Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie

Parcours Hydrologie-Hydrogéologie

Modélisation hydrologique en contexte de changement climatique : Incertitudes liées aux paramètres de modèles conceptuels pluie-débit

Pierre Brigode

Directeur de recherche : Ludovic Oudin

UMR 7619 isyphe

UMR Sisyphe 7619
Université P. et M. Curie
Paris, France

6 septembre 2010

UPMC SORBONNE UNIVERSITÉS

MINES ParisTech

AgroParisTech

ABSTRACT

The main goal of this study is to quantify the impact of uncertainties of parameters of conceptual hydrological models in a changing climate. Two hydrological models will be used (TOPMO and GR4J) on 120 French catchments of the Somme, the Seine and the Loire. The first source of errors considered is the uncertainty related to the climatic specificity of the calibration period. To quantify this uncertainty on model outputs, 3 climatically contrasted sub-periods are identified in the observed time series: a wet period, a mean period and a dry period. The models are calibrated on each of these sub-periods and the outputs generated by these three types of calibrations are analyzed in validation on another dry period first and then on data from a future climate scenario (1980-2000, 2045-2065, 2080-2100). The results show that the climatic specificity of the calibration period has a significant impact on the simulation of discharge, especially for low flow rates (Q_{05}). Then the uncertainty due to equifinality of parameter sets is taken into account by considering each type of calibration outputs associated with all the acceptable parameter set. These additional uncertainties have a significant impact on all hydrological models simulations. The consideration of these two types of uncertainties can identify trends of declining of the particular discharge studied (Q_{05},QAM et Q_{95}), but makes the quantification of these declines very uncertain.

RESUME

Cette étude vise à quantifier l'impact des incertitudes des paramètres de modèles hydrologiques en contexte de changement climatique. Deux modèles hydrologiques seront appliqués (TOPMO et GR4J) sur 120 bassins versants des bassins de la Somme, de la Seine et de la Loire. La première source d'erreur étudiée est l'incertitude liée à la spécificité climatique de la période de calage. Pour quantifier l'impact de cette incertitude sur les sorties de modèles, 3 sous-périodes climatiquement contrastées sont tout d'abord identifiées au sein des chroniques observées : une période humide, une période moyenne et une période sèche. Les modèles sont calés sur chacune de ces 3 périodes, et les sorties engendrées par ces 3 types de calages sont analysés en validation sur une autre période sèche identifiée dans la chronique et sur les données issues d'un scénario climatique futur (tranche temps présent (1980-2000), milieu de siècle (2045-2065) et fin de siècle (2080-2100). Les résultats montrent que la spécificité climatique de la période de calage a un impact non négligeable sur la simulation de débits caractéristiques, notamment pour les débits d'étiages (Q_{05}). L'incertitude liée à l'équifinalité des jeux de paramètres est ensuite prise en compte en considérant pour chaque type de calage les sorties associées à des jeux équifinaux. Ces incertitudes supplémentaires ont un impact considérable sur l'ensemble des simulations des modèles hydrologiques. La considération de ces deux types d'incertitudes permet d'identifier des tendances à la diminution des débits caractéristiques étudiés (Q_{05},QAM et Q_{95}) mais rend la quantification de ces diminutions très incertaine.

REMERCIEMENTS

Voici donc la partie la plus difficile d'un mémoire, les *remerciements*. Ce chapitre nécessite un exercice de style certain : il s'agit en effet de *remercier* l'ensemble des personnes concernées de prêt comme de loin par la réalisation de mon stage, en employant le terme « *merci* » ou un proche voisin le moins souvent possible. Il est d'ailleurs notable que je l'ai déjà employé à trois reprises. Le compteur est déclenché…

Je tiens en premier lieu à *remercier* mon tuteur de stage, Ludovic Oudin, maître de conférences à l'Université Pierre et Marie Curie. Il a su installer un climat de travail très agréable, me permettant de travailler en grande autonomie tout en étant encadré de manière très instructive. Ses conseils m'ont de plus permis de ne pas m'égarer sur des chemins trop incertains, ce qui serait un comble pour un hydrologue en herbe travaillant sur l'incertitude des modèles.

Je souhaite également *remercier* Agnès Ducharne, coordinatrice du projet RExHySS, pour ses conseils utiles et pour m'avoir permis d'enrichir mon échantillon de données ainsi que Pierre Ribstein, directeur de l'UMR Sisyphe.

Il me tient particulièrement à cœur de *remercier* l'ensemble du personnel du laboratoire « sérieux » qu'est Sisyphe. Ainsi, par couloir et par bureau, *merci* à :
Benjamin pour sa chemise « parme », Olivier pour son sac à dos, Rémi pour son jeu de boules, Jean-Marie pour son béret, Sylvain pour sa nouvelle couleur de cheveux, Marie pour ses conseils botaniques, Julie pour sa nationalité, Aurélien pour son amour pour les cornichons, Stéphane pour ses financiers, François pour m'avoir transmis son savoir à travers une bouture, Agnès pour sa personnalité si commode, Khaoula pour sa patience, Sandro pour ses nombreux sourires, Baptiste pour ses débardeurs, Youri pour ses immenses calculs, Danièle pour nous avoir permis d'imaginer le nom de son fils, Alexandre pour sa concentration à tout épreuve, Guillaume pour m'avoir accordé le privilège d'utiliser son (Ctrl + W ©), Paul pour son surnom magnifique, Pauline pour son manque de sérieux, Hocine pour son frisbee, Laure pour sa pause clope, Valérie pour ses stagiaires, Cyrielle pour ses problèmes d'ordinateur, Monsieur Bendjoudi pour avoir supporté Célestine, Célestine pour être une fille si calme, Camille pour son ordinateur, Sarah pour son accent, Mathieu pour son sérieux, Nejla pour ses allers-et-venus, Yoyo pour sa banane, Anne pour le NASH à venir, Cheikna pour la maquette, LeeDie pour So Foot, les Cigognes qui sont mes échassiers préférés…

Enfin, un mot particulier pour Ugo, mon voisin d'antichambre sans qui ce stage n'aurait pas été le même. Malgré ses tentatives infructueuses de crime végétal, je me dois de le *remercier* ici pour son assiduité et son humour si léger. Malgré son inexpérience due essentiellement à sa semaine d'ancienneté manquante, ses conseils et son soutien furent fort utiles.

Score final : 7 mots compris dans le champ lexical du *remerciement*… Exercice à retravailler…

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION ____ *6*

2. ETAT DE l'ART ____ *8*

2.1 Incertitudes liées à l'utilisation de modèles hydrologiques en climat changeant ____ **8**

2.1.1 Les incertitudes climatiques ____ 8
2.1.2 Les incertitudes hydrologiques ____ 9
2.1.3 Quantification de ces deux grands ensembles d'incertitudes ____ 10

2.2 Incertitudes liées aux paramètres des modèles hydrologiques ____ **10**

2.2.1 Robustesse de l'identification des paramètres ____ 11
2.2.2 Equifinalité des jeux de paramètres ____ 13

2.3 Bilan de la revue bibliographique et problématique ____ **14**

3. METHODOLOGIE ____ *15*

3.1 Méthodologie générale ____ **15**

3.2 Estimation des incertitudes liées aux paramètres ____ **15**

3.2.1 Robustesse de l'identification des paramètres ____ 15
3.2.2 Equifinalité des jeux de paramètres ____ 16

3.3 Impact de ces incertitudes sur les projections hydrologiques ____ **17**

3.3.1 Sorties des modèles considérées ____ 17
3.3.2 Validations des simulations avec les données observées ____ 17
3.3.3 Projections sur le scénario climatique futur ____ 18

4. DONNEES ET MODELES ____ *19*

4.1 Données hydroclimatiques ____ **19**

4.1.1 Données climatiques observées ____ 19
4.1.2 Scénario climatique considéré ____ 19
4.1.3 Données hydrométriques ____ 19
4.1.4 Caractéristiques de l'échantillon de bassins versants ____ 20

4.2 Modèles hydrologiques ____ **21**

4.2.1 GR4J ____ 22
4.2.2 TOPMO ____ 22
4.2.3 Comparaison et mise en application des modèles ____ 23
4.2.4 Performances générales des modèles ____ 24

5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS ____ *27*

5.1 Robustesse de l'identification des paramètres ____ **27**

5.1.1 Identification des périodes « climatiquement contrastées » ____ 27
5.1.2 Impact de la spécificité climatique de la période de calage sur la valeur des paramètres ____ 29
5.1.3 Impact de la spécificité climatique de la période de calage sur les performances des modèles ____ 31
5.1.4 Quantification des incertitudes avec les données observées ____ 33
5.1.5 Evaluation des incertitudes avec les données du scénario ____ 36
5.1.6 Synthèse ____ 38

5.2 Equifinalité des jeux de paramètres ____ **38**

5.2.1 Quantification des incertitudes avec les données observées ____ 39
5.2.2 Evaluation des incertitudes avec les données du scénario ____ 42
5.2.3 Synthèse ____ 43

5.3 Synthèse générale ____ **44**

6. CONCLUSION ____ *46*

7. BIBLIOGRAPHIE ____ *47*

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Vue schématique de la cascade d'incertitudes auxquelles sont soumises les projections hydrologiques en contexte de changement climatique 8
Figure 2 : Caractéristiques « physiographiques » et « hydrologiques » de l'échantillon de bassin versant considéré 20
Figure 3 : Localisation des 120 stations hydrométriques considérées 21
Figure 4 : Schéma des modèles hydrologiques conceptuels GR4J et TOPMO 23
Figure 5 : Performances des modèles GR4J (gauche) et TOPMO (droite) en calage sur les 120 bassins versants 25
Figure 6 : Performances des modèles en calage et en validation obtenues sur deux sous-périodes différentes 26
Figure 7 : Performances des modèles et stabilité des paramètres sur deux sous-périodes distinctes 26
Figure 8 : Exemple de caractérisation d'une chronique : Station H8110010 : La Seine à Poses (65 000 km²) 27
Figure 9 : Comparaison des coefficients d'aridité (C) associés aux différentes sous-périodes et tranches de temps du scenario futur 28
Figure 10 : Distributions des valeurs de paramètres obtenues en fonction des conditions de calage (GR4J à gauche et TOPMO à droite) 30
Figure 11 : Performances des modèles obtenues en calage sur les périodes humides, moyennes, sèches 31
Figure 12 : Performances des modèles obtenues en validation sur les périodes sèches par les 3 différents calages 32
Figure 13 : Comparaison des hydrogrammes simulés en fonction des périodes de calages avec la chronique observée pour les 2 modèles : Station H8110010, la Seine à Poses (65 000 km²) 33
Figure 14 : Incertitudes liées aux 3 périodes de calages des modèles et biais entre les simulations et les observations pour 3 variables (Q_{05}, QMA et Q_{95}) 35
Figure 15 : Incertitudes liées à la période de calage pour les 3 tranches de temps 36
Figure 16 : Evolution des débits caractéristiques de crues Q_{95} entre les tranches milieu de siècle et fin de siècle et entre les tranches fin de siècle et milieu de siècle en fonction des calages pour le modèle GR4J 37
Figure 17 : Valeurs des paramètres retenus et performances associées pour les 3 périodes de calage (humide en bleu, moyenne en vert et sèche en rouge) pour le modèle GR4J 39
Figure 18 : Incertitudes liées à l'équifinalité des paramètres et biais entre les simulations et les observations pour 3 variables (Q_{05}, QMA et Q_{95}) 41
Figure 19 : Incertitudes liées à l'équifinalité pour les 3 tranches de temps 42
Figure 20 : Evolution des débits caractéristiques de crues Q_{95} entre les tranches milieu de siècle et fin de siècle et entre les tranches fin de siècle et milieu de siècle en fonction des calages et des sorties des jeux de paramètres équifinaux pour le modèle GR4J 43
Figure 21 : Biais minimum et maximum liés à la robustesse de l'identification des paramètres et à l'équifinalité évalués sur les données observées (GR4J à gauche et TOPMO à droite) 44
Figure 22 : Performances des modèles en fonction des longueurs des périodes de calibration considérées (GR4J à gauche et TOPMO à droite) 49

TABLES DES ANNEXES

Annexe I : Quantification de l'impact des longueurs des périodes de calages sur les performances des modèles 49

LISTE DES ABREVIATIONS UTILISEES DANS LE MEMOIRE

- FS : Fin de siècle (2080-2100) ;
- MS : Milieu de siècle (2045-2065) ;
- NSE_{sq} : Critère de Nash & Sutcliffe calculé sur la racine carrée des débits
- Q_{05} : Débit surpassé 95% du temps (mm/j) ;
- Q_{95} : Débit surpassé 5% du temps (mm/j) ;
- QMA : Débit moyen annuel (mm/an) ;
- TP : Temps présent (1980-2000) ;

1. INTRODUCTION

❖ *Prévisions de l'impact du changement climatique : un jet de dé* (Blöschl et Montanari, 2010) *?*

Les « impacts hydrologiques » du changement climatique sur les bassins versants font l'objet de recherches très actives depuis plusieurs années. Ces travaux visent généralement à quantifier ces impacts et leur répercussion socio-économique à l'échelle globale, régionale ou locale. Les changements concernent à la fois la ressource en eau (étiages plus marqués en été par exemple) mais également l'aléa des crues (modification de la fréquence d'occurrences de crues par exemple). L'application de modèles hydrologiques peut permettre d'évaluer l'ampleur de tels changements. Le choix du type de modèles (modèles à bases physiques, modèles conceptuels, etc.) à utiliser dépend généralement de l'objectif de modélisation ainsi que des données disponibles. En tout état de cause, chaque famille de modèles est soumise à des limites de prédictibilité des réponses hydrologiques : le processus de modélisation permet, par définition, de représenter de manière simplifiée les processus hydrologiques. Les simulations obtenues sont donc soumises à d'importantes incertitudes, notamment en contexte de changement climatique. Ainsi, certains processus non pris en compte par les modèles à base physique peuvent jouer un rôle significatif dans le futur ce qui induit des erreurs potentielles croissantes (Beven, 1989). De la même manière, l'utilisation des modèles conceptuels nécessite une phase d' « apprentissage » (phase de calage du modèle) avec des données observées dans le passé pour simuler les réponses au climat futur, ce qui rend leurs projections incertaines : ils sont en effet utilisés au-delà des conditions de calage. Ce sont ces incertitudes entourant les paramètres des modèles conceptuels en contexte de changement climatique qui seront le cœur de cette étude : en quelle mesure les paramètres sont-ils représentatifs à la fois du climat « actuel » et des conditions hydroclimatiques futures ? Une illustration très simple de ce problème est fournie par Merz et al. (2010) sur plusieurs bassins versants autrichiens : l'utilisation de jeux de paramètres obtenus après une phase de calage réalisée sur une période particulièrement « froide » entraine une surestimation des crues « actuelles » de 30% !

La définition de l'incertitude entourant la sortie d'un modèle est une première difficulté. L'incertitude correspond à l' « état de ce qui est incertain » ou à une « chose imprévisible »[1]. Evaluer les incertitudes liées à des sorties de modèles hydrologiques est une démarche délicate et également incertaine… Enfin, il est important de noter que la quantification d'une incertitude permet de qualifier la reproductibilité de la simulation, mais non de sa « justesse hydrologique » : à l'image d'un chimiste répétant plusieurs fois son protocole expérimental afin de tester le caractère reproductif de son expérience, de nombreuses réalisations lui permettront de répondre à son interrogation, mais elles ne lui indiqueront pas si son protocole est juste. En général, la quantification des incertitudes en contexte de changement climatique est approchée par la dispersion des sorties des modèles (climatiques et/ou hydrologiques).

❖ *Thématique de recherche*

Le but général de cette étude est donc de quantifier puis de comparer les sources d'incertitudes liées aux paramètres des modèles hydrologiques en contexte de changement climatique. Un état de l'art sera tout d'abord présenté afin de dresser le bilan des recherches actuelles sur ce sujet. Cette revue bibliographique permettra ensuite de préciser la problématique de cette étude et donc de mettre en place une méthodologie permettant de répondre aux

[1] Définition tirée du Robert 2010

questions soulevées. L'analyse des sources d'incertitudes sera menée sur plus d'une centaine de bassins versants français grâce à deux modèles conceptuels pluie-débit : GR4J (Perrin et al., 2003) et TOPMO (inspirée de TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979)). Enfin, une « conclusion générale » pourra également être émise sur l'importance des erreurs engendrées par les paramètres des modèles hydrologiques en condition de changement climatique.

2. ETAT DE l'ART

Malgré la littérature importante évoquant les impacts hydrologiques du changement climatique, il existe encore peu d'études quantifiant les incertitudes liées à la modélisation hydrologique en contexte de changement climatique.

2.1 Incertitudes liées à l'utilisation de modèles hydrologiques en climat changeant

Les simulations hydrologiques en contexte de changement climatique sont soumises à la fois aux incertitudes « classiques » de modélisation en « climat stationnaire » ainsi qu'à celles liées au travail avec des scénarios de climat futur. Cet ensemble d'incertitudes est comparé dans la littérature à une cascade. Elle peut, de manière simplifiée, être divisée en deux parties : une première partie concernant les *incertitudes climatiques* et une deuxième concernant les *incertitudes hydrologiques* (cf. Figure 1).

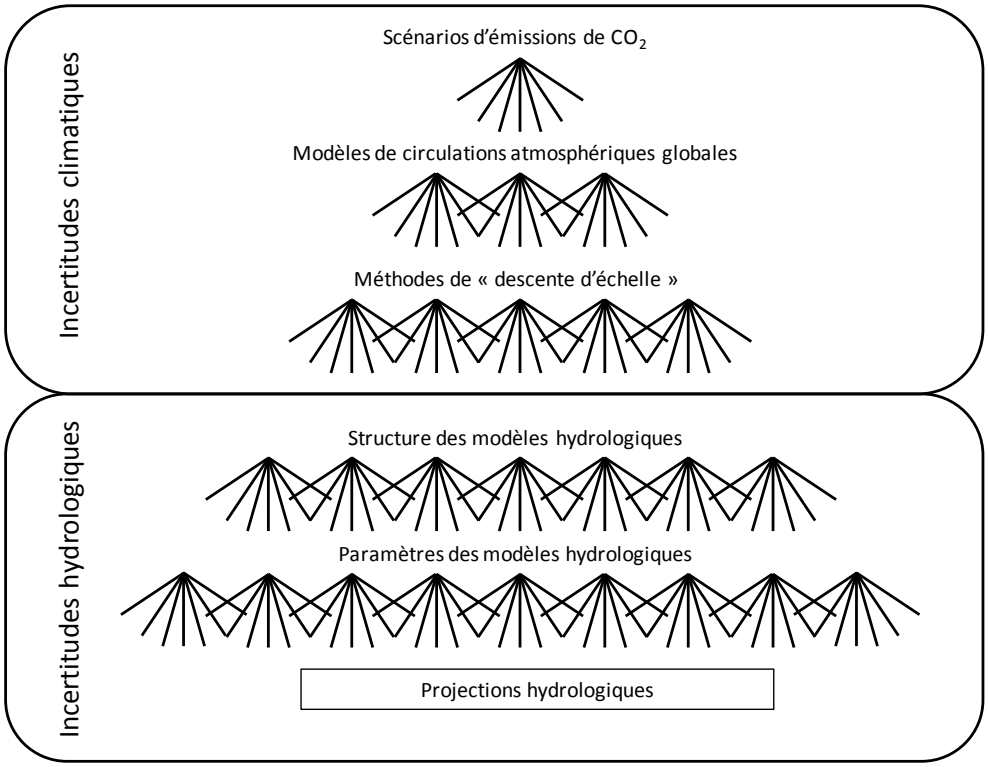


Figure 1 : Vue schématique de la cascade d'incertitudes auxquelles sont soumises les projections hydrologiques en contexte de changement climatique

2.1.1 Les incertitudes climatiques

La partie supérieure de la cascade regrouperait donc *l'ensemble des incertitudes climatiques* :

- Les climatologues fondent leurs projections climatiques sur divers *scénarios d'émissions de CO_2*, influencés par des hypothèses de croissance de la population mondiale et d'évolution des technologies.
- Ces scénarios sont ensuite utilisés en entrées de *modèles de circulations atmosphériques globaux*. Les modèles de circulations décrivent généralement les même processus mais avec différentes équations, différentes échelles spatiales et temporelles, etc. Ils peuvent également

différer dans la paramétrisation des phénomènes dynamiques, dans la définition de l'état initial du système climatique, etc. L'importance des incertitudes engendrées par les modèles globaux de circulation est réelle : Covey et al. (2003) montrent en effet qu'aucun des 18 modèles de circulation testés dans son étude ne reproduit des simulations de pluies cohérentes avec les observations.

- Pour réaliser des études à des échelles régionales, les données issues des modèles globaux doivent être « désagrégées » à l'échelle voulue. Une fois encore, il existe différentes *méthodes de « descente d'échelle »* : approches dynamiques (simulation à l'échelle régionale de la dynamique climatique en appliquant des modèles de circulation régionaux par exemple), approches statistiques (liens statistiques entre l'état climatique à grande échelle et les caractéristiques d'un climat local (méthode des types de temps par exemple)), etc.

