

Simulation d'un bassin versant anthropisé à l'aide d'un modèle hydrologique semi-distribué : le bassin de la Seine et ses réservoirs

Laura Nunez Torres¹, Olivier Delaigue¹, David Dorchie², Guillaume Thirel^{1*}

¹ Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR research unit, Hydrology Research Group, Antony, France

² INRAE, UMR G-EAU, Montpellier, France

* guillaume.thirel@inrae.fr

Résumé

Anticiper les risques hydrologiques et gérer les ressources en eau sont des actions qui nécessitent la mise en place d'outils de modélisation, notamment les modèles hydrologiques. Ces derniers nécessitent des données hydro-climatiques actuelles et/ou passées du bassin versant considéré afin de simuler son comportement hydrologique. Pour cela, les modèles pluie-débit tentent de reconstituer fidèlement les composantes influençant l'hydrologie du bassin : le débit résulte en effet des précipitations, de l'évapotranspiration, des échanges avec la nappe et d'un temps de transfert, mais aussi, lorsque l'on prend en compte les usages, des prélèvements (eau potable, industrie, agriculture) et de la régulation effectuée par les barrages et réservoirs.

Cette étude porte sur la prise en compte des retenues en eau au sein du bassin de la Seine. Réalisé dans le cadre d'un stage, elle a permis la mise en place d'une modélisation semi-distribuée afin de simuler le comportement hydrologique de ce bassin en intégrant l'influence des quatre principaux lacs-réservoirs du bassin de la Seine. La modélisation semi-distribuée s'appuyant sur un maillage spatial basé sur des sous-bassins, il a tout d'abord été nécessaire de procéder à un découpage du bassin de la Seine. Un modèle hydrologique semi-distribué a ensuite été appliqué à cet ensemble de sous-bassins afin de simuler les débits naturels. Ensuite, les différentes influences humaines présentes sur le bassin ont pu être prises en compte dans le modèle. Enfin, une régularisation des paramètres obtenus lors du calage du modèle a été appliquée. Elle a consisté à déterminer, pour un bassin versant considéré, le bassin en amont le plus contributif en terme de débit et d'optimiser son jeu de paramètres afin de l'appliquer en entrée du modèle du bassin aval.

Les principaux résultats montrent que la régularisation des paramètres, dont le but est de ne pas favoriser la performance aux dépens du réalisme des paramètres, n'apporte pas d'amélioration homogène de nos résultats, seuls les paramètres des bassins à l'aval semblent améliorés. La modélisation semi-distribuée sans régularisation donne quant à elle de meilleurs résultats, notamment concernant les valeurs de critère de performance, comparés à ceux obtenus avec une modélisation globale (i.e. non semi-distribuée). Des études plus approfondies mériteraient d'être menées afin de tester la robustesse du modèle semi-distribué utilisé dans cette étude, les résultats obtenus étant issus du calage des paramètres.

Points-clefs

- ✓ Une sélection étendue de stations hydrologiques représentatives a été établie sur la Seine en amont de Vernon
- ✓ Une modélisation hydrologique semi-distribuée a été mise en place avec succès
- ✓ L'inclusion dans le modèle des volumes d'eau prélevés et relâchés par les grands lacs de Seine ont permis de représenter au mieux les débits mesurés

Abstract

Anticipating hydrological risks and managing water resources necessitates setting up tools, including hydrological models. Hydrological modelling is based on current and/or past hydro-climatic data related to a catchment in order to simulate the current and/or future hydrological behaviour of this catchment. Numerous models attempt to faithfully reconstruct the components influencing the hydrology of the basin: flow indeed result from precipitation, evapotranspiration, exchanges with the groundwater and transfer time to the mouth of the river, but also the withdrawals due to the various uses (drinking water, industry, agriculture) and the regulation carried out by dams and reservoirs.

This study will focus on the accounting of dams within the Seine River basin. More precisely, semi-distributed modelling will be used to simulate the hydrological behaviour of this basin, mainly by integrating the influence of the reservoir dams. Since semi-distributed modelling is based on a sub-basin spatial grid, it is necessary to divide the Seine basin into smaller sections. A semi-distributed hydrological model based on the R package *airGR*, developed by the HYDRO team of HYCAR (INRAE Antony), will then be applied to this set of sub-basins. Indeed, they allow the simulation of natural flows. The *airGRiwrn* package allows to take into account the different human influences occurring on the basin. Finally, a regularization of the parameters obtained from the model calibration was applied in order to ameliorate our results.

The main results show that the regularization, whose aim is not to favor the model performance too much compared to the realism of parameter values, does not bring a homogeneous improvement of our results. On the contrary the semi-distributed modeling without regularization indicates a clear improvement of our set of parameters compared to the set obtained with a lumped (i.e. non semi-distributed) modeling. More in-depth studies should be carried out in order to test the robustness of the semi-distributed model used in this study.

Highlights

- ✓ An extended selection of representative hydrological stations was set up on the Seine River upstream Vernon
- ✓ A semi-distributed hydrological modelling was successfully set up
- ✓ Including in the model withdrawn and released water volumes by the Seine reservoirs permitted representing better the measured streamflows

Introduction

Le bassin de la Seine est un territoire soumis à de forts enjeux nécessitant d'être gérés. Il s'agit d'un territoire très urbanisé, agricole et comprenant de nombreuses industries et enjeux économiques. Les tensions sur l'eau y sont donc très fortes : 70 % de l'alimentation en eau potable de la région parisienne provient directement de prélèvements dans les grandes rivières, deux centrales nucléaire et thermique utilisent l'eau de la Seine pour leur refroidissement et de nombreux industriels exploitent l'eau des grandes rivières pour leur refroidissement ainsi que la dilution de leurs déchets (Bizouard, 2019). De plus, des facteurs de changements viennent accroître ces tensions : la croissance de la population et l'urbanisation mènent à des besoins croissants en eau potable et en irrigation et le changement climatique intensifie les risques de crues et d'étiages (Dorchies et al., 2014). Il est donc nécessaire de connaître au mieux le comportement hydrologique actuel du bassin afin de pouvoir anticiper les futurs événements hydrologiques.

C'est pourquoi, entre autres, le projet européen ClimAware (2010-2013) a eu pour objectif l'étude de l'impact du changement climatique sur la gestion des barrages-réservoirs du bassin de la Seine, qui visent l'écrêtement des crues et le soutien des étiages (Dorchies et al., 2016). Cela a permis par exemple de montrer une augmentation de l'intensité des étiages ainsi que la difficulté des lacs-réservoirs à limiter l'impact des inondations dans le futur, même avec une meilleure gestion de ces ouvrages (Dehay, 2012). Dans cette continuité, le projet européen « *Innovating Water Management Optimisation Practice* » (IN-WOP) s'intéresse actuellement à l'optimisation des règles de gestion des quatre lacs-réservoirs du bassin de la Seine (lac du Der-Chantecoq, lac d'Orient, lacs du Temple et Amance et lac de Pannecière), également dans un cadre de changement climatique, notamment grâce à l'amélioration des modèles hydrologiques et climatiques. Cette optimisation est basée sur une modélisation semi-distribuée du bassin de la Seine intégrant les usages et la gestion des quatre lacs-réservoirs.

Le programme de recherche du PIREN-Seine, initialement lancé par le Centre national de la recherche scientifique (CNRS), a pour objectif de coordonner les travaux sur le bassin de la Seine de manière intégrée (cf. section 1.2.1). Ce stage s'inscrit donc dans ces efforts afin de mettre en œuvre un modèle semi-distribué du bassin jusqu'à Vernon en aval de Paris, intégrant les différents usages et la régulation des réservoirs. L'objectif est de permettre à terme d'intégrer à ce modèle d'autres influences anthropiques afin de couvrir l'ensemble des influences auxquelles est soumis le bassin et ainsi pouvoir établir des perspectives d'évolution de son comportement hydrologique.

Dans un premier temps, cette étude portera sur l'élaboration du jeu de données hydro-climatiques fourni sur l'ensemble de la zone d'étude. Dans un second temps, un découpage géographique du bassin en sous-bassins sera réalisé afin d'effectuer une modélisation semi-distribuée du bassin de la Seine. Enfin, les performances de la modélisation hydrologique sous différentes configurations seront évaluées.

1. Présentation de l'étude

1.1. Contexte de l'étude

1.1.1. Objet d'étude

Dans cette étude, nous nous intéressons au bassin de la Seine et plus précisément au bassin drainé en amont de la ville de Vernon, avec une superficie d'environ 64 420 km². De nombreux cours d'eau sont présents sur ce bassin, le plus connu étant la Seine qui s'écoule de l'amont, en passant par l'exutoire du bassin à Vernon avec une longueur de 775 km, jusqu'à son embouchure au Havre (Figure 1). Les principaux affluents de la Seine sont la Marne, l'Aube, l'Yonne et l'Oise, avec respectivement des longueurs de 514 km, 249 km, 292 km et 341 km. Concernant les débits moyens observés pour ces cinq cours d'eau, le plus élevé est relevé pour la Seine avec 563 m³/s, puis vient la Marne avec 110 m³/s, l'Oise avec 109 m³/s, l'Yonne avec 93 m³/s et l'Aube avec 41 m³/s.

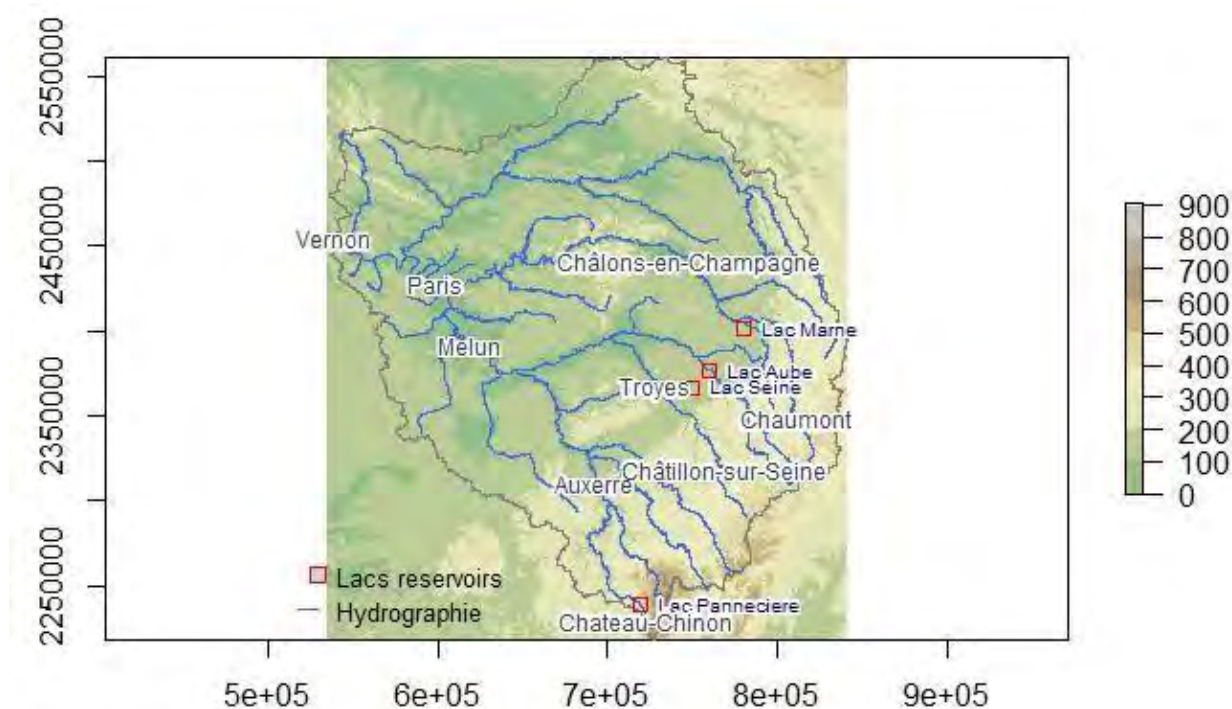


Figure 1. Localisation et topographie du bassin de la Seine jusqu'à Vernon. Carte réalisée à partir du modèle numérique de terrain (MNT) de la mission "Shuttle Radar Topography Mission" (SRTM) (Werner, 2001 ; Rabus, et al., 2003 ; Farr, et al., 2007).

La topographie du bassin de la Seine est relativement peu marquée (Figure 1), variant de 31 m à l'exutoire (ville de Vernon) à 300 m pour la majorité du bassin excepté dans le Morvan où les altitudes peuvent culminer jusqu'à 901 m (dans le Haut-Folin par exemple).

Nous étudierons le comportement hydrologique de ce bassin à travers l'utilisation de la modélisation globale puis semi-distribuée. En effet, ces modélisations permettent de reproduire les conditions de débit du bassin à partir des données de précipitations et de température de l'air observées et d'évapotranspiration potentielle. La modélisation semi-distribuée permet également d'intégrer les usages du bassin tels que la régulation des lacs-réservoirs.

1.1.2. Régime hydro-climatique

Le bassin de la Seine est soumis à un régime hydrologique de type pluvial océanique, caractérisé par des débits plus élevés sur la période de novembre à juin et, à l'inverse, des débits plus faibles sur la période de juillet à octobre (Figure 2). Ces variations sont dues aux conditions de précipitation et d'évapotranspiration, mais également aux usages de l'eau qui diffèrent suivant la période de l'année.

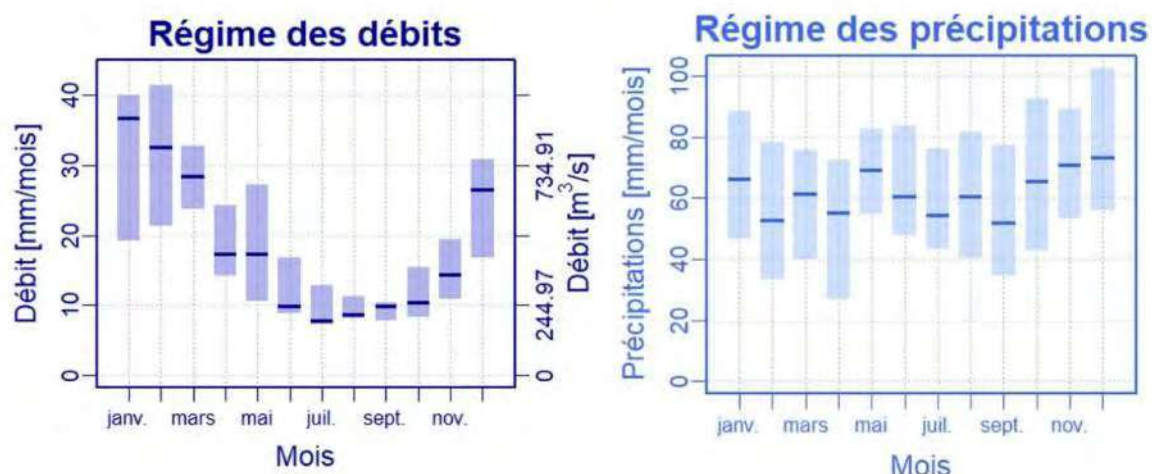


Figure 2. Régimes hydrologique et pluviométrique du bassin de la Seine, exemple de la station hydrologique H8100021 - "La Seine à Vernon" (Brigode et al, 2020).

Les variables hydro-climatiques (débit et précipitation) représentées sur la Figure 2 sont agrégées au pas de temps mensuel. Une boîte par mois est représentée, le régime médian est noté par un trait horizontal gras et les quantiles 25 et 75 des régimes sont indiqués par les limites inférieure et supérieure des boîtes. Le régime des débits n'est représenté que si au moins cinq années hydrologiques (du 1^{er} octobre au 30 septembre) pleines (avec moins de 10% de lacunes) sont présentes dans les données de débit.

L'influence de la neige est quant à elle assez faible sur l'ensemble du bassin, mais non négligeable lors de forts épisodes neigeux par exemple dans la région du Morvan, au sud-est du bassin de la Seine (au nord de Château-Chinon, Figure 1). Par exemple, pour la station H2021010 - "La Seine à Montigny-en-Morvan [Chassy]" (juste en aval du lac de Pannecière, Figure 1), on estime à 6 % les précipitations solides observées sur le bassin par rapport aux précipitations totales (Figure 3). C'est pourquoi nous les prendrons tout de même en compte pour la suite de l'étude.

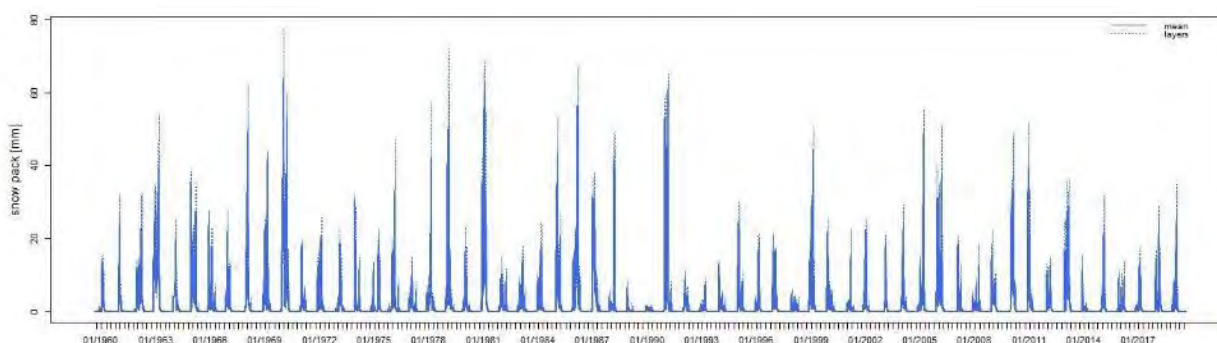


Figure 3. Manteau neigeux (en mm d'équivalent en eau) simulé à la station H2021010 - La Seine à Montigny-en-Morvan.

1.1.3. Géologie du bassin

Le bassin de la Seine est presque entièrement situé dans le Bassin parisien, bassin sédimentaire intracratonique affecté par une subsidence thermique due à l'extension permienne (Brunet et Le Pichon, 1982) qui a permis l'accumulation d'épaisses séries sédimentaires au centre qui se réduisent en épaisseur en bordure. Ces formations sont à faible pente (de 0.01 m à 0.03 m tous les 100 m) et convergent vers le centre du bassin, où sont visibles les formations les plus récentes (sédiments de l'Eocène et de l'Oligocène). Puis, de part et d'autre du bassin, se succèdent des formations semi-perméables datant du Crétacé et d'autres plus perméables datant du Jurassique (Figure 4).

