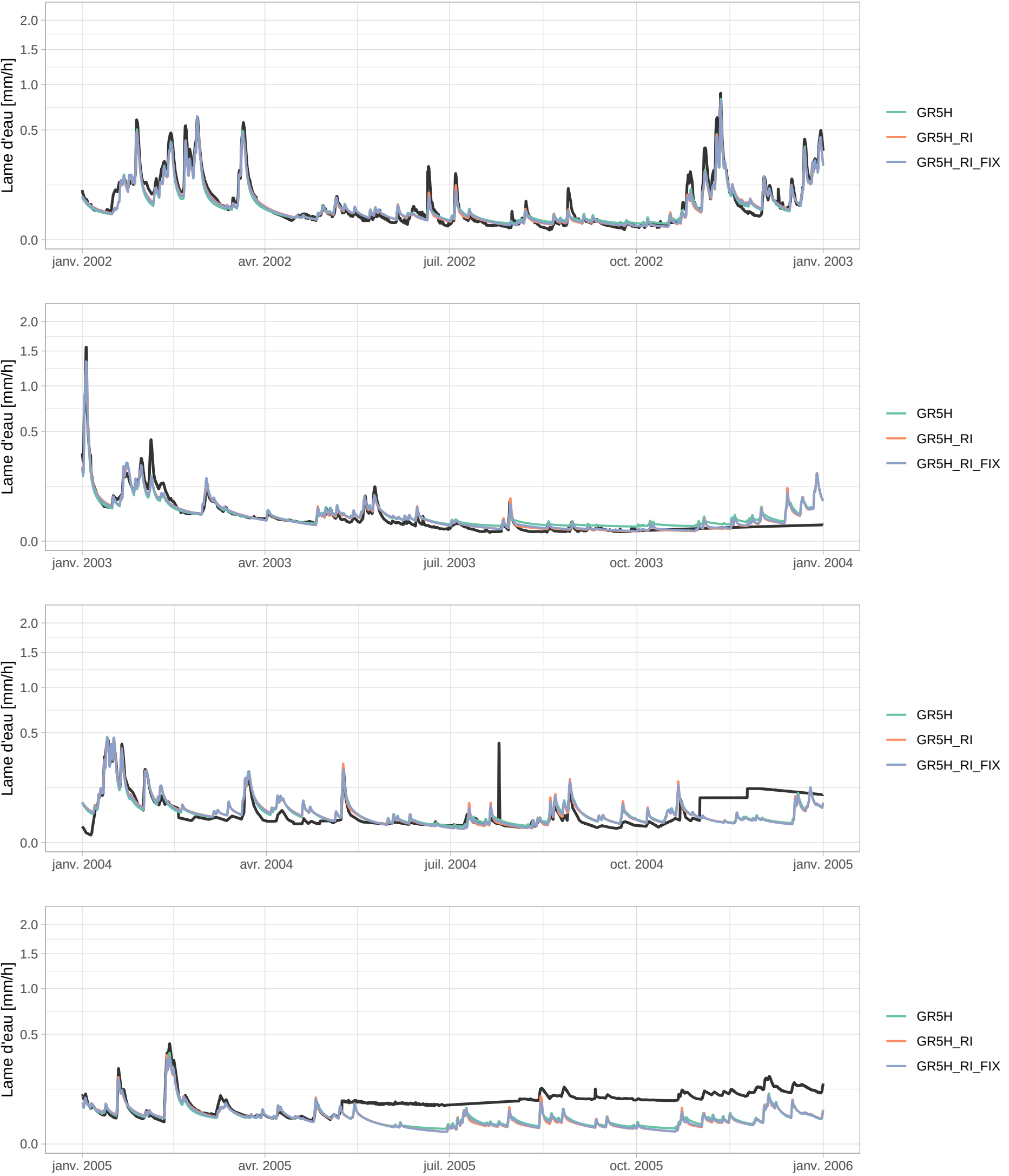
H620101001 – L'Aisne à Mouron (2242 km2)



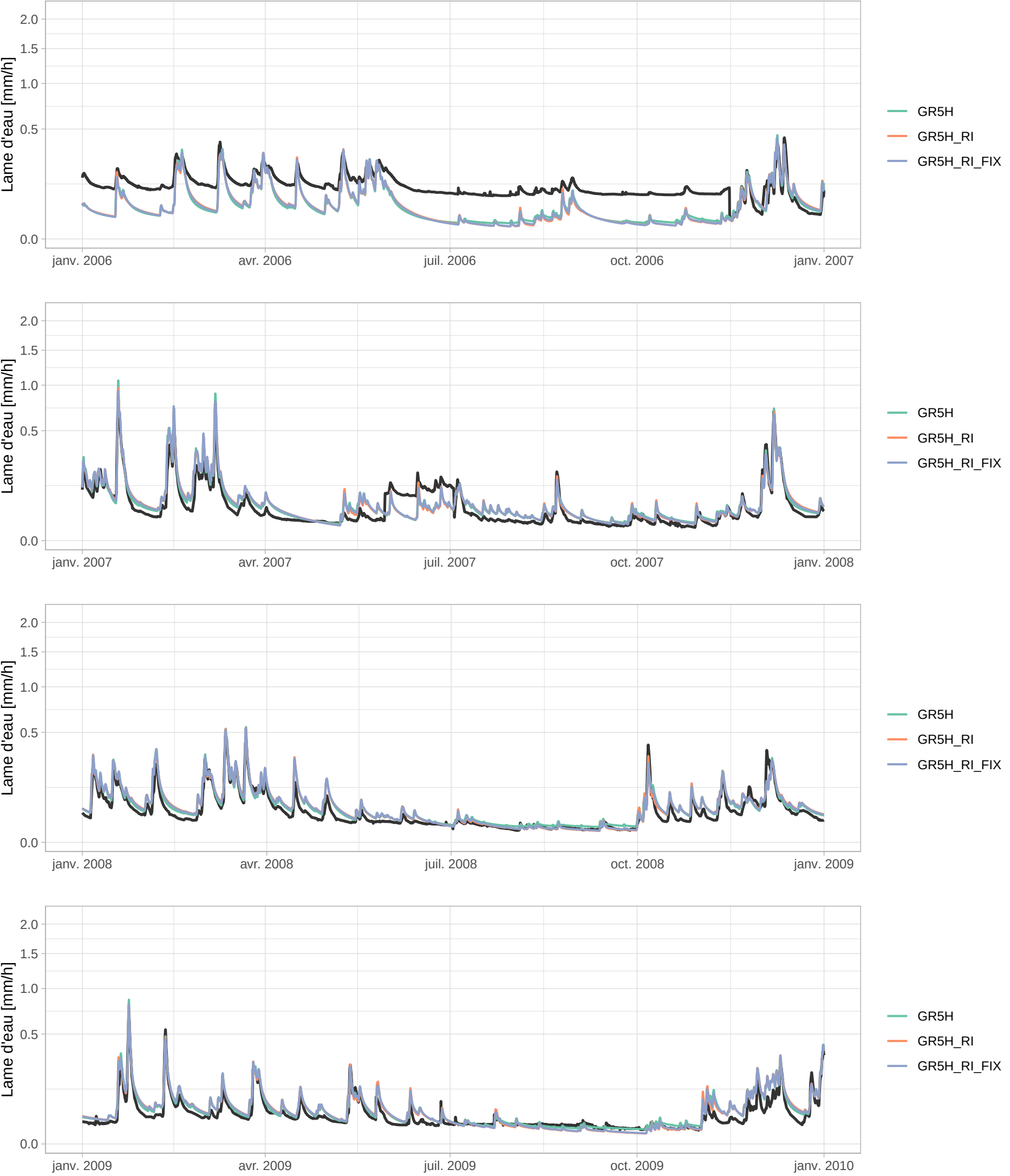
H620101001 – L'Aisne à Mouron (2242 km2)