Le processus de genèse de données climatiques à une échelle régionale est donc soumis à un ensemble d'incertitudes non négligeables. La quantification de ces erreurs est généralement réalisée en étudiant la dispersion des sorties associées à l'utilisation de chaque scénario d'émission, de modèles de circulations globales et de méthodes de descente d'échelles. Ces incertitudes, bien qu'étant « climatiques » influent fortement sur la modélisation hydrologique puisqu'elles concernent en effet les données d'entrées des modèles hydrologiques (précipitation et évapotranspiration potentielle notamment).

2.1.2 Les incertitudes hydrologiques

La partie inférieure de la cascade concernerait *l'ensemble des incertitudes liées à l'application des modèles hydrologiques*. L'application de modèles pluie-débit est soumise à des multiples incertitudes, qui interviennent à différents niveaux du processus de modélisation :

- Les *données d'entrées des modèles hydrologiques*. Les observations utilisées comme données d'entrées des modèles (typiquement des informations sur les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (Oudin et al., 2006)) et comme données de validation (typiquement des informations sur les débits (Ibbitt, 1972)) sont ainsi une première source d'erreurs.
- La *structure de ces modèles.* La structure d'un modèle est issue d'hypothèses générales sur la relation pluie-débit (i.e. des équations et hypothèses décrivant les différents processus mis en jeux). En contexte de changement climatique, certains processus ou hypothèses non pris en compte peuvent devenir non-négligeables et donc induire des erreurs potentielles. L'estimation de cette erreur est souvent approchée en comparant les sorties de différents modèles
- Les *paramètres* libres des modèles conceptuels. Ces paramètres n'étant pas des grandeurs physiques mesurables sur le terrain ou pouvant être estimées, nécessitent en effet une phase de calage du modèle (« calibration », apprentissage). Les processus de calage, le choix des données utilisées pour ces phases, la fonction objectif considérée, l'équifinalité des paramètres (jeux de paramètres différents qui induisent des performances des modèles comparables) impliquent ainsi des erreurs liées à l'identification des paramètres des modèles. En contexte de climat non-stationnaire, cette identification peut devenir plus incertaine du fait de changement physique du bassin versant non-pris en cours (Variation du couvert végétal par exemple). Ces erreurs potentielles sont largement reconnues par la communauté scientifique mais leur impact sur les projections hydrologiques en contexte de changement climatique sont peu étudiées.

2.1.3 Quantification de ces deux grands ensembles d'incertitudes

Les sources d'incertitudes mises en évidence précédemment interagissent entre-elles (la structure d'un modèle joue sur les valeurs de paramètres, les entrées influencent également les paramètres lors de la procédure de calage, etc.) ce qui rend leur quantification d'autant plus difficile. Il n'existe que très peu d'études visant à hiérarchiser les différentes sources d'erreurs en contexte de climat « non-stationnaire » :

- L'application par Wilby et Harris (2006) de deux modèles pluie-débit à un bassin versant situé en Angleterre a permis de considérer la structure des modèles globaux de circulation comme la source d'incertitude la plus importante, suivie par la méthode de désagrégation, de la structure du modèle hydrologique, des paramètres des modèles et enfin du scénario d'émission.
- Kay et al. (2006) mènent le même type d'étude sur deux autres bassins versants britanniques et classent également la structure des modèles de circulation globaux comme la principale source d'erreur, mais considèrent les scénarios d'émissions comme plus incertains que la modélisation hydrologique.
- Les résultats du projet Rexhyss (Ducharne et al., 2010) permettent également de mettre en valeur la plus grande importance des erreurs dues aux modèles de circulation par rapport aux incertitudes hydrologiques notamment.
- Enfin, dans une étude générale visant à comparer plusieurs sources d'incertitudes en contexte de changement climatique, Kay et al. (2009) quantifient l'impact de l'incertitude liée aux paramètres. Un test statistique de robustesse est mis en place : chaque année constitutive de la chronique est tour-à-tour « oubliée » lors de la phase de calage ce qui génère, pour une chronique de (n) années, un nombre (n+1) de jeux de paramètres différents. Les résultats montrent que cette incertitude a un impact très faible par rapport aux autres erreurs considérées (modèle de circulation global, méthodes de désagrégation, etc.). Les auteurs notent néanmoins que l'équifinalité, non prise en compte dans cette étude, peut avoir un impact fort sur l'incertitude liée aux paramètres des modèles.

Les incertitudes liées à l'utilisation de modèles hydrologiques en contexte de changement climatique semblent donc être considérées comme « non dominantes » par rapport à celles liées aux projections climatiques. Néanmoins, les recherches effectuées sont généralement « déséquilibrées » : plusieurs dizaines de scénarios futurs, de modèles de circulations globales ou de méthodes de désagrégation peuvent être retenus et testés sur uniquement un ou deux modèles hydrologiques. Or Wilby (2005) constate que les incertitudes liées aux modèles hydrologiques peuvent aller croissantes en fonction du nombre de modèles considérés. Un test complet serait, par exemple, de considérer autant de scénarios futurs que de modèles hydrologiques. Ceci permettrait notamment de pouvoir quantifier l'impact relatif de ces différentes sources d'incertitudes. Enfin, il semble important de noter que ces « hiérarchisations des erreurs » ont été obtenues en utilisant un nombre limité de bassin versant. Blöschl et Montanari (2010) notent en effet que la mise en évidence d'incertitudes très importantes sur un bassin versant est difficilement généralisable, à une région par exemple.

2.2 Incertitudes liées aux paramètres des modèles hydrologiques

Les erreurs liées aux paramètres des modèles hydrologiques sont, en contexte de changement climatique, induites par la *non-robustesse de l'identification des paramètres* ainsi que par *l'équifinalité des jeux de paramètres*. Si peu d'études abordent le problème de robustesse des paramètres, les questions d'équifinalité sont largement étudiées depuis plusieurs années par la

communauté scientifique. Des méthodes standards existent pour quantifier l'impact de l'équifinalité sur les simulations hydrologiques. Néanmoins, il semble que ces méthodes ont été en majorité testées en condition de climat « stationnaire ». De la même manière, la considération de ces deux sources d'erreurs est généralement mise en place pour des climats non changeant.

2.2.1 Robustesse de l'identification des paramètres

❖ *Sensibilité des paramètres à la période de calage considérée*

Plusieurs études générales visent à étudier la sensibilité des paramètres à la période de calage. Ces tests sont généralement effectués dans des conditions de climat « stationnaire », dues à des chroniques de longueur limitée. Des contrastes climatiques sont obtenus en considérant des sous-périodes hydroclimatiquement particulières, ce qui permet de « créer » un contexte « non-stationnaire » observé, nécessaire aux études :

- Gan et Burges (1990) utilisent le modèle SACRAMENTO sur 5 petits bassins versants « hypothétiques », i.e. avec des surfaces planes, homogènes. Ces bassins sont considérés comme marqués par des conditions hydroclimatiques différentes. Les auteurs montrent que les valeurs des paramètres sont dépendantes des propriétés hydroclimatiques de la période utilisée pour le calage du modèle. Selon eux, ces observations sont à prendre en compte plus particulièrement lors de travaux en contexte de changement climatique.
- Jakeman et al. (1993) testent le modèle IHACRES sur deux grands bassins versant (Caroline du Nord et Pays de Galle). 10 périodes de calages (constituée de 2 à 3 ans de données) sont identifiées au préalable dans la chronique observée. Ces différents jeux de paramètres sont ensuite testés en contexte de climat non-stationnaire (augmentation de la température moyenne de l'air de 1 à 3°C). Les différentes simulations issues de ces différents jeux de paramètres sont similaires, ce qui pousse les auteurs à conclure sur la possibilité d'utiliser le modèle IHACRES en conditions climatiques non-stationnaires.
- Wilby (2005) utilise quant à lui deux versions du modèle CATCHMOD sur le bassin versant de la Tamise. L'ensemble des données observées est tout d'abord utilisé comme période de calage du modèle. Deux années hydrologiques particulières sont ensuite considérées : une « sèche » (1975-1976) et une « humide » (1967-1968). La stabilité des paramètres et la dispersion des « sorties » sont différentes selon la structure du modèle : celle la plus simple (i.e. avec le moins de paramètres) présente notamment une grande variabilité des valeurs des paramètres, alors que la structure la plus complexe (i.e. la plus paramétrée) implique une plus grande stabilité des paramètres.

❖ *Stabilité temporelle des valeurs « optimales » des paramètres*

D'autres études se sont concentrées sur l'hypothèse de stabilité temporelle des paramètres optimaux :

- Wagener et al. (2003) étudient ainsi l'évolution des paramètres optimaux dans le temps pour un modèle pluie-débit à réservoir simple appliqué à un bassin versant de 1 256 km², situé au sud-est de l'Angleterre. Pour cela, une approche de type Dynamic Identifiability Analysis (DYNIA) développée par Wagener et al. (2001) a été utilisée. Cette méthode, permettant de mettre en évidence l'instabilité temporelle de la distribution des paramètres optimaux et l'incertitude liée à ces paramètres, nécessite la mise en place de simulations Monte-Carlo en amont. Cette instabilité est évaluée sur une période glissante (de longueur fixe) parcourant l'ensemble de la chronique observée. Les résultats de cette étude mettent en évidence des variations temporelles significatives des paramètres optimaux.

- Choi et Beven (2007) arrivent à la même conclusion générale en appliquant la méthode GLUE au modèle TOPMODEL sur un bassin versant de 150 km² localisé en Corée du Sud. Cette étude a consistée à diviser les chroniques observées en périodes « hydrologiquement similaires ». Les résultats montrent également que les paramètres « acceptables » varient significativement sur chacune des 15 périodes hydrologiques identifiées.
- Van Werkhoven et al. (2008) quantifient la sensibilité des paramètres du modèle SAC-SMA en fonction des caractéristiques hydroclimatiques des données d'entrées. Cette étude est réalisée sur 12 bassins versants répartis sur l'ensemble des Etats-Unis et donc marqués par des climats différents. Les résultats montrent notamment des variations de sensibilité de paramètres liées aux changements des conditions hydroclimatiques d'entrées du modèle.
- Abebe et al. (2010) analysent également le changement temporel des valeurs optimales des paramètres du modèle HBV grâce à une approche de type DYNIA. 60 000 simulations Monte-Carlo ont donc été réalisées sur un bassin versant de 1 944 km² de surface situé dans l'état du Mississipi, possédant une chronique de 40 ans de données. Une discrétisation de la chronique est ensuite effectuée afin de quantifier l'erreur réalisée à chaque pas de temps. Les résultats montrent que l'identification de paramètres optimaux est plus aisée sur certaines périodes et que ces valeurs optimales varient dans le temps.
- Enfin, Vos et al. (2010) proposent d'exploiter ces différentes conclusions pour améliorer les procédures de calage des modèles hydrologiques en ne considérant plus les paramètres des modèles comme invariant dans le temps. La nouvelle procédure d'optimisation proposée a été testée avec le modèle HyMod (5 paramètres libres) sur le même bassin versant utilisé dans l'étude d'Abebe et al. (2010). Ces données observées sont divisées en 12 périodes « hydrologiquement semblables » auxquelles 12 valeurs « optimales » de paramètres sont associées. Ces optimums sont donc considérés comme évoluant dans le temps afin de compenser les erreurs de structure du modèle mises en évidence précédemment. Différentes structures du modèle HyMod sont testées en étant calées de trois manières distinctes : 2 calages avec des paramètres non variant et un calage « dynamique » avec des paramètres pouvant varier dans le temps. Cette dernière procédure induit des performances meilleures du modèle.

L'ensemble de ces articles tendent à démontrer l'instabilité temporelle des valeurs des paramètres optimaux des modèles hydrologiques. La définition d'un « jeu de paramètre optimal » pour une chronique donnée peut donc sembler plus incertaine que la considération de plusieurs jeux de paramètres optimaux. Cette hypothèse forte est essentiellement due à des erreurs de structure des modèles hydrologiques conceptuels.

❖ *Stabilité des paramètres en conditions non-stationnaires observées*

L'observation de conditions non-stationnaires, notamment en Afrique de l'Ouest, a permis d'évaluer la stabilité des paramètres de modèles hydrologiques. En effet, une diminution marquée des précipitations a été observée à partir de 1970 dans cette région et ceci durant plusieurs décennies. Ces études sont particulièrement précieuses car elles permettent d'appréhender au mieux le problème de l'identification des paramètres de modèles hydrologiques en contexte de changement climatique observé.

- Niel et al. (2003) travaillent ainsi sur un échantillon de 17 bassins versants situés en Afrique de l'Ouest et en Afrique Centrale. Ces bassins, de superficies différentes, sont modélisés grâce au modèle GR2M. Ce modèle est, pour chaque bassin, calé sur deux sous-périodes différentes : une avant le changement du début des années 1970 et une après. Les résultats montrent que la stabilité des paramètres dépend du bassin versant considéré mais également qu'une forte dispersion des valeurs des paramètres n'est pas forcement liée à une variabilité climatique.

- Le Lay et al. (2007) testent le modèle GR4J sur le bassin du Bénin (10 050 km²), région concernée par l'existence de sous-périodes contrastées : une période « humide » (1954-1970) et une période « sèche » (1972-1990). Ces deux « segments » ainsi que l'ensemble de la chronique sont utilisés pour la phase de calage du modèle. Un ré-échantillonnage aléatoire des années est ensuite effectué afin d'obtenir 100 jeux de paramètres optimaux. La dispersion de ces paramètres est ensuite comparée à celles obtenues avec les calages réalisés sur la période « sèche » et la période « humide ». Ces dispersions étant du même ordre de grandeur, les auteurs concluent quant à une relative stabilité des valeurs des paramètres en conditions « non-stationnaires » observées.

Les résultats de ces deux articles, basés sur des conditions de climat « non-stationnaire » observées, indiquent qu'une variation climatique n'est pas obligatoirement accompagnée d'une instabilité accrue des valeurs de paramètres des modèles considérés.

2.2.2 Equifinalité des jeux de paramètres

L'équifinalité des paramètres des modèles hydrologiques est un problème largement reconnu par la communauté scientifique : il existe un nombre important de méthodes standards pour quantifier l'incertitude liée à l'équifinalité des jeux de paramètres (méthode Metropolis Monte Carlo (MCMC), analyse de sensibilité régionale (RSA), etc.). Celle la plus utilisée dans la littérature est la méthode GLUE : *Generalised Likelihood Uncertainty Estimation,* Beven et Binley (1992). Elle a été construite autour de cette limite fondamentale des modèles hydrologiques conceptuels qu'est l'équifinalité des jeux de paramètres et donc l'absence d'un jeu de paramètre optimal. Ainsi, une projection hydrologique moins incertaine serait une combinaison de différents jeux de paramètres, pondérée par une distribution de probabilité de ces jeux. Cette distribution de probabilité *à priori* est considérée être la vraisemblance du modèle et permet donc d'accepter ou de rejeter certaines simulations en définissant un seuil de vraisemblance. Cette approche permet donc d'estimer l'incertitude liée à l'équifinalité des jeux de paramètres. Freer et al. (1996) montrent que cette quantification est fortement conditionnée par le choix de la distribution de probabilité des jeux de paramètres.

Il existe différents utilisations possibles de la méthodologie générale de GLUE :

- sur *l'exploration de l'espace des paramètres* : la genèse d'un très grand nombre de paramètres aléatoire peut être réalisée grâce à différentes méthodes d'échantillonnage. L'utilisation d'algorithmes de type Monte-Carlo (Metropolis, 1949) permet une « visite aléatoire » de l'espace des paramètres. La méthode d'Hypercube Latin, divisant l'espace des paramètres en sous-ensemble, « force » un tirage dans chacun de ces sous-ensembles et permet donc un examen général des jeux de paramètres possibles. Cette technique permet donc une exploration plus complète de l'espace des paramètres et un temps de calcul moindre. Enfin, des techniques d'optimisation des paramètres peuvent être utilisées : la méthode *Shuffled Complex Evolution-UA* (SCE-UA : Duan et al. (1992)) développée afin d'identifier le jeu de paramètre optimal, est constituée d'un échantillonnage préliminaire de type Hypercube Latin, qui tend ensuite à converger vers un jeu de paramètre optimal.
- sur le *seuil d'acceptabilité des jeux de paramètres :* les jeux générés doivent être testés afin de caractériser leur acceptabilité. Il existe deux manières simples de fixer ce seuil. Il est tout d'abord possible de fixer un nombre de jeux de paramètres à retenir. Le seuil peut également être défini en fonction d'une valeur maximale de la fonction objectif considérée, obtenue après un calage préalable du modèle. Le seuil d'acceptabilité d'un jeu de paramètres correspond alors à un certain pourcentage de cette valeur maximum. D'autres méthodes plus complexes sont possibles. Les approches de type GLUE rajoute en effet un « poids » à chacun des jeux de paramètres

acceptables : certains jeux sont considérés comme plus proches du jeu optimal que d'autres. Ce poids relatif au jeu de paramètres est attribué grâce à une fonction de vraisemblance.

La quantification des incertitudes liées à l'équifinalité nécessite donc en premier lieu la mise en place d'un échantillonnage de l'espace des paramètres. Tous les jeux générés sont alors testés avec le modèle considéré. Un seuil « arbitraire » est ensuite fixé afin de rejeter certains jeux. La définition de ce seuil est peut explicitée dans la plupart des méthodologies étudiées.

2.3 Bilan de la revue bibliographique et problématique

Les paramètres des modèles hydrologiques sont-ils une source d'erreurs négligeable par rapport à l'ensemble de la cascade d'incertitude rencontrée lors d'étude d'impact du changement climatique ? Les études réalisées pour quantifier le poids relatif des incertitudes climatiques et hydrologiques ne permettent pas, à l'heure actuelle, de conclure sur cette question. Les articles évoquant les incertitudes engendrées par les paramètres des modèles se concentrent généralement sur la robustesse de leur identification ou sur l'équifinalité des jeux de paramètres. Si le choix de la période de calage peut apparaitre comme une source importante d'erreurs en contexte de changement climatique, il semble nécessaire de quantifier également les erreurs supplémentaires pouvant être induites par l'équifinalité des jeux de paramètres.

3. METHODOLOGIE

3.1 Méthodologie générale

L'objectif général de notre étude est donc de quantifier les incertitudes engendrées par la non-robustesse des paramètres puis les erreurs supplémentaires liées à l'équifinalité des paramètres en contexte de changement climatique.
La première étape de la méthodologie consiste à quantifier l'impact de la spécificité hydroclimatique des données utilisées en calage sur l'identification des paramètres. Les tests réalisés pour quantifier cette incertitude sont basés sur des procédures de calage-validation différentiels (« differential-split sample test » (Klemeš, 1986)) nécessitant l'identification de sous-périodes climatiquement contrastées. Chacune de ses périodes est utilisée pour le calage des modèles, ce qui génère donc autant de jeux de paramètres que de sous-périodes considérées. Les jeux de paramètres sont ensuite testés sur une période différente.
L'incertitude liée à la spécificité climatique de la période de calage sera ensuite mise en perspective de l'incertitude relative à l'équifinalité. La méthode adoptée consiste à générer en premier lieu un grand nombre de jeux de paramètre aléatoire qui seront tous testés. Les sorties des jeux offrant des bonnes performances (i.e. proches de celles obtenues avec le jeu de paramètre optimal) sont ensuite analysées.

3.2 Estimation des incertitudes liées aux paramètres

3.2.1 Robustesse de l'identification des paramètres

Afin d'étudier l'impact de la spécificité climatique des données utilisées en calage sur l'identification des paramètres, plusieurs sous-périodes « climatiquement contrastées » ont tout d'abord été identifiées. Des tests préalables ont permis de fixer la longueur de ces sous-périodes à 3 ans. Cette durée particulière semble en effet être un bon compromis entre « significativité hydrologique » et bonne performance des modèles. Des détails de ces calculs sont fournis en Annexe 1.
Plusieurs indices climatiques peuvent être choisis pour mettre en évidence ces différentes périodes, en fonction des propriétés climatiques que l'on veut mettre en valeur. En contexte de changement climatique, c'est l' « *aridité* » d'une période qu'il semble intéressant à quantifier. Elle peut être estimée de manière simple grâce au rapport du cumul des précipitations journalières tombées sur cette période et du cumul des évapotranspirations potentielles estimées sur cette même période. Un raffinement peut être apporté en ne considérant que le cumul des pluies hivernales. En effet, ce sont les pluies tombant durant l'hiver qui contribuent majoritairement à l'écoulement « de base » des rivières. Ainsi, pour caractériser chaque sous-période de 3 ans le coefficient d'aridité suivant (noté C) a été utilisé :

$$C_a = \frac{P_{hivernale_a}}{ETP_a}$$

où C_a est le coefficient d'aridité de l'année a, $P_{\text{hivernale a}}$ est la moyenne des pluies tombées entre les mois de novembre et d'avril et ETP_a est la moyenne des ETP de l'année a.
Ce coefficient d'aridité sera en premier lieu appliqué à l'ensemble des périodes de 3 ans continues disponibles dans chaque chronique. Il permettra donc d'estimer l' « aridité » de chacun de ces sous-périodes. Un bassin versant possédant (n) années de données verra sa chronique divisée en

(n-1) périodes de 3 ans caractérisées par une valeur du coefficient d'aridité C. Quatre sous-périodes particulières seront ensuite identifiées par bassin versant :

- Une période considérée comme « humide ». Elle correspond à la période de 3 ans ayant le coefficient d'aridité C le plus faible.
- Une période considérée comme « moyenne » représentant les « caractéristiques climatiques moyennes » observées sur un bassin versant donné. Elle correspond à la période de 3 ans ayant le coefficient d'aridité le plus proche de celui calculé sur l'ensemble de la chronique considérée.
- Un couple de deux périodes « sèches ». Ces deux sous-périodes correspondent au couple de segments de 3 ans sans recouvrement ayant le coefficient d'aridité le plus fort.