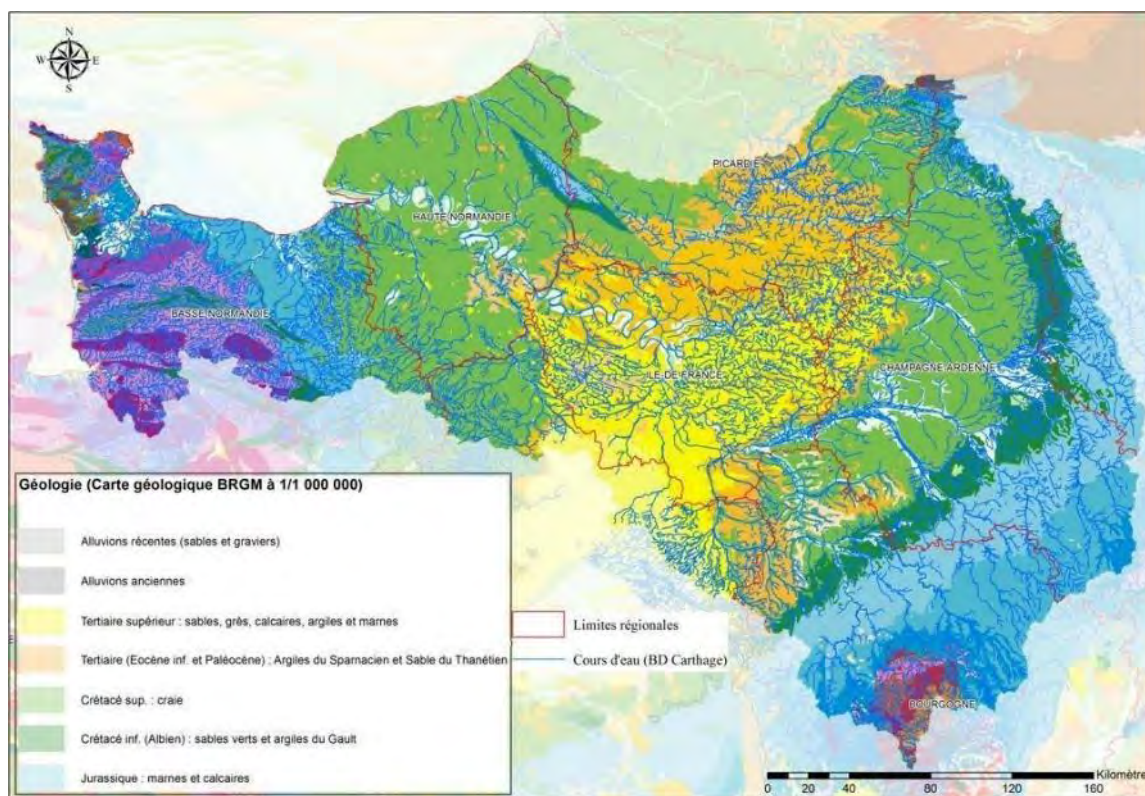


Figure 4. Géologie du bassin de la Seine (<http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article403>).

1.1.4. Influences anthropiques

Le bassin de la Seine est soumis à différentes influences anthropiques. En effet, ce bassin présente de forts besoins en eau mais également une pression polluante très importante, car il compte environ 18 millions d'habitants soit environ 27 % de la population française métropolitaine, dont 12 millions uniquement pour la région Île-de-France.

Parmi ces influences anthropiques figurent les barrages, essentiels pour la régulation des débits des rivières mais aussi pour l'exploitation de l'eau en tant que ressource. Ils peuvent être de plusieurs types :

- les lacs-réservoirs : retenues d'eau dont le niveau est soumis à des règles de gestion bien définies et alimentées par des cours d'eau en amont. Ils ont pour principal objectif la gestion des crues et des étiages ;
- les barrages hydro-électriques : ouvrages équipés d'une turbine et d'un alternateur permettant grâce à la force de l'eau de produire de l'énergie transformée par la suite en courant électrique alternatif ;
- les barrages pour la navigation : ouvrages permettant le maintien du niveau d'eau afin de garantir une voie navigable ;
- les barrages pour irrigation.

Nous nous limiterons dans cette étude aux lacs-réservoirs. En effet, ce sont les principaux ouvrages influant sur les débits des rivières sur ce bassin, notamment à travers les valeurs de débits de prise et de restitution. De plus, il est difficile d'obtenir des données concernant les autres types de pressions anthropiques exercées sur le bassin.

1.1.5. Les lacs-réservoirs

Le bassin de la Seine présente quatre lacs-réservoirs situés en amont du bassin (Tableau 1). Ils sont gérés par l'Établissement public territorial de bassin (EPTB) Seine Grands Lacs (<https://seinegrandslacs.fr/>). Trois de ces lacs sont en dérivation des fleuves Marne, Aube et Seine ; le dernier est quant à lui situé au fil de l'eau sur l'Yonne (Figure 5).

Ces quatre réservoirs constituent une retenue d'eau totale de 807.5 Mm³. Ils ont été construits entre 1949 et 1990 dans le but de réguler les débits à l'aval en écrétant les crues mais aussi en soutenant les étiages. Ainsi, lors de l'épisode de crue de janvier-février 2018 par exemple, ils ont permis de contenir le pic de crue à

5,85 m au lieu de 6,50 m s'ils n'avaient pas été présents (Magnien et Baumes, 2018). Cela aurait pu entraîner de graves dommages matériels ainsi qu'un fort ralentissement de l'activité quotidienne dû à l'activation des dispositifs de gestion de crise. Ils permettent ainsi de limiter les inondations mais aussi de répondre aux besoins en eau de la population et des industries.

De plus, on peut établir un lien entre la localisation de ces lacs-réservoirs et la géologie du bassin de la Seine. En effet, ces lacs sont situés sur des zones où le réseau hydrographique est nettement plus dense (Figure 5). Ces zones plus denses correspondent également à des terrains de lithologie argileuse (en vert foncé sur la Figure 4) donc imperméables et permettant de créer des retenues d'eau. Ce sont ainsi des terrains idéaux pour la mise en place de structures telles que les lacs-réservoirs.

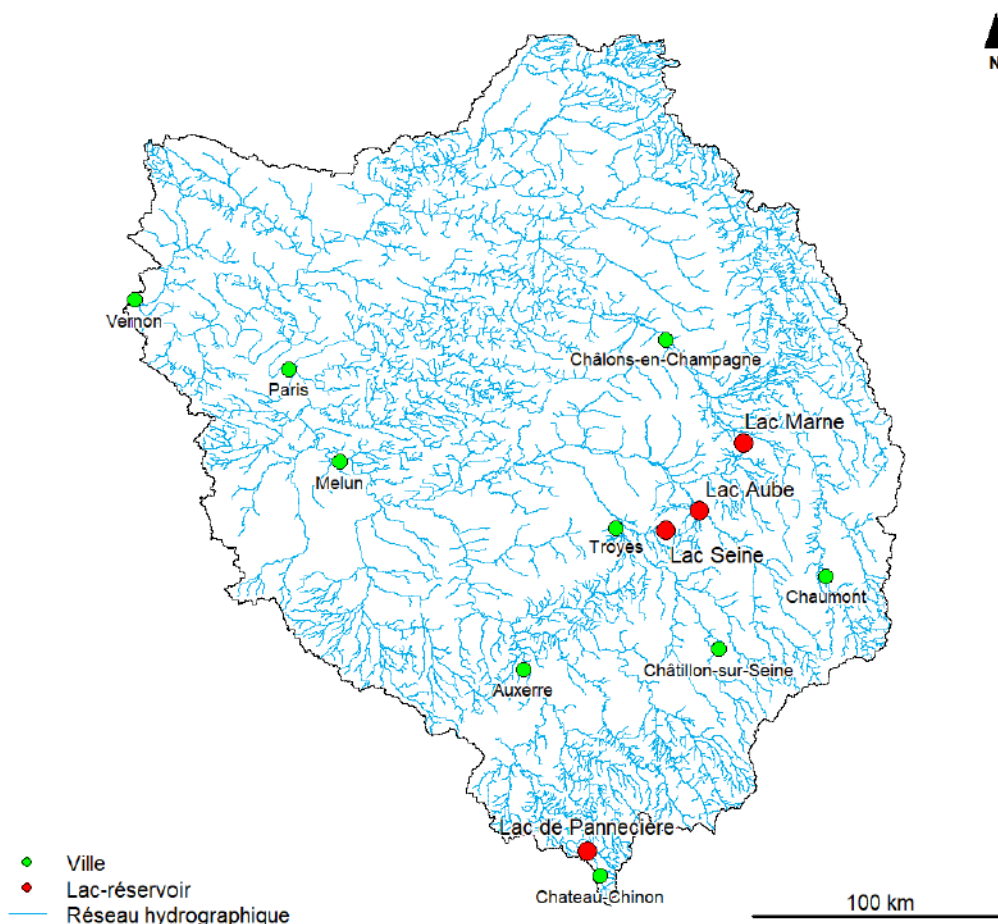


Figure 5. Réseau hydrographique et localisation des lacs-réservoirs du bassin de la Seine.

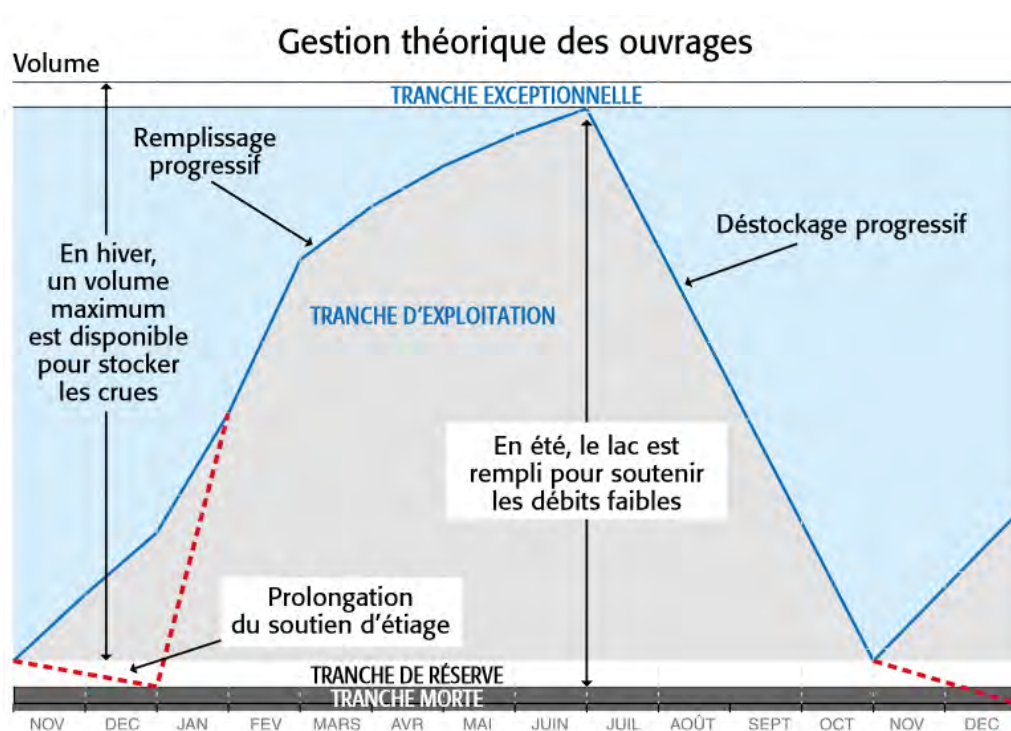
Chaque lac réservoir est soumis à des règles de gestion strictes de deux types :

- Une gestion proactive : il est nécessaire de préparer le lac-réservoir aux événements futurs de crues et d'étiages en aval. Plus précisément, le lac doit être plein au début des périodes d'étiages afin de pouvoir relâcher une certaine quantité d'eau pour soutenir les rivières à l'aval. À l'inverse, le lac doit être vide au début des périodes de crue afin de pouvoir être rempli par le "trop plein" des rivières en amont et ainsi éviter des débordements de lits de ces dernières en aval ;
- Une gestion réactive : il est également nécessaire de pouvoir gérer à un instant t une situation imprévue de forte crue ou d'étiage sévère.

Tableau 1. Caractéristiques des lacs-réservoirs.

Lacs	Mise en service	Affluent	Superficie (km ²)	Capacité (Mm ³)	Connexion Lac - Affluent
Der-Chantecoq	1974	Marne	48	350	Dérivation
Temple et Amance	1990	Aube	23.2	170	Dérivation
Orient	1966	Seine	23	205	Dérivation
Pannecière	1949	Yonne	5.2	82.5	Au fil de l'eau

L'EPTB Seine Grands Lacs définit pour chaque réservoir une courbe de remplissage-vidange théorique (courbe d'exploitation) afin de suivre la gestion de ces lacs-réservoirs (Figure 6). Entre le 1^{er} juillet et le 31 octobre, chaque lac-réservoir subit une vidange (courbe bleue décroissante). Si le seuil d'alerte est atteint, cette vidange peut être prolongée afin de soutenir les étiages (courbe rouge pointillée). Entre le 1^{er} novembre et le 30 juin, chaque lac-réservoir subit à l'inverse un remplissage dû aux précipitations à cette période de l'année.

Figure 6. Gestion théorique des grands lacs de Seine¹.

Quatre tranches existent concernant la gestion du remplissage des lacs-réservoirs :

- Tranche morte : tranche d'eau qui n'est jamais vidangée hormis lors des inspections décennales réglementaires ou travaux éventuels. Elle permet la survie de la faune piscicole.
- Tranche de réserve : cette tranche est réservée au soutien des débits d'étiage après le 31 octobre et jusqu'au 31 décembre lorsque la situation le nécessite.
- Tranche d'exploitation : cette tranche sert à l'exploitation courante du lac. Elle est remplie chaque année, en principe entre le 1^{er} novembre et le 1^{er} juillet, et vidée entre le 1^{er} juillet et le 1^{er} novembre.
- Tranche exceptionnelle : cette tranche ne peut être remplie qu'en cas exceptionnel, par exemple en cas de crues importantes ou de crues de printemps, et pour une durée réduite. Dès que possible, la tranche exceptionnelle doit être vidée pour revenir, au niveau prévisionnel de la tranche d'exploitation.

¹ D'après https://www.seinegrandslacs.fr/sites/default/files/media/downloads/sgl_plaquette_seine_juillet2015_bd_0.pdf. Consulté le 8 novembre 2021.

Afin de répondre aux deux types de gestion, différents seuils d'alerte ont également été mis en place, d'une part pour les crues et d'autre part pour les étiages. Ces seuils sont définis pour des stations dites de contrôle en aval des lacs réservoirs. Ils sont décrits en détail sur le Tableau 2.

Tableau 2. Les différents seuils d'alerte concernant les crues et les étiages.

Événement	Seuils				
Crue	Pas de vigilance particulière requise	Risque de crue génératrice de débordements	Risque de crue génératrice de débordements importants	Risque de crue majeure	
Etiage	Station sans état de vigilance particulier	Station en état de vigilance	Station en état d'alerte	Station en état d'alerte renforcée	Station en état de crise

Prenons un exemple de station hydrométrique directement affectée par la construction d'un lac-réservoir (Figure 7). La station H1231010 - L'Aube à Blaincourt-sur-Aube étant placée directement en aval des lacs Temple en Amance, situés en dérivation de l'Aube, nous observons effectivement une modification de la série de débits observés à partir de l'année de construction du lac-réservoir (en 1990). Nous pouvons remarquer une sorte de régulation des débits observés, ne dépassant plus les 5 mm.j⁻¹ à partir de 1990, sauf en période de forte crue, comme on peut l'observer en 2013 et 2018. Nous pouvons ainsi être témoins de l'action de ce lac-réservoir, notamment sur l'écêtement des crues.

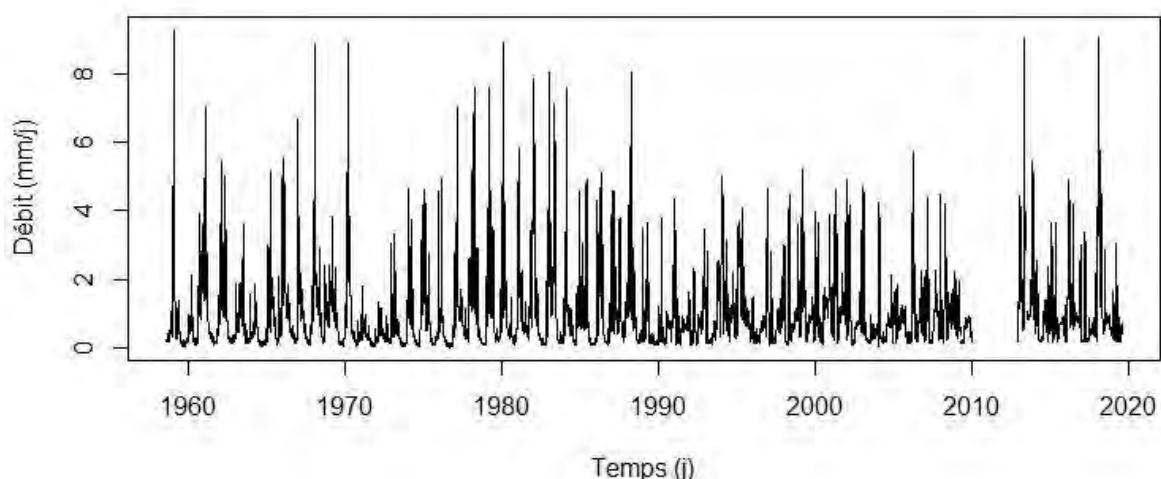


Figure 7. Hydrogramme représentant la série de débits observés à la station H1231010 - L'Aube à Blaincourt-sur-Aube.

1.2. État de l'art

1.2.1. Études réalisées sur le bassin de la Seine

De nombreuses études ont été réalisées ou sont en cours de réalisation sur le bassin de la Seine, à des fins d'amélioration de la gestion de l'eau ainsi que du territoire face au changement climatique. Quelques-unes d'entre elles, directement liées à notre étude, sont présentées ci-après.

Projet RExHySS - Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme

Ce projet s'est intéressé plus particulièrement aux extrêmes hydrologiques sur deux grands hydrosystèmes fluviaux représentatifs du Nord de la France : la Seine et la Somme.

Les principaux résultats obtenus indiquent un assèchement prononcé des bassins étudiés d'ici à la fin du 21^e siècle, avec une baisse des nappes et des débits en moyenne annuelle. D'un point de vue socio-

économique, cela pourrait menacer l'équilibre des différents usages de l'eau et tout particulièrement l'irrigation des cultures qui pourrait augmenter de 50 à 60 % face au changement climatique. Cela aurait un impact direct sur la recharge des nappes, qui verraient leur niveau atteindre seulement 30 % de leur niveau actuel en fin de siècle. (Habets et al., 2011).

Projet ClimAware - Impacts of climate change on water resources management - regional strategies and European view

Le projet ClimAware a été lancé afin d'étudier l'impact sur la disponibilité en eau. Concernant le bassin de la Seine, il a été question de l'adaptation de la gestion des barrages dans le but de soutenir les étiages et d'écrêter les crues, tout en prenant en compte les enjeux socio-économiques importants, notamment en région parisienne. Les résultats ont globalement indiqué, en conditions présentes et futures, une diminution de la disponibilité en eau et des faibles débits pendant la période estivale. Ils ont également montré qu'une marge de progrès existe concernant la gestion des réservoirs et qu'il serait alors nécessaire de définir des stratégies de d'adaptation appropriées (Dorchies et al., 2014).

Projet IN-WOP - Innovative water management optimisation practice

Ce projet a pour but l'optimisation des règles de gestion des réservoirs. Il est actuellement en cours de réalisation. Plus précisément, il devra prendre en compte les règles de gestion actuelles des réservoirs ainsi que la pression du changement climatique sur le bassin de la Seine, jusqu'à Vernon. Ce stage s'inscrit donc dans la lignée de ce projet et contribuera, de par l'utilisation d'un modèle hydrologique semi-distribué basé sur le package airGRiwr (outil de modélisation semi-distribuée codé en langage R), à répondre aux objectifs posés initialement.

Phase 8 du PIREN-Seine - Programme interdisciplinaire de recherches sur l'environnement

Le CNRS, à l'origine du PIREN-Seine, collabore avec 14 acteurs autour de différents domaines tels que l'étude de la qualité de l'eau, l'écologie ou encore l'hydrologie. Les précédentes phases menées par le PIREN-Seine consistaient essentiellement à replacer le réseau hydrographique dans la complexité du fonctionnement du bassin de la Seine, à rendre compte des risques sanitaires ainsi que du fonctionnement des paysages et la gestion des territoires ainsi qu'à développer la modélisation du bassin en structurant les bases de données disponibles, à utiliser la cartographie historique et à intégrer les changements d'échelle. L'axe 2 est dédié aux extrêmes hydrologiques du bassin de la Seine. Ce stage a été financé par le PIREN-Seine. Une réunion de future collaboration a également eu lieu au cours de ce stage.

