

Projet RExHySS

Annexe Volet 3

Analyse fréquentielle des événements hydrologiques extrêmes

E. Sauquet, A. Ducharne, F. Habets, E. Martin, L. Oudin, D. Thiéry et P.

Viennot

4 août 2009

Introduction

L'objectif de ce volet est d'analyser l'évolution possible des extrêmes hydrologiques (crues et étiages sévères, et dans une moindre mesure, valeurs extrêmes des niveaux piézométriques) sous l'influence du changement climatique, en particulier pour les seuils à vertu réglementaire pour la gestion opérationnelle des eaux et la prévention des risques. Cette analyse a été conduite sur l'ensemble des simulations hydrologiques analysées en termes de régime hydrologique dans le volet V2 (chacune étant définie par un scénario climatique désagrégé et par un modèle hydrologique).

Nous commencerons par présenter les principales variables retenues pour caractériser ces événements extrêmes, et leur modalité de calcul. Il s'agit de variables qui quantifient l'intensité et la dynamique de tels événements, et qui sont dimensionnantes pour les gestionnaires. Elles ont été choisies pour leur mise en œuvre automatique aisée sur un grand nombre de chroniques.

Dans un premier temps, ces variables seront analysées pour les conditions actuelles afin d'évaluer la capacité des modèles hydrologiques à restituer les différents aspects du régime hydrologiques et les fluctuations piézométriques. Cette étape est nécessaire pour mesurer la confiance à accorder aux prédictions issues de ces mêmes modèles dans le futur. En effet, il paraît peu probable qu'un modèle peu performant en conditions actuelles puisse fournir des simulations crédibles pour le futur. Notons cependant que le réalisme des projections hydrologiques sous changement climatique n'est pas nécessairement lié à la qualité des simulations en temps présent.

Dans un second temps, nous caractériserons l'évolution sous changement climatique du régime hydrologique pour ce qui concerne ces extrêmes de hautes et basses eaux. Les débits sont des variables locales (stationnelles) et ne sont pas simulés de manière continue par les modèles hydrologiques. Une des difficultés de ce volet fut qu'il n'a pas été possible de définir un lot de stations traitées par tous les modèles. Le nombre de bassins simulés varie donc d'un modèle à l'autre (Figure 1). Neuf stations ont été traitées par les cinq modèles ; 13 par quatre modèles et à l'opposé, 73 ont été traitées par un seul modèle. Finalement 160 bassins versants de la Seine et de la Somme ont été étudiés par au moins un modèle. Compte tenu de la diversité des échantillons, une approche régionale est apparue plus adaptée pour quantifier les évolutions. Elle a l'avantage de fournir une vision synthétique des grandes évolutions sur le secteur et les conclusions que l'on pourrait tirer sont, de fait, plus robustes / plus représentatives que celles issues d'une analyse locale isolée. Dans la suite, nous n'avons conservé que les bassins simulés disposant de débits observés référencés dans la base de données HYDRO permettant la comparaison présent-futur (23 pour CLSM ; 41 pour EROS ; 5 pour GARDENIA ; 85 pour GR4J ; 125 pour MODCOU ; 60 pour SIM). Notons que nous avons regroupé sous le nom « EROS/GARDENIA » dans les analyses qui suivent, les simulations des stations du bassin de la Somme, réalisées par GARDENIA, et celles de la Seine, obtenues par EROS. En effet, EROS et GARDENIA ont le même algorithme de simulation. EROS est cependant spatialisé. L'entité « EROS/GARDENIA » est donc spatialisée pour 89 % des bassins (41 bassins sur 46).

En complément des analyses régionales, les évolutions des extrêmes hydrologiques de la Seine à Paris et de la Somme à Abbeville seront examinées en détail.

Les évolutions de la piézométrie seront enfin examinées sur le bassin de la Somme. Nous exploiterons les sorties de GARDENIA en 57 points (Figure 2), les autres modèles n'ayant pas fourni de valeurs.