Pour chaque bassin versant, les périodes « humide », « moyenne » ainsi qu'une des deux « sèches » seront utilisés pour le calage des modèles. Les impacts de ces contrastes climatiques des périodes de calages seront ainsi évalués en terme de stabilité des paramètres et de performances sur la période sèche non utilisée pour le calage.

L'absence de conditions non-stationnaires observées (telles qu'en 1970 en Afrique de l'ouest et centrale) ne permet pas de définir clairement deux périodes contrastées pouvant être l'objet de tests de calage-validation différentiels. L'identification de périodes continues de 3 ans climatiquement contrastées permet néanmoins d'approcher des conditions de climat changeant. Néanmoins, ces sous-périodes de 3 ans particulières peuvent, pour certains bassins, n'offrir qu'un contraste climatique limité. De plus, les conditions sèches attendues dans le futur sont susceptibles de durer plus longtemps que les 3 ans de la période de calage, entrainant ainsi un assèchement sur le long terme des réserves hydriques des bassins versants. Cette tendance n'est pas forcement approchée en considérant les 2 années sèches isolées de la période de calage.

3.2.2 Equifinalité des jeux de paramètres

Les méthodes classiques de quantification consistent à générer de manière aléatoire un très grand nombre de jeux de paramètres et de tester leurs performances. L'idée est donc de considérer les jeux de paramètres offrant des performances équivalentes à celles obtenues avec le jeu de paramètre « optimal ». Un seuil, fixé par rapport à la performance de ce jeu « optimal » ($0{,}9*NSE_{opt}(\sqrt{Q})$), permet de considérer un nombre limité de jeux de paramètres équifinaux. La valeur de ce seuil doit néanmoins permettre la sélection d'une large gamme de jeu de paramètres. Pour chaque phase de calage, un nombre différent de jeux de paramètres équifinaux est retenu. Ces jeux retenus sont ensuite utilisés par les modèles et l'analyse des sorties associées permet une quantification de l'incertitude liée à l'équifinalité.

L'échantillonnage de jeux de paramètres est réalisé dans cette étude par la méthode SCE-UA. Cette technique d'optimisation a été utilisée pour évaluer l'équifinalité dans plusieurs études (Vrugt et al. (2003), Blasone et al. (2008)). Elle permet l'identification d'un jeu de paramètre « optimal ». La première étape consiste à générer un nombre fixé de jeux de paramètres aléatoires (approche de type *Hypercube Latin* : division de l'espace des paramètres en « région » permettant un meilleur échantillonnage). Ce nombre est fixé à 6000 dans cette étude. Chacun de ces jeux de paramètre est testé en estimant ses performances sur la période de calage considérée. La deuxième phase consiste ensuite à échantillonner de nouveaux jeux de paramètres permettant de converger vers un jeu considéré comme « optimal ». L'ensemble des jeux de paramètres testés est fixé à un nombre maximal de 8000. Les jeux de paramètres dont les performances sont supérieures au seuil sont considérés comme équifinaux. Chaque jeu de paramètre sélectionné est ensuite utilisé en simulation. La dispersion de ces simulations permet de quantifier les incertitudes liées à l'équifinalité des paramètres des modèles.

Les approches classiques de type Monte-Carlo (« visite aléatoire » de l'espace des paramètres) et Hypercube Latin (division de l'espace des paramètres en sous-ensemble puis tirage dans chacun de ces sous-ensembles) ont été préalablement testées. Ces méthodes n'offraient pas de compromis intéressant entre l'obtention de jeux de paramètres acceptables et le temps de calculs, elles n'ont finalement pas été retenues pour cette étude. Il est en effet important de préciser que ces tests nécessitent des temps de calculs importants. L'application de la méthode SCE-UA au modèle GR4J pour une période de calage de 3 ans nécessite environ 2 heures pour échantillonner l'espace des paramètres et tester tous les jeux identifiés comme équifinaux.

3.3 Impact de ces incertitudes sur les projections hydrologiques

3.3.1 Sorties des modèles considérées

L'analyse des incertitudes va être menée séparément sur 3 variables particulières issues des différentes simulations :

- Q_{05}, correspondant au débit surpassé 95 % du temps (mm/j). Ce premier centile permet de caractériser la sévérité des étiages.
- Q_{MA}, correspondant au débit moyen annuel (mm/an). Cette variable permet d'avoir une idée générale des impacts du changement climatique.
- Q_{95}, correspondant au débit surpassé 5 % du temps (mm/j). Ce centile renseigne notamment l'intensité des crues.

3.3.2 Validations des simulations avec les données observées

Les premiers tests consistent à utiliser 3 sous-périodes préalablement identifiées pour caler les modèles. Ces 3 procédures de calage seront ensuite validées en considérant une quatrième sous-période, considérée comme sèche.
La première étape permet d'estimer l'erreur liée à la robustesse de l'identification des paramètres. L'impact de la spécificité climatique de la période de calage peut tout d'abord être évalué en termes de performances des modèles (évaluées grâce au critère de Nash & Sutcliffe sur les racines carrés des débits (NSE(√Q)) : l'utilisation d'une période sèche pour la phase de calage est-elle plus performante qu'une autre sous-période pour simuler les débits d'une autre période sèche ? Il est également intéressant de s'intéresser aux valeurs des paramètres. Les 3 phases de calage engendrent pour chaque bassin versant 3 jeux de paramètres optimaux différents. Ces jeux optimaux sont donc comparés pour chacun des deux modèles hydrologiques. Enfin, la comparaison des sorties des modèles en fonction des procédures de calages des modèles permet de quantifier les incertitudes existantes en comparant les variables simulées avec celles observées. Un « biais » est alors estimé pour chaque variable par bassin versant et par calage :

$$b_{i,j} = \frac{x_{sim} - x_{obs}}{x_{sim}}, \textit{ avec i : type de calage et j : bassin}$$

L'impact supplémentaire de l'incertitude liée à l'équifinalité des jeux de paramètres est ensuite évalué. L'ensemble des sorties associées aux jeux équifinaux est parcouru afin d'identifier, par variable, les valeurs minimales et maximales simulées. Ces extrêmes sont comparés aux valeurs observées. Enfin, deux « biais » sont évalués, par type de calage et de bassin versant : un premier associé aux variables estimées minimales et un deuxième associé aux variables estimées maximales. Cette méthode permet donc de « borner », par type de calage, l'ensemble des

prévisions possibles. Les erreurs engendrées par ces deux sources d'incertitudes sont enfin comparées par modèle.

3.3.3 Projections sur le scénario climatique futur

Les différents calages obtenus sont ensuite utilisées pour simuler la réponse hydrologique associée aux 3 tranches du scenario futur : temps présent (1980-2000), milieu de siècle (2045-2065) et fin de siècle (2080-2100). L'absence de données de validation ne permet pas d'estimer un biais par variable. Les distributions des sorties des modèles sont donc utilisées pour évaluer la dispersion liée à spécificité climatique de la période de calage et l'équifinalité des jeux de paramètres. Ces quantifications permettent enfin de mettre en évidence des tendances d'évolution des débits caractéristiques dans le futur. Ainsi, des différences entre les débits simulés en milieu de siècle et les débits simulés en temps présent et entre les débits simulés en fin de siècle et en milieu de siècle permettent d'évaluer pour chaque bassin versant les impacts du changement climatique en prenant en compte les incertitudes liées à la spécificité climatique de la période calage puis les incertitudes liées à l'équifinalité des jeux de paramètres. L'impact du premier type d'incertitude est évalué en considérant les 3 signes des différences associées aux 3 calages : deux différences positives et une négative est associée à une augmentation significative du débit considéré entre les deux périodes étudiées. De la même manière, l'ensemble des sorties associées aux jeux de paramètres équifinaux est considéré : si plus de 95 % des sorties des jeux équifinaux sont marqués par une différence positive, alors une tendance à l'augmentation du débit particulier considéré sur la période étudiée est notée. Ces différences sont donc estimées par bassin versant pour les 3 débits caractéristiques et pour les deux sources d'incertitudes.

4. DONNEES ET MODELES

4.1 Données hydroclimatiques

Les données hydroclimatiques utilisées dans cette étude concernent trois grands bassins français : la Loire, la Seine et la Somme. Les impacts « hydrologiques » du changement climatique sur chacun de ces trois bassins ont fait l'objet de deux projets de recherches : le projet RExHySS (Ducharne et al., 2010), sur la Seine et la Somme et le projet ICC-Hydroqual, sur la Loire, coordonné par Florentina Moatar. L'ensemble des données utilisées pour cette étude (hydrologiques, hydroclimatiques (observées et simulées par le scénario futur considéré) sont issues des bases de données construites pour ces deux projets de recherches.

4.1.1 Données climatiques observées

Les premières informations à rassembler concernent les chroniques journalières de précipitations (P) et d'évapotranspiration (ETP) journalières. Les données utilisées dans cette étude sont issues de la base de données SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige), données disponibles sur la période 1970-2007. Ces informations sont spatialisées sur l'ensemble des trois bassins étudiés par un maillage de 8 km de côté. Les données SAFRAN ont été validées sur l'ensemble du territoire français (Quintana-Seguí et al., 2009).

4.1.2 Scénario climatique considéré

Un seul scénario climatique futur a été considéré dans cette étude. Il est issu du scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B fourni par l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Les scénarios A1 modélisent une croissance économique rapide, une croissance démographique atteignant un pic en milieu de siècle puis déclinant, et l'introduction rapide et efficace de nouvelles technologies. Le scénario A1B se distingue des autres familles (A1T et A1F1) en considérant un développement technologique s'équilibrant entre l'utilisation d'énergie fossile et des « nouvelles sources d'énergies ». Les données issues de ce scénario ont été traitées avec le modèle de circulation atmosphérique globale GFDL_CM2_1 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Coupled Model) développé au NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory. Ce modèle fournit des données à l'échelle globale, qu'il est nécessaire de « désagréger » à une échelle plus régionale. Le scénario désagrégé utilisé dans cette étude a été obtenu grâce à la méthode des régimes de temps (Boé et al. (2006), Boé et al. (2007)). Des données d'évapotranspiration potentielle et de précipitations journalières sont donc générées sur les bassins de la Somme, de la Seine et de la Loire à partir de données désagrégées sur des mailles de 8 km de côté. Ces données sont disponibles sur trois tranches de temps : temps présent (TP : 1960-2000), milieu de siècle (MS : 2045-2065) et fin de siècle (FS : 2080-2100). Une analyse de différents scénarios climatiques désagrégés (dont le scénario A1B_GFDL_CM2_1) a été réalisée en annexe du projet Rexhyss (Hachour et al., 2009) et montre que pour la Seine et la Somme, le modèle GFDL_CM2_1 fournit des scénarios intermédiaires parmi les 10 autres modèles climatiques testés lors du projet.

4.1.3 Données hydrométriques

La première base de données à constituer concerne les débits observés. La BANQUE HYDRO regroupe des chroniques de débits journaliers, issues d'observations sur plusieurs milliers de

stations hydrométriques, réparties sur l'ensemble du territoire français. Un premier échantillon « brut » de 278 stations hydrométriques a été rassemblé. Il regroupe 5 stations hydrométriques pour le bassin de la Somme, 54 stations pour celui de la Loire et 219 stations pour la Seine. La méthodologie développée pour cette étude implique de travailler sur des chroniques répondant à des critères de qualité, de longueur et de continuité qu'il a fallu déterminer.

La quantité de données disponibles a été évaluée en considérant le nombre d'informations manquantes, i.e des lacunes de données de débits. Un test a été mis en place afin de considérer chaque année hydrologique (du 1er septembre au 31 aout) de l'ensemble des chroniques comme étant *exploitable* ou *déficitaire* en quantité de données. Des seuils ont été choisis arbitrairement : une année déficitaire est une année possédant 20 jours consécutifs sans données et/ou 40 jours sans données sur l'ensemble de l'année. Il est important de noter que la majorité des périodes de lacunes sont retrouvées en été (dues principalement aux faibles débits observés, difficilement mesurables). Un second test a été réalisé pour ne considérer que des chroniques relativement « longues » et constituées uniquement d'année *exploitables*. La durée minimale des chroniques a été fixée à 16 années hydrologiques : 4 périodes « particulières » de 3 ans plus une période de 3 ans supplémentaire ainsi qu'une année d'initialisation.

La qualité « intrinsèque » des données, i.e. leur justesse hydrométrique, n'a pas été jugée lors de cette étude. En effet, un nombre presque infini de tests peuvent être mis en place pour évaluer cette justesse. Néanmoins, un examen visuel de la chronique de chaque bassin a été réalisé pour identifier des problèmes de lacunes et/ou d'enregistrement sur les données de débits.

4.1.4 Caractéristiques de l'échantillon de bassins versants

L'ensemble de ces critères ont donc permis de créer l'échantillon « définitif » de bassins versants, regroupant 120 bassins : 1 pour la Somme, 22 pour la Loire et 97 pour la Seine (cf. Figure 2). Différentes caractéristiques « physiographiques » et « hydroclimatiques » ont été estimées pour caractériser cet échantillon (cf. Figure 2).

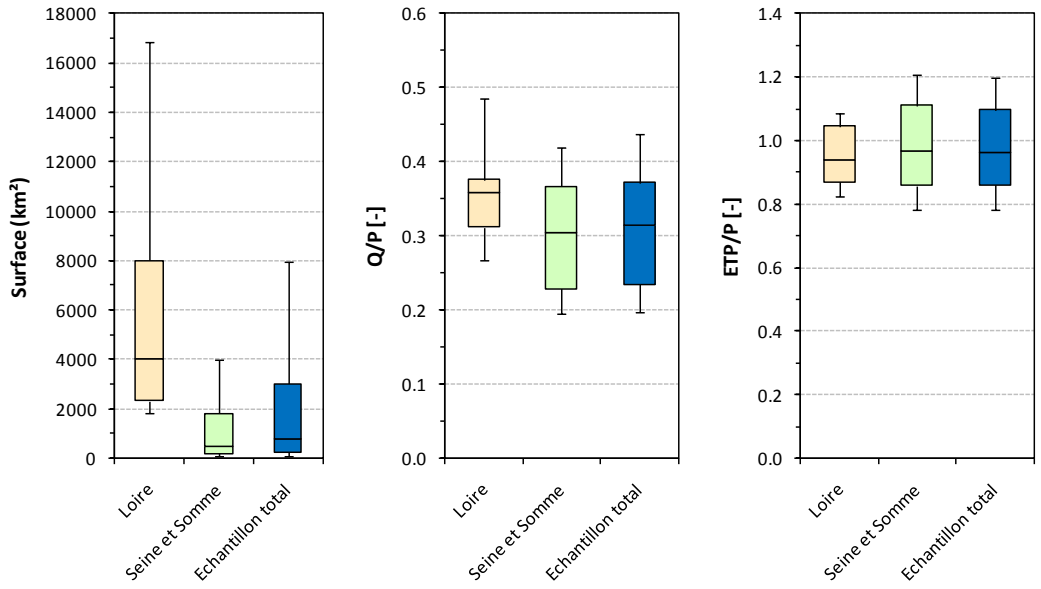


Figure 2 : Caractéristiques « physiographiques » et « hydrologiques » de l'échantillon de bassin versant considéré

De manière générale, les bassins versants de la Loire permettent d'apporter une certaine diversité à la fois « physique » et « climatiques ». Ces bassins possèdent, en moyenne, une surface beaucoup plus importante (une surface médiane de 4018 km² contre 452 km² pour les bassins de la Seine et de la Somme). Ils sont de plus caractérisés par des altitudes moyennes légèrement plus importantes, ainsi qu'un contexte hydrogéologique différent : bassin sédimentaire (bassin de Paris, constitué d'aquifères continus situés à différentes profondeurs), massif cristallin (massif central, composé d'aquifères superficiels discontinus), etc.

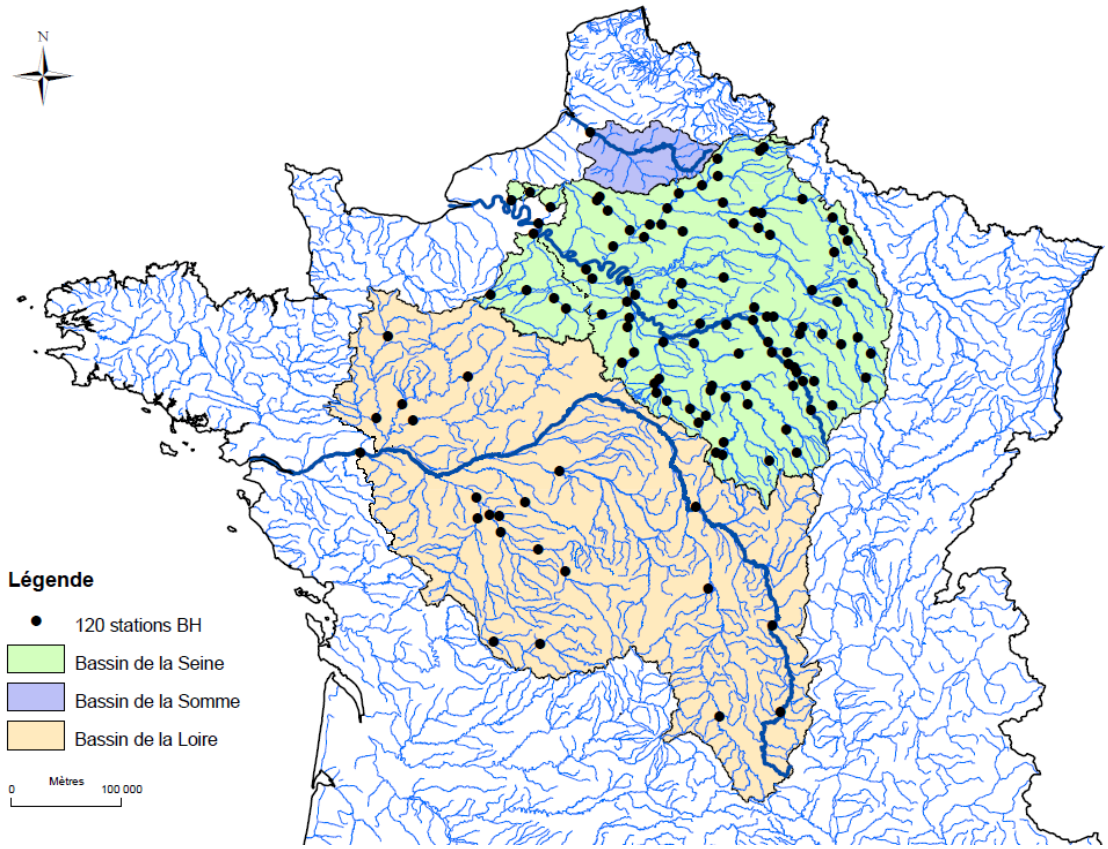


Figure 3 : Localisation des 120 stations hydrométriques considérées

4.2 Modèles hydrologiques

Deux modèles pluie-débit au pas de temps journalier ont été utilisés : GR4J (Perrin et al., 2003) et TOPMO, inspiré de TOPMODEL (Beven et Kirkby, 1979). Il s'agit de deux modèles globaux conceptuels qui nécessitent exactement les mêmes données d'entrées (précipitation, ETP). Ils appartiennent à la famille des modèles dits « *parcimonieux* [2] » i.e. possédant un nombre limité de paramètres libres. Il semble en effet que l'utilisation de tels modèles peu complexes permettent d'obtenir des performances semblables voir supérieures à celles obtenues avec des modèles décrivant beaucoup plus « finement » les processus hydrologiques (i.e. avec plus de paramètres). Ainsi, Perrin et al. (2001) montrent qu'un modèle ayant entre 3 et 5 paramètres permet

[2] Parcimonie : (du latin *parcere* « retenir » et *monere* « faire penser ») épargne, économie extrême, minutieuse (Robert 2010).

l'obtention de performances satisfaisantes à un pas de temps journalier. La structure de ce type de modèle est généralement articulée autour de deux sous-ensemble de processus : la *fonction de production*, regroupant ceux qui détermineront la partie de la pluie contribuant à l écoulement (appelée pluie efficace, fonction des précipitations brutes et de l'évapotranspiration potentielle) et la *fonction de transfert*, rassemblant les processus qui « transforment » la pluie efficace préalablement estimée en débit.
Les deux modèles seront décrits dans les deux paragraphes suivants à travers plusieurs points : hypothèses principales, structures, paramètres libres, utilisations en contexte de changement climatique, etc. Une brève comparaison des deux modèles sera ensuite réalisée dans un troisième paragraphe.