1.2.2. Catégorisation des modèles hydrologiques

Il existe un très grand nombre de modèles développés pour représenter la transformation pluie-débit. Leur classification est difficile (Hrachowitz and Clark, 2017), mais on peut néanmoins identifier de manière grossière trois principales catégories :

- **Modèle empirique** : des relations mathématiques directes sont établies entre les entrées et sorties observées du bassin versant considéré. Les processus impliqués dans la relation pluie-débit ne sont pas décrits, ce sont des modèles dits de type "boîte noire" ;
- **Modèle conceptuel** : il inclut les principaux processus de la relation pluie-débit sans utiliser de lois physiques. Il est constitué de réservoirs connectés entre eux dont le niveau augmente et diminue au cours du temps et qui représentent les différents compartiments hydrologiques d'un bassin versant ;
- **Modèle à base physique** : il représente les processus de la relation pluie-débit en utilisant les lois physiques correspondantes. Il repose sur la résolution des bilans de masse et d'énergie.

Discretisation spatiale des modèles

Par ailleurs, les modèles hydrologiques peuvent fonctionner à des échelles spatiales diverses :

- **Modèle global** : le bassin versant est considéré comme une seule entité spatiale homogène.

Les processus qui y sont représentés ne dépendent donc pas de la variabilité spatiale ;

- **Modèle semi-distribué** : le bassin versant est subdivisé en plusieurs entités spatiales selon des critères hydrologiques ou topographiques. Il permet donc la prise en compte de la variabilité spatiale des processus entrant en jeu sur le bassin ;
- **Modèle distribué** : le bassin versant est divisé en plusieurs entités spatiales cette fois selon un maillage régulier. Il prend ainsi également en compte la variabilité spatiale des processus.

Discretisation temporelle des modèles

Les types de modèles décrits ci-dessus dépendent également du pas de temps choisi, qui dépendent de l'objectif de l'étude. Le pas de temps utilisé peut être horaire, journalier, mensuel ou annuel. Quelques modèles utilisent également un pas de temps infra-horaire. Ainsi, un pas de temps fin correspond à l'étude des crues, voire des crues rapides, alors qu'un pas de temps plus grossier correspond à l'étude des ressources du territoire considéré.

Dans le cadre de ce stage, nous cherchons à intégrer de manière localisée les quatre lacs réservoirs du bassin de la Seine. La modélisation semi-distribuée nous permet de réaliser cela en divisant le bassin de la Seine en sous-bassins versants. En effet, elle se définit par un modèle conceptuel composé de réservoirs connectés représentant les différents compartiments hydrologiques du bassin. Les données utilisées (climatiques et hydrologiques) sont quant à elles au pas de temps journalier et les études d'impact du changement climatique sont généralement également réalisées au pas de temps journalier. Comme nous n'étudions pas ici les extrêmes climatiques présents sur le bassin, le choix du pas de temps journalier pour notre modèle paraît adapté pour cette étude.

2. Méthodologie

2.1. Modélisation hydrologique

Avant de réaliser une modélisation hydrologique du bassin de la Seine, une discrétisation spatiale de celui-ci est nécessaire. En effet, différentes conditions hydro-climatiques sont observées pour les stations hydrométriques du bassin. Nous avons pour cela utilisé le modèle numérique de terrain de la mission SRTM (Werner, 2001 ; Rabus et al., 2003 ; Farr et al., 2007) sur le bassin versant de la Seine et rassemblé les données climatiques afin de diviser le bassin en bassins versants présentant les mêmes conditions hydro-climatiques

2.1.1. Modèle utilisé

Pour cette étude, nous avons sélectionné un modèle pluie-débit conceptuel global développé par INRAE. Un tel modèle prend en entrée des précipitations observées, de l'évapotranspiration potentielle, et a pour but de simuler des débits. Celui-ci fonctionne au pas de temps journalier et est utilisé pour la gestion de la ressource en eau (prévision et simulation des crues et étiages), l'étude de l'impact du changement climatique ou encore le dimensionnement d'ouvrages (barrages). Il s'agit du modèle GR4J (Génie rural à 4 paramètres journalier), défini avec quatre paramètres à optimiser (Perrin et al., 2003), comme présenté sur la Figure 8.

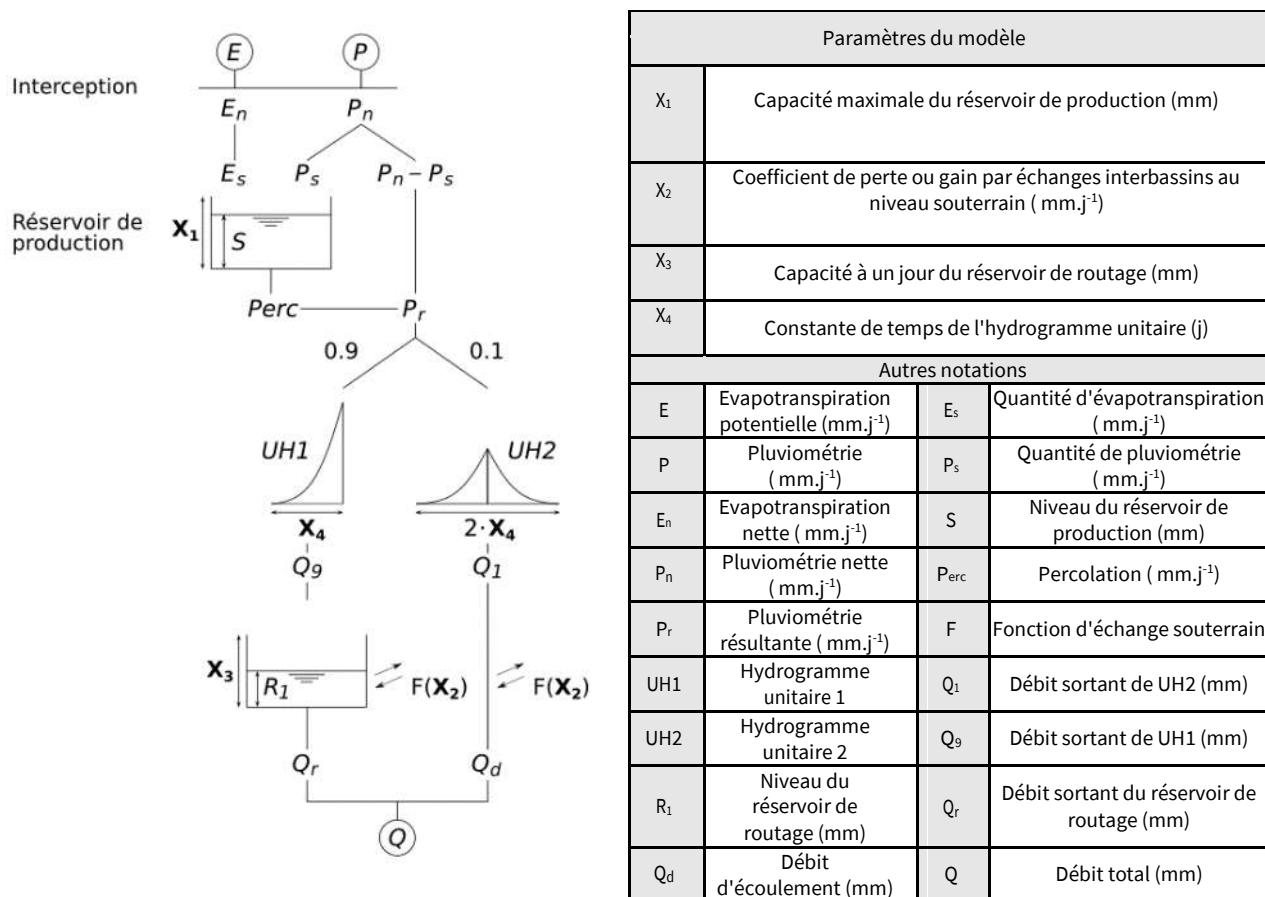


Figure 8. Schéma de la structure du modèle GR4J et présentation de ses paramètres.

Nous utiliserons donc par la suite ce modèle qui est un bon compromis entre résultats fiables et nombre de paramètres suffisant. De plus, comme mentionné précédemment, certains bassins versants voient leur régime hydrologique influencé par la neige. Nous avons donc intégré au modèle GR4J un module de neige, appelé CemaNeige, permettant d'améliorer la modélisation des débits à l'exutoire pour ces bassins versants influencés par la neige. Ce module prend en entrée les données de précipitations et de température de l'air. Il compte également deux paramètres libres à caler (Valéry, 2010) :

- CT_G , le coefficient de pondération (adimensionnel) de l'état thermique du manteau, compris entre 0 et 1 ;
- K_f , le facteur degré-jour (en mm.°C⁻¹.j⁻¹), généralement compris entre 2 et 6 mm.°C⁻¹.j⁻¹.

Nous avons fixé ces deux paramètres à 0.9 et 2.3 pour tous nos bassins, étant donné qu'ils ont été testés et approuvés lors de précédentes études pour la France métropolitaine (Riboust, 2018). Lors de l'étape de calage, ces paramètres ne seront donc pas calés, ce qui évitera des erreurs pour les bassins versants non ou peu influencés par la neige.

Il existe également d'autres modèles tels que les modèles GR5J et GR6J permettant d'améliorer respectivement la fonction d'échange en eau (typiquement pour les stations basées sur une zone avec présence d'une nappe) et la simulation des faibles et forts débits. Cependant, il n'a pas été possible de les traiter dans cette étude, il s'agit par conséquent d'une perspective de poursuite de ces travaux.

2.1.2. Modélisation semi-distribuée

La modélisation semi-distribuée du bassin de la Seine a été réalisée à l'aide du modèle GR4J, du module CemaNeige ainsi qu'en intégrant les quatre lacs réservoirs présents sur le bassin. En effet, la modélisation semi-distribuée permet de prendre en compte l'influence des lacs-réservoirs sur les débits des rivières et induira donc de meilleures performances en calage. De plus, la modélisation semi-distribuée prend en compte chaque bassin intermédiaire comme entité individuelle avec ses propres données de précipitation,

d'évapotranspiration et de débit ce qui permet d'obtenir des résultats plus proches de la réalité (Figure 9). Ainsi, en entrée du modèle semi-distribué, nous pourrions retrouver ces données ajoutées aux informations de géolocalisation des bassins, leur(s) bassin(s) amont et aval, les distances à l'exutoire entre chaque bassin, l'aire de chaque bassin et enfin le modèle GR appliqué à chaque bassin (dans notre cas le modèle utilisé est GR4J couplé au module CemaNeige). De plus, un paramètre supplémentaire interviendra lors de cette étape : la célérité c . En effet, il est nécessaire de prendre en compte les phénomènes d'atténuation et de retard typiques de la propagation en cours d'eau des bassins amont vers l'exutoire du bassin considéré.

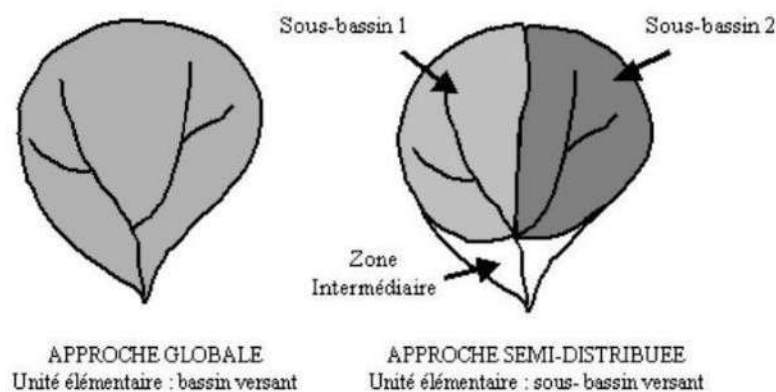
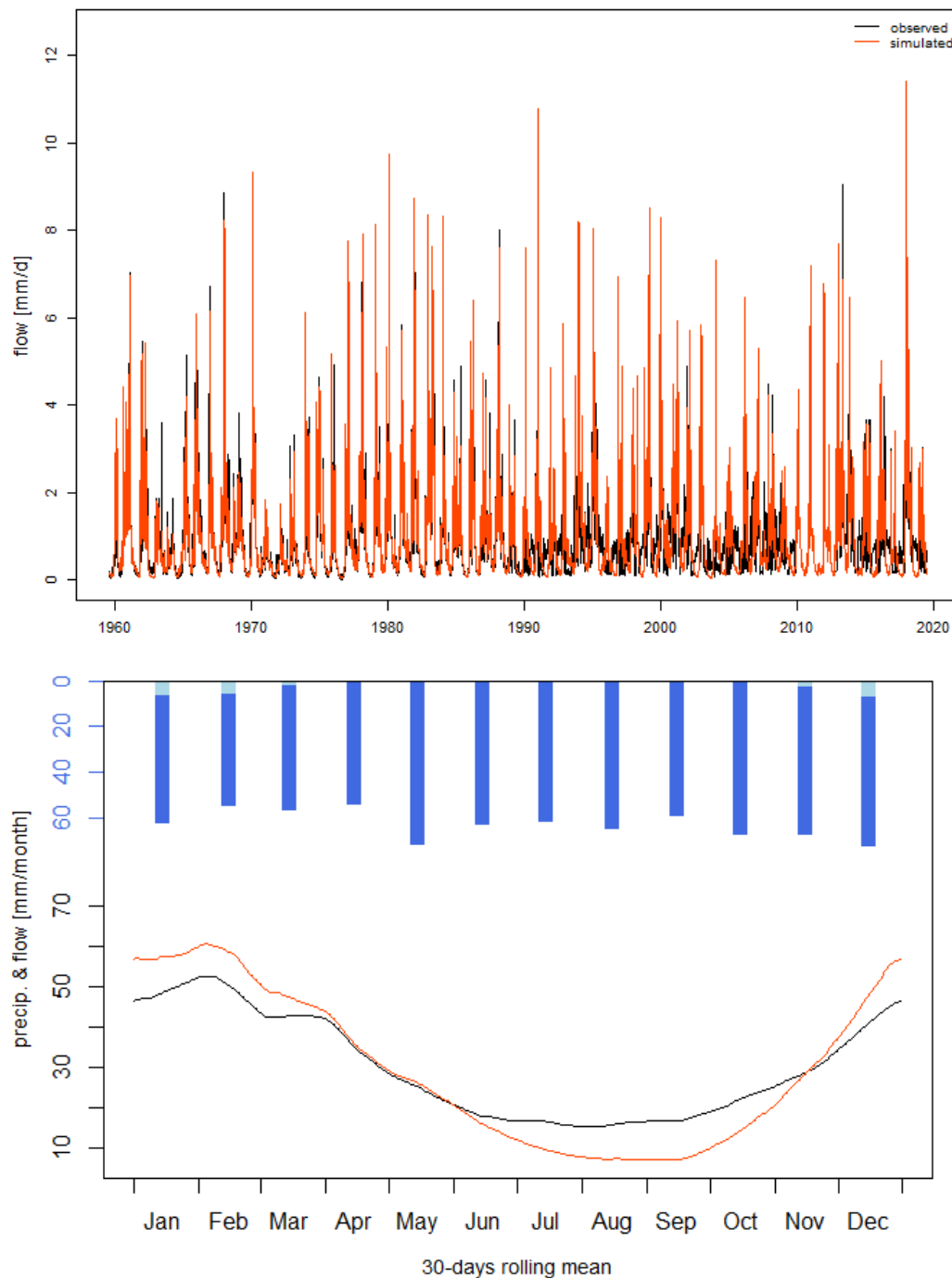


Figure 9. Schémas comparant les modélisations globale et semi-distribuée (Lamblin, 2009).

Voici un exemple illustrant les séries de débits simulés et observés suite à la modélisation avec et sans intégration de l'influence des lacs-réservoirs sur le bassin de la Seine, pour la station H1231010 - L'Aube à Blaincourt-sur-Aube, située juste en aval des lacs Temple et Amance (Figure 10) :



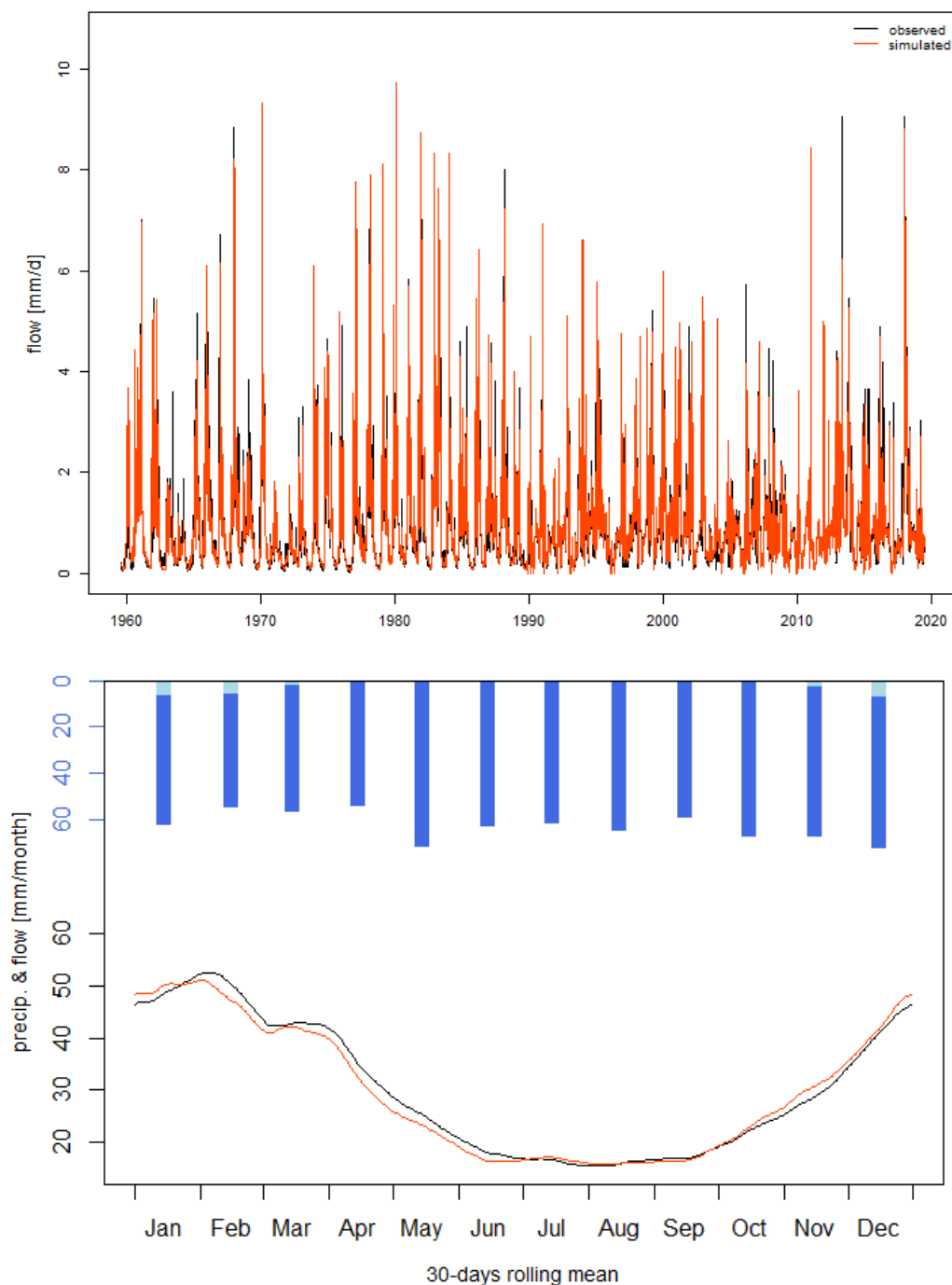


Figure 10. Résultats obtenus suite à la modélisation (deux premières images) et avec (deux images suivantes) intégration de l'influence des lacs-réservoirs pour la station H1231010 - L'Aube à Blaincourt-sur-Aube.