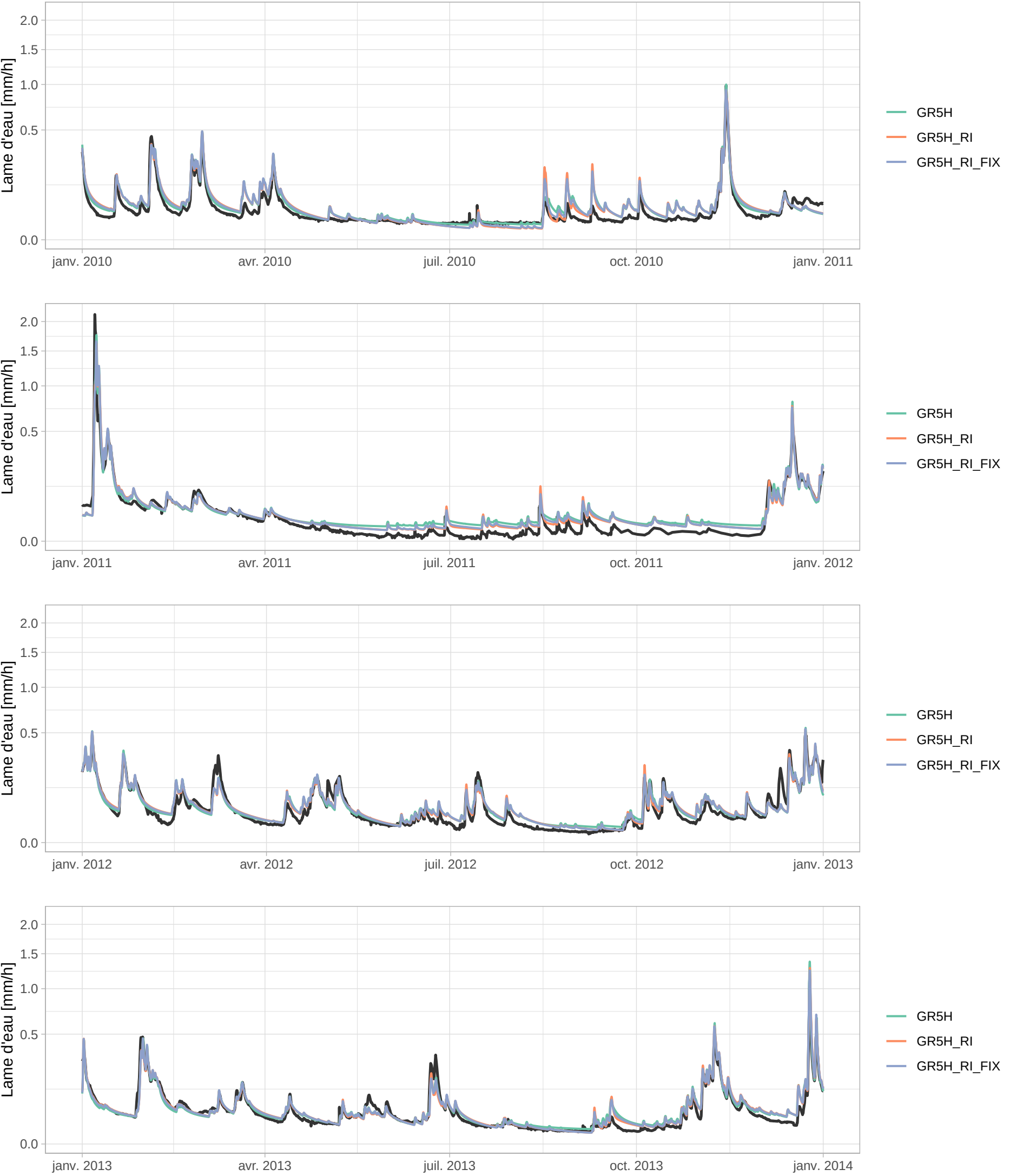
H702101001 – L'Oise à Hirson (316 km2)



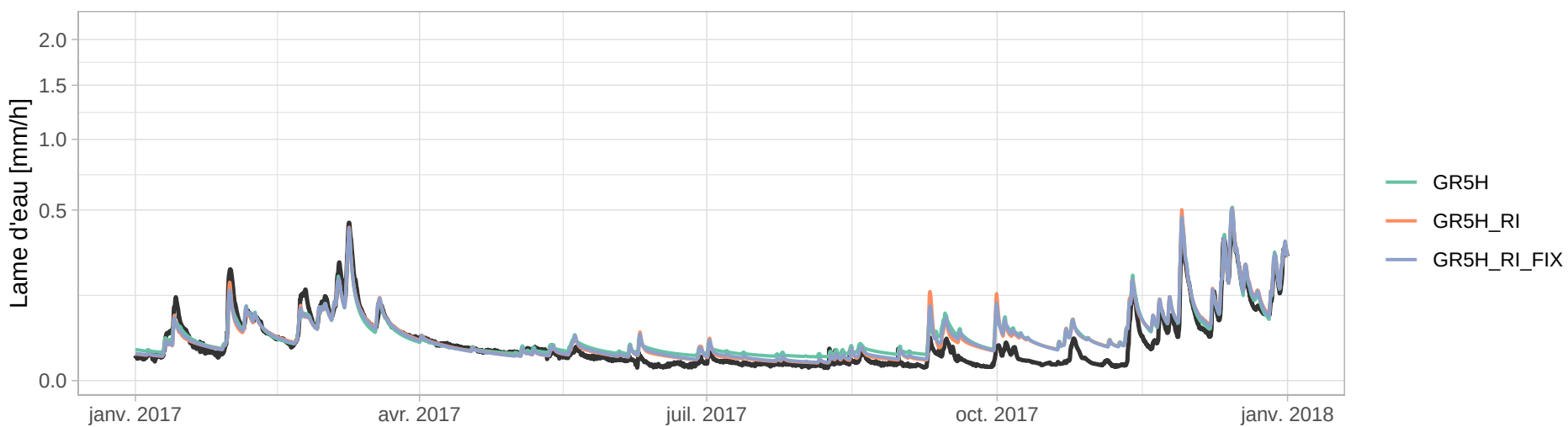
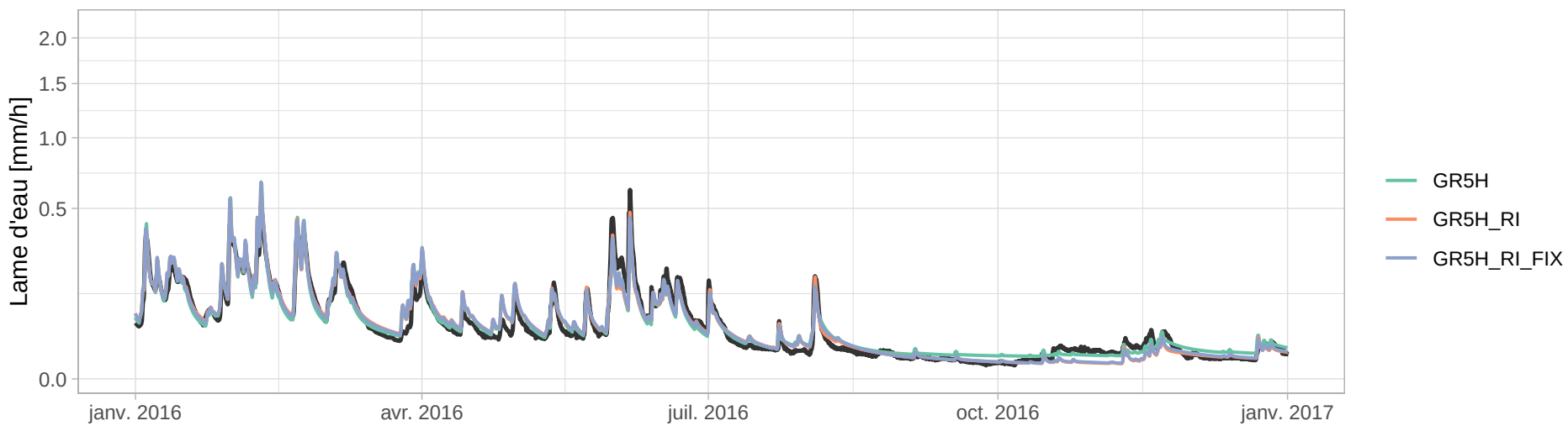