4.2.1 GR4J

Le modèle GR4J (Perrin et al., 2003) possède 4 paramètres libres, qui seront décrits ci-après (cf. Figure 4). Il a été développé en utilisant des données provenant d'un grand nombre de bassins versants (plusieurs centaines), possédant des caractéristiques climatiques contrastées. La fonction de production de GR4J est assurée par l'interception de la pluie brute et de l'évapotranspiration potentielle et un premier réservoir représentant l'humidité du sol (paramètre X1). La fonction de transfert est quant à elle construite autour d'une composante d'écoulements (paramètre X4) et d'un autre réservoir non-linéaire (paramètre X3). Un terme d'échange permet en outre de modéliser des pertes ou des gains en eau du système vers des aquifères profonds et/ou d'autres bassins versants (paramètre X2).
GR4J semble avoir été peu utilisé jusqu'à présent en contexte de changement climatique : la recherche « *GR4J climate change* » sur le site internet « Science direct » permet d'accéder à 15 articles. Le Lay et al. (2007) ont néanmoins testé ce modèle dans leur étude portant sur la stabilité des paramètres en conditions climatiques non-stationnaire.

4.2.2 TOPMO

TOPMODEL a été développé par Beven et Kirkby (1979) à partir d'observations issues de bassins de moyenne montagne du Nord-Ouest de l'Angleterre, région marquée par un climat humide. Ce modèle est largement utilisé par la communauté des hydrologues modélisateurs.
TOPMODEL est construit autour d'une hypothèse centrale : la genèse des processus de ruissellement est essentiellement liée à la topographie (le nom du modèle provient de cette hypothèse : TOP pour topographie). La distribution de l'altitude d'un bassin est décrite au moyen d'un indice topographique, caractérisant chaque « pixel » du bassin. Dans la version de TOPMODEL utilisée dans cette étude, la distribution de cet indice est approchée grâce à une fonction paramétrisée du modèle et non estimée à partir de la topographie du bassin (Edijatno et al., (1999) ; Michel et al., (2003)). Cet ajout d'un paramètre libre (paramètre X3) est la principale différence entre TOPMO et la version originale de TOPMODEL (cf. Figure 4).
TOPMODEL modélise donc une nappe dite « de versant », qui apparait dans les premiers centimètres du sol après un fort épisode pluvieux. Cette eau s'infiltre et transite « lentement » par le sol jusqu'à saturation. Un ruissellement « rapide » apparait alors, par refus d'infiltration. L'écoulement de cette nappe temporaire est essentiellement lié à la topographie du bassin. La fonction de production de TOPMO est assurée par un premier réservoir d'interception des précipitations brutes et de l'évapotranspiration potentielle (paramètre X2) puis par un deuxième réservoir « exponentiel » gérant l'humidité du sol (paramètres X1 et X6). Le module de transfert de TOPMO est quant à lui constitué d'un troisième et dernier réservoir quadratique (paramètre X5) ainsi que d'une fonction de délai sur le débit final (paramètre X4).

TOPMODEL est un modèle qui a été largement utilisé pour étudier l'impact du changement climatique, notamment par la communauté d'hydrologues britanniques, très active sur ce sujet. Ainsi, 419 articles sont cités sur le site « Science direct » grâce à la recherche des mots clés « *TOPMODEL Climate Change* ».

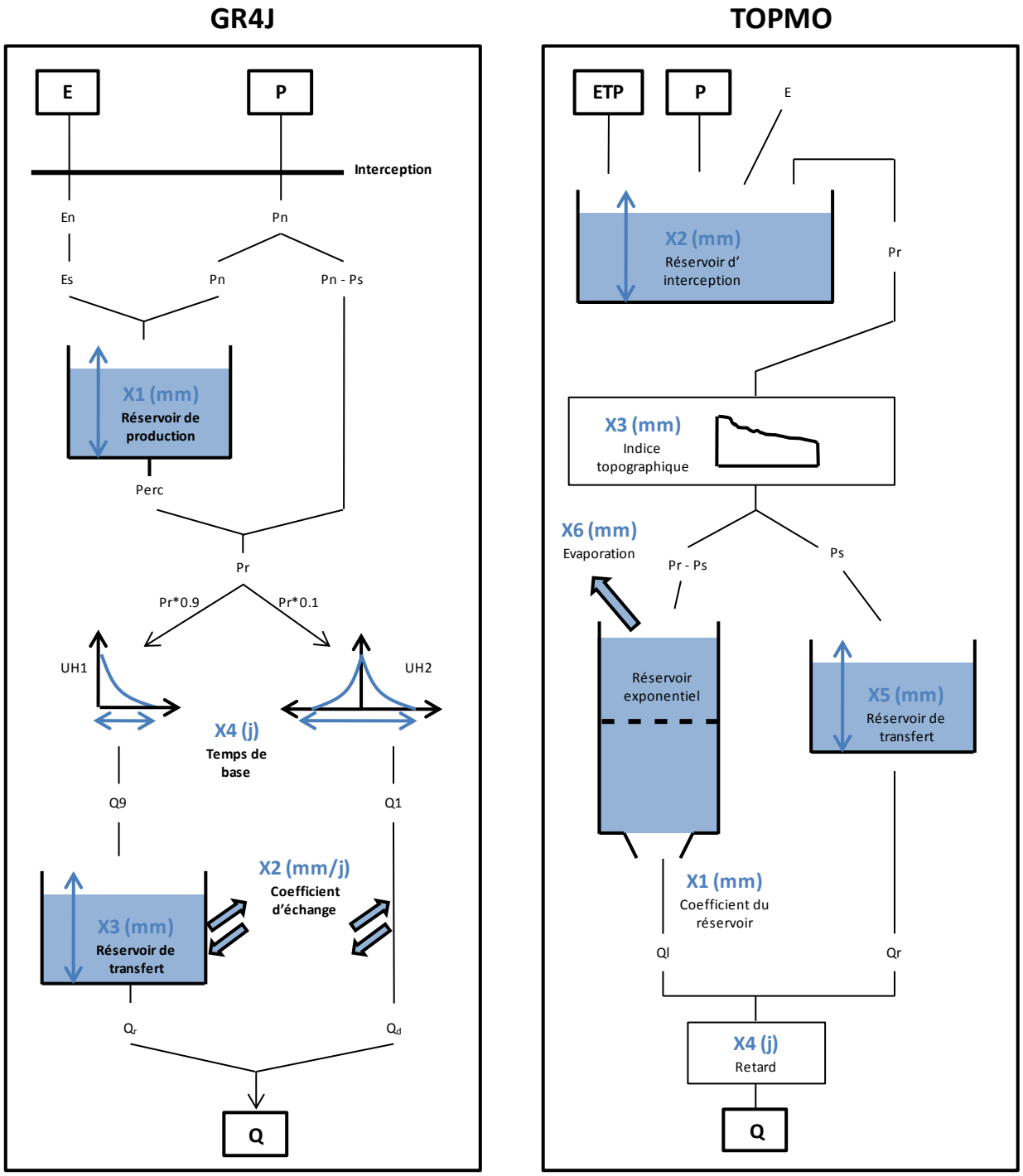


Figure 4 : Schéma des modèles hydrologiques conceptuels GR4J et TOPMO

4.2.3 Comparaison et mise en application des modèles

❖ *Quelles sont les principales différences entre ces deux modèles ?*

La première différence notable concerne le nombre de paramètres libres, plus important pour TOPMO (6) que pour GR4J (4). La répartition de ces paramètres entre les « sous-ensembles de

processus hydrologiques » est néanmoins la même : une première moitié pour les fonctions de production et l'autre moitié pour les fonctions de transfert (cf. Tableau 1). Concernant la structure intrinsèque des modèles, la différence principale concerne la présence d'un terme d'échanges souterrains dans GR4J. Ce terme (paramètre X2) peut être assimilé à un « robinet supplémentaire » permettant de jouer sur le bilan en eau global d'un bassin versant. En effet, les seules entrées d'eau dans TOPMODEL (et dans la majorité des modèles pluie-débit) sont induites par les pluies, alors que les pertes sont uniquement contrôlées par l'évapotranspiration et les débits à l'exutoire. Au contraire, une valeur positive du paramètre X2 de GR4J implique un apport d'eau attribué aux aquifères profonds, alors qu'une valeur négative induit la simulation d'une perte d'eau.

Modèles	Paramètres	Unité	Fonction	Processus
GR4J	X1	mm	Capacité du réservoir de production	PRODUCTION
	X2	mm/j	Coefficient d'échange avec les eaux souterraines	PRODUCTION
	X3	mm	Capacité du réservoir de transfert	TRANSFERT
	X4	jour	Temps de base des hydrogrammes	TRANSFERT
TOPMO	X1	mm	Coefficient du réservoir exponentiel	TRANSFERT
	X2	mm	Capacité du réservoir d'interception	PRODUCTION
	X3	mm	Paramètre d'indice topographique	PRODUCTION
	X4	jour	Retard	TRANSFERT
	X5	mm	Capacité du réservoir de transfert	TRANSFERT
	X6	mm	Paramètre d'évaporation	PRODUCTION

Tableau 1 : Comparaison des paramètres des modèles GR4J et TOPMO

- *Comment optimiser les paramètres et selon quelle fonction objectif ?*

Pour simplifier les différents calculs effectués, les paramètres « réels »des modèles sont transformés afin de « borner » l'espace des paramètres possibles (typiquement entre -10 et 10).
Différentes techniques d'optimisation peuvent être utilisées pour la phase de calage des paramètres des modèles. L'algorithme utilisé pour les tests initiaux est une technique d'optimisation locale, procédant à des procédures de recherche du jeu de paramètre « optimal » dans l'espace des paramètres. Cette recherche s'effectue « pas-à-pas » (Edijatno et al., 1999) et fournit des résultats en général très satisfaisants avec un temps de calcul très faible. Les principaux résultats ont quant à eux été obtenu avec la technique d'optimisation SCE-UA (Duan et al., 1992), présentée précédemment.
Le critère de (Nash et Sutcliffe, 1970) calculé sur les « racines carrés des débits » (NSE(√Q)) a été utilisé comme fonction objectif pour les différentes phases de calages des deux modèles. Il s'avère en effet que l'utilisation de ce critère permet une bonne représentation des débits de crues mais également des débits d'étiages (Oudin et al., 2006).

4.2.4 Performances générales des modèles sur les bassins étudiés

Plusieurs tests préalables ont été mis en place afin d'évaluer les performances générales des deux modèles sur les chroniques observés Ces performances sont évaluées grâce à la méthode d'optimisation « pas-à-pas.

Toutes les stations sélectionnées ont été préalablement utilisées pour la phase de calages des deux modèles : les résultats sont satisfaisants puisque plus de 60 % des bassins-versants sont

modélisés avec des critères de Nash (calculés sur les racines carrés des débits) supérieurs à 0,80 pour GR4J et pour TOPMO (cf. Figure 5).

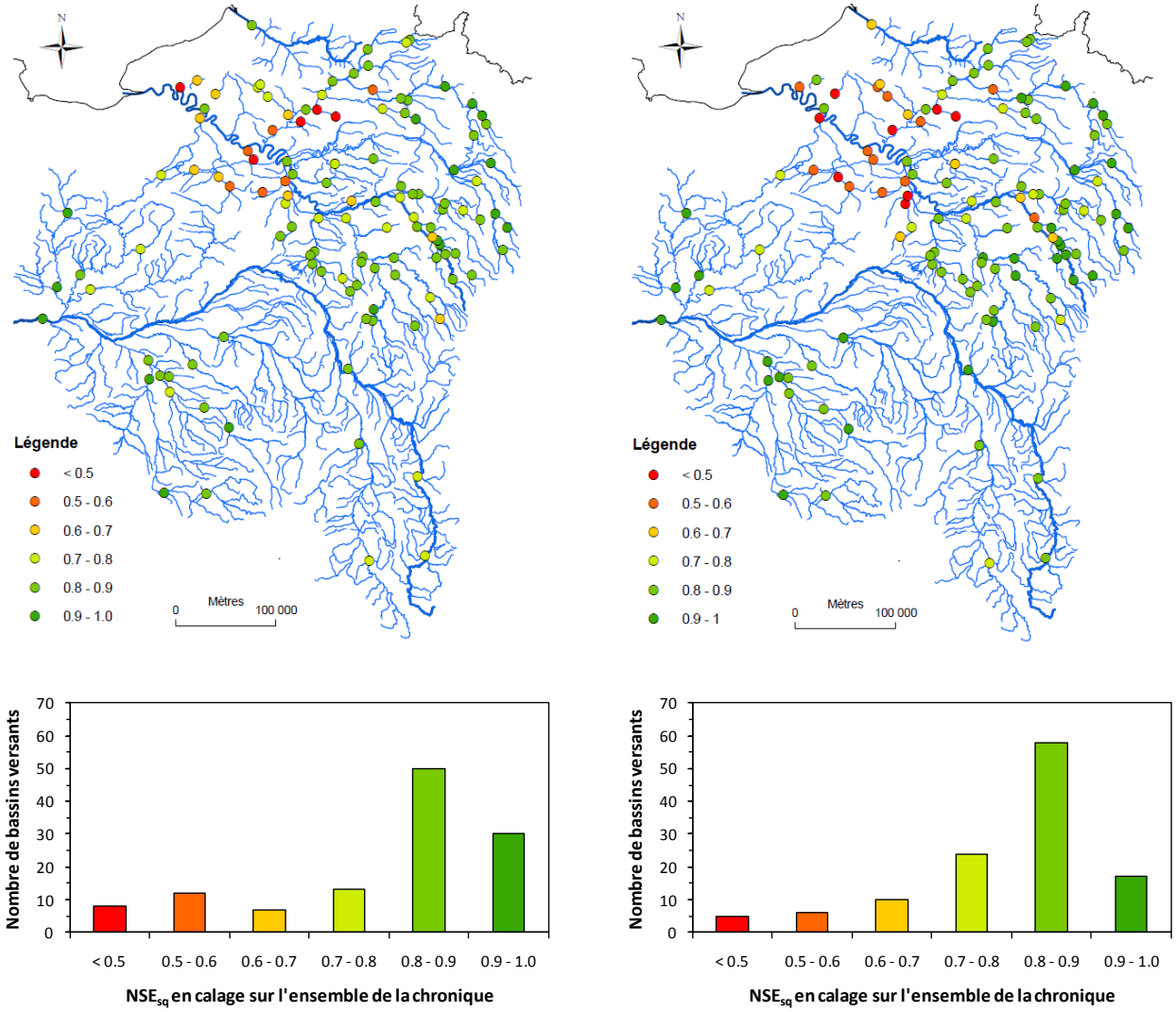


Figure 5 : Performances des modèles GR4J (gauche) et TOPMO (droite) en calage sur les 120 bassins versants

De manière générale, les bassins versants pouvant être considérés comme « mal modélisés » le sont pour les deux modèles. Il s'agit en majorité de « petits » sous-bassins de la Seine, situés en aval de Paris.

Chaque chronique a été divisée en deux sous-périodes de même longueur afin de mettre en place des procédures de calage-validation classiques. Les performances en validation du modèle GR4J semblent être légèrement meilleures que celles obtenues avec le modèle TOPMO (cf. Figure 5). La « perte » de performances entre le calage et la validation est du même ordre de grandeur entre les deux modèles : entre 2 et 5 points sur le critère de Nash sur les racines des débits pour GR4J et TOPMO.

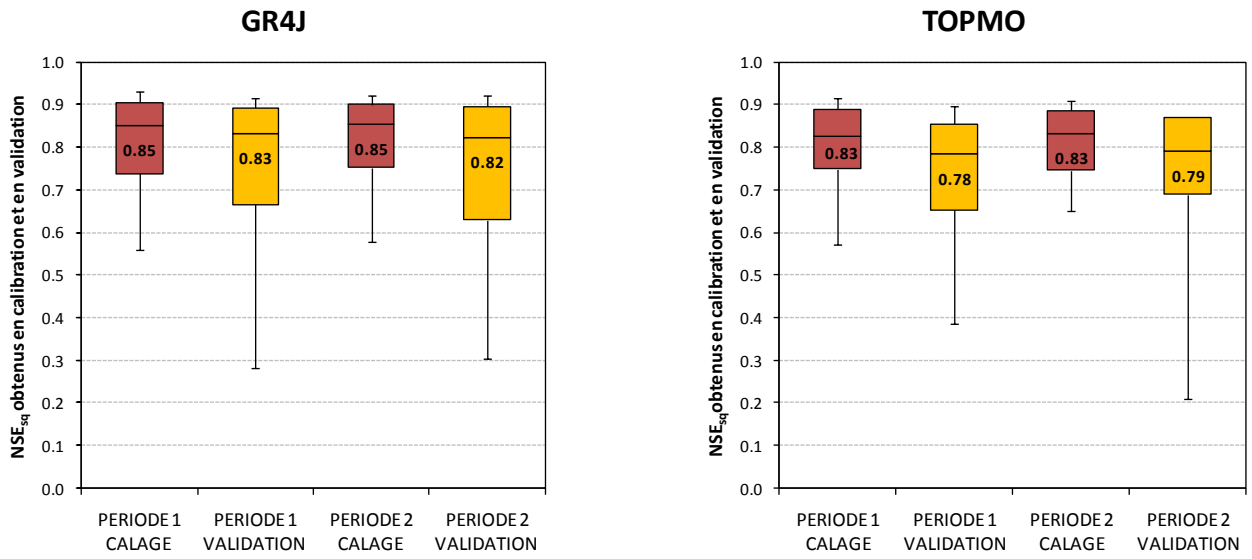


Figure 6 : Performances des modèles en calage et en validation obtenues sur deux sous-périodes différentes

Concernant la stabilité des paramètres, les résultats sont différents en fonction des modèles et des paramètres. Ainsi, pour GR4J, les paramètres X2 et X3 semblent être stables (coefficients de corrélation supérieurs à 0,8) alors que les paramètres X1 et X4 le sont nettement moins (coefficients de corrélation proches de 0,3). Pour TOPMO, les paramètres sont moins stables (coefficients de corrélation inférieurs à 0,3 pour X1, X2, X5 et X6 et supérieurs à 0,6 pour X3 et X4).

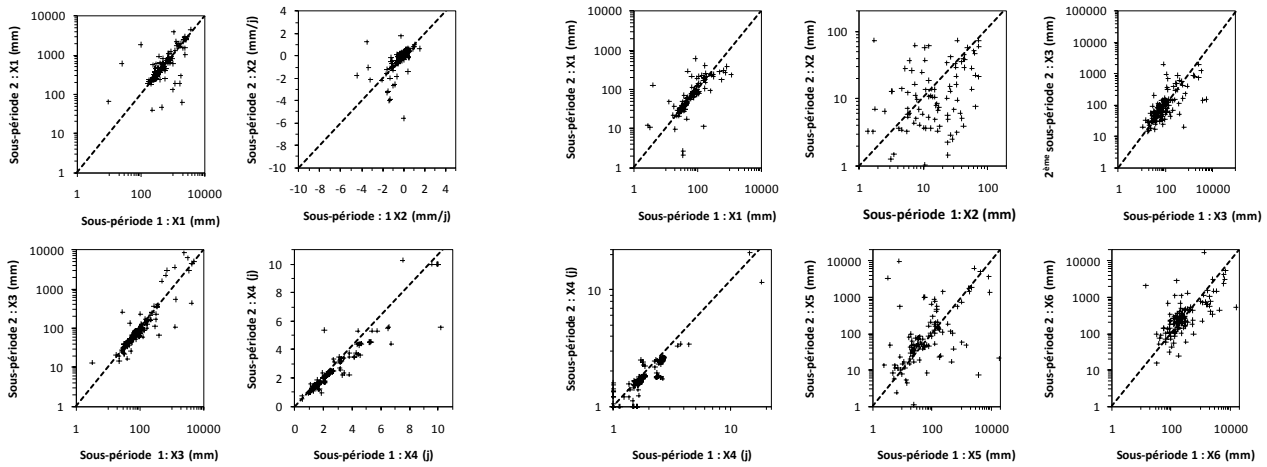


Figure 7 : Performances des modèles et stabilité des paramètres sur deux sous-périodes distinctes

5. RESULTATS ET INTERPRETATIONS

5.1 Robustesse de l'identification des paramètres

5.1.1 Identification des périodes « climatiquement contrastées »

L'identification des sous-périodes est la base de la méthodologie décrite précédemment. La Figure 8 illustre cette première étape pour la chronique de données (26 ans de données) du bassin de la Seine à Poses. Le coefficient d'aridité (C) permet tout d'abord d'identifier les 3 sous-périodes qui seront utilisées pour caler les modèles :

- les années 1977-1980 comme constitutives de la période humide ;
- les années 1986-1989 comme constitutives de la période moyenne ;
- les années 1989-1992 comme constitutives de la période sèche.