On observe sur la Figure 10 que les séries journalières de débits (images 1 et 3) illustrent le fait que la non prise en compte de l'influence des lacs-réservoirs (image 1) ne permet pas au modèle de simuler les débits de manière réaliste à partir des années 1990, ce qui correspond à la mise en route d'un lac-réservoir en amont de cette station. En revanche, lorsque les influences sont prises en compte (image 3), on observe une bien meilleure corrélation entre débits mesurés et simulés. Cette influence se répercute très clairement sur le graphique de régime des débits (deuxième et quatrième images de la Figure 10), avec une réduction de l'écart entre les courbes de débits simulés (en rouge) et observés (en noir) témoignant de meilleurs résultats pour la modélisation intégrant l'influence des lacs-réservoirs. On voit bien que les réservoirs limitent les débits lors des périodes hivernales et soutiennent les débits estivaux d'étiage. De plus, les valeurs de critère de

performance viennent confirmer ces observations : nous obtenons une valeur de 0.76 pour le KGE (critère de Kling-Gupta, cf. 2.2) pour la modélisation sans prise en compte des lacs-réservoirs contre 0.94 avec prise en compte des lacs-réservoirs.

2.1.3. Utilisation de la régularisation

Nous ferons également intervenir lors de cette modélisation une régularisation des paramètres de calage (de Lavenne et al., 2019). En effet, bien que la prise en compte des lacs-réservoirs devrait déjà permettre d'améliorer les résultats, la régularisation pourrait fournir un jeu de paramètres encore plus optimal pour modéliser le bassin de la Seine.

Le principe général de la régularisation est d'ajouter une contrainte au problème initialement posé afin d'obtenir une solution stable. En effet, il a pu être constaté dans le passé que certains paramètres pouvaient prendre des valeurs aberrantes pour certains bassins versants intermédiaires. Cela est dû au fait que les flux d'eau des bassins versants intermédiaires proviennent de manière plus ou moins importante des bassins versants amont. Lorsque cette contribution du bassin amont devient trop importante, cela pose des difficultés d'identification des paramètres du modèle sur les bassins versants intermédiaires. En effet, pour le modèle, cela signifie que pour déterminer les paramètres de la partie aval du bassin versant, il reste peu de marge de manœuvre par rapport au débit total.

Afin d'améliorer nos résultats, nous avons donc introduit une information dite "*a priori*" lors de l'étape de création des paramètres du modèle GR4J en configuration semi-distribuée et influencée (Figure 11). Pour un bassin aval considéré, cet *a priori* sera représenté par les paramètres du bassin en amont le plus contributif d'après les débits observés sur une période commune, c'est-à-dire celui apportant le débit le plus élevé au bassin aval considéré. Cet *a priori* sera utilisé afin de déterminer un jeu de paramètres qui soit à la fois performant en termes de critère de calage, mais aussi peu éloigné des paramètres *a priori*.

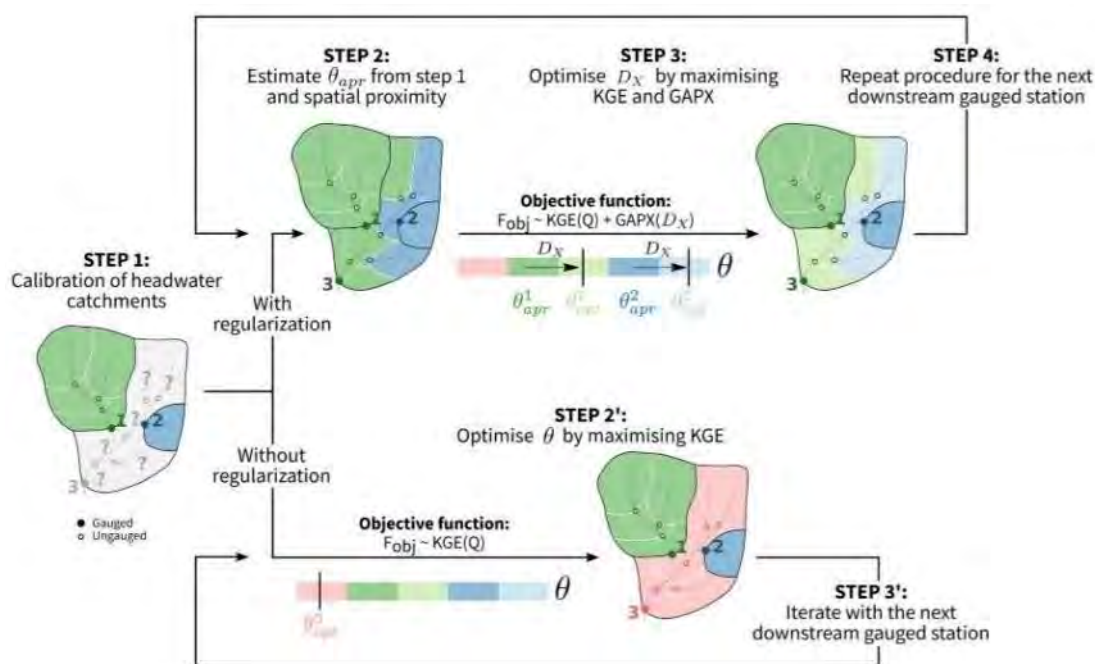


Figure 11. Stratégie de calage afin d'estimer le jeu de paramètres θ de chaque bassin amont inclus dans la zone de contribution du bassin aval. La stratégie proposée (en haut) est comparée à celle sans régularisation (en bas). Les jeux de paramètres *a priori* sont définis à partir du bassin le plus contributif en termes de débit. On notera que dans notre cas, nous n'utilisons pas de bassins non jaugés, ceux-ci ne possèdent donc pas de jeux de paramètres (Figure tirée de de Lavenne et al., 2019).

On introduit dans cette étape de régularisation deux éléments :

- Une fonction de dérive D_X permettant d'estimer le nouveau jeu de paramètres θ par rapport au jeu de paramètres a priori :

$$\theta = f(\theta_{apr}, D_X)$$

- Une contrainte GAPX appliquée au jeu de paramètres optimisé:

$$GAPX(\theta_{opt}) = 1 - \frac{\theta_{apr} - \theta_{opt}}{\theta_{range}} * \max(0, KGE'(\theta_{apr}))$$

Ainsi, la fonction-objectif F_{obj} revient à optimiser à la fois le score de performance KGE' et la contrainte GAPX, grâce à une moyenne pondérée entre ces deux éléments, avec k égal le plus souvent à 0.15 :

$$F_{obj}(\theta_{opt}) = (1 - k) * KGE'(\theta_{opt}) + k * GAPX(\theta_{opt})$$

L'étape de calage se déroule donc suivant les étapes ci-dessous :

- 1- Calage des bassins de tête du bassin de la Seine.
- 2- Le bassin amont le plus contributif est défini comme a priori pour le bassin aval considéré. On affecte alors le jeu de paramètres du bassin à priori en entrée de l'étape de calage du bassin aval.
- 3- Calage du bassin aval : maximisation du critère de calage, et recherche du jeu de paramètres optimal du bassin aval par rapport à l'a priori.
- 4- On répète les étapes précédentes pour le prochain bassin à l'aval.

Voici un exemple de résultats en sortie de modélisation avec et sans l'ajout de la régularisation des paramètres pour la station H5752020 - Le Grand Morin à Montry (Figure 12).

A première vue aucune amélioration significative des résultats n'est observée entre les deux modélisations, autant sur l'hydrogramme que sur le régime des débits. Cependant, en regardant les valeurs de critère de performance, nous remarquons une légère amélioration de la performance suite à la modélisation semi-distribuée avec régularisation des paramètres ($KGE' = 0.851$) comparée à celle sans régularisation des paramètres ($KGE' = 0.846$).

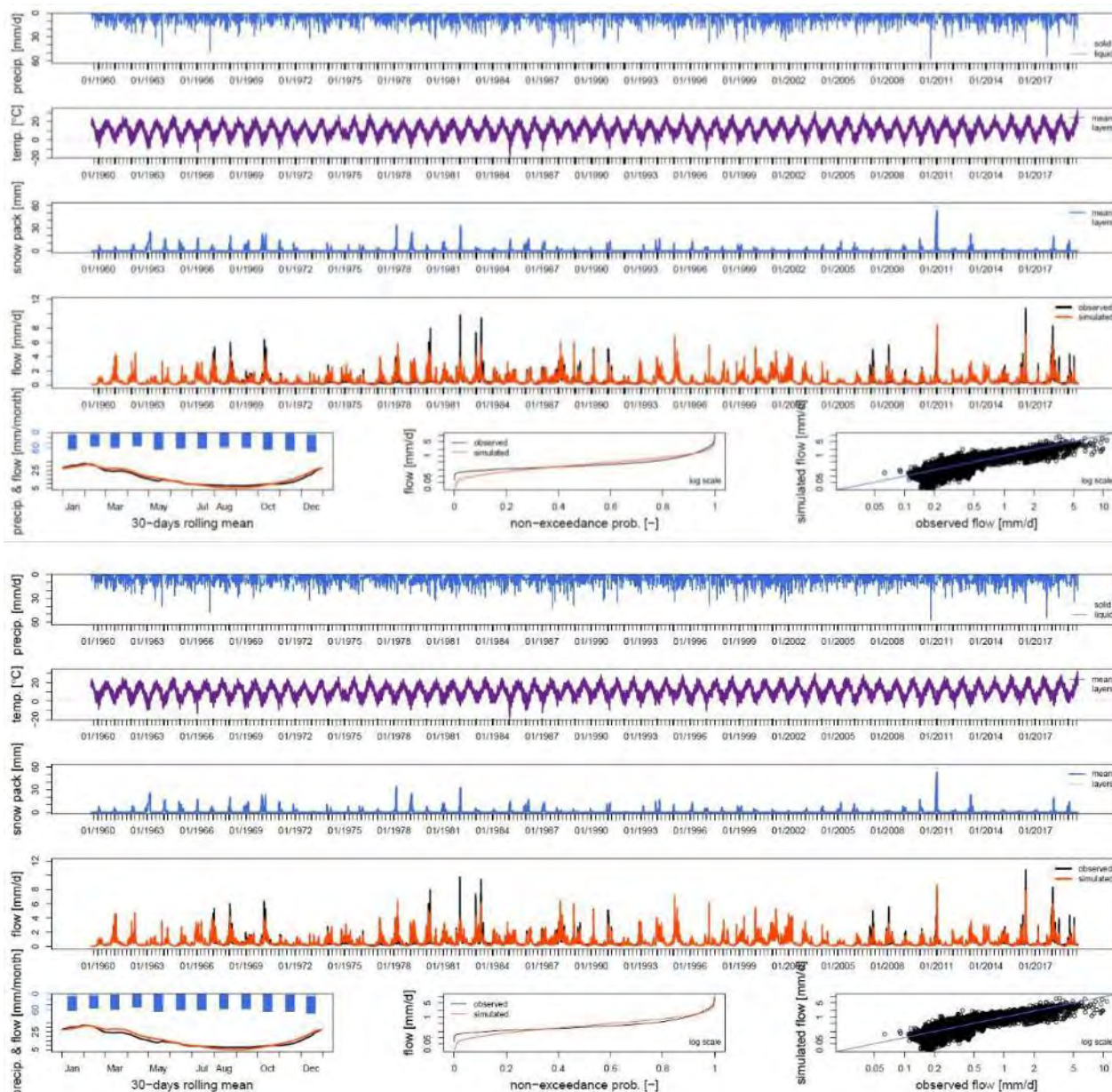


Figure 12. Comparaison des hydrogrammes résultant des modélisations semi-distribuées avec et sans l'ajout de la régularisation des paramètres pour la station H5752020 - Le Grand Morin à Montry (en haut : modélisation semi-distribuée sans régularisation, en bas : modélisation semi-distribuée avec régularisation).

2.1.4. Outils utilisés

Nous avons utilisé dans cette étude plusieurs outils de modélisation :

- Le package airGR (Coron et al., 2017, 2020) : il contient les modèles hydrologiques et de neige, les outils de calage ainsi que les outils permettant de réaliser la modélisation semi-distribuée ;
- Le package airGRIwrm (Dorchies, 2021) : il fait usage d'airGR et propose une solution ergonomique afin d'inclure des usages de l'eau dans une modélisation semi-distribuée de manière automatisée. Il fournit ainsi des outils pour la gestion de la ressource en eau et dans notre cas des outils d'étude des usages des lacs-réservoirs ;
- Le logiciel R : il permet la manipulation de données, la réalisation de calculs, le tracé de graphes et de modèles (R Core Team (2017)) ;
- Le logiciel ArcGIS : il permet le tracé de cartes géographiques (Redlands, 2011) ;
- Le package mapsf (Giraud, 2021) : il permet la réalisation de cartes géographiques sur le logiciel R.

2.2. Critère de calage retenu

Le calage d'un modèle permet l'ajustement de ses paramètres aux spécificités du site, dans notre cas aux spécificités de chaque station hydrologique. Il s'agit donc de déterminer les valeurs de ses paramètres (X1 à X4 dans le cadre de GR4J) lui permettant d'obtenir les meilleures performances selon le critère adopté, au regard de débits observés.

Pour nos modélisations, nous avons choisi l'utilisation du critère de Kling-Gupta modifié (KGE') (Kling et al., 2012). En effet, ce critère est largement utilisé à l'INRAE.

$$KGE' = 1 - \sqrt{(1 - r)^2 + (\gamma - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Ce dernier utilise la distance euclidienne entre les valeurs prises par les trois composantes suivantes :

- γ : rapport entre les coefficients de variation des événements simulés et observés (notés CV_{sim} et CV_{ob}) ou encore le quotient du rapport entre l'écart-type σ et la moyenne μ pour les événements observés ($\frac{\sigma_{obs}}{\mu_{obs}}$) et simulés ($\frac{\sigma_{sim}}{\mu_{sim}}$) :

$$\gamma = \frac{\frac{\sigma_{sim}}{\mu_{sim}}}{\frac{\sigma_{obs}}{\mu_{obs}}} = \frac{CV_{sim}}{CV_{obs}}$$

- β : erreur de bilan normée

$$\beta = \frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$$

- r : coefficient de corrélation linéaire entre débits observés (Q_i^{obs}) et simulés (Q_i^{sim}), n étant le nombre de jours sur la période considérée et i un jour parmi n .

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \mu_{obs})(Q_i^{sim} - \mu_{sim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{obs} - \mu_{obs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_i^{sim} - \mu_{sim})^2}}$$

L'objectif est alors de minimiser la distance euclidienne (la faire tendre vers 0) afin de maximiser le KGE' (le faire tendre vers 1, la meilleure valeur de performance possible).

Afin de donner un poids relativement équivalent aux erreurs commises sur les forts et faibles débits, nous avons choisi d'utiliser une transformation de type racine carrée sur les séries temporelles des débits observés et simulés (Santos et al., 2018).

De plus, airGRiwrn repose sur l'intégration de prises et de restitutions d'eau dans les bassins versants étudiés. Dans notre cas, nous utiliserons les valeurs mesurées par l'EPTB Seine Grands Lacs sur une période passée afin d'intégrer ces lacs-réservoirs. Une étude d'impact du changement climatique futur nécessiterait l'utilisation d'une fonction de gestion des lacs-réservoirs sur des conditions futures, fonctionnalité qui est utilisable dans airGRiwrn mais n'a pas été considérée dans cette étude. En effet, cela représente une étude à part entière, et sera l'objet du projet IN-WOP actuellement en cours.

2.3. Bases de données

Nous utiliserons quatre bases de données afin de constituer un jeu de stations hydrologiques exploitables conséquent pour notre étude.

2.3.1. Données climatiques observées

Les données climatiques sont issues de la base de données SAFRAN de Météo-France (Vidal et al., 2010). Elles résultent d'une réanalyse, mélangeant observations et sorties de modèle, couvrant le territoire métropolitain avec un maillage de 8 x 8 km² (Annexe 1). Ce produit fournit des chroniques climatiques journalières sur une période allant du 1er août 1958 au 31 juillet 2019 qui ont été agrégées sur les sous-bassins versants de la zone d'étude (Delaigue et al., 2020). Dans notre étude, nous utiliserons les données de précipitation, de température de l'air et d'évapotranspiration potentielle. Cette dernière a été calculée avec la

formule d'Oudin (Oudin et al., 2005) qui utilise comme seule donnée d'entrée la température de l'air.

2.3.2. Données hydrologiques

Base de données HYDRO

Cette base de données est issue de la Banque HYDRO fournissant des séries de débits observés à différents pas de temps (Leleu et al., 2014) et gérées par le SCHAPI (Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations). Ces informations sont recueillies par les 3000 stations hydrométriques constituant le réseau de mesure français, géré par les unités d'hydrométrie au sein des Directions Régionales de l'Environnement et de l'Aménagement du Logement (DREAL). Chaque station hydrométrique est repérée par un code et des coordonnées spatiales précises. Les données climatiques étant fournies au pas de temps journalier sur une période allant du 1er août 1958 au 31 juillet 2019, nous utiliserons donc les données de débits observés au pas de temps journalier et sur cette même période, pour un ensemble initial de 466 stations (Delaigue et al., 2020) (Figure 14).

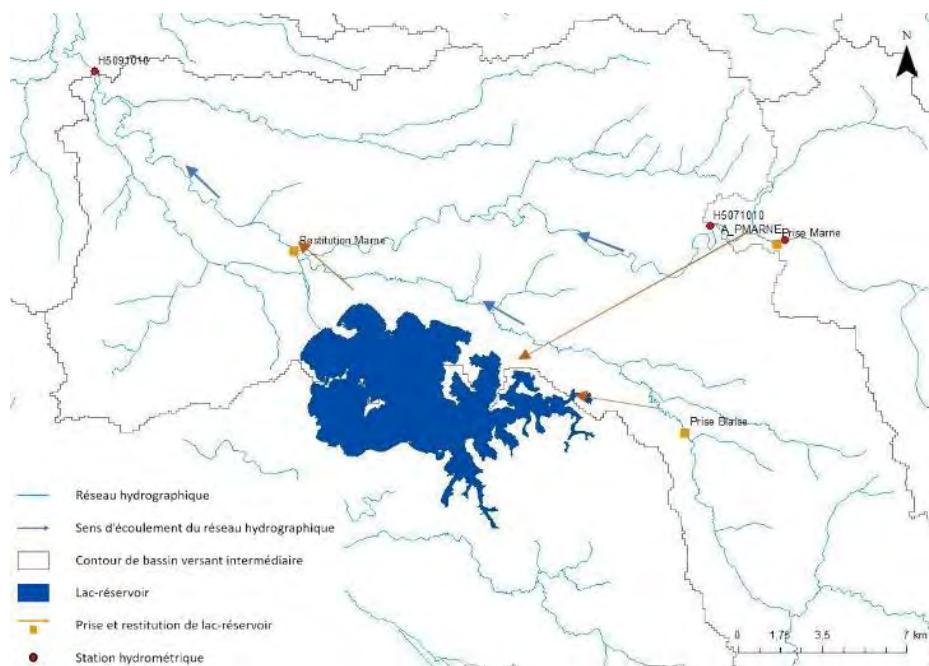
Base de données de l'EPTB Seine Grands Lacs

Dans le cadre du projet ClimAware (Dorchies et al., 2014, 2016), un certain nombre de stations de contrôle, absentes de la Banque HYDRO, a été défini permettant de calculer la performance de gestion des crues et des étiages. Il serait donc intéressant d'ajouter ces points de contrôle à notre étude. La plupart d'entre eux figurant déjà dans notre jeu de données, seules les séries de débits observés de trois stations ont été ajoutées à celui-ci : l'Aube à Trannes (TRANN_01), l'Yonne à Chaumard (CHAUM_07) et l'amont de la prise Marne (A_PMARNE).