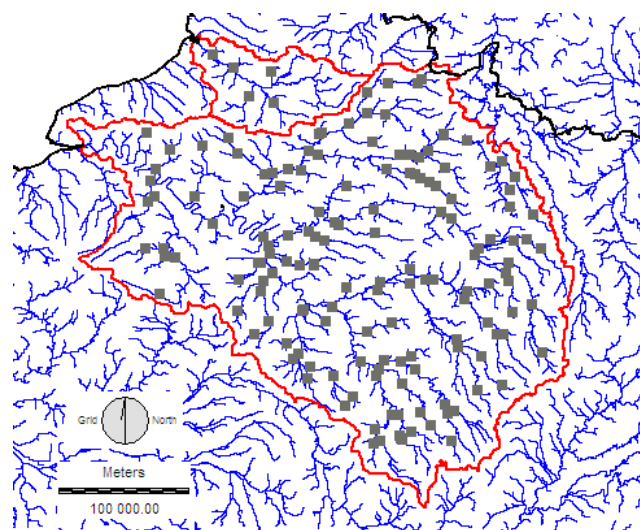


Figure 1 : Stations traitées par les modèles hydrologiques (■) et contour des bassins de la Somme et de la Seine (—)

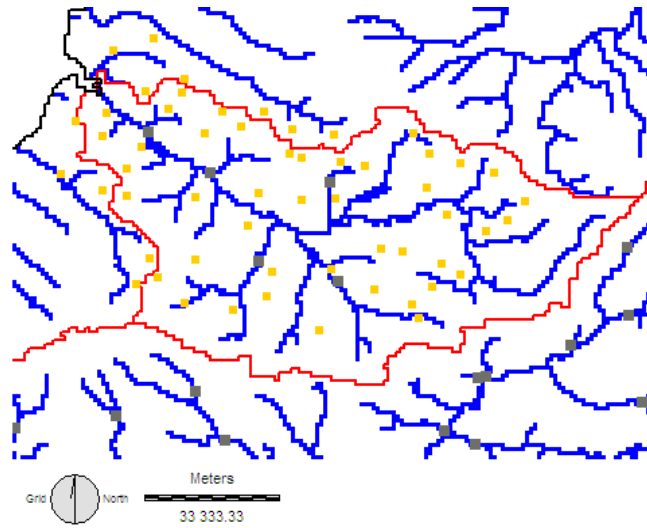


Figure 2 : Piézomètres traités par GARDENIA (■)

Variables d'intérêt

Caractéristiques du régime des crues

Pour caractériser un épisode de crue, il existe un grand nombre de variables-clefs dont les valeurs conditionnent la sévérité des crues :

- l'intensité de la crue : le débit de pointe Q_{max} ;
- le débit de base Q_b prévalant dans les instants qui précèdent l'averse ou la fonte ;
- le volume maximal généré V_{dmax} sur une durée continue d ;
- le temps de base t_b ;
- la durée DX de dépassement de X fois Q_{max} ;
- le temps de montée t_m et des coefficients de forme qui conditionnent l'allure de la courbe de concentration et de la courbe de récession...

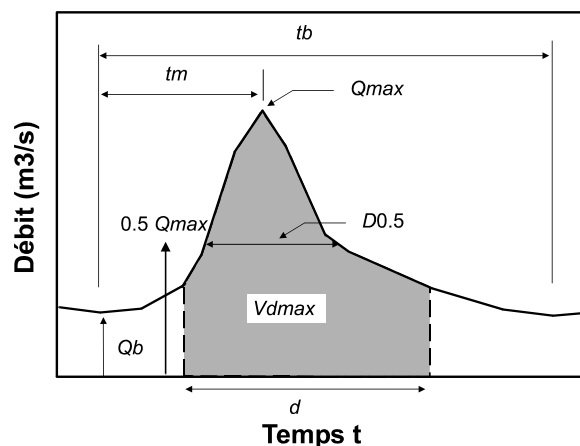


Figure 3 : Caractéristiques génériques d'un hydrogramme de crue

Ici, notre effort s'est concentré sur deux types de variables extraites de la chronique de débit : une durée caractéristique de crue D et le quantile décennal des débits journaliers $QJXA10$.

$QJXA10$ renseigne l'intensité des crues observables sur le bassin. C'est le débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans, i.e. ayant une probabilité 1/10 chaque année d'être dépassé. Ce quantile est calculé ici par ajustement de loi de Gumbel à l'échantillon constitué des maxima annuels de débits journaliers observés pour chacune des années hydrologiques disponibles de la station hydrométrique (QJXA). L'estimation des paramètres est obtenue par maximum de vraisemblance. La zone d'étude est soumise majoritairement à un climat tempéré océanique avec une influence continentale plus marquée dans les secteurs plus accidentés du sud-est. Le régime hydrologique des cours d'eau au sens de Pardé est de ce fait pluvial avec une période d'étiage correspondant à l'été et le début de l'automne. Majoritairement, les bassins étudiés présentent un caractère saisonnier prononcé avec des événements concentrés en hiver. L'année hydrologique à considérer pour l'extraction des débits journaliers maximum $QJXA$ débute le 1^{er}

août de l'année N et s'achève le 31 juillet de l'année N+1. Dans les analyses régionales, les valeurs des débits de référence seront exprimées en l/s/km² pour comparer les bassins indépendamment de leur taille.