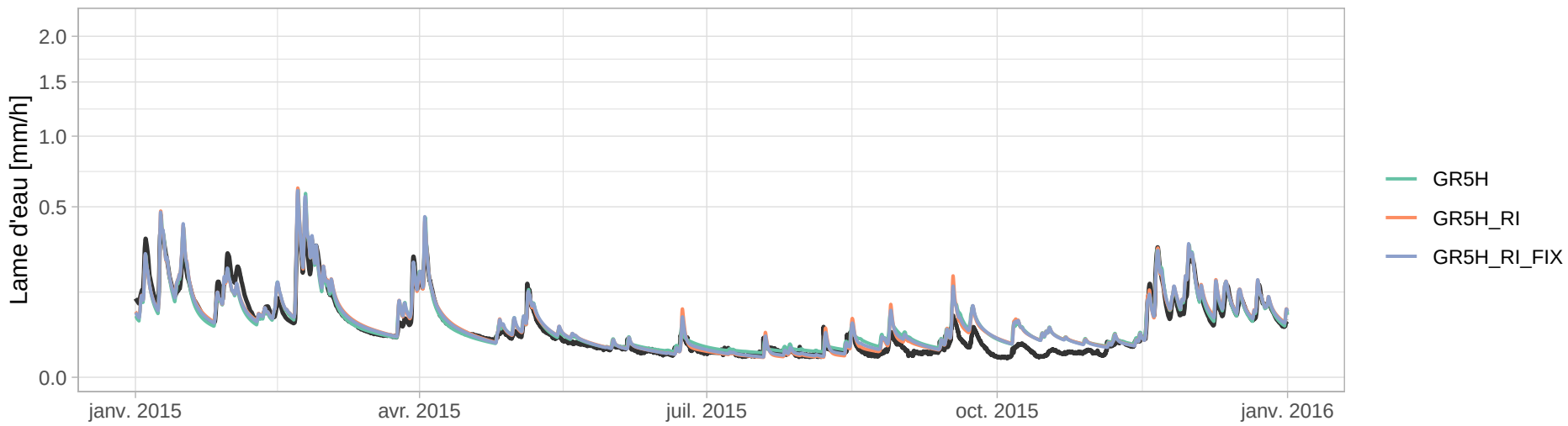
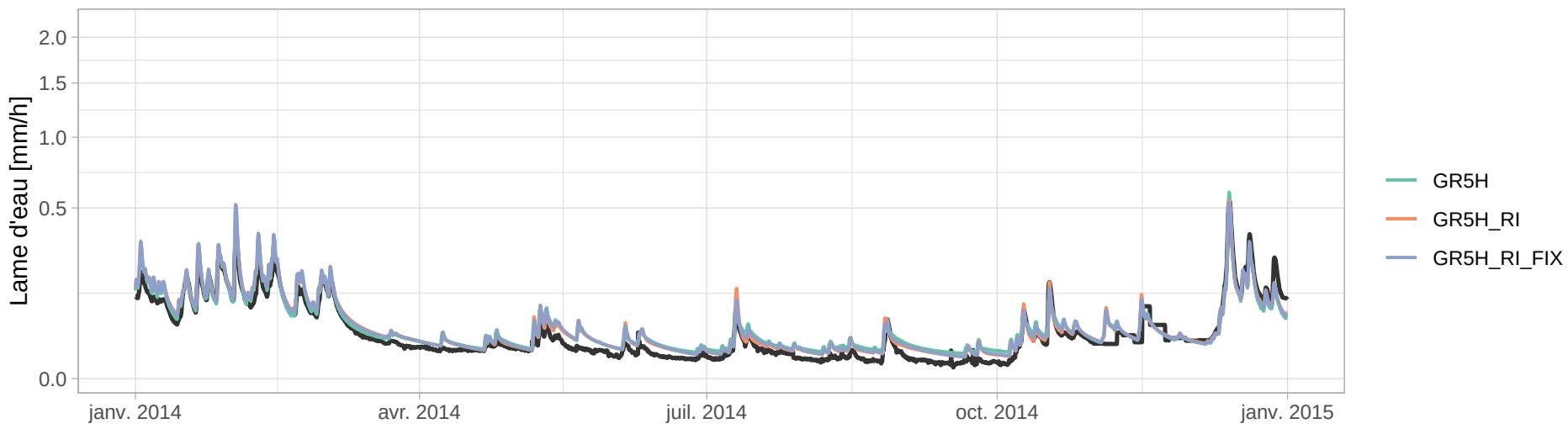
H702101001 – L'Oise à Hirson (316 km2)