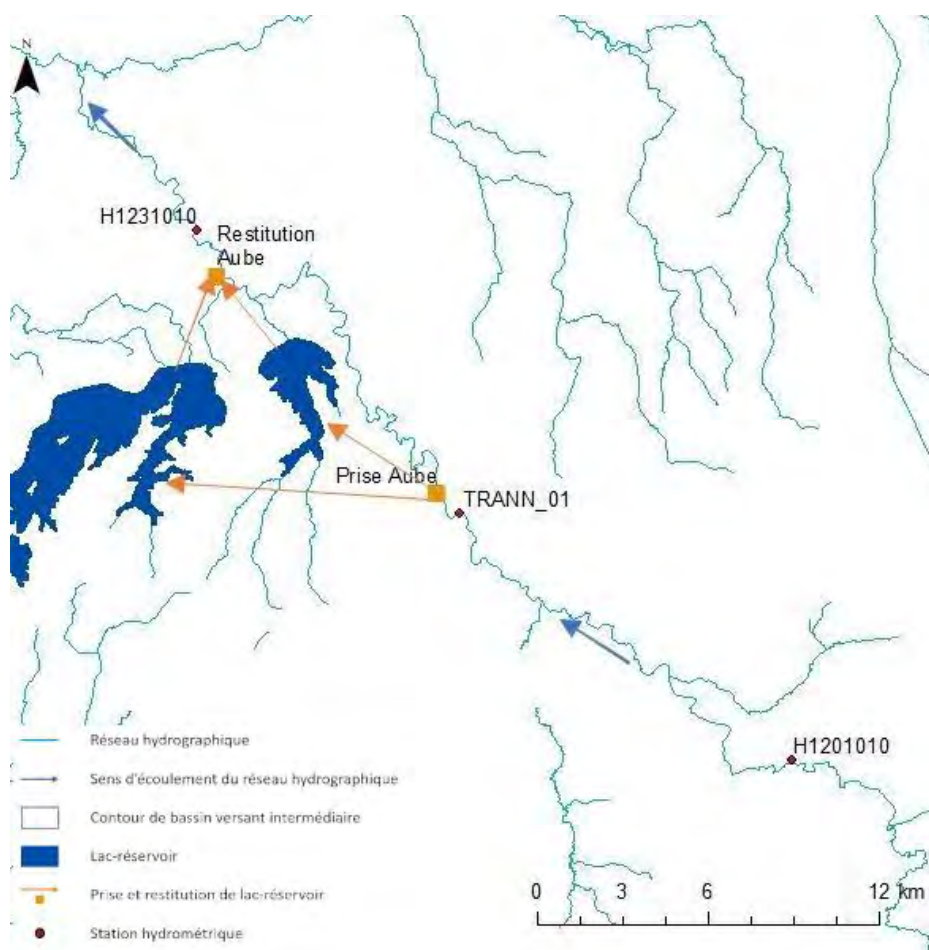
Données de gestion des lacs-réservoirs

Les quatre lacs-réservoirs du bassin de la Seine, placés en dérivation de leur rivière respective, sauf pour le lac de Pannecière placé au fil de l'eau, sont divisés en deux types de connexions : en amont, la connexion de prise, et en aval, la connexion de restitution. Les connexions de prise permettent par exemple de connaître le débit prélevé en amont par le réservoir tandis que les connexions de restitution indiquent le débit sortant directement du réservoir. Le cas du lac Pannecière, placé au fil de l'eau, est quant à lui particulier car les connexions de prise et de restitution sont situées au même emplacement. Ce lac étant situé à l'exutoire du bassin représenté par la station CHAUM_07 - L'Yonne à Chaumard, nous avons pris les données de débits observés de cette station comme données de prise pour le réservoir.

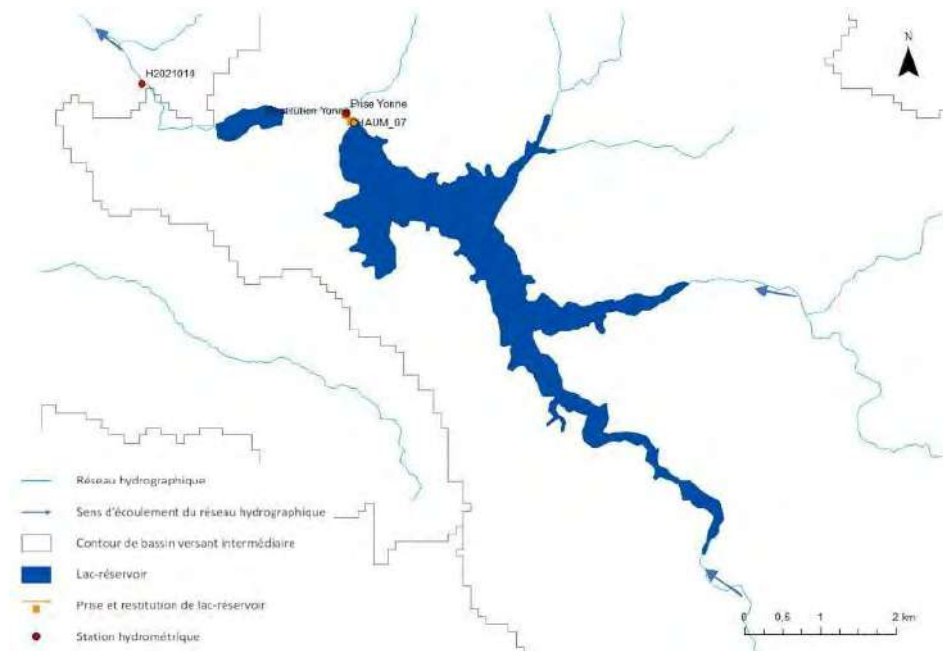
Afin d'intégrer ces lacs-réservoirs à notre modèle, nous avons donc eu recours aux données de débits de prise et de restitution de chaque lac (Figure 13) fournies sous forme de fichiers d'exploitation par l'EPTB Seine Grands Lacs (Bizouard, communication personnelle, 2021). Elles permettront par la suite de simuler les conditions de débit des stations en aval de chaque lac-réservoir se rapprochant au mieux de la réalité et nous verrons par la suite comment ces lacs-réservoirs ont été représentés dans le modèle du bassin versant de la Seine utilisé.



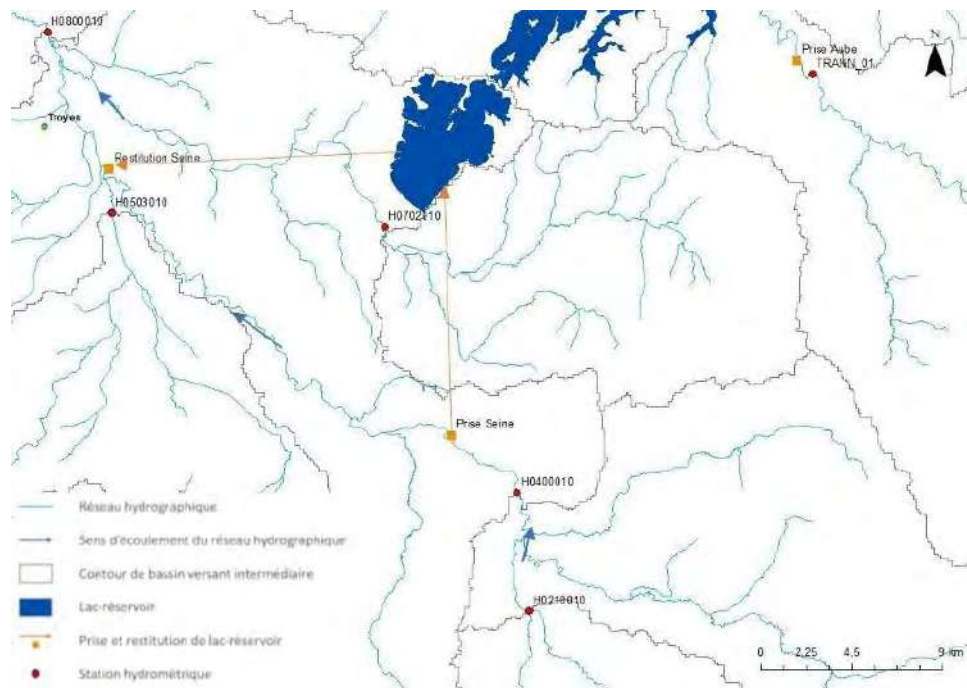
Lac du Der-Chantecoq



Lacs Temple et Amance



Lac de Pannecière



Lac d'Orient

Figure 13. Situation, prise(s) et restitution des quatre lacs-réservoirs du bassin de la Seine.

3. Résultats

Compte tenu des différents projets présentés ci-dessus et de la disponibilité des données, nous limiterons notre zone d'étude de l'amont du bassin de la Seine à la station H8100021 - "La Seine à Vernon" (la fiche de synthèse graphique de cette station est disponible en Annexe 1)².

De plus, bien que des méthodes d'estimation de débits en des points non jaugés des cours d'eau existent, les données à notre disposition proviennent de stations jaugées et en nombre largement suffisant. Nous ne réaliserons donc des simulations hydrologiques qu'au droit des stations hydrologiques jaugées sélectionnées sur le bassin de la Seine.

3.1. Sélection des stations

Plusieurs étapes de sélection de stations de notre jeu de données initial seront effectuées dans cette étude. Les raisons expliquant ces futurs choix sont les suivantes :

- Pour une station donnée, nous ne disposons pas forcément de données de débits observés sur des chroniques suffisamment longues. En effet, les données climatiques sont disponibles sur la période décrite plus haut sans lacune, car il s'agit d'une réanalyse, ce qui n'est pas le cas des données de débits. Les stations ont ainsi pu être créées ou bien disparaître pendant une certaine période de temps, ou bien tomber en panne ;
- Le bassin versant étudié répond au critère de similarité : lorsque la surface de deux bassins se chevauchent à plus de 80 %, un seul des deux bassins sera conservé pour la suite de l'étude.

Ces deux critères, s'ils ne sont pas respectés, induisent une difficulté de paramétrage non négligeable lors de l'étape de la modélisation hydrologique semi-distribuée et les stations correspondantes doivent donc être écartées de la sélection.

3.1.1. Stations non considérées

D'après les données recueillies depuis la base de données d'INRAE (Delaigue et al., 2020), nous disposons de 466 stations hydrologiques situées sur le bassin de la Seine jusqu'à son exutoire final au Havre (Figure 14).

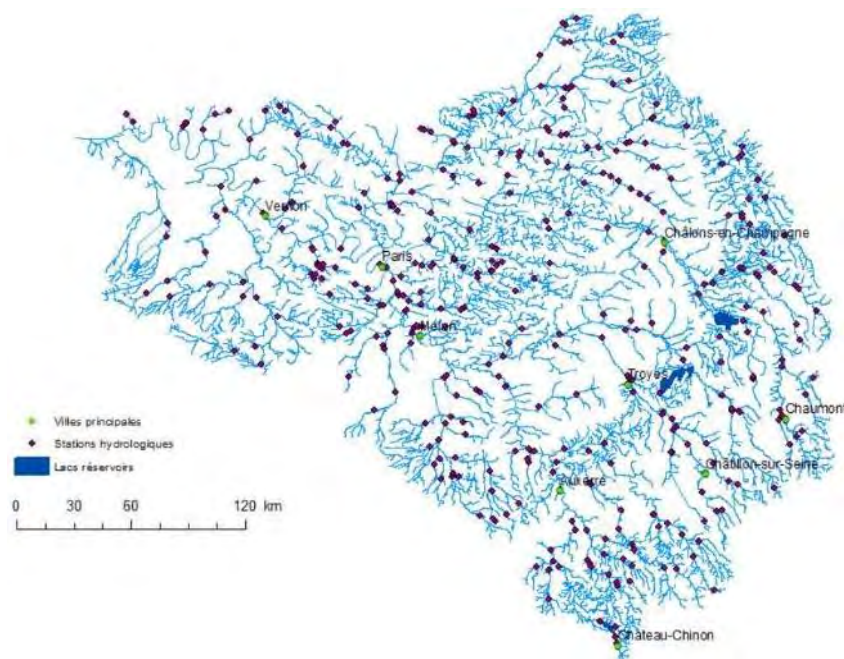


Figure 14. Localisation des 466 stations hydrologiques présentes sur le bassin de la Seine.

² les fiches de l'ensemble des stations utilisées pour cette étude sont accessibles à l'adresse suivante : <https://webgr.inrae.fr/activites/base-de-donnees/>

Cependant, certaines stations hydrologiques ne remplissent pas deux conditions essentielles pour la suite de notre étude :

- Présence de données de débits observés sur la période d'étude (du 1^{er} août 1958 au 31 juillet 2019) ;
- Localisation des stations dans la zone d'étude : à l'amont du bassin de la Seine à Vernon.

Au total, 91 stations ne remplissent pas l'une de ces deux conditions et seront par conséquent retirées du jeu de données initial (Annexe 2). Nous poursuivrons ainsi notre sélection avec un ensemble de 375 stations hydrologiques.

3.1.2. Disponibilité des données

En regardant plus en détail les chroniques de débits observés de chaque station hydrologique du bassin, nous pouvons également remarquer la présence de périodes de lacunes plus ou moins importantes où les données de débits observés sont absentes (Figure 15). Il paraît donc nécessaire d'étudier la disponibilité des données de débits observés pour chaque station hydrologique. Voici tout d'abord un exemple de graphique indiquant la disponibilité des données de débits observés pour un échantillon de 30 stations hydrologiques parmi les 375 retenues précédemment (Figure 15).

On peut en effet remarquer la présence d'une ou plusieurs lacunes (espacement entre deux bandes bleues) pour une station hydrologique donnée, traduisant l'absence de données de débits observés sur ces périodes. Afin de mener à bien notre étude, il est important de disposer d'une disponibilité de données conséquente.

Première étape :

Nous allons donc tenter de définir une période de disponibilité de données adéquate en deux étapes :

- Fusion des données de débits observés de stations hydrologiques lorsque cela est possible.
- Étude de la répartition spatiale des stations hydrologiques ayant la même période de disponibilité de données.

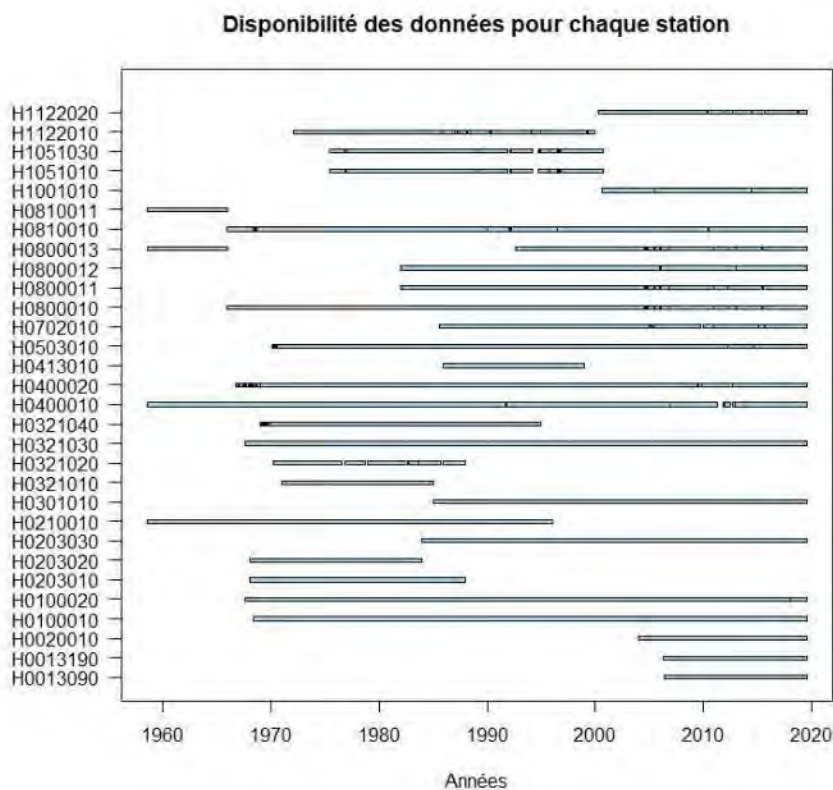


Figure 15. Disponibilité des données de débits observés au pas de temps journalier sur un échantillon de 30 stations hydrologiques.

Nous pouvons tout d'abord remarquer que certaines périodes de données semblent pouvoir être regroupées. C'est le cas par exemple des données des stations H0810010 et H0810011 sur la Figure 15. En réalité, il existe parmi notre ensemble de stations hydrologiques des stations dites "doublons". Ces dernières constituent deux stations étant proches géographiquement. Il peut s'agir de situations telles que la modernisation de l'appareillage d'une station, du remplacement d'une station suite à une mise hors service lors d'une crue, etc. Ainsi, ces deux stations possèdent un code différent mais fournissent des séries de débits observés pour un même lieu géographique. Il est donc possible de les regrouper afin d'obtenir une plus grande disponibilité de données. Parmi notre jeu de stations, nous pouvons ainsi repérer 98 stations en tant que potentiels doublons.

Pourtant, en regardant plus en détail les chroniques des débits observés de ces doublons, il s'avère que certaines stations que l'on pensait être des doublons sont en réalité des faux doublons (les stations ne sont pas assez proches pour être qualifiées de doublons) ou bien sont effectivement des doublons mais la fusion de leurs données ne présente pas grand intérêt. Ces stations sont donc replacées dans le jeu de stations initial en tant que stations individuelles. Finalement, seules 76 stations possèdent un doublon auquel elles peuvent être fusionnées. Notre jeu de données est donc constitué de $375 - 76 + 38 = 337$ stations.

Afin de mener à bien la fusion des données des stations doublons, il est important d'identifier les périodes de données communes ou non entre ces stations et si les périodes communes présentent les mêmes valeurs de débits observés (Figure 16). En effet, certains doublons possèdent une période de disponibilité de données commune mais avec des valeurs de débits observés sensiblement différentes. Lors du remplacement d'une station, il arrive que l'ancienne et la nouvelle station cohabitent sur une période commune avant que l'ancienne soit définitivement remplacée. Pour ces quelques cas, nous calculerons une moyenne pondérée des débits sur la période de disponibilité commune. Cela permettra de réduire l'impact de cette fusion sur l'hydrogramme résultant du regroupement de deux stations doublons. Cette fusion des stations doublons permet donc de regrouper les 76 stations initiales en 38 nouvelles stations avec une plus grande période de disponibilité des données (Figure 17).