La **durée caractéristique D** est obtenue à partir d'une sélection d'hydrogrammes sur une fenêtre autour des pics de crues majeures (Sauquet et al., 2009). Pour chaque station, nous avons extrait l'événement majeur de chaque année. Puis nous avons rendu les hydrogrammes adimensionnels en divisant chacun d'entre eux par le débit maximal Q_{max} . Tous les hydrogrammes normés ont un débit maximal de 1. A partir de cet échantillon de crues normées, nous construisons un hydrogramme supposé représentatif du régime de crue par simple moyenne arithmétique, après avoir échantillonné à un pas de temps fixe (ici la journée). D est la durée de dépassement de $1/2$ pour l'hydrogramme normé moyen.

En Figure 4, sont représentés, pour deux stations, les hydrogrammes moyens en noir, en gris l'ensemble des événements qui ont conduit à son calcul. Cette analyse permet d'identifier la dynamique de crue plus rapide sur l'Yonne ($D= 11$ jours), que sur la Seine ($D= 32$ jours). Ces durées sont relativement conséquentes du fait de la taille des surfaces drainées (respectivement 10700 km² pour l'Yonne à Courlon et 43800 km² pour la Seine à Paris) et des volumes injectés par les sous bassins versants qui arrivent progressivement aux confluences et s'accumulent d'amont en aval.

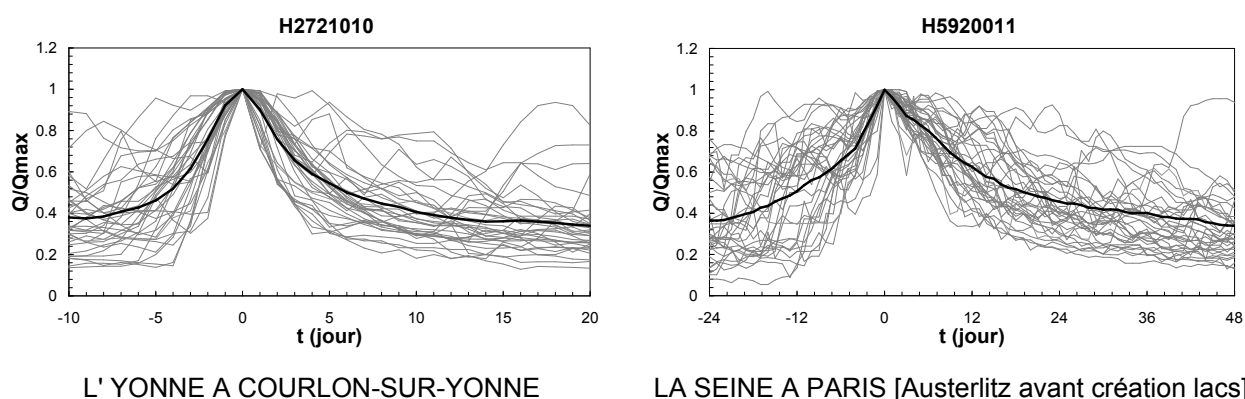


Figure 4 : Hydrogrammes de crue représentatifs (adimensionnels)

Caractéristiques du régime des étiages

Nous avons recherché des indicateurs pour caractériser les extrêmes des basses eaux, les équivalents pour les étiages des caractéristiques Q_{JXA10} et D retenus pour les crues.

Notre choix s'est porté sur :

- le **QMNA5** renseigne la sévérité des étiages et intervient dans un cadre réglementaire de gestion des eaux. La variable d'intérêt est le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche (ayant une probabilité 1/5 chaque année de ne pas être dépassé). Il est calculé, ici, par ajustement de la loi Log-normale à l'échantillon constitué des plus faibles débits mensuels observés pour chacune des

années hydrologiques disponibles de la station hydrométrique (*QMNA*). Du fait de la saisonnalité des écoulements, l'année hydrologique à considérer pour l'extraction des minima mensuels *QMNA* est l'année civile ;

- la **fiabilité**, définie par rapport à un seuil de débit S , qui est la proportion de valeurs observées dans la chronique au-dessus de ce seuil S :

$$F = 1 - \sum_i L_i / L_{tot}$$

où L_{tot} est la longueur de la chronique et L_i est la durée en jours