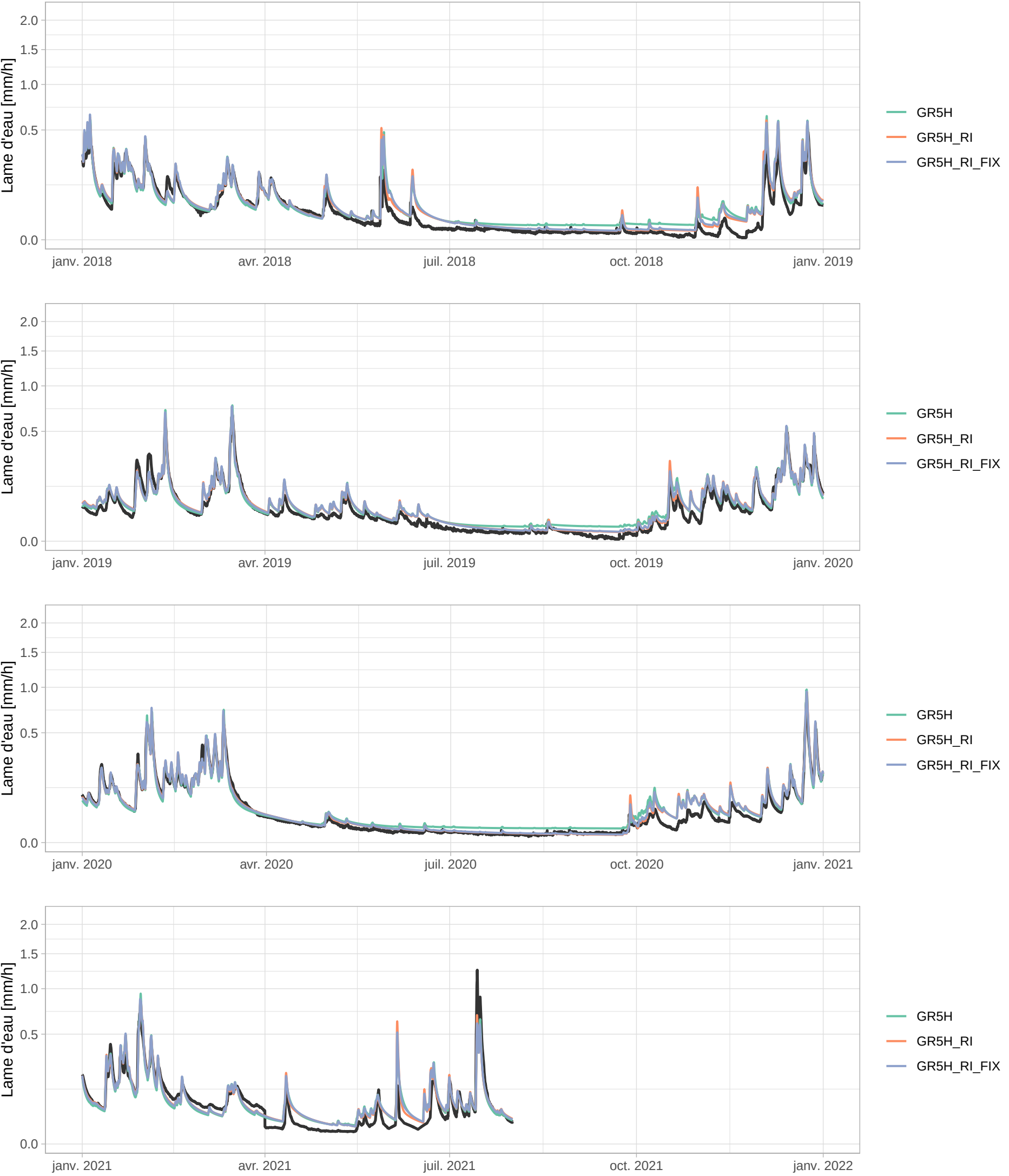
H702101001 – L'Oise à Hirson (316 km2)



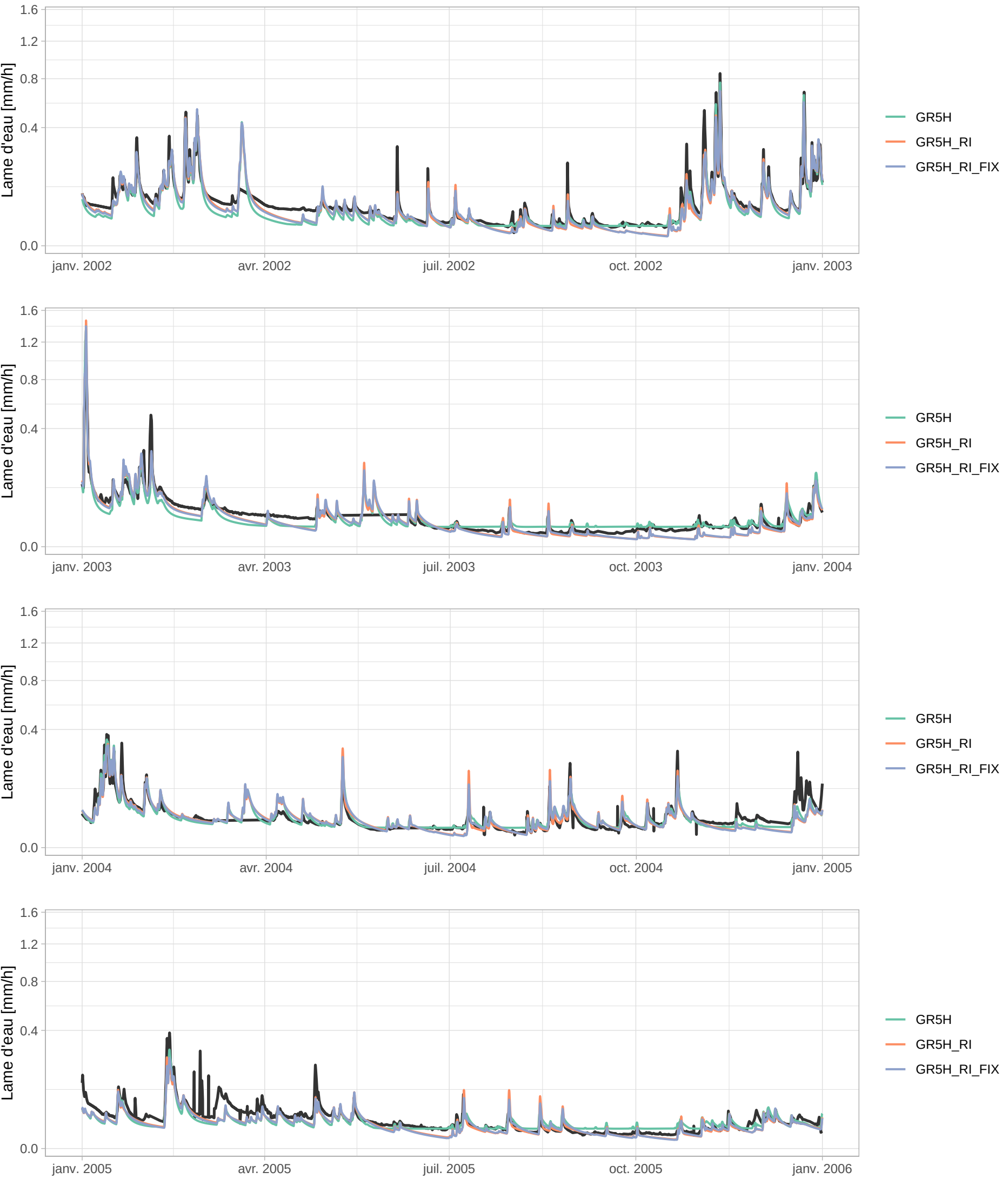
H702101001 – L'Oise à Hirson (316 km2)