La deuxième période sèche, qui sera utilisée comme segment de validation, est constituée des années 1995-1998.

Plusieurs éléments permettent de justifier l'intérêt, pour ce bassin versant, de la méthodologie développée. La comparaison des valeurs de coefficient moyen sur chacune de ces sous-périodes montre une différence notable entre les périodes humide et moyenne ainsi qu'entre les périodes moyenne et le couple de sèche. La période moyenne est marquée par une aridité très proche de celle calculée sur l'ensemble de la chronique (C estimé à 2,4). Les 2 périodes chaudes sont, en moyenne, proches (C estimé à 3). Cette aridité des périodes chaudes est du même ordre de grandeur que celles des 3 tranches de temps de 20 ans (temps présent, milieu de siècle et fin de siècle) issues du scénario. Il apparait que les données de la tranche temps présent sont plus arides que celles issues des observations (C estimé à 2,8 contre 2,4) ainsi que des données de la tranche milieu de siècle (C estimé à 2,8 contre 2,6). Enfin, la tranche fin de siècle est caractérisée par une aridité plus importante que la période de 3 ans la plus sèche observée dans la chronique de 26 ans.

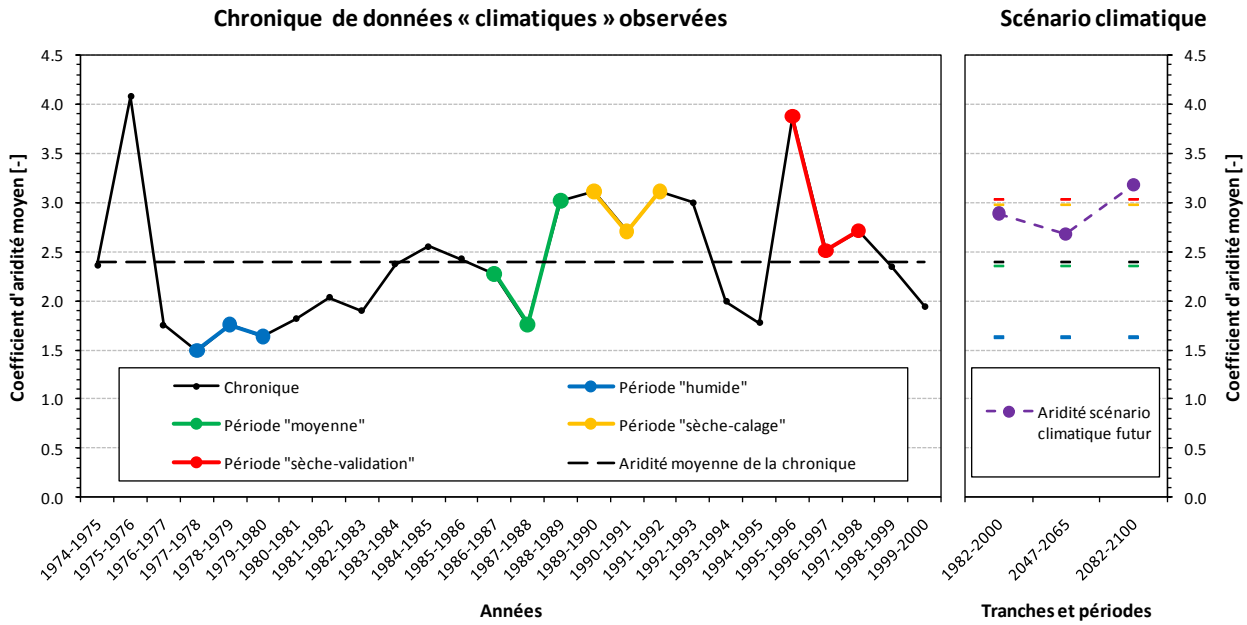


Figure 8 : Exemple de caractérisation d'une chronique : Station H8110010 : La Seine à Poses (65 000 km²)

La validation de ces observations est possible en comparant les valeurs de coefficient d'aridité pour l'ensemble des sous-périodes identifiées et tranches de temps utilisées, pour tous les bassins versants (cf. Figure 8). Il apparait ainsi qu'en terme d'aridité moyenne :

- les périodes sèches sont proches ;
- les périodes sèches, moyennes et humides sont contrastées ;
- les données de la tranche temps présent sont plus sèches que la chronique observée ;
- les périodes sèches utilisées pour la validation sont proches des données issues de la tranche fin de siècle.

L'analyse des 3 années identifiées comme humides et sèches permet de retrouver des années récentes connues pour leurs « extrêmes hydroclimatiques » : les périodes humides 1976-1979 et 1998-2001, les périodes de canicules : 1973-1976, 1988-1991, etc.

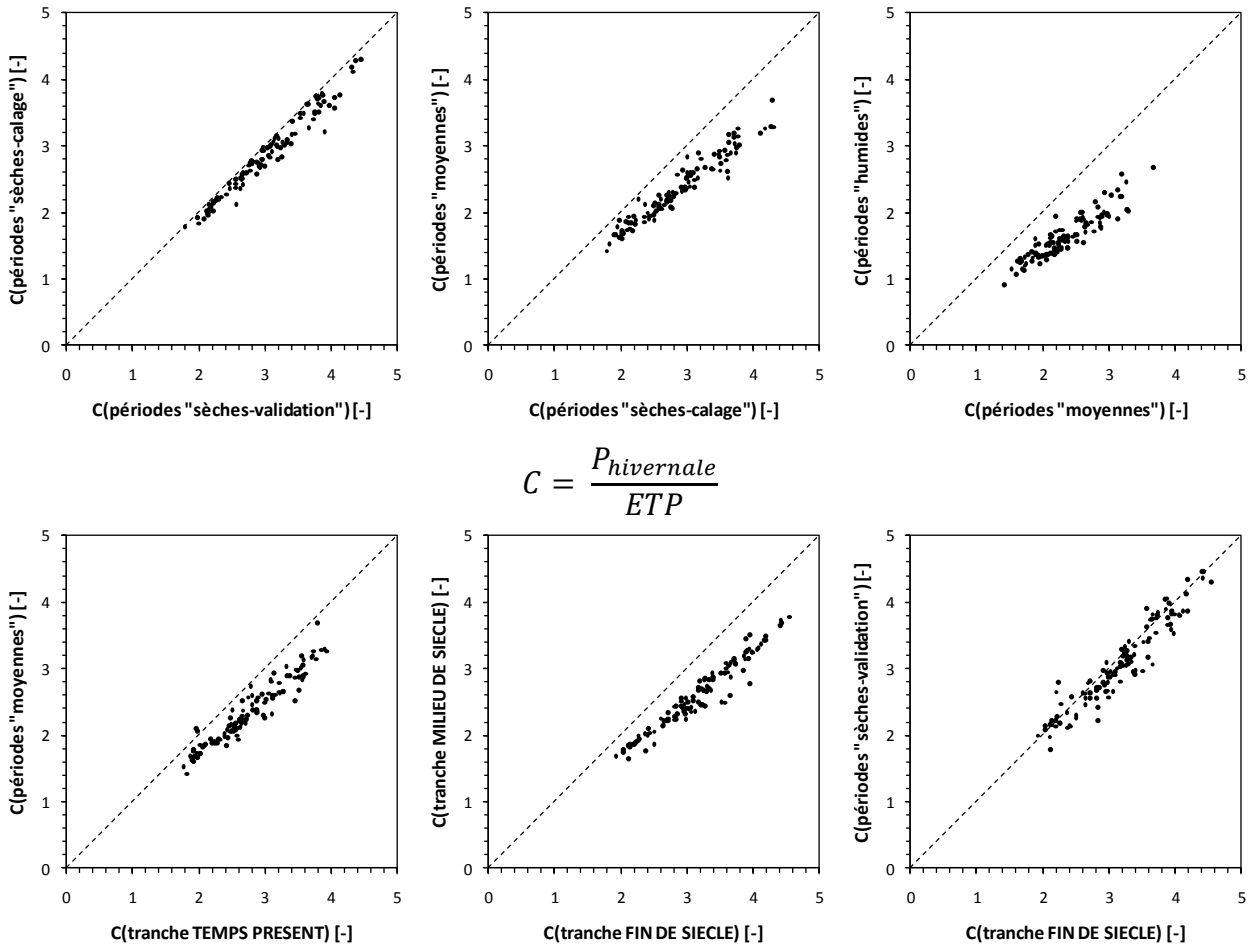


Figure 9 : Comparaison des coefficients d'aridité (C) associés aux différentes sous-périodes et tranches de temps du scenario futur

En résumé, ces résultats « valident » l'approche générale développée précédemment : les différentes sous-périodes proposent, en moyenne, des contrastes climatiques intéressants. De plus, les périodes sèches utilisées comme segments de validation sont, en terme d'aridité moyenne, proche des années projetées en fin de siècle. Il est néanmoins important de noter que ces périodes ne sont pas de même longueur (3 ans contre 20 ans) et donc que les périodes sèches issues des chroniques ne sont pas marquées par une aridité persistante comme celle des scénarios.

5.1.2 Impact de la spécificité climatique de la période de calage sur la valeur des paramètres

La Figure 10 présente les distributions des valeurs de paramètres obtenues en fonction des conditions de calage pour les 2 modèles. D'une manière générale, l'impact de la spécificité climatique de la période de calage sur les valeurs des paramètres semble être limité pour GR4J. Certains paramètres de ce modèle paraissent être plus stables que d'autres : les valeurs du paramètre d'échange (X2) varient peu en fonction des périodes de calage considérées. Les valeurs des paramètres de TOPMO paraissent plus influencées par la période de calage. De plus, le calage sur les périodes « sèches » semblent induire l'identification de valeurs plus importantes de l'ensemble des paramètres en comparaison avec les autres conditions de calage. Cette tendance est particulièrement observable pour les paramètres X1 et X2, respectivement coefficient du réservoir exponentiel et capacité du réservoir d'interception.

Il est important de noter que l'interprétation de distributions de valeurs de paramètres doit être réalisée avec prudence compte tenu de la sensibilité relative du modèle à chacun des paramètres ainsi qu'à la pertinence hydrologique des valeurs extrêmes de ces paramètres. L'interprétation des valeurs des paramètres est également une tache compliquée du fait des interactions existantes entre ces différents paramètres. Pour le modèle GR4J par exemple, une augmentation du paramètre gérant la capacité du réservoir de production peut être compensée par une variation du paramètre d'échange induisant une perte plus importante d'eau vers les systèmes extérieurs, ceci afin de « boucler » le bilan en eau du bassin considéré. Les différences de sensibilité entre les modèles pourraient s'expliquer par le nombre de paramètres à identifier, plus important pour TOPMO que pour GR4J (respectivement 6 et 4). L'application de TOPMO nécessiterait donc un apprentissage (i.e. une phase de calage) plus. Il est également important de noter que l'identification de paramètres pourrait être plus aisée pour des périodes à climats « extrêmes » (sec ou humide). Ces données offriraient en effet moins de marge de manœuvre aux modèles lors du calage des paramètres en comparaison avec un climat « moyen ».

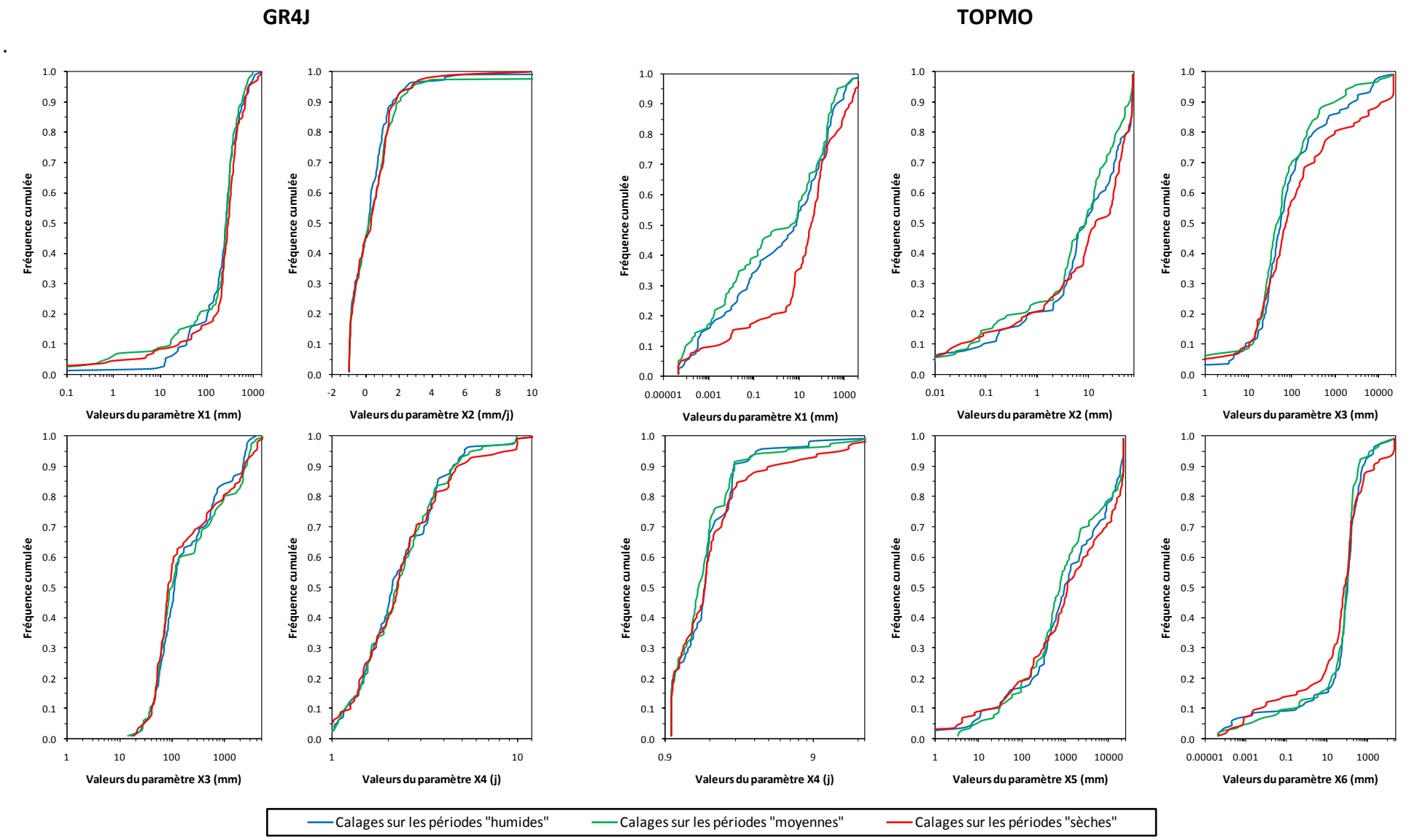


Figure 10 : Distributions des valeurs de paramètres obtenues en fonction des conditions de calage (GR4J à gauche et TOPMO à droite)

5.1.3 Impact de la spécificité climatique de la période de calage sur les performances des modèles

La Figure 11 présente les performances obtenues en calage pour les 3 périodes au climat contrasté. Les 2 modèles présentent la même tendance de perte de performance lorsque l'aridité de la période de calage augmente. Cette perte est moins importante pour GR4J que pour TOPMO : perte de 3 points entre les performances médianes en calage sur les périodes humides et les périodes sèches contre une perte de 5 points pour TOPMO.

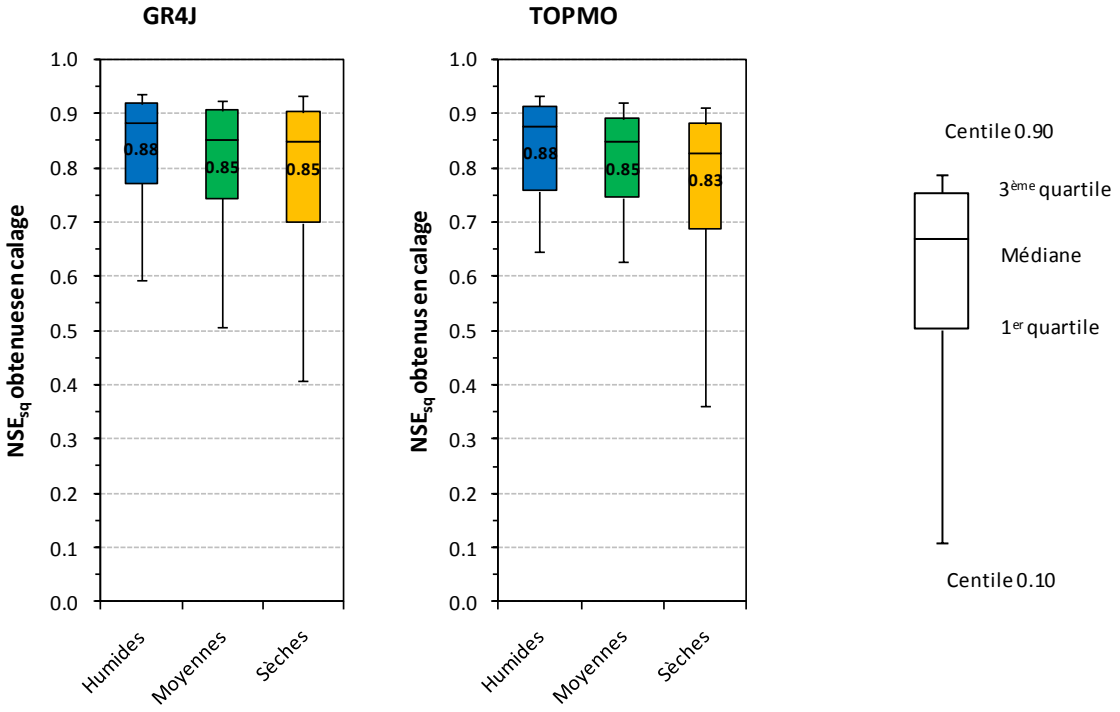


Figure 11 : Performances des modèles obtenues en calage sur les périodes humides, moyennes, sèches

Les performances des modèles obtenues en validation sur les périodes sèches en fonction des 3 calages sont représentées sur la Figure 12. Il existe peu de différence entre les différents calages en terme de performances médianes. Pour les deux modèles, le choix de la période moyenne pour le calage semble être le plus pertinent. Les faibles centiles indiquent également une robustesse très faible des performances en calage sur les périodes humides. L'utilisation de périodes sèches pour le calage offre des performances différentes selon les modèles. Pour TOPMO, l'utilisation de périodes sèches offre des performances moins bonnes que les périodes moyennes en terme de performance médiane (perte de 5 points) mais très similaires en terme de faibles centiles (le centile 0,10 correspond à des valeurs du critère de Nash proche de -0,5). Des différences plus marquées existent pour GR4J : si les performances médianes entre ces deux conditions de calage sont également proches (perte d'1 point), le calage sur des périodes moyennes semble être beaucoup plus robuste (le centile 0,10 correspond respectivement à des valeurs du critère de Nash de -0,1 et de -0,9).

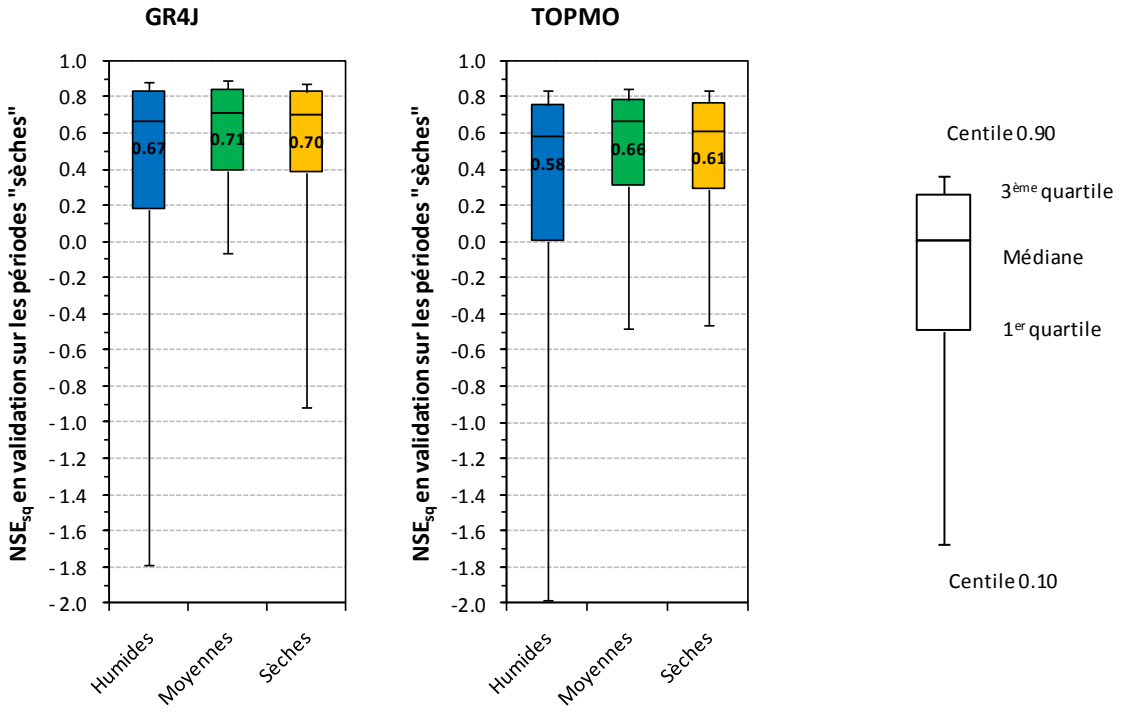


Figure 12 : Performances des modèles obtenues en validation sur les périodes sèches par les 3 différents calages

En résumé, la spécificité climatique de la période de calage a un impact limité sur les performances des deux modèles. Néanmoins, il important de noter que le calage sur une période humide est en général moins performant que les autres lorsque le modèle est utilisé en validation sur une période sèche. Ces résultats sont à considérer en parallèle avec les contrastes d'aridité existant entre ces périodes, évalués précédemment (cf. 5.1.1).