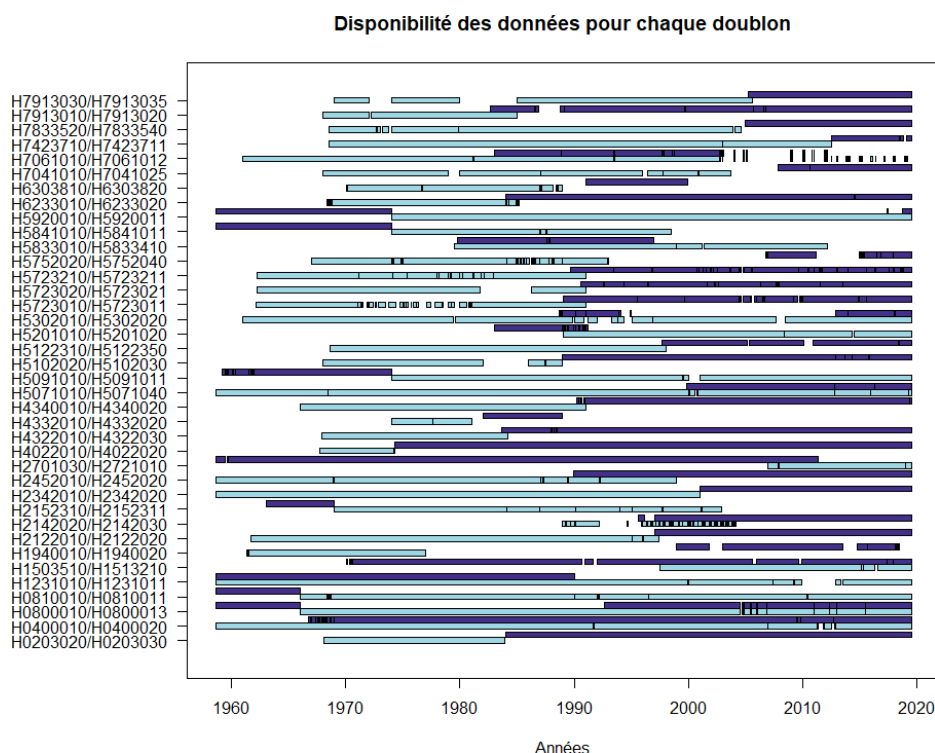


Figure 16. Disponibilité des données des débits observés des stations doublons avant l'étape de fusion. En bleu clair : disponibilité des données d'une des stations doublons; en bleu foncé : disponibilité des données de l'autre station doublon.

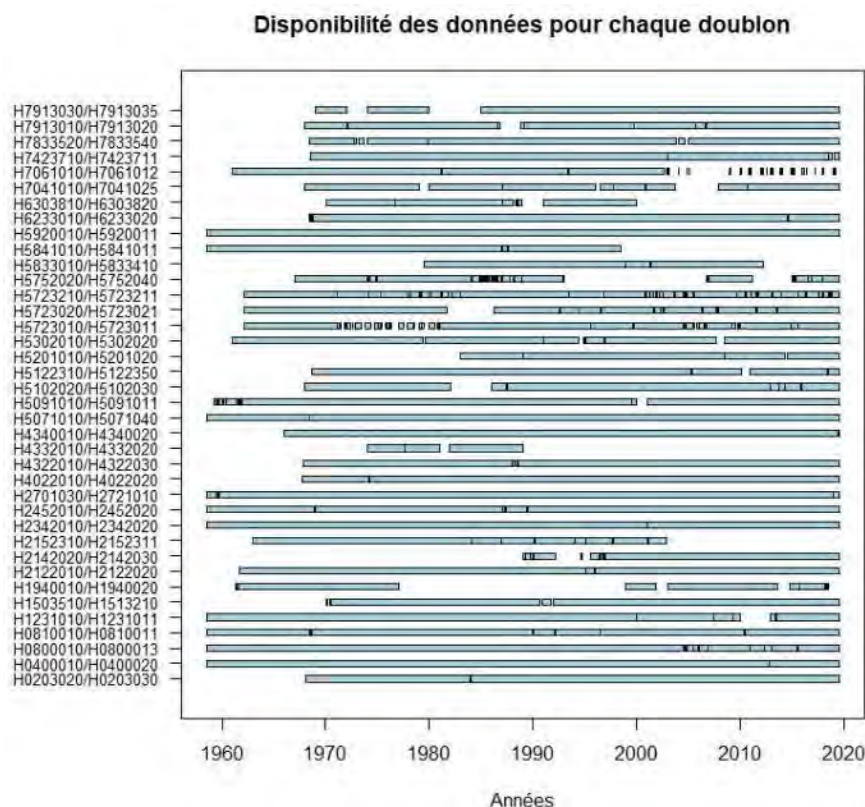


Figure 17. Disponibilité des données des stations hydrologiques doublons après l'étape de fusion.

Seconde étape :

Elle consiste à étudier la répartition spatiale des stations hydrologiques ayant la même période de disponibilité de données. Comme vu précédemment, les données de débits observés sont disponibles sur la période de temps allant du 1^{er} août 1958 au 31 juillet 2019. La disponibilité des données peut ainsi être comprise entre 0 (exclu) et 61 ans. En choisissant un pas de temps de 10 ans, on réalise des cartes pour les disponibilités suivantes, en les récupérant grâce aux précédents graphes de disponibilité des données (Figures 15 à 17). Ainsi, nous pouvons évaluer le nombre de stations suivant la période de disponibilité choisie (Figure 18).

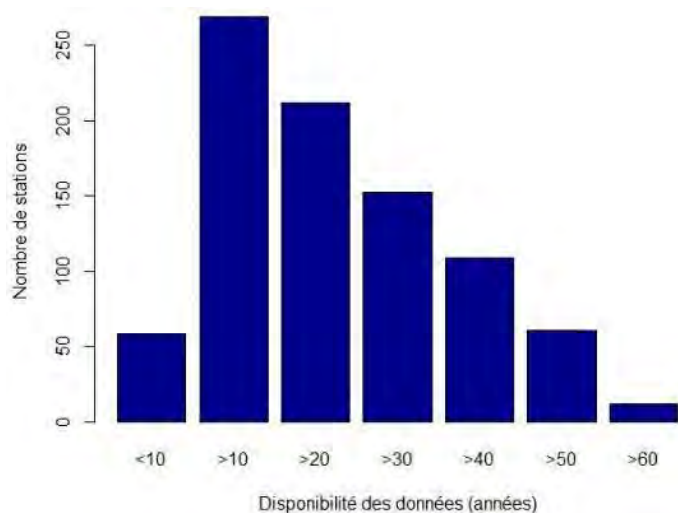


Figure 18. Distribution de la disponibilité des données des stations hydrologiques du bassin.

En traçant des cartes de disponibilité des données, il est donc possible d'effectuer une comparaison de nos données selon deux critères :

- les stations sont trop ou pas assez nombreuses sur l'ensemble du bassin ;
- les stations ne sont pas réparties de manière homogène sur l'ensemble du bassin.

Cela nous a amenés à ne conserver que la carte représentant une disponibilité des données supérieure ou égale à 30 ans, qui semble être un bon compromis en termes de nombre de stations présentes sur le bassin. Nous travaillerons ainsi pour la suite avec ce nouveau jeu de données de 153 stations (Figure 19).

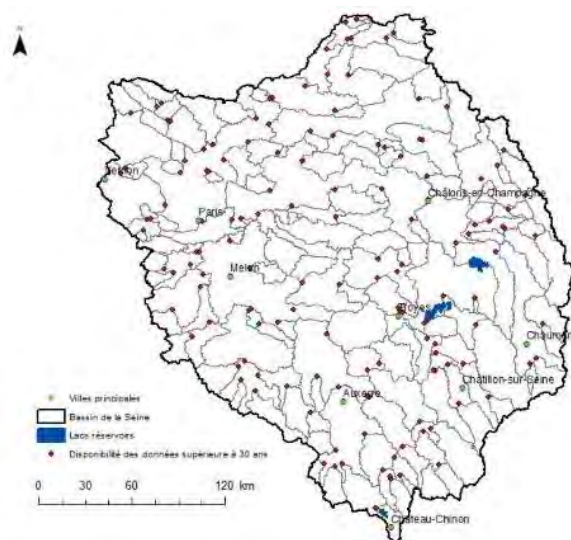


Figure 19. Carte des stations ayant plus de 30 ans de données de débits observés.

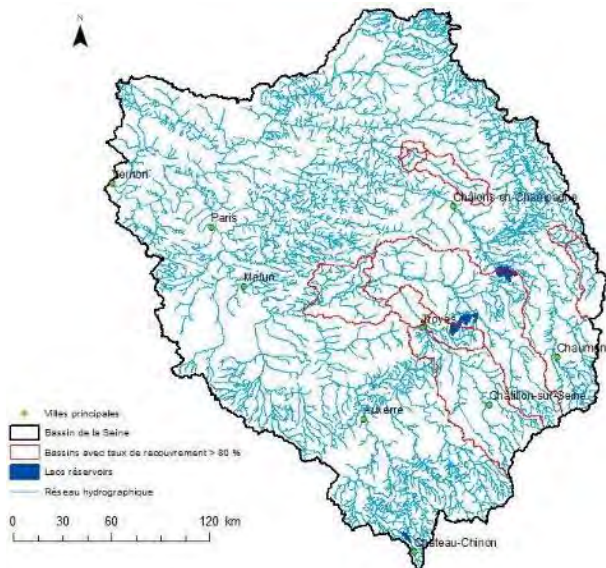


Figure 20. Visualisation des bassins avec un taux de recouvrement supérieur à 80 %.

3.1.3. Recouvrement des sous-bassins versants

L'étude des superficies de chaque sous-bassin montre que certains d'entre eux semblent presque entièrement se chevaucher. Il pourrait donc être judicieux de ne garder qu'un sous-bassin représentatif de l'ensemble. Pour cela, un algorithme permettant de calculer le taux de recouvrement de chaque sous-bassin les uns par rapport aux autres a été établi. En fixant un seuil minimal à 80 % de chevauchement, les sous-bassins ayant des superficies très proches seront ainsi regroupés (Figure 20).

Nous observons un total de quatre groupes de sous-bassins (l'ensemble des bassins répartis autour de la ville de Troyes et de Châtillon-sur-Seine forme en réalité deux groupes de sous-bassins au vu des valeurs des superficies correspondantes) (Tableau 3). Chaque groupe a ainsi été traité individuellement afin de déterminer les bassins à conserver pour la suite de nos travaux. La sélection du sous-bassin s'est basée sur trois critères :

- Analyse de la disponibilité des données des séries de débits observés ;
- Analyse de la performance de la modélisation hydrologique en conditions naturelles et en calage ;
- Analyse de la répartition spatiale des sous-bassins.

Après analyse des caractéristiques de chaque sous-bassin (Tableau 3), il a également été nécessaire d'identifier parmi ces bassins ceux ayant été étudiés lors du projet ClimAware. En effet, notre étude étant dans la continuité de ce projet, il sera intéressant par la suite de comparer les nouvelles simulations à celles obtenues au cours du projet ClimAware.

Tableau 3. Comparaison des caractéristiques de chaque sous-bassin présentant un taux de recouvrement supérieur à 80 %. Le KGE est obtenu en évaluant la performance d'un modèle GR4J global ne prenant pas en compte d'influence anthropique.

Code station	Nom station	Disponibilité (années)	Superficie (km²)	Critère de performance (KGE')
Groupe 1				
H0800010 (après fusion)	La Seine [totale] à Troyes (après création grands lacs)	> 60	3499	0.82
H0800012	La Seine [partielle] à Troyes (Tauxelles)	37	3028	0.75
H0810010 (après fusion)	La Seine à Méry-sur-seine (après création grands lacs)	> 60	3899	0.84
Groupe 2				
H1700010	La Seine à Pont-sur-Seine	40	8855	0.90
H1940010 (après fusion)	La Seine à Bazoches-lès-Bray (barrage de la Grande Bosse)	37	10 176	0.94
Groupe 3				
H5122310 (après fusion)	L'Ornain à Fains-Véel	50	824	0.94
H5122340	L'Ornain à Tronville-en-Barrois	30	673	0.94
Groupe 4				
H6402030	La Vesle à Puisieulx	36	607	0.94
H6412010	La Vesle à Saint-Brice-Courcelles	41	736	0.90
H6412020	La Vesle à Châlons-sur-Vesle	38	827.5	0.91

Groupe 1 :

Ce groupe présente une station (H0810010 - La Seine à Méry-sur-Seine) utilisée pour le projet ClimAware et donc ne pouvant pas être éliminée. La station H0800010 - La Seine [totale] à Troyes possède quant à elle plus de 60 ans de disponibilité de données et une valeur de KGE' supérieure à 0.8 signifiant une simulation de très bonne qualité (cf Jeantet et al., 2021). Il serait donc intéressant de la conserver également dans notre jeu de stations.

Groupe 2 :

Ce groupe de deux stations présente également une station (H1700010 - La Seine à Pont-sur-Seine) utilisée pour le projet ClimAware que nous garderons donc dans cette étude. Cependant, la seconde station est située sur une zone où des recherches sont menées depuis quelques années, dans le cadre du projet de la Bassée.

En effet, ce dernier a pour double objectif d'étudier l'opportunité de diminuer les niveaux de la Seine en crue grâce à la mise en eau de cette zone et la valorisation écologique du territoire de la Bassée aval. Il pourrait donc être intéressant de garder cette station hydrologique dans notre étude afin de pouvoir apporter des données à ce projet si besoin.

Groupe 3 :

La répartition spatiale et la valeur du critère KGE' ne nous permettent pas de départager ces deux stations. Cependant, la station H5122310 - L'Ornain à Fains-Véel possède une disponibilité des données supérieure de 20 ans à celle de la station H5122340 - L'Ornain à Tronville-en-Barrois. Nous garderons donc pour la suite la station ayant la plus grande disponibilité de données.

Groupe 4 :

La disponibilité des données est équivalente entre les trois stations. Quant à la répartition spatiale, nous pouvons observer que le sous-bassin correspondant à H6402030 - La Vesle à Puisieulx est légèrement plus grand. Si nous nous intéressons aux performances, la meilleure valeur pour le critère KGE' est également obtenue par la station H6402030 - La Vesle à Puisieulx. C'est donc cette dernière que nous garderons pour la suite de notre étude.

3.1.4. Première modélisation

Enfin, une dernière étape consiste à effectuer une première modélisation globale afin d'écarter les éventuelles stations hydrologiques ne présentant pas de grand intérêt pour notre étude. Par exemple, la Figure 21 présente de très faibles débits observés pour la station H4033010 - La Juine à Méréville (bassin versant de 210.4 km²), compris entre 0.2 mm.j⁻¹ et 0.8 mm.j⁻¹. Cette station possède par ailleurs un régime peu ou non influencé par des prélèvements humains. Sa contribution d'un point de vue hydrologique est donc trop faible pour avoir un réel impact dans notre modélisation. Nous ne la conserverons pas dans notre jeu de données.

Ainsi, neuf stations parmi notre jeu de données présentent une faible contribution au réseau hydrographique du bassin de la Seine et seront donc retirées de notre jeu de données.

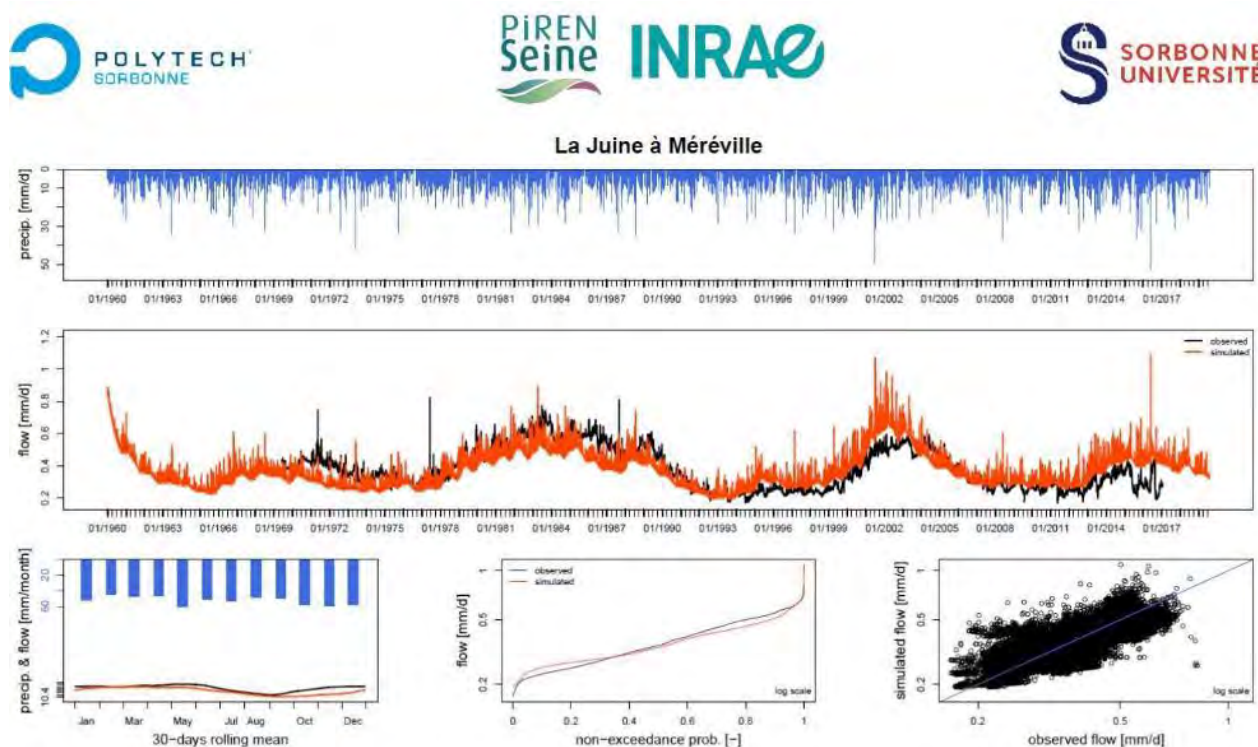


Figure 21. Exemple de station hydrologique présentant des faibles débits.

3.1.5. Synthèse

Au total, 323 stations n'ont pas été retenues suivant les critères établis précédemment (somme de la colonne « Stations ne répondant pas au critère de sélection » dans le Tableau 4, sans oublier d'ajouter le nombre de stations disparaissant avec la fusion des doublons, soit 38 stations). Le Tableau 4 ci-dessous récapitule les différentes étapes de sélection des stations hydrologiques et une carte synthétique de la constitution du jeu de stations final est disponible en Annexe 2.

Tableau 4. Synthèse des étapes de sélection des stations hydrologiques.

Étapes de sélection	Stations concernées	Stations éliminées	Stations conservées
Présence de données de débits observés	466	79	387
Stations situées en amont de Vernon	387	12	375
Stations doublons	76	38 (fusionnées)	337
Disponibilité des données > 30 ans	337	180	157
Taux de recouvrement des bassins < 80 %	157	4	153
Première modélisation globale	153	10	143

Nous disposons donc d'un jeu de données final constitué de 143 bassins versants associés à 143 stations hydrologiques placées à l'exutoire de chaque bassin, représentées sur la Figure 22.