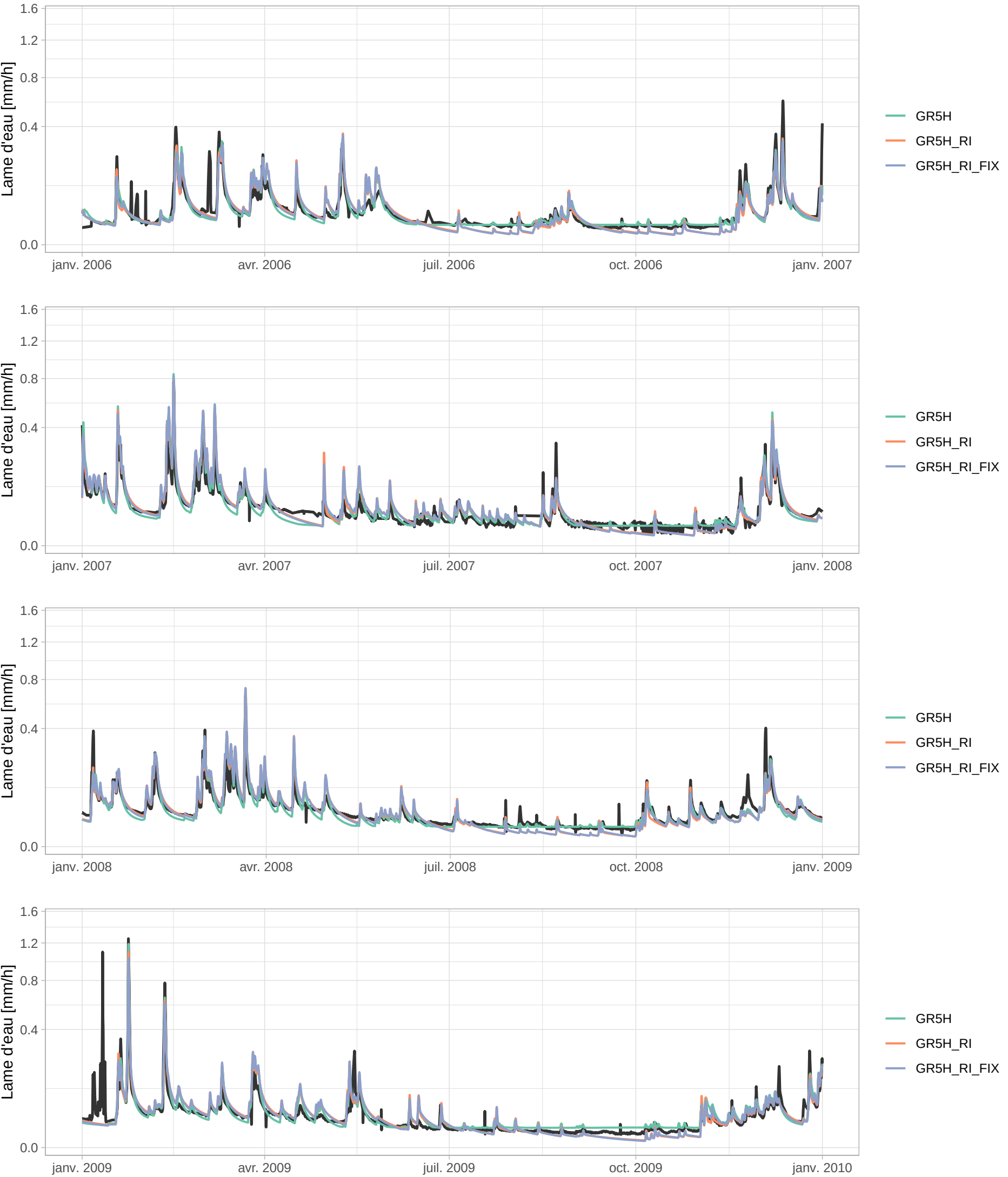
H702101001 – L'Oise à Hirson (316 km2)



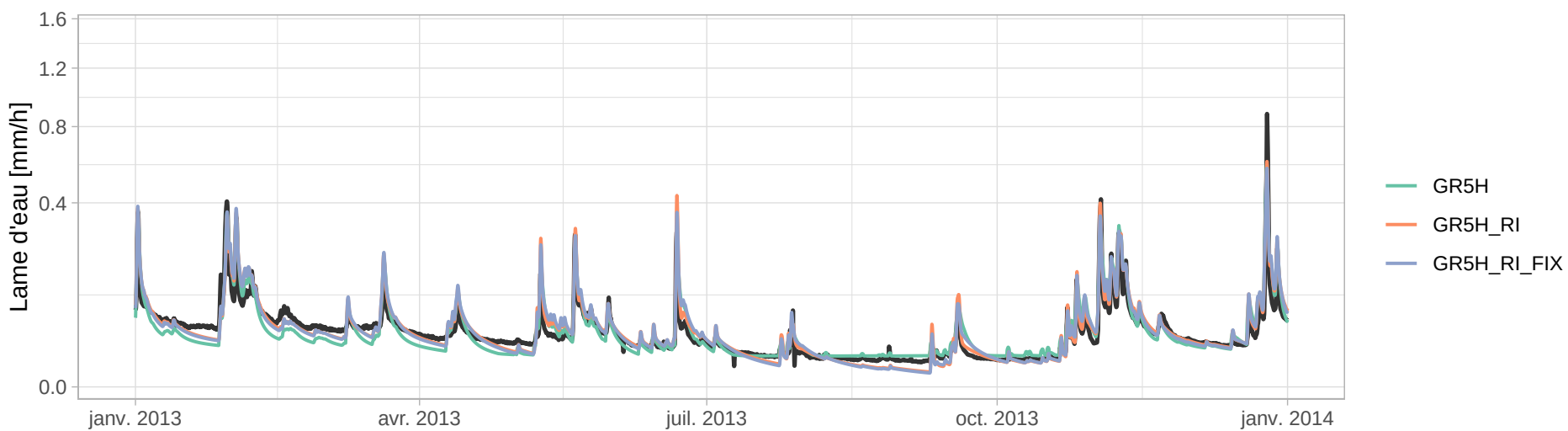
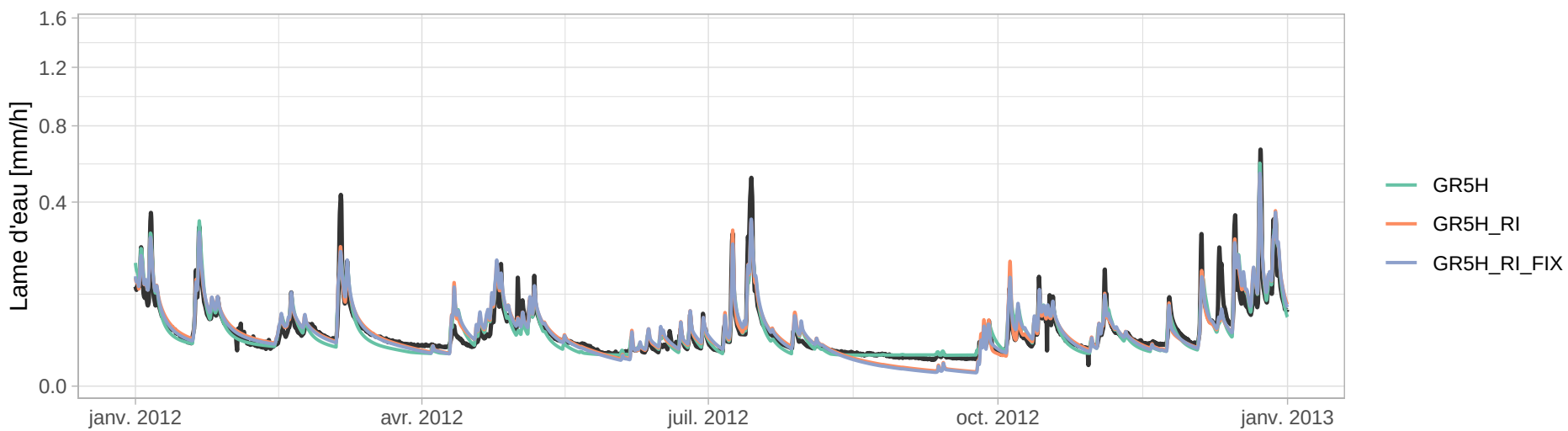