5.1.4 Quantification des incertitudes avec les données observées

L'analyse des simulations issues des 3 différents calages peut tout d'abord être réalisée grâce à la comparaison d'hydrogrammes simulés et observés. La Figure 13 regroupe les 3 hydrogrammes simulés ainsi que la chronique observée des 2 modèles pour la Seine à Poses. Les différences entre les 3 simulations semblent être moins marquées pour le modèle TOPMO : en particulier, le calage sur la période humide et le calage sur la période moyenne fournissent des hydrogrammes simulés très similaires. GR4J apparait donc comme plus sensible à la période de calage sur ce bassin versant. Néanmoins, l'amplitude des débits de crues est mieux représentée par GR4J. Enfin, il est intéressant de noter que les formes des sorties de chaque modèle sont très semblables, elles diffèrent seulement par leur « amplitude ».

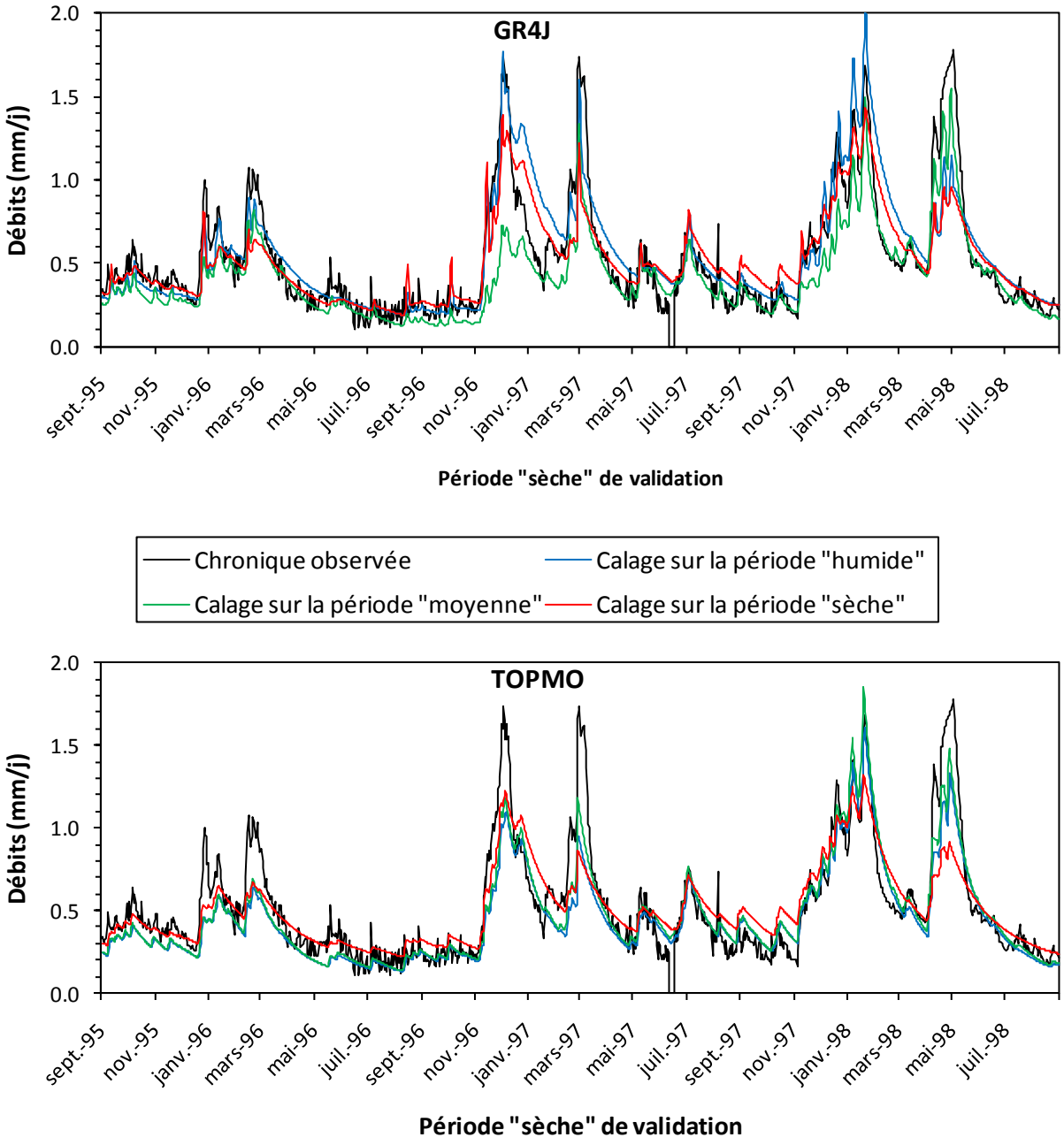


Figure 13 : Comparaison des hydrogrammes simulés en fonction des périodes de calages avec la chronique observée pour les 2 modèles : Station H8110010, la Seine à Poses (65 000 km²)

La Figure 14 synthétise la première partie des résultats portant sur l'incertitude liée à la robustesse de l'identification des paramètres (simulations validées grâce aux chroniques des périodes sèches). Cette figure présente les différences entre variables caractéristiques simulées et observées sur la période de validation sèche. Pour chaque modèle, la figure de gauche présente les nuages de points entre observations et simulations, les barres d'erreurs représentant les valeurs minimales et maximales obtenues à partir des 3 calages (humide, moyen et sec). Les figures de droite représentent les distributions des biais obtenus suivant les 3 calages. Une comparaison générale entre les variables observées et sorties des simulations permet d'avoir une large vision des incertitudes liées au choix de la période de calage. Les deux modèles sont, en moyenne, confrontés à des erreurs du même ordre de grandeur pour les 3 variables étudiées. La simulation d'étiages apparait comme la plus sensible à la spécificité climatique de la période de calage pour les 2 modèles: de nombreux bassins versants ont un biais relatif à Q_{05} supérieur à 50% les 2 modèles. En comparaison, seulement une dizaine de bassin ont un biais de l'ordre de 50 % pour le débit moyen annuel. Les biais estimés sur la prévision de QMA (débit moyen annuel) et de Q_{95} sont du même ordre de grandeur. La prévision de débits d'étiages semble être moins certaine lors du calage des modèles sur les périodes sèches. De la même manière, le calage sur les périodes moyennes parait simuler des valeurs de QMA moins incertaines que les autres types de calage, et le calage sur les périodes humides permet les estimations les moins biaisées de Q_{95}. Ces tendances sont moins évidentes pour GR4J que pour TOPMO.

La spécificité climatique de la période de calage engendre une incertitude non négligeable sur la prévision des étiages (près de 30% des bassins versants ont un biais relatif à Q_{05} supérieur à 50% pour les 2 modèles). L'impact de cette incertitude sur les 2 autres variables est moins important, mais reste « significatif » : elle engendre un biais de 20 % sur plus de la moitié des bassins versants sur la prévision des débits caractéristiques de crues et un biais de 20 % sur plus de 60 % des bassins dans le cas du débit moyen annuel. Ce dernier biais relatif à la simulation de débit moyen annuel est néanmoins préoccupant : malgré le calage du modèle sur 3 ans de données observées, la simulation de débit moyen annuel (débit caractéristique à priori simple à estimer) est associée à un biais considérable sur un nombre important de bassins versants.

Ces résultats tendent à montrer que l'adaptation de la spécificité climatique de la période de calage en fonction de la sortie voulant être simulée pourrait permettre des estimations moins incertaines de cette variable : la projection de débits de crues par exemple pourrait être moins incertaine si le modèle est calé sur une période « humide » de la chronique observée plutôt que sur l'ensemble de la chronique.

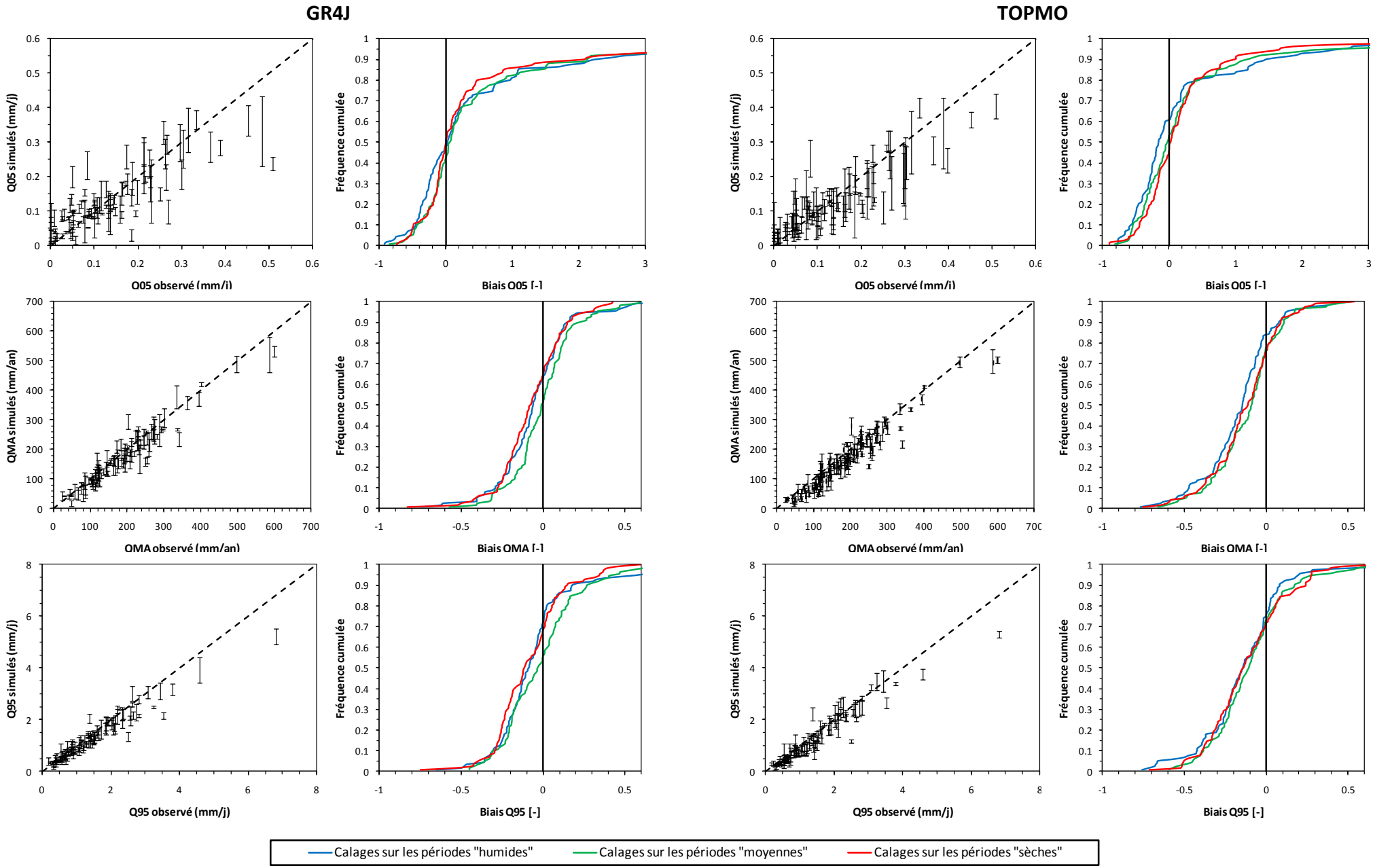


Figure 14 : Incertitudes liées aux 3 périodes de calages des modèles et biais entre les simulations et les observations pour 3 variables (Q_{05}, QMA et Q_{95})

5.1.5 Evaluation des incertitudes avec les données du scénario

Il est intéressant d'étudier l'évolution dans le temps des incertitudes liées à la spécificité climatique de la période de calage. Les valeurs minimum et maximum de chaque variable simulée sont donc retenues par tranche de temps afin de pouvoir comparer les 3 « enveloppes » des distributions des débits caractéristiques (Q_{05}, QMA et Q_{95}) (cf.

Figure 15). Les 2 modèles présentent les mêmes formes d'enveloppes de distribution, se « déplaçant » toutes vers des valeurs plus faibles avec le temps. Peu d'enveloppes se chevauchent, c'est uniquement le cas des simulations de débit moyen annuel pour les 2 modèles. Entre les tranches de temps milieu de siècle et fin de siècle.

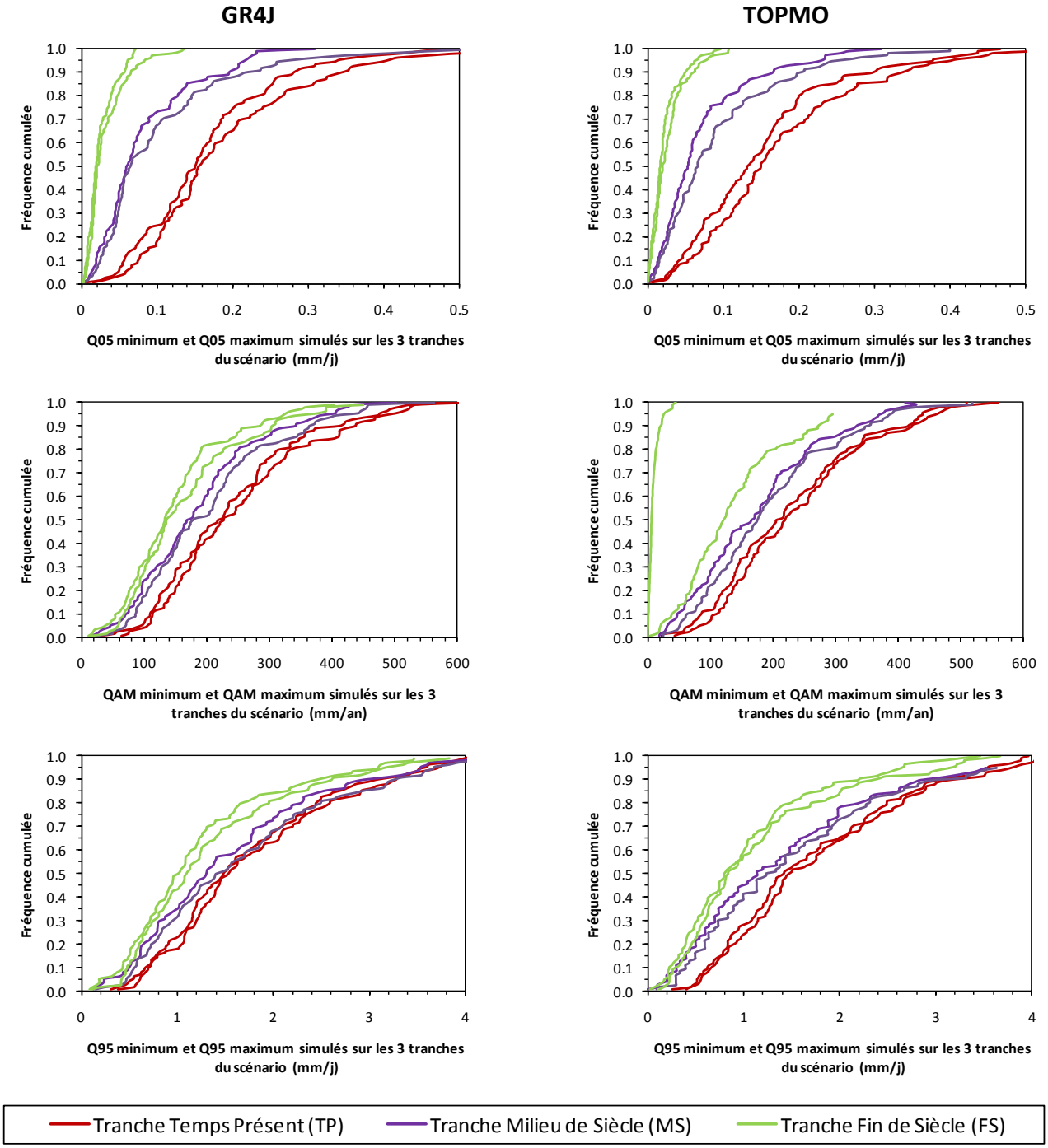
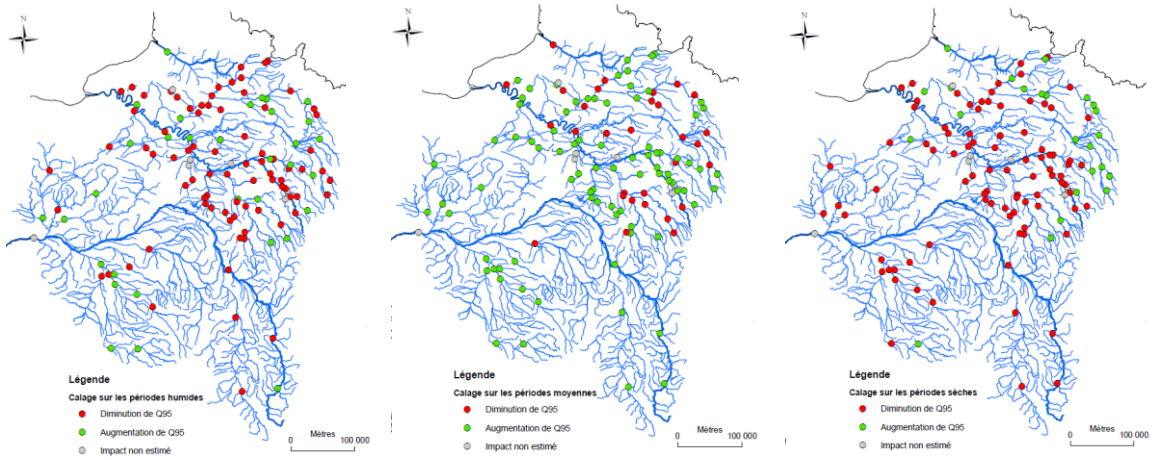


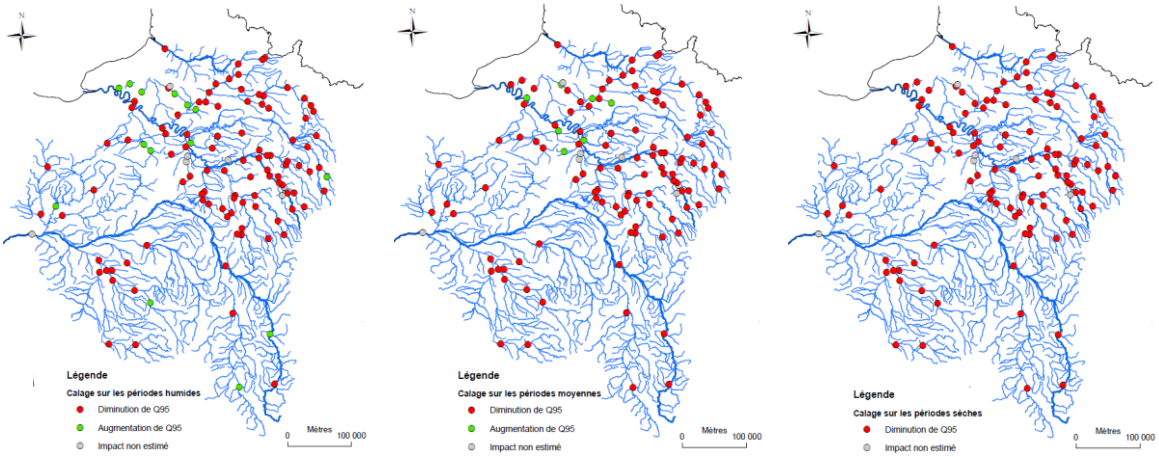
Figure 15 : Incertitudes liées à la période de calage pour les 3 tranches de temps

La prise en compte des incertitudes liées à la spécificité climatique des périodes de calage permet donc de confirmer la tendance à une diminution des débits d'étiages, des débits moyens et des débits de crues en milieu de siècle puis en fin de siècle.