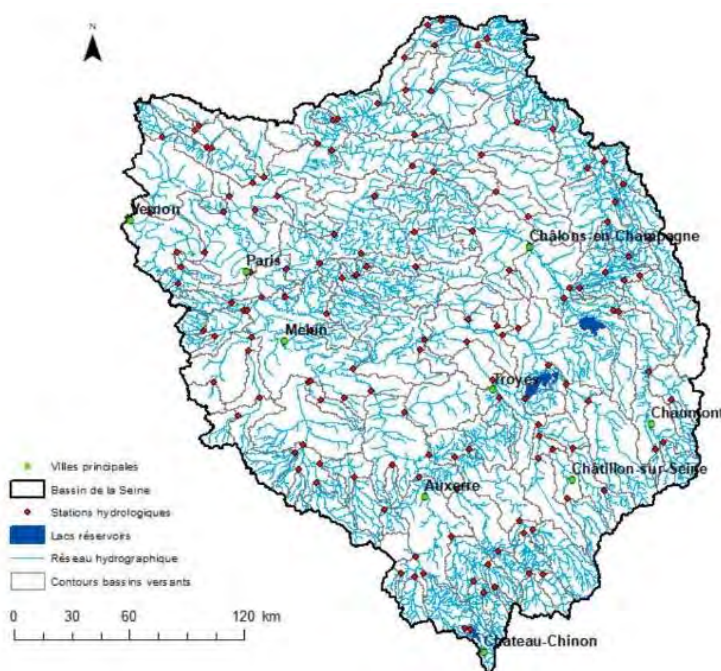


Figure 22. Carte de situation finale des 143 stations hydrologiques sur le bassin de la Seine.

3.2. Résultats de la modélisation

Nous voulons dans un premier temps comparer les résultats des modélisations globale et semi-distribuée, afin d'analyser l'apport de la semi-distribution et de vérifier la bonne implémentation d'airGRiwm sur le bassin versant de la Seine. Pour cela, nous commençons par différencier les bassins de tête (surfaces drainées par les premiers cours d'eau du réseau hydrographique du bassin de la Seine) et les bassins en aval (Figure 23).

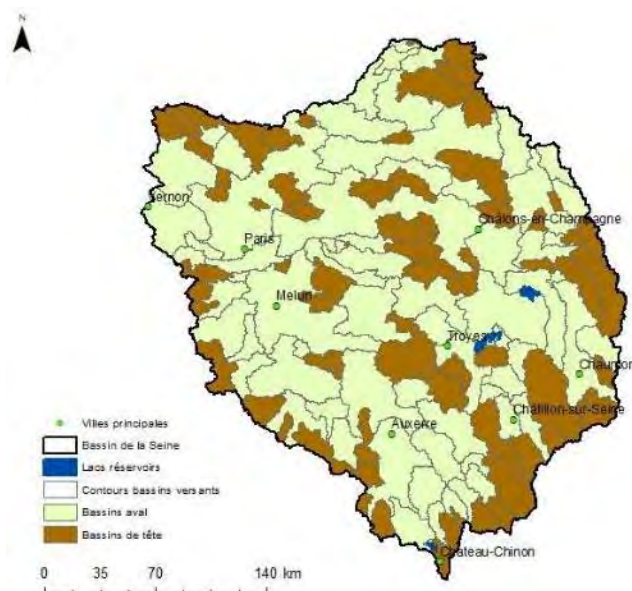


Figure 23. Repérage des bassins de tête et des bassins en aval parmi les 143 bassins versants sélectionnés.

Rappelons également la signification des différents paramètres du modèle et du critère de performance (Tableau 5) qui seront présentés par la suite (Figure 24 et Figure 26).

Tableau 5. Rappel de la signification des paramètres du modèle GR4J ($X1$ à $X4$), du modèle semi-distribué ($X1$ à $X4 + c$) et du critère de performance (KGE').

Paramètre	Signification
$X1$	Capacité du réservoir de production (mm)
$X2$	Coefficient d'échange avec le souterrain (mm.j^{-1})
$X3$	Capacité du réservoir de routage (mm)
$X4$	Pas de temps de l'hydrogramme unitaire (j)
c	Célérité (m.s^{-1})
KGE'	Critère de performance

3.2.1. Modélisation globale

Une première modélisation est réalisée de manière globale avec le modèle GR4J, avec utilisation du module CemaNeige mais sans prise en compte de l'influence des lacs-réservoirs dans la modélisation. Notons que les débits observés utilisés sont bien influencés par ces lacs-réservoirs, ce qui va fatalement mener à des difficultés de modélisation sur certains bassins. Les paramètres de calage obtenus et le critère de performance (KGE') ont été recueillis et présentés sur la Figure 24 (Giraud, 2021).

On remarque pour les paramètres $X1$ et $X3$ (capacités des réservoirs de stockage et de routage) des valeurs extrêmes (i.e. au-delà de 10 000 mm pour $X1$ et 2000 mm pour $X3$), donc anormales, témoignant d'un problème de calage. On observe le même phénomène avec des fortes valeurs négatives pour le paramètre $X2$ (échange avec la nappe souterraine). En effet, la carte du critère de performance KGE' montre une corrélation entre les bassins ayant des valeurs de $X1$, $X2$ et $X3$ extrêmes (en valeur absolue) et un calage moins performant (valeurs inférieures à 0.9). Notons toutefois que les débits observés utilisés sont influencés par les lacs-réservoirs mais que ceux-ci ne sont pas pris en compte dans la modélisation, ce qui mène probablement à une

détérioration des performances. Concrètement, l'algorithme de calage utilisé peut mener à des combinaisons de paramètres extrêmes, jouant notamment sur les paramètres ayant trait au bilan hydrologique, afin d'obtenir des valeurs de critères les moins pires. Par exemple, si sur un bassin versant un lac-réservoir vient à limiter les crues, phénomènes qui ont un fort impact sur la valeur du critère KGE', alors que le modèle ne représente pas ce phénomène mais utilise ces débits influencés pour le calage, une solution acceptable peut être de retirer un maximum d'eau au modèle pour obtenir des débits plus bas, notamment via des paramètres X1 ou X3 forts ou un paramètre X2 très négatif. Il est donc nécessaire d'améliorer ces résultats à travers l'utilisation d'autres méthodes.

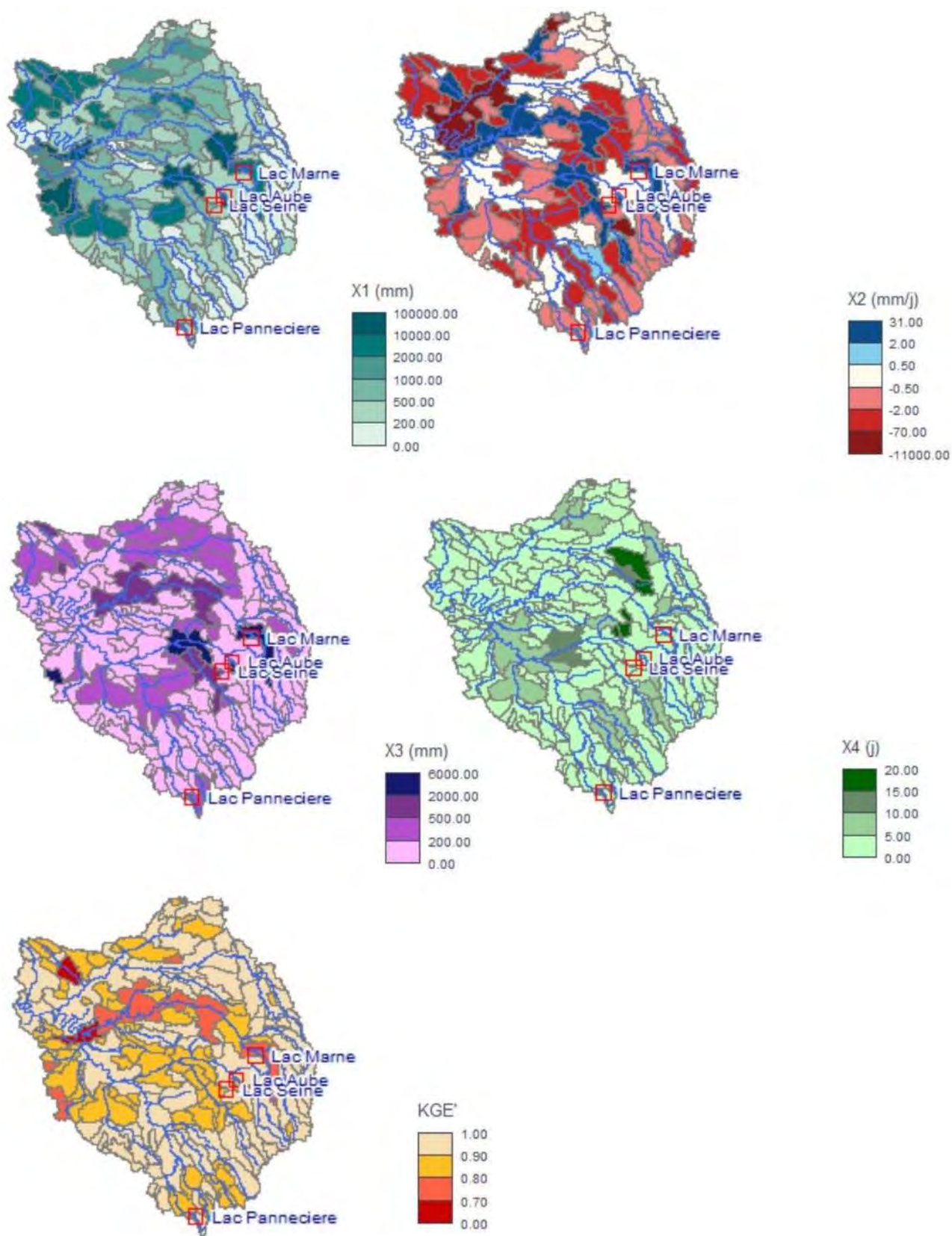


Figure 24. Cartes des valeurs des paramètres et du critère de performance lors du calage du modèle GR4J. Configuration spatiale globale sans prise en compte des influences.

3.2.2. Modélisation semi-distribuée

Afin d'intégrer la complexité de la réalité à notre modèle hydrologique semi-distribué (cf. II.1.b), nous définissons des stations de prise et de restitution, situées respectivement en amont et en aval de chaque lac. Ainsi, une schématisation proche de la réalité est définie, prenant en compte les canaux de prise et de restitution des lacs ainsi que le sens d'écoulement, puis est intégrée au réseau entier du bassin de la Seine (les prises et restitutions de chaque lac sont visibles en rouge sur la Figure 25).

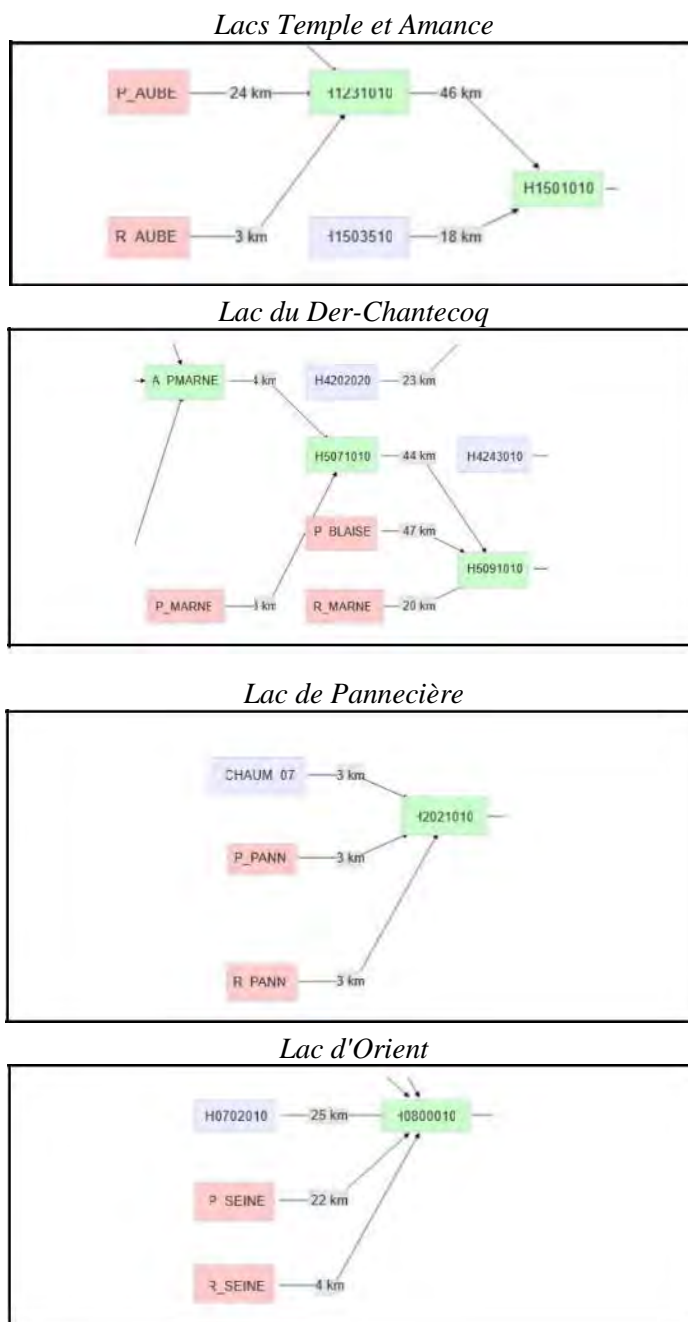
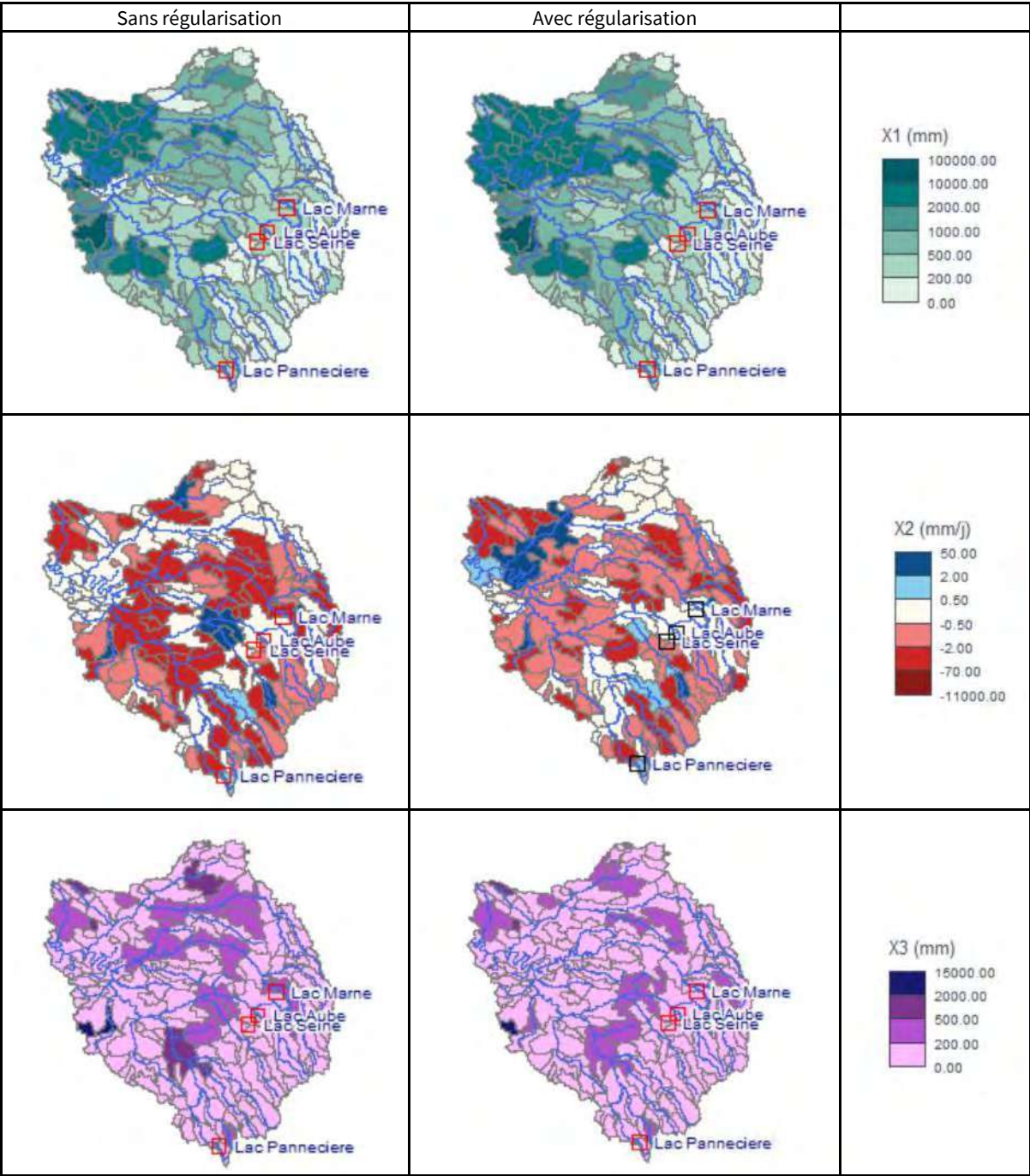


Figure 25. Schématisation du réseau de stations hydrologiques du bassin de la Seine avec ajout des prises et restitutions de chaque lac-réservoir.

Nous avons réalisé une comparaison des résultats obtenus suite à la modélisation semi-distribuée avec prise en compte des influences des lacs-réservoirs et avec et sans utilisation de la régularisation des paramètres de calage (Figure 26). Les cartes de référence sont celles obtenues précédemment lors de la modélisation globale utilisant GR4J couplé à CemaNeige (Figure 24). De plus, les bassins de tête (Figure 23) ne sont pas affectés par la semi-distribution contrairement aux bassins à l'aval, ce qui explique des valeurs de paramètres et de critère de performance identiques pour la modélisation globale, semi-distribuée sans régularisation et semi-distribuée avec régularisation.



Sans régularisation

Avec régularisation

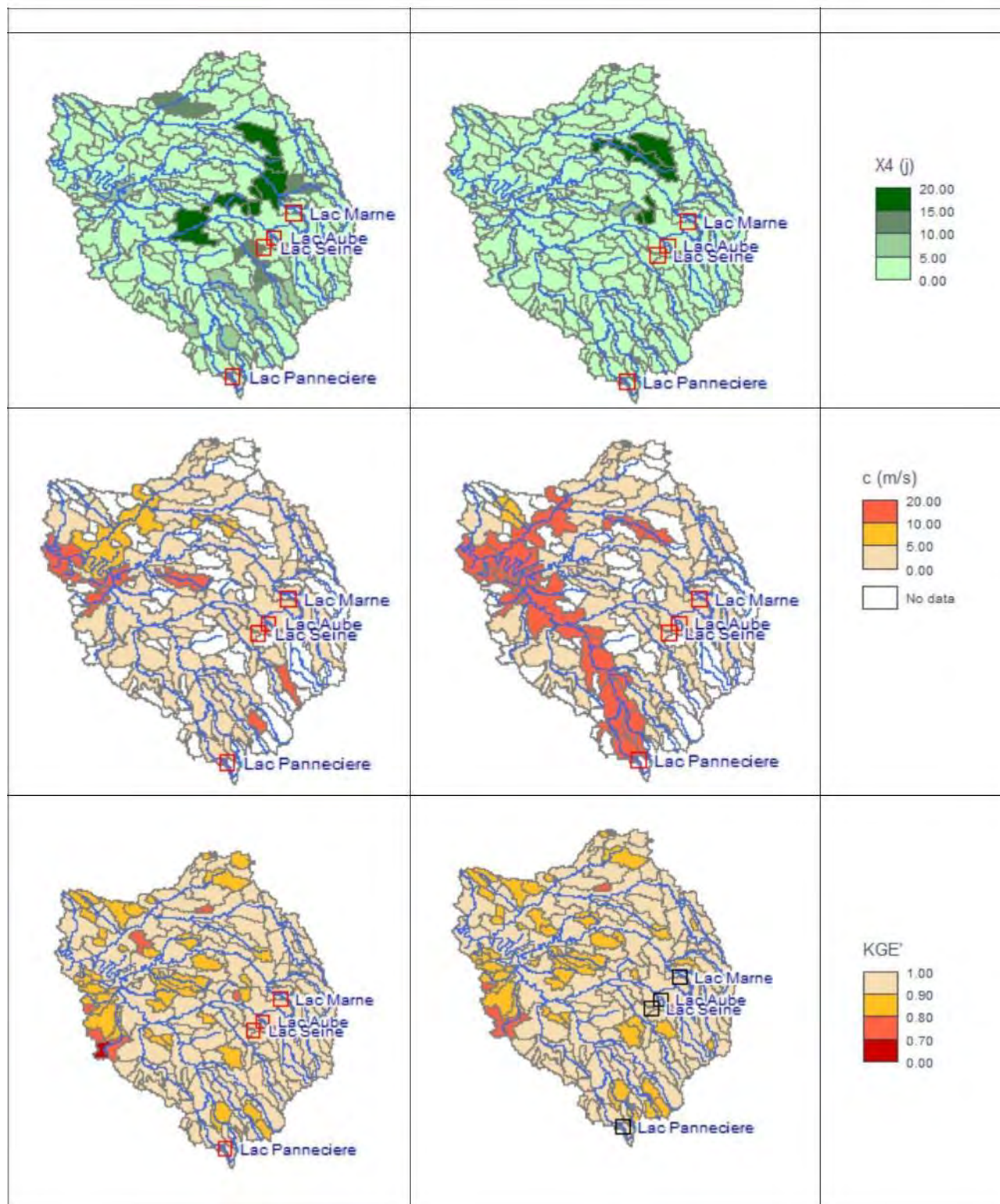


Figure 26. Comparaison des cartes des valeurs des paramètres (dont la célérité), du critère de performance lors du calage du modèle GR4J. Configuration spatiale semi-distribuée avec prise en compte des influences. A gauche : calage n'utilisant pas la méthode de régularisation des paramètres. A droite : calage utilisant la méthode de régularisation des paramètres.