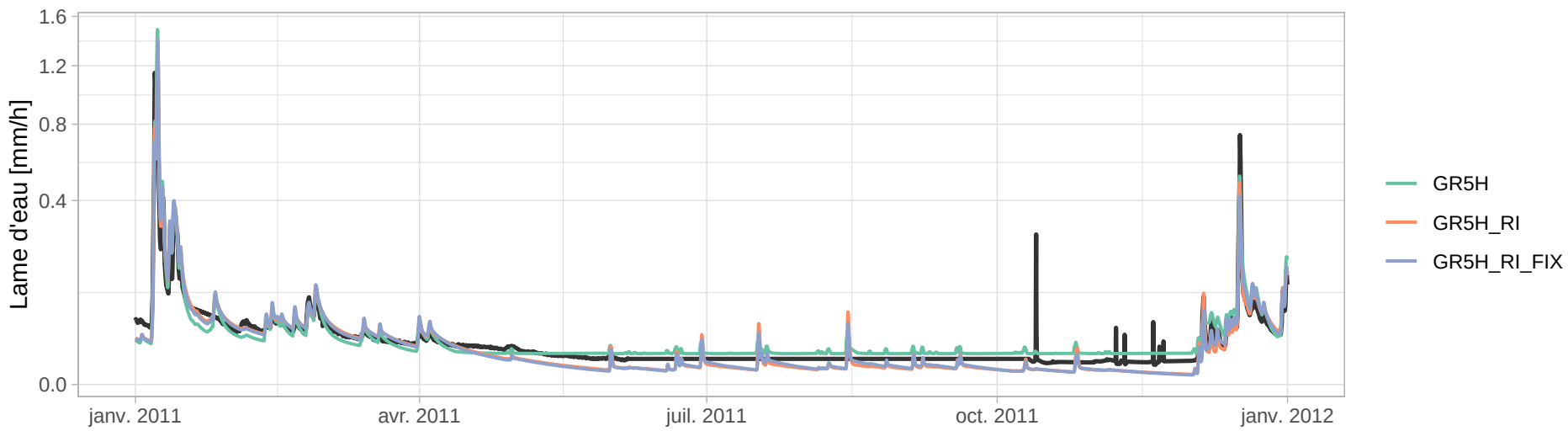
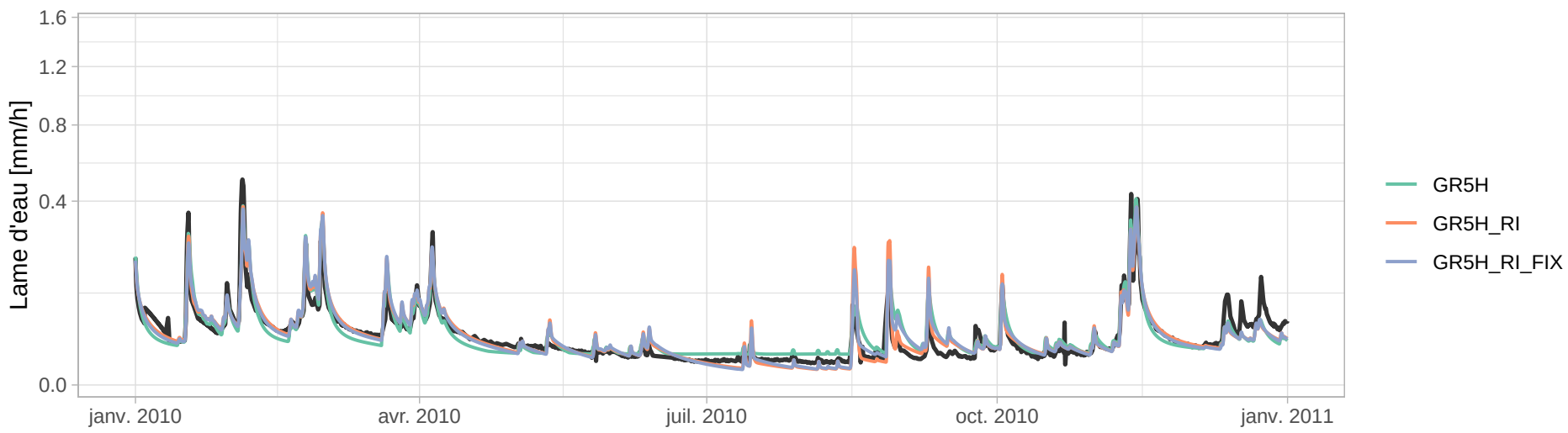
H710202001 – La Serre à Montcornet (112 km2)



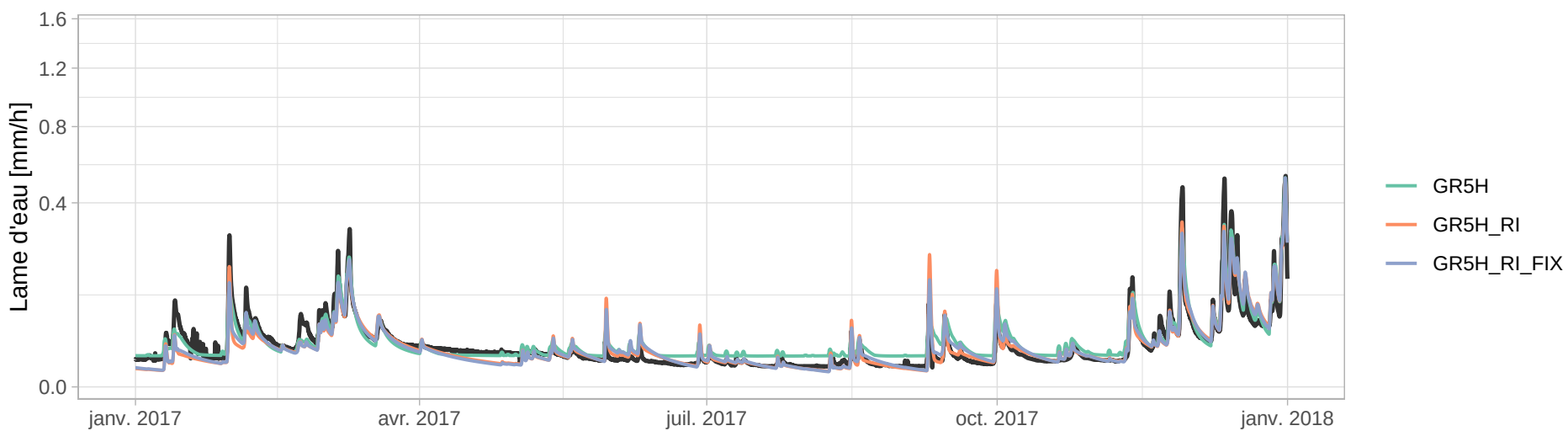