Cette tendance peut être visualisée par bassin versant en comparant les sorties associées à chaque calage entre les tranches milieu de siècle et temps présent et entre les tranches fin de siècle et milieu de siècle. La diminution des débits d'étiages et des débits moyens est constatée avec les 3 calages et les 2 modèles. La diminution des débits caractéristiques de crues est moins « globale », notamment sur la période milieu de siècle (cf. Figure 16). Il apparait ainsi que les débits de crues de certains bassins versants semblent augmentés à l'horizon 2050 avant de diminuer à l'horizon 2100. C'est notamment le cas de bassin versant se trouvant à l'est du bassin de Paris, en amont de la Marne, de l'Oise et de la Seine.



Signe des différences entre les Q_{95} simulés en milieu de siècle et les Q_{95} simulés en temps présent



Signe des différences entre les Q_{95} simulés en fin de siècle et les Q_{95} simulés en milieu de siècle

Figure 16 : Evolution des débits caractéristiques de crues Q_{95} entre les tranches milieu de siècle et fin de siècle et entre les tranches fin de siècle et milieu de siècle en fonction des calages pour le modèle GR4J

5.1.6 Synthèse

La spécificité climatique de la période de calage engendre une incertitude faible mais non négligeable sur les simulations hydrologiques. Ces biais sont du même ordre de grandeur entre les deux modèles. La prévision d'étiages (Q_{05}) apparait ainsi comme très sensible à la spécificité de la période de calage pour les 2 modèles. Le calage sur les périodes sèches permet néanmoins de mieux approcher les valeurs observées. De la même manière, l'utilisation des périodes moyennes pour estimer le débit moyen annuel et l'utilisation des périodes humides pour estimer les débits de crues semblent engendrer des biais inférieurs à ceux constatés avec les autres périodes de calage. Cette tendance met donc en évidence la possibilité d' « adapter » le calage d'un modèle en fonction des variables d'intérêts : les simulations associées à une future période sèche seraient alors réalisées en calant le modèle sur une période sèche observée. L'utilisation de ces calages pour simuler les réponses hydrologiques associées aux données du scenario futur permet de mettre en évidence une dispersion du même ordre de grandeur entre les sorties issues des différents calages. Enfin, la prise en compte des 3 sorties associées aux 3 types de calages permet de constater une diminution des débits d'étiages, des débits moyens annuels ainsi que des débits de crues aux horizons milieu de siècle puis fin de siècle. Cette diminution dépasse les marges d'incertitude introduites en tenant compte de la spécificité climatique de la période de calage.

5.2 Equifinalité des jeux de paramètres

5.2.1 Quantification des incertitudes avec les données observées

La première analyse portant sur l'équifinalité consiste à visualiser par bassin l'ensemble des jeux de paramètres retenus (i.e. supérieur au seuil fixé) ainsi que les performances associées à ces jeux. La Figure 17 synthétise ces informations pour le bassin de la Seine à Poses. Chaque sous-période étant associée à une performance optimale différente, le seuil d'acceptabilité des jeux de paramètres est également fonction de la période de calage considérée.

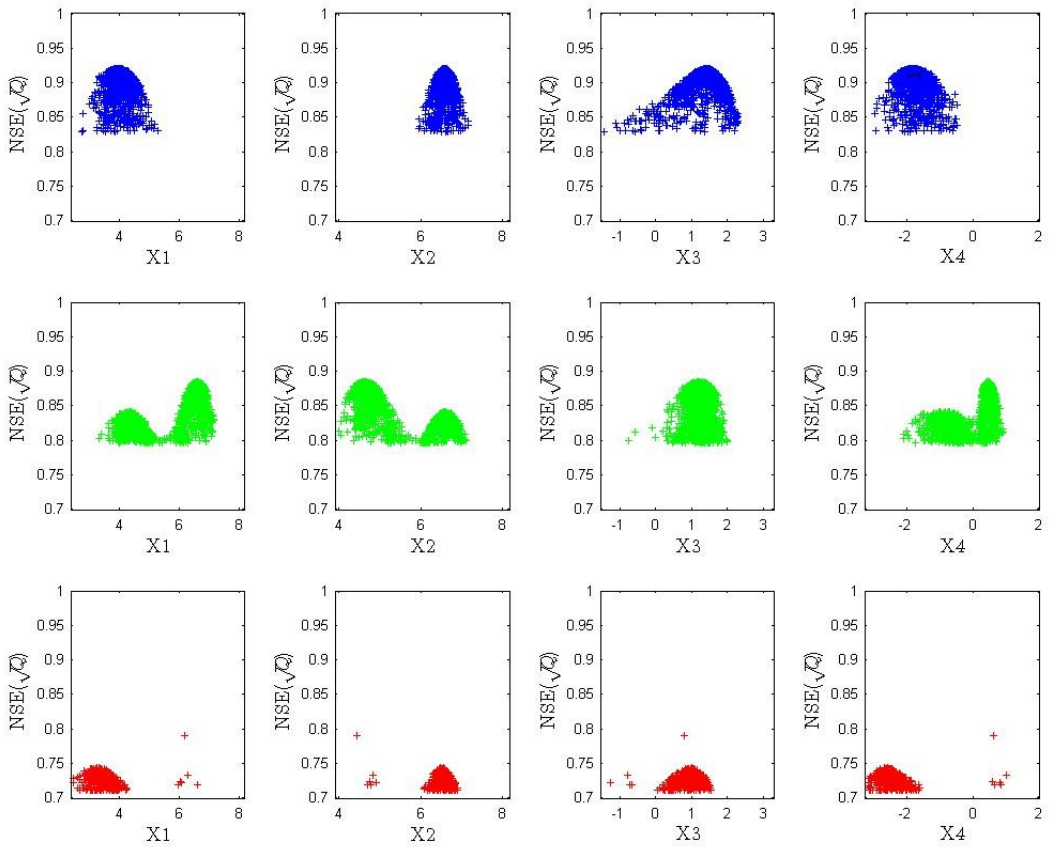


Figure 17 : Valeurs des paramètres retenus et performances associées pour les 3 périodes de calage (humide en bleu, moyenne en vert et sèche en rouge) pour le modèle GR4J

L'ensemble des jeux de considérés sur la période « humide » tendent globalement jusqu'au jeu de paramètre optimal, engendrant des performances en calage sur cette période supérieure à 0.9. Le cas de la période moyenne est une illustration assez parlante du problème d'équifinalité : si un jeu de paramètre optimal semble se dégager (performance de 0.9 environ) un optimal « local » est observable. Ce jeu engendre des performances proches de celles du jeu optimal (environ 0.85) en étant constitué de paramètres assez différents. Il est probable que les sorties associées à ce maximum local soient relativement différente des projections réalisées avec le jeu de paramètre optimal. L'étude de l'équifinalité sur la période sèche met en évidence un autre problème : si le jeu de paramètre optimal est clairement identifié, aucun des jeux considérés comme équifinaux ne possèdent des valeurs de paramètres proches du jeu optimal. L'utilisation de ces jeux en projection peut donc engendrer des sorties incertaines des modèles

La Figure 18 regroupe les résultats concernant l'impact de l'équifinalité sur les sorties des modèles. Cette figure présente les différences entre variables caractéristiques simulées et observées sur la période de validation sèche. Pour chaque modèle, la figure de gauche présente les nuages de points entre observations et simulations, les barres d'erreurs représentant les valeurs minimales et maximales obtenues à partir des différents jeux de paramètres équifinaux sur les 3 périodes de calage (humide, moyen et sec). Les figures de droite représentent les distributions des biais minimum et des biais maximum obtenus en considérant l'ensemble des jeux équifinaux selon les 3 calages. Comme précédemment, les 2 modèles semblent être soumis à des erreurs du même ordre de grandeur. Toutefois ces erreurs sont beaucoup plus importantes que celles induites par le choix de la période de calage. La simulation des étiages est à nouveau la plus sensible à cette source d'incertitude : près de 30 % des bassins versants possèdent un biais lié à l'estimation de Q_{05} supérieur à 60 %. L'écart entre les distributions des sorties maximum et des sorties minimum est, pour les 3 variables très important : 50 % des bassins versants présentent ainsi un biais liés à la simulation du débit moyen annuel par TOPMO oscillant entre 10 et 50 % ! Cet écart peut être lié à la définition du seuil permettant de considérer certains jeux de paramètres comme équifinaux. Des tests sur une modification du seuil de 0.9 à 0.95 sont en cours pour tester cette hypothèse.

L'analyse de l'impact de la spécificité climatique de la période de calage a révélé que certaines variables étaient mieux simulées (i.e. sont associées à un biais avec les données observées plus faibles) avec certains calages. Ces tendances ne sont pas retrouvées lors de la considération de l'équifinalité. Il apparait ainsi que le calage sur les périodes sèches engendrent, pour les 3 variables et les 2 modèles, un biais plus faible que les autres calages. Cette tendance peut s'expliquer par l'identification plus aisée de jeux de paramètres optimaux lors d'utilisation de forçages « extrêmes ». L'utilisation de périodes sèches pour le calage semble donc induire une incertitude plus faible liée à l'équifinalité des jeux de paramètres.

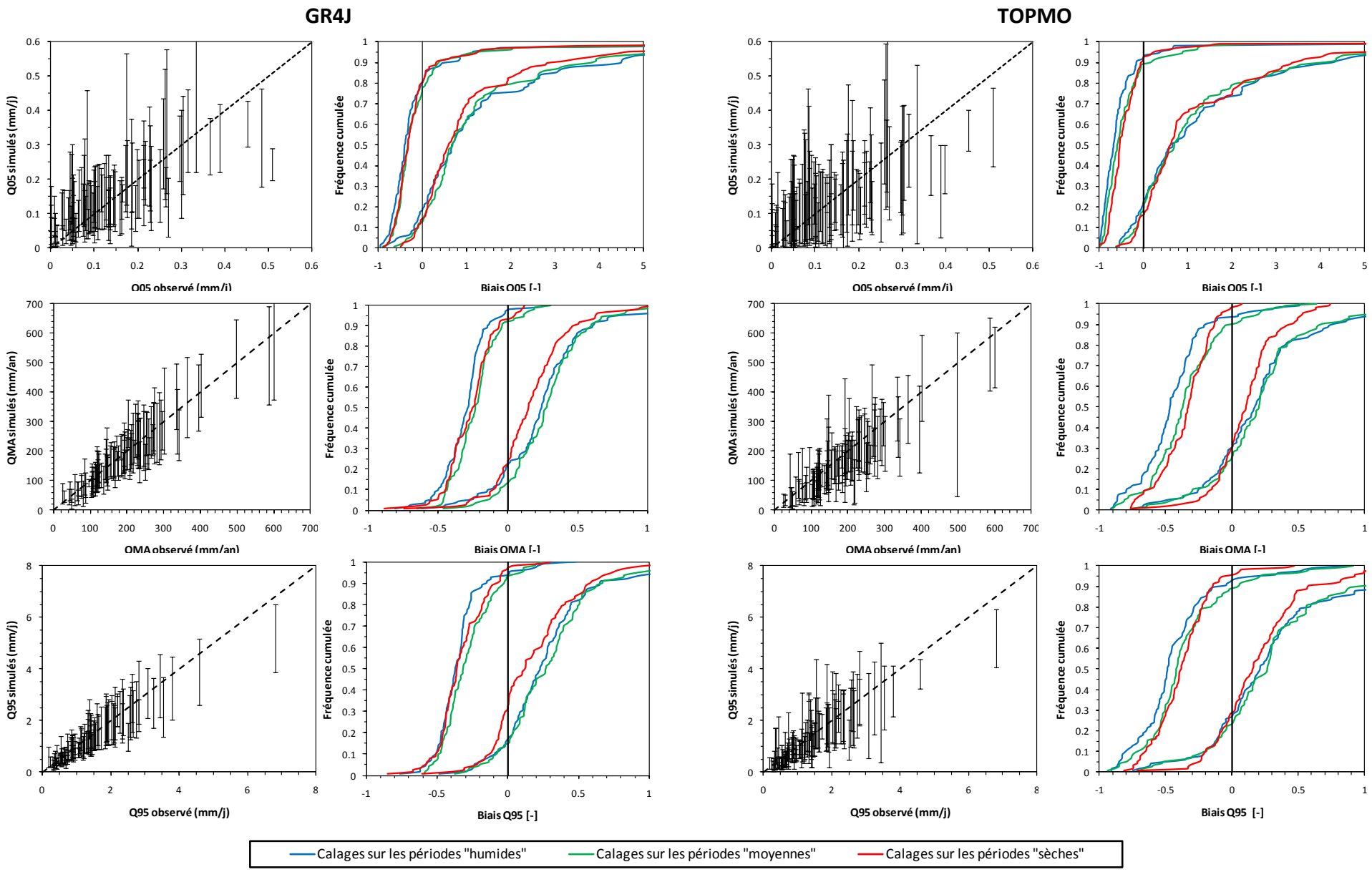


Figure 18 : Incertitudes liées à l'équifinalité des paramètres et biais entre les simulations et les observations pour 3 variables (Q_{05}, QMA et Q_{95})

5.2.2 Evaluation des incertitudes avec les données du scénario

La comparaison des incertitudes liées à l'équifinalité des paramètres en fonction des tranches de temps du scénario est réalisée en Figure 19. Les valeurs minimum et maximum de chaque variable simulée par un jeu de paramètre considéré comme équifinal sont retenues par tranche de temps. Les 2 modèles présentent les mêmes formes d'enveloppes de Q_{05}, QMA et Q_{95} simulés. La largeur de ces enveloppes est beaucoup plus importante que celles engendrées par la prise en compte des différentes périodes de calage. Les faisceaux associés à chaque variable se recoupent. Une évolution marquant une diminution des 3 débits étudiés est notable, mais la prise en compte des incertitudes liées à l'équifinalité des paramètres rend la quantification de ces diminutions de débits très incertaines.

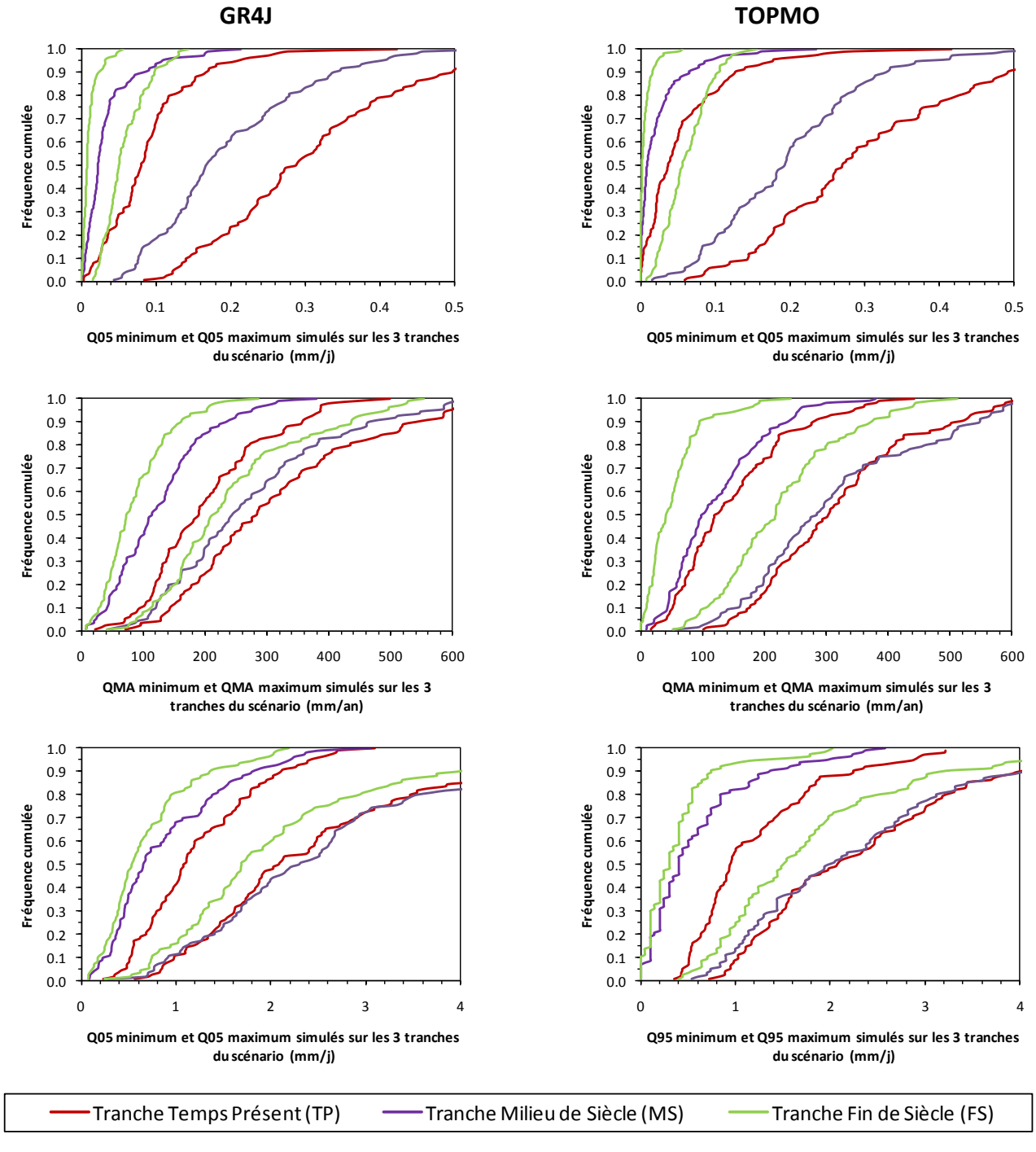
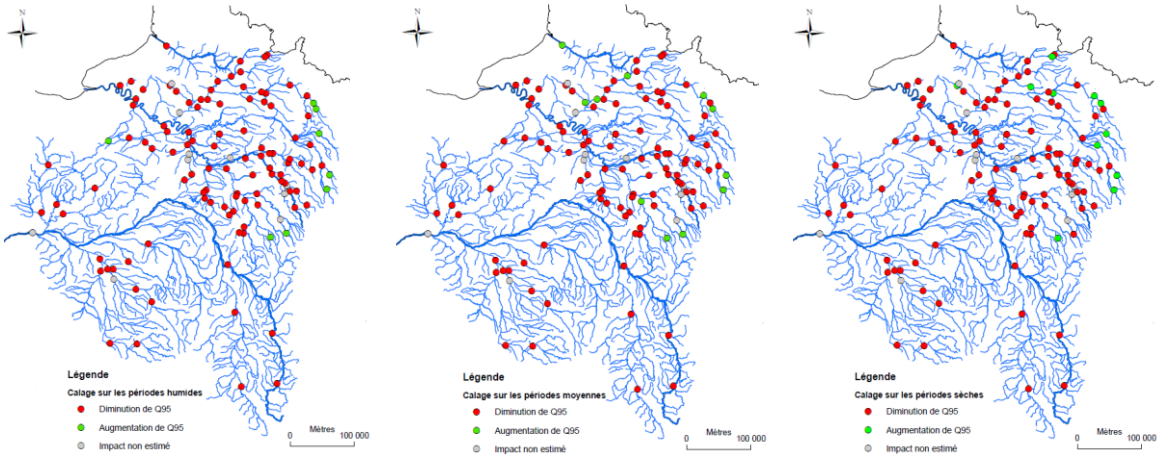
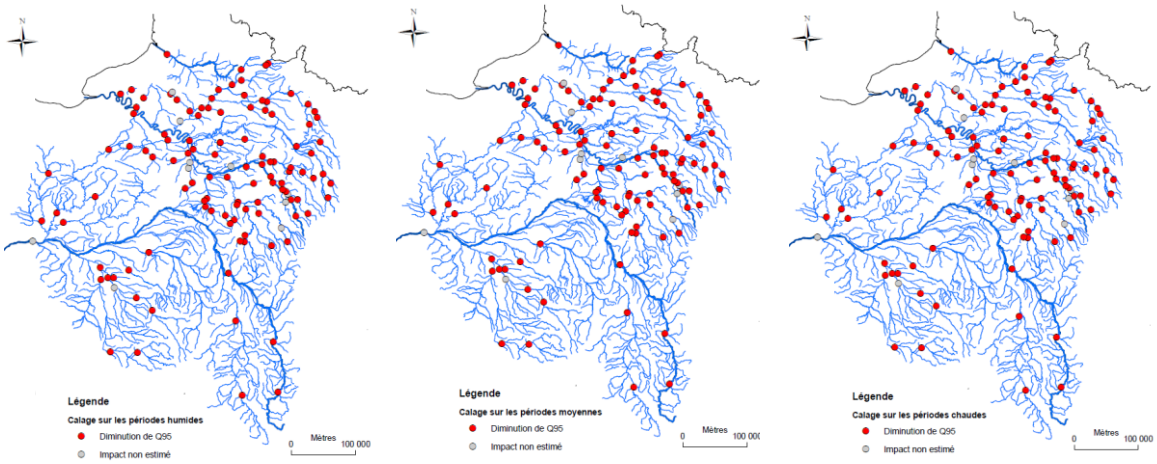


Figure 19 : Incertitudes liées à l'équifinalité pour les 3 tranches de temps

La prise en compte de l'incertitude liée à l'équifinalité rend la quantification de tendances moins aisée. La considération de cette source d'incertitude supplémentaire remet en question les tendances à l'augmentation des débits de crues observées sur certains bassins (cf. Figure 20).