Nous pouvons tout d'abord remarquer une cohérence géographique de nos résultats. En effet, les valeurs de paramètres encore extrêmes ou élevées semblent être associées en général aux bassins de tête (Figure 23). On observe également pour la modélisation semi-distribuée avec régularisation des paramètres une faible amélioration des valeurs du critère de performance (par exemple des valeurs entre 0.7 et 0.8 passant

à des valeurs comprises entre 0.8 et 0.9, au nord-ouest du bassin). De plus, nous pouvons également remarquer une diminution des valeurs de capacité du réservoir de routage (X3) avec une disparition presque totale des valeurs extrêmes (comprises entre 500 mm et 15 000 mm) ce qui est encourageant comparé aux valeurs observées pour la modélisation semi-distribuée sans régularisation des paramètres. Concernant les valeurs de capacité du réservoir de production (X1), nous remarquons pour les bassins en aval des valeurs plus extrêmes pour la modélisation semi-distribuée avec régularisation que sans régularisation. Rappelons cependant que pour obtenir une solution acceptable proche de la réalité, il peut être nécessaire d'influer sur les paramètres X1 ou X3 lors de l'étape de calage afin de les rendre plus élevés, comme observé ci-dessus.

Enfin, si nous nous intéressons plus particulièrement aux zones où sont situés les lacs-réservoirs, nous pouvons remarquer que dans les deux cas de modélisation semi-distribuée (sans régularisation et avec régularisation), les valeurs des paramètres sont toutes bien meilleures que celles obtenues avec la modélisation sans intégration des lacs-réservoirs. En effet, pour cette dernière, de nombreuses valeurs extrêmes étaient observées, témoignant d'un souci lors de l'étape de calage. Il est donc nécessaire d'intégrer l'influence des lacs-réservoirs au modèle afin de rapprocher les résultats obtenus de ceux observés en réalité.

Conclusion

Le but de cette étude était de produire des connaissances ainsi qu'un modèle hydrologique du bassin versant de la Seine permettant de réaliser par la suite des projections des événements de crue et d'étiage sur ce bassin. Grâce à la construction de ce modèle et à son calage, il sera ensuite possible de forcer ce modèle avec d'autres données telles que les règles de gestion des lacs réservoirs ou encore l'intégration d'autres usages de l'eau (irrigation, industries, etc.).

Sur la base d'une large base de données et grâce à un processus de sélection strict, un ensemble de 143 stations situées sur le bassin versant de la Seine en amont de Vernon a été sélectionné. Cette sélection de stations, répondant à des critères de disponibilité de données, de représentation spatiale du bassin versant et de non-recouvrement avec d'autres stations, a permis de mettre en place une modélisation hydrologique. Sur la base d'un modèle hydrologique global, GR4J, largement utilisé dans les études d'impact du changement climatique et sur le bassin de la Seine, et qui aura servi de point de référence, une modélisation semi-distribuée a été mise en place. Celle-ci, utilisant les packages R airGR et airGRiwr, a permis d'intégrer les prises et les restitutions des quatre lacs-réservoirs situés sur le bassin afin d'écarter les crues et de soutenir les étiages. Par ailleurs, une méthode de contrainte des paramètres du modèle semi-distribué, la régularisation, a été testée.

Les résultats ont montré l'importance de l'intégration de l'influence des lacs-réservoirs dans notre modèle afin d'éviter l'obtention de valeurs extrêmes pour les paramètres de calage et ainsi pouvoir obtenir des simulations de débits proches des observations. La régularisation des paramètres montre quant à elle quelques améliorations de nos résultats comparées à la semi-distribution sans régularisation des paramètres, cependant celles-ci restent faibles.

De plus, nous pourrions investiguer le choix du modèle utilisé pour réaliser les simulations. En effet, nous avons pu constater que certaines stations situées sur une zone très perméable présentaient par conséquent un fort taux d'échange avec la nappe souterraine (paramètre X2 sur les cartes de paramètres de la Figure 26). Il aurait donc été intéressant de pouvoir prendre en compte ces échanges de manière améliorée dans notre modèle. Cependant, le modèle utilisé dans cette étude (modèle GR4J) ne prend en compte le processus des échanges souterrains interbassins que de manière simplifiée, à l'inverse des modèles GR5J et GR6J, également disponibles dans airGR, qui permettent notamment d'inverser le sens de ces échanges au cours de l'année. Cela n'a pas pu être testé en raison de contraintes de temps, mais il est prévu dans le futur d'effectuer une simulation utilisant le modèle GR5J puis GR6J et observer les résultats obtenus. À terme, lorsqu'elle sera implémentée dans airGR, nous pourrions utiliser la régularisation des paramètres de deux modèles (X5 et X6).

Les travaux futurs des projets IN-WOP et PIREN-Seine comprendront la mise en place de fonctions de gestion des lacs-réservoirs, ainsi que l'étude de l'impact du changement climatique sur le respect des débits caractéristiques et enfin l'optimisation des règles de gestion pour ces conditions futures.

Bibliographie

- Bizouard, D. (EPTB Seine Grands Lacs) (2019). L'impact du changement climatique sur la Seine et ses affluents. <https://episeine.fr/actualite/limpact-du-changement-climatique-sur-la-seine-et-ses-affluents>.
- Brigode, P., Génot, B., Lobligois, F., Delaigue, O. (2020). Summary sheets of watershed-scale hydroclimatic observed data for France. Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR Research Unit, Hydrology group, Antony. doi: <https://doi.org/10.15454/UV01P1>.
- Brunet, M.-F., Le Pichon, X. (1982). Subsidence of the Paris Basin, *J. Geophys. Res.*, 87(B10), 8547–8560. doi: [10.1029/JB087iB10p08547](https://doi.org/10.1029/JB087iB10p08547)
- Coron, L., Thirel, G., Delaigue, O., Perrin, C., Andréassian, V. (2017). The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package, *Environmental Modelling & Software*, 94, 166-171. doi: [10.1016/j.envsoft.2017.05.002](https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.05.002).
- Coron, L., Delaigue, O., Thirel, G., Dorchies, D., Perrin, C., Michel, C. (2021). airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.6.12.9000. doi: [10.15454/EX11NA](https://doi.org/10.15454/EX11NA), <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>.
- Dehay, F. (2012). Étude de l'impact du changement climatique sur la gestion des lacs-réservoirs de la Seine (Diplôme d'ingénieur). ENGEEES, Strasbourg. <https://hal.inrae.fr/view/index/identifiant/hal-02597326>.
- Delaigue, O., Génot, B., Lebécherel, L., Brigode, P., Bourgin, P.-Y. (2020). Database of watershed-scale hydroclimatic observations in France. Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR Research Unit, Hydrology group, Antony. <https://webgr.inrae.fr/base-de-donnees>.
- de Lavenne, A., Andréassian, V., Thirel, G., Ramos, M.-H., Perrin, C. (2019). A regularization approach to improve the sequential calibration of a semidistributed hydrological model. *Water Resources Research*, 55, 8821–8839. doi: [10.1029/2018WR024266](https://doi.org/10.1029/2018WR024266).
- Dorchies, D. (2021). airGRiwr: 'airGR' Integrated Water Resource Management. R package version 0.5.0.9000. <https://airgriwr.g-eau.fr/>.
- Dorchies, D., G., Thirel, C., Perrin, J.-C., Bader, R., Thépot, J.-L., Rizzoli, C., Jost, S., Demerliac (2016). Climate change impacts on water resources and reservoir management in the Seine river basin (France), *La Houille Blanche*, 5, 32-37. doi: [10.1051/lhb/2016047](https://doi.org/10.1051/lhb/2016047).
- Dorchies, D., Thirel, G., Jay-Allemand, M., Chauveau, M., Dehay, F., Bourgin, P.-Y., Perrin, C., Jost, C., Rizzoli, J.-L., Demerliac, S., Thépot, R. (2014). Climate change impacts on multi-objective reservoir management: case study on the Seine River basin, France. *International Journal of River Basin Management*, 12(3), 265-283. doi: [10.1080/15715124.2013.865636](https://doi.org/10.1080/15715124.2013.865636).
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45, RG2004. doi: [10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183).
- Flipo N., Gallois, N., Labarthe, B., Baratelli, F., Viennot, P., Schuite, J., Rivière, A., Bonnet, R., Boé, J. (2020). Pluri-annual Water Budget on the Seine Basin: Past, Current and Future Trends. In: Flipo N., Labadie P., Lestel L. (eds) The Seine River Basin. *The Handbook of Environmental Chemistry*, 90. Springer, Cham. doi: [10.1007/978-3-030-39219-2_392](https://doi.org/10.1007/978-3-030-39219-2_392).
- Giraud, G. (2021). mapsf: Thematic Cartography. R package version 0.2.0. <https://CRAN.R-project.org/package=mapsf>.
- Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharne, A., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Pagé, C., Sauquet, E., Terray, L., Thiéry, D., Oudin, L., Viennot, P., Therry, S.. (2011). Impact du changement climatique sur les ressources en eau du bassin versant de la Seine.
- Hrachowitz, M., Clark, M.P. (2017). HESS Opinions. The complementary merits of competing modelling philosophies in hydrology, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 3953–3973. doi: [10.5194/hess-21-3953-2017](https://doi.org/10.5194/hess-21-3953-2017).
- Jantet, A., Henine, H., Chaumont, C., Collet, L., Thirel, G., and Tournebise, J.: Robustness of a parsimonious subsurface drainage model at the French national scale, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25, 5447–5471,

<https://doi.org/10.5194/hess-25-5447-2021>, 2021.

Kling, H., Fuchs, M., and Paulin, M.: Runoff conditions in the upper Danube basin under ensemble of climate change scenarios, *J. Hydrol.*, 424–425, 264–277, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.01.011>, 2012.

Lamblin, R., 2009. Prédiction des crues aux confluences – Impact de la spatialisation sur les performances des modèles hydrologiques de prévision. Mémoire de Master 2, Hydrologie, hydrochimie, sols et environnement, Spécialité hydrologie, ENSIACET, ENSEEIHT, INP Toulouse, 30 pp. URL : <https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2012/07/2009-LAMBLIN-MASTER.pdf>

Leleu, I., Tonnelier, I., Puechberty, R., Gouin, P., Viquendi, I., Cobos, L., Foray, A., Baillon, M., Ndima, P.-O. (2014). La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques. *La Houille Blanche*, 1, 25-32.. doi: 10.1051/lhb/2014004.

Lestel, L., Steinmann, R., Chemlal, K., Carré, C. (2016). Étude spatiale et temporelle des réseaux de mesure. Les cas des stations hydrométriques depuis le XIXe siècle et des stations de mesure de la qualité de l'AESN depuis 1971, PIREN-Seine Phase 7. URL : https://www.piren-seine.fr/sites/default/files/PIREN_documents/phase_7/rapports_annuels/2016/a3b2_Lestel_PIREN2016.pdf

Magnien, J.-F., Baumes, C., 2018. Rapport d'activité 2017. EPTB Seine Grands Lacs, Paris, France. https://www.seinegrandslacs.fr/sites/default/files/media/downloads/seine_gds_lacs_ra_2017_bd.pdf

Oudin, L., Frédéric, H., 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. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026.

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275-289. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7.

R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

Rabus, B., Eineder M., Roth, A., Bamler, R. (2003). The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57, 241–262. doi: 10.1016/S0924-2716(02)00124-7.

Redlands, C. E. S. R. I. (2011). ArcGIS Desktop: Release 10.8.

Riboust, P. (2018). De la neige au débit : de l'intérêt d'une meilleure contrainte et représentation de la neige dans les modèles. Thèse de doctorat, Irstea (Antony) et UPMC Sorbonne Universités (Paris), 339 pp.

Rinaudo, J-D., Neverre, N. (2019). La prévision à moyen et long terme de la demande en eau potable : bilan des méthodes et pratiques actuelles. AFB. <https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/0000000001687f5b203ca42e12d1d9cc>.

Rivière, A., Flipo, N. (2021). Fonctionnement hydrogéophysique des interfaces nappe-rivière et conséquences sur la ressource en eau. Rapport de synthèse. Phase 7 (2015-2019). Consulté le 8 août 2021, 4. doi: 10.26047/PIREN.RAPP.SYNTH.2019.

Santos, L., Thirel, G., Perrin, C. (2018). Technical note: Pitfalls in using log-transformed flows within the KGE criterion, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 4583-4591, <https://doi.org/10.5194/hess-22-4583-2018>.

Terrier, M. (2016). Évaluation des procédures de naturalisation pour la reconstitution de débits sur le bassin versant de la Seine. Mémoire de Master 2 Polytech Nice-Sophia, Irstea, Antony, 73 pp.

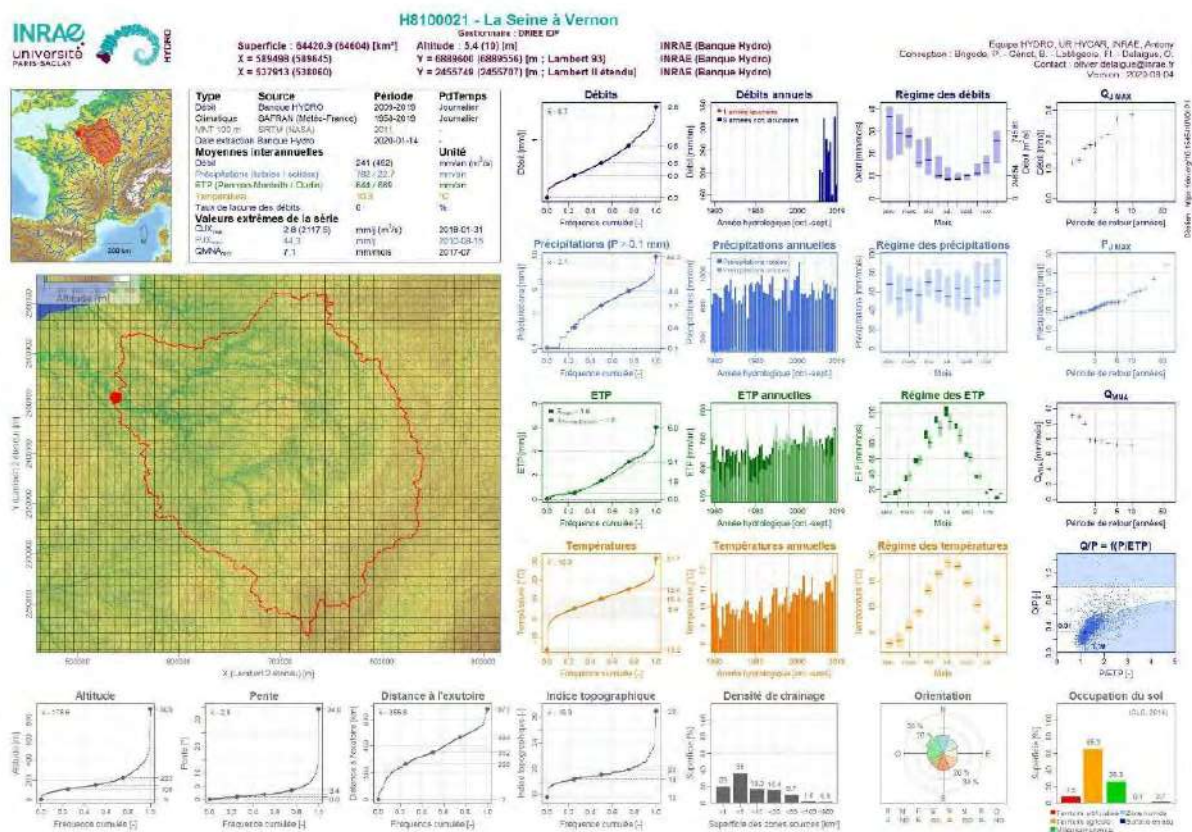
Valéry, A., (2010). Modélisation précipitations – débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse de Doctorat, Cemagref (Antony), AgroParisTech (Paris), 405 pp.

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. doi: 10.1002/joc.2003.

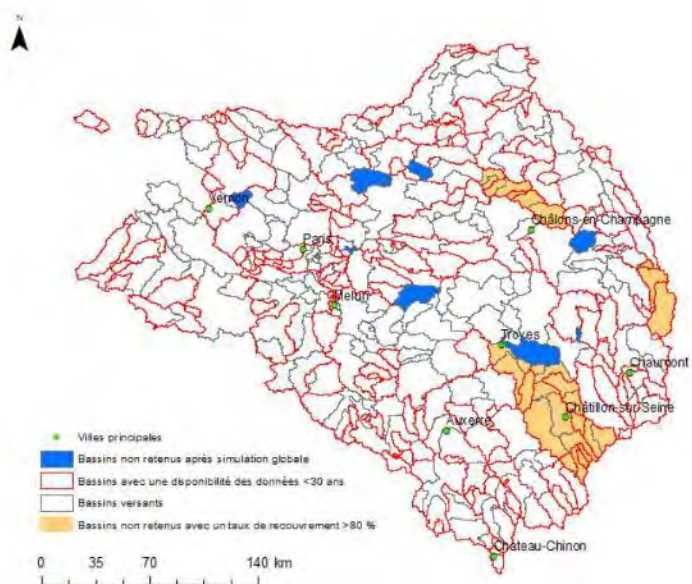
Werner, M. (2001). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), mission overview, *Journal of Telecommunication (Frequenz)*, 55, 75-79.

Annexes

Annexe 1 : Fiche synthèse graphique de la station hydrométrique H8100021 - La Seine à Vernon (Brigode et al., 2020).



Annexe 2 : Cartes synthétiques représentant les étapes de sélection des stations hydrologiques du bassin de la Seine



Carte finale représentant les 143 bassins versants sélectionnés pour l'étape de modélisation (globale et semi-distribuée)