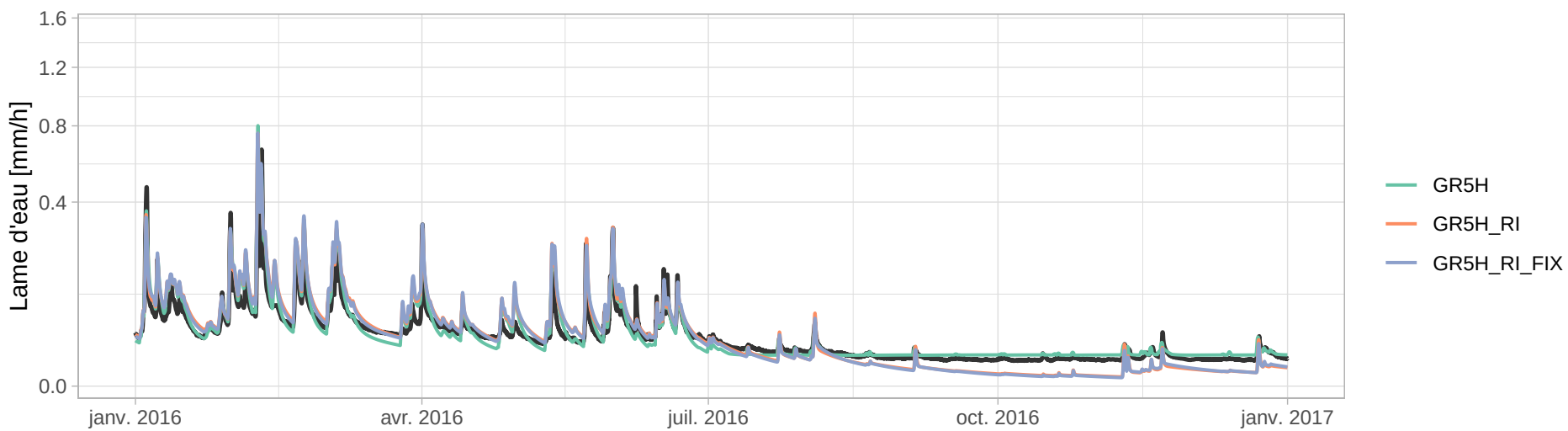
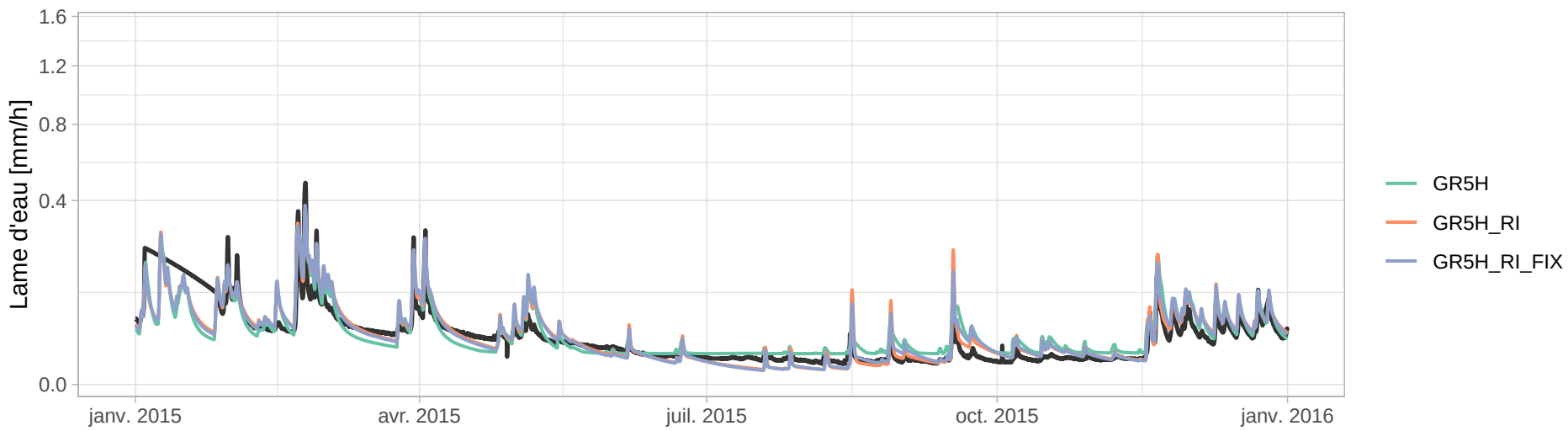
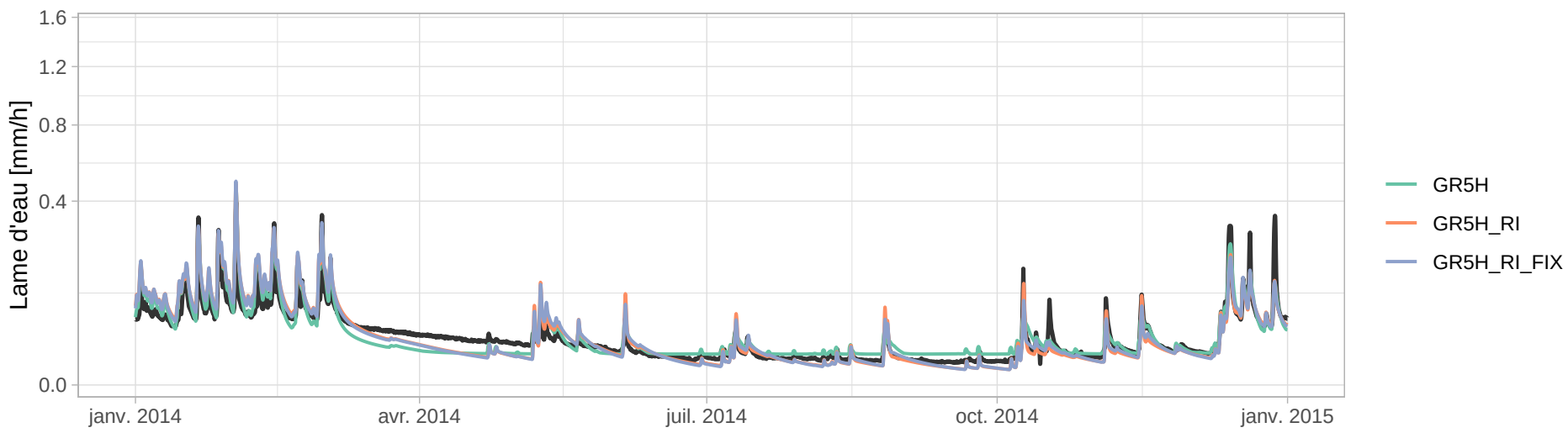
H710202001 – La Serre à Montcornet (112 km2)



H710202001 – La Serre à Montcornet (112 km2)



H710202001 – La Serre à Montcornet (112 km2)



H710202001 – La Serre à Montcornet (112 km2)