Signe des différences entre les Q_{95} simulés en milieu de siècle et les Q_{95} simulés en temps présent



Signe des différences entre les Q_{95} simulés en fin de siècle et les Q_{95} simulés en milieu de siècle

Figure 20 : Evolution des débits caractéristiques de crues Q_{95} entre les tranches milieu de siècle et fin de siècle et entre les tranches fin de siècle et milieu de siècle en fonction des calages et des sorties des jeux de paramètres équifinaux pour le modèle GR4J

5.2.3 Synthèse

L'étude de l'impact de l'équifinalité révèle l'existence d'incertitudes très fortes. La simulation de débits d'étiages est la plus « sensible » à ces incertitudes. La dispersion entre les valeurs maximales et minimales des débits caractéristiques considérés issus des simulations utilisant différents jeux équifinaux est très importante, ce qui rend son interprétation difficile. Si des tendances à la diminution des débits semblent observables, la quantification de ces évolutions est très incertaine. Ces erreurs sont beaucoup plus importantes que celles entrainées uniquement par la non-robustesse de l'identification des paramètres.

5.3 Synthèse générale et discussion

Les distributions des biais minimum et des biais maximum par source d'incertitude pour la période sèche de validation sont représentées comme synthèse dans la Figure 21.

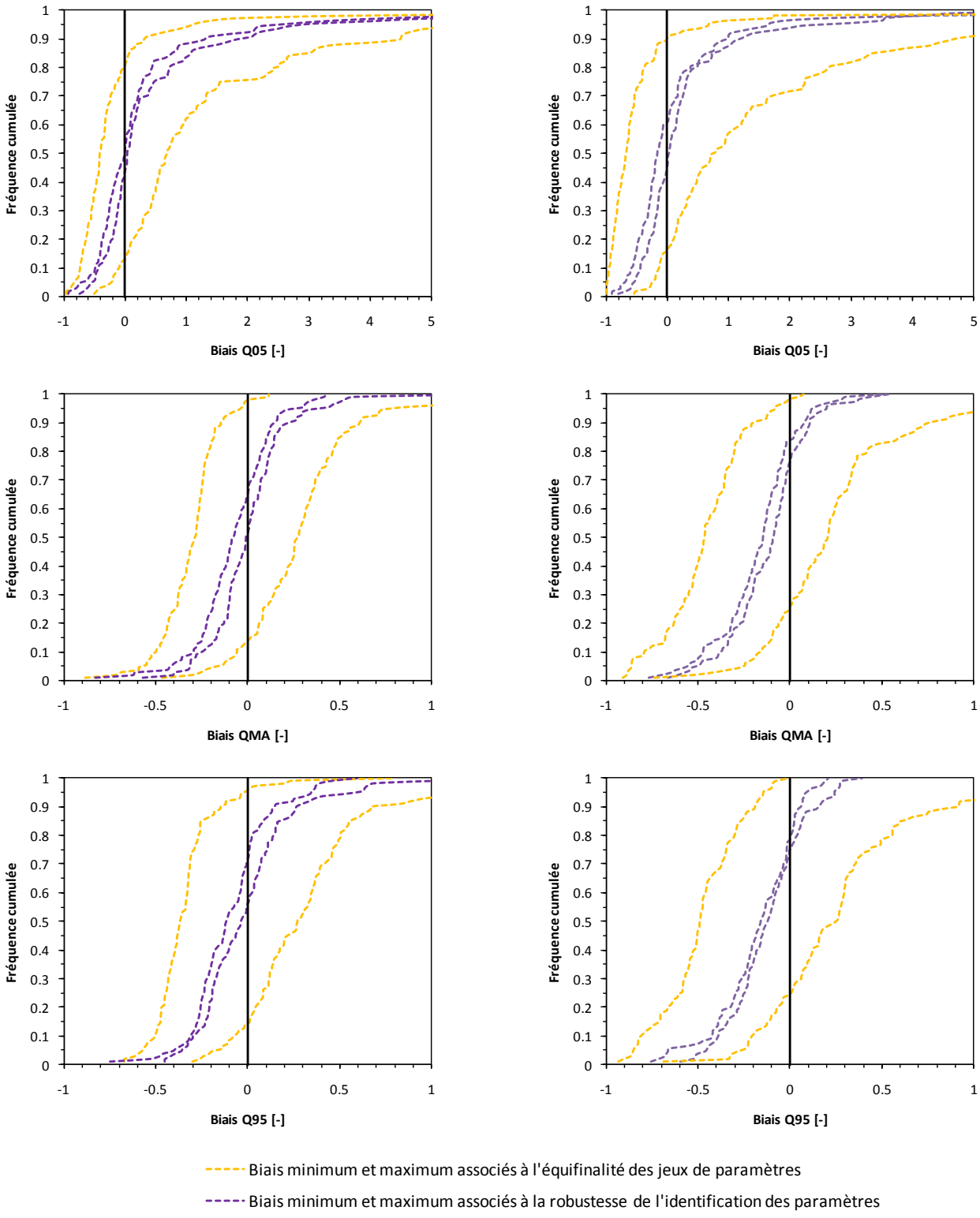


Figure 21 : Biais minimum et maximum liés à la robustesse de l'identification des paramètres et à l'équifinalité évalués sur les données observées (GR4J à gauche et TOPMO à droite)

Cette figure permet tout d'abord de noter l'impact faible mais non négligeable de l'incertitude liée au climat de la période de calage (en moyenne, environ 60% des bassins présentent une incertitude de l'ordre de 20% sur les prévisions de débits d'étiages, de débits moyen annuel et de débits de crues). Ces erreurs et plus particulièrement celles sur la simulation de débit moyen annuel sont préoccupantes. Les modèles hydrologiques utilisés sont calés sur une période 3 ans et ne parviennent pas, pour un nombre important de bassin versant, à simuler correctement un débit caractéristique à priori simple à approcher, le débit moyen annuel. L'incertitude supplémentaire engendrée par l'équifinalité des jeux de paramètres est quant à elle très forte, pour toutes les sorties.

Il est intéressant de comparer les résultats obtenus dans cette étude avec ceux issus du projet RExHySS concernant le bassin de la Seine à Poses. Une diminution des débits de la Seine à cet exutoire de l'ordre de 150 m^3/s (soit environ -25%) avait été estimée entre les tranches fin de siècle et temps présent. Une étude simple des incertitudes hydrologiques (considération de plusieurs modèles hydrologiques) avait de plus évalué l'incertitude liée à cette simulation à plus ou moins 50 m^3/s. La considération des 3 périodes de calages permet de simuler pour GR4J et pour ce bassin versant, une diminution du débit moyen annuel de l'ordre de -20% (calage humide) à -88%(calage moyen) en considérant l'incertitude liée à la période de calage et de l'ordre de -12 à -90 % lorsque l'on rajoute les incertitudes liées à l'équifinalité des jeux de paramètres. L'utilisation de TOPMO engendre une diminution comprise entre 0 et -45% en considérant l'incertitude liée à la spécificité climatique des périodes de calages, et entre -15 et -90 % en prenant en compte les erreurs liées à l'équifinalité. Il apparait donc que pour le bassin de la Seine à Poses, l'incertitude liée aux paramètres des modèles hydrologiques est largement supérieure à celle liées à l'utilisation de plusieurs modèles hydrologiques.

6. CONCLUSION

L'analyse préalable de l' « aridité » des sous-périodes et des tranches de temps considérés permet de valider l'intérêt de la méthodologie développée : les années sèches observées dans les chroniques sont proches, en terme de coefficient d'aridité moyen, des années futures projetées par le scénario utilisé. Il est néanmoins important de préciser qu'il s'agit de sous-périodes de 3 ans comparées à des tranches de 20 ans de données. Ces tranches sont donc marquées par une persistance d'un climat sec, ce qui a une forte influence sur la modélisation hydrologique (variation des niveaux dans les réservoirs, etc.)

L'utilisation de périodes contrastées en calage a un effet limité sur l'identification des paramètres optimaux ainsi que sur les performances des modèles. Le calage sur les périodes humides s'avère néanmoins peu performant en validation sur une période sèche. Les incertitudes liées à la non-robustesse de l'identification des paramètres est faible mais non négligeable pour les 2 modèles, surtout pour la prévision des étiages. Le biais minimal associé à la simulation de chaque variable est souvent associé à une spécificité de la période de calage : la simulation de débits d'étiages est moins incertaine avec une période de calage sèche, celle de débit moyen avec les périodes moyennes et les débits de crues avec les périodes humides. Ces tendances générales révèlent la possibilité de réduire l'incertitude liée à la prévision d'une variable en adaptant le calage des modèles : l'estimation de réponses hydrologiques associées à une période future sèche est moins incertaine en utilisant une période de calage sèche. La considération de l'incertitude supplémentaire engendrée par l'équifinalité des jeux de paramètres a un impact très net sur les projections des 2 modèles. La simulation des débits d'étiages semblent être à nouveau la plus sensible à cette incertitude. Les enveloppes, dessinées par les sorties minimales et maximales de chaque variable, ont les même forme, montrant un impact du même ordre de grandeur sur chaque variable. Le calage sur les périodes sèches est associé à des projections moins incertaines que les autres types de calage pour toutes les sorties considérées. Cette tendance est à mettre en relation avec l'identification plus aisée de jeux de paramètres optimaux lors de forçage climatique extrêmes. Le modèle est ainsi contraint par ces conditions particulières et possèdent donc une marge de manœuvre limité lors de l'optimisation des paramètres. Si les différentes sorties tendent à mettre en évidence une diminution des 3 débits particuliers simulés aux horizons milieu de siècle et fin de siècle, les largeurs importantes des enveloppes générées par cette incertitude rend la quantification de cette évolution très incertaine.

La considération conjuguée de l'incertitude liée à la non-robustesse de l'identification des paramètres et de l'incertitude liée à l'équifinalité des jeux de paramètres a un impact significatif sur les projections des modèles hydrologiques. Ces deux incertitudes d'origine différentes semblent en effet avoir un effet multiplicatif. Il apparait donc nécessaire de prendre en compte et de quantifier ces deux types d'incertitudes lors d'études d'impact du changement climatique.

7. BIBLIOGRAPHIE

Abebe, N. A., Ogden, F. L., and Pradhan, N. R., 2010. Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall-runoff model: Implications for parameter estimation. Journal of Hydrology In Press, Corrected Proof.

Anctil, F., Perrin, C., and Andréassian, V., 2004. Impact of the length of observed records on the performance of ANN and of conceptual parsimonious rainfall-runoff forecasting models. Environmental Modelling & Software 19, 357-368.

Beven, K., 1989. Changing ideas in hydrology–The case of physically-based models. Journal of hydrology 105, 157–172.

Beven, K. J., and Kirkby, M. J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Journal 24, 43–69.

Beven, K., 1993. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. Advances in Water Resources 16, 41-51.

Beven, K., and Binley, A., 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. Hydrological Processes 6, 279-298.

Blasone, R. S., Vrugt, J. A., Madsen, H., Rosbjerg, D., Robinson, B. A., and Zyvoloski, G. A., 2008. Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling. Advances in Water Resources 31, 630–648.

Blöschl, G., and Montanari, A., 2010. Climate change impacts - throwing the dice? Hydrological Processes 24, 374-381.

Boé, J., Terray, L., Habets, F., and Martin, E., 2006. A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. Journal of Geophysical Research 111, 20 PP.

Boé, J., Terray, L., Habets, F., and Martin, E., 2007. Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. International Journal of Climatology 27, 1643-1655.

Choi, H. T., and Beven, K., 2007. Multi-period and multi-criteria model conditioning to reduce prediction uncertainty in an application of TOPMODEL within the GLUE framework. Journal of Hydrology 332, 316–336.

Covey, C., AchutaRao, K. M., Cubasch, U., Jones, P., Lambert, S. J., Mann, M. E., Phillips, T. J., and Taylor, K. E., 2003. An overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project. Global and Planetary Change 37, 103-133.

Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, V., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. Water Resources Research 28, PP. 1015-1031.

Ducharne, A., Habets, F., Pagé, C., Sauquet, E., Viennot, P., Déqué, M., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Oudin, L., Terray, L., and Thiéry, D., 2010. Climate change impacts on Water Ressources and Hydrological Extremes in Nothern France. In Barcelona (Spain).

Edijatno, N., Nascimento, N. O., Yang, X., Makhlouf, Z., and Michel, C., 1999. GR3J: a daily watershed model with three free parameters. Hydrological Sciences Journal 44, 263–278.

Freer, J., Beven, K., and Ambroise, B., 1996. Bayesian Estimation of Uncertainty in Runoff Prediction and the Value of Data: An Application of the GLUE Approach. Water Resources Research 32, PP. 2161-2173.

Gan, T. Y., and Burges, S. J., 1990. An Assessment of a Conceptual Rainfall-Runoff Model's Ability to Represent the Dynamics of Small Hypothetical Catchments 1. Models, Model Properties, and Experimental Design. Water Resources Research 26, 1595–1604.

Hachour, A., Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Pagé, C., and Terray, L., 2009. Annexe volet 1 : Analyse et comparaison des scénarii climatiques désagrégés dans Rexhyss. Analyse des scénarios climatiques REXHYSS, 38.

Ibbitt, R. P., 1972. Effects of random data errors on the parameter values for a conceptual model. Water Resources Research, Vol 8, No 1, P 70-78, February 1972. 9 tab, 7 Ref.

Jakeman, A. J., Chen, T. H., Post, D. A., Hornberger, G. M., Littlewood, I. G., and Whitehead, P. G., 1993. Assessing uncertainties in hydrological response to climate at large scale. Macroscale modelling of the hydrosphere 214, 37–47.

Kay, A., Jones, R. G., and Reynard, N. S., 2006. RCM rainfall for UK flood frequency estimation. II. Climate

change results. Journal of Hydrology 318, 163-172.
Kay, A., Davies, H., Bell, V., and Jones, R., 2009. Comparison of uncertainty sources for climate change impacts: flood frequency in England. Climatic Change 92, 41-63.
Klemeš, V., 1986. Operational testing of hydrological simulation models. Hydrological Sciences Journal 31, 13.
Le Lay, M., Galle, S., Saulnier, G. M., and Braud, I., 2007. Exploring the relationship between hydroclimatic stationarity and rainfall-runoff model parameter stability: A case study in West Africa. Water Resources Research 43, W07420.
Merz, R., Parajka, J., and Blöschl, G., 2010. Temporal stability of catchment model parameters - implications for climate impact analyses. In Geophysical Research Abstracts, p. 6119.
Metropolis, N., and Ulam, S., 1949. The Monte Carlo method. Journal of the American Statistical Association 44, 335-341.
Michel, C., Perrin, C., and Andreassian, V., 2003. The exponential store: a correct formulation for rainfall—runoff modelling. Hydrological Sciences Journal 48, 109–124.
Nash, J. E., and Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I–A discussion of principles. Journal of hydrology 10, 282–290.
Niel, H., Paturel, J. E., and Servat, E., 2003. Study of parameter stability of a lumped hydrologic model in a context of climatic variability. Journal of Hydrology 278, 213–230.
Oudin, L., Perrin, C., Mathevet, T., Andréassian, V., and Michel, C., 2006. Impact of biased and randomly corrupted inputs on the efficiency and the parameters of watershed models. Journal of Hydrology 320, 62–83.
P. Quintana-Seguí, P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, and S. Morel, 2009. Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France.
Perrin, C., 2007. Impact of limited streamflow data on the efficiency and the parameters of rainfall-runoff models. Hydrological Sciences Journal 52, 131.
Perrin, C., Michel, C., and Andreassian, V., 2001. Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. Journal of Hydrology 242, 275–301.
Perrin, C., Michel, C., and Andréassian, V., 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology 279, 275-289.
Shao, J., and Tu, D., 1995. The jackknife and bootstrap. Springer.
Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, C., and Rodhe, A., 1999. Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems in identifying model parameters and structure. Hydrological Sciences Journal 44, 779.
Van Werkhoven, K., Wagener, T., Reed, P., and Tang, Y., 2008. Characterization of watershed model behavior across a hydroclimatic gradient. Water Resources Research 44.
Vos, N. J. D., Rientjes, T. H. M., and Gupta, H. V., 2010. Diagnostic evaluation of conceptual rainfall-runoff models using temporal clustering. Hydrological Processes 9999, n/a.
Vrugt, J. A., Gupta, H. V., Bouten, W., and Sorooshian, S., 2003. A Shuffled Complex Evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters. Water Resources Research 39, 1201.
Wagener, T., Lees, M. J., and Wheater, H. S., 2001. Montecarlo Analysis toolbox User Manual. Department of Civil and Environmental Engineering, Imperial College London, UK.(2001b).
Wagener, T., McIntyre, N., Lees, M. J., Wheater, H. S., and Gupta, H. V., 2003. Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis. Hydrological Processes 17, 455-476.
Wilby, R. L., and Harris, I., 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. Water Resources Research 42, 10 PP.
Wilby, R. L., 2005. Uncertainty in water resource model parameters used for climate change impact assessment. Hydrological Processes 19, 3201-3219.

ANNEXES

Annexe I : Quantification de l'impact des longueurs des périodes de calages sur les performances des modèles

Différentes longueurs de périodes de calages ont été testées : périodes de 1 an, 2 ans, 3 ans, 4 ans, 5 ans, 6 ans, 7 ans, 8 ans, 9 ans et 10 ans. L'ensemble des années considérées sont des années hydrologiques, débutant le 1er septembre et s'achevant le 31 août. Ces tests indiquent que la longueur de la période de calage influe peu sur les performances globales des modèles considérées. Il est important de rappeler que les chroniques de données observées sont relativement courtes (25 ans au maximum). Pour qu'un contraste « significatif » existe entre les différentes sous-périodes identifiées il est nécessaire de découper la chronique considérée en un nombre suffisant de sous-périodes. Le choix de période de 3 ans a donc été considéré comme étant un bon compromis entre « significativité » hydrologique (3 cycles hydrologiques annuels enregistrés) et découpage de la chronique en sous-périodes climatiquement contrastées. Ces choix s'appuient également sur les résultats d'études évoquant la longueur des périodes de calages : (Anctil et al., 2004) mettent en évidence les bonnes performances de GR4J avec des périodes de calibration de 3 à 5 ans et Perrin et al. (2007) montrent qu'une année de donnée pour la calibration des modèles GR4J et TOPMO permet d'obtenir des performances robustes.
Si les simulations et performances ne sont estimées qu'à partir des 3 années précédemment identifiées, l'étape de calage du modèle nécessite une année d'initialisation permettant la mise à niveau des réservoirs des modèles et l'affranchissement de conditions initiales incertaines. L'année hydrologique précédant la sous-période de 3 ans est donc utilisée pour cette initialisation.

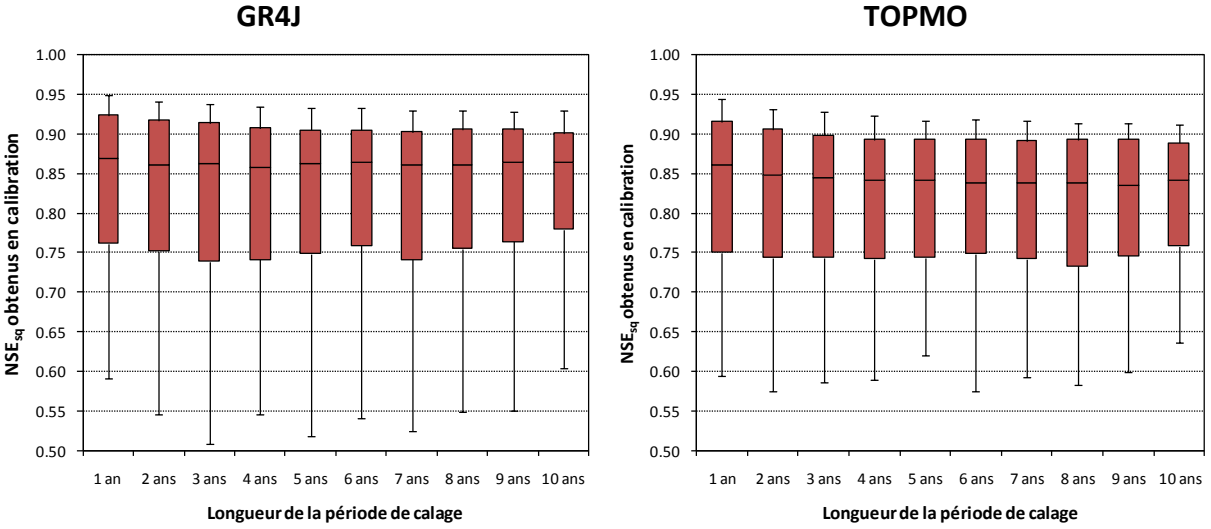


Figure 22 : Performances des modèles en fonction des longueurs des périodes de calibration considérées (GR4J à gauche et TOPMO à droite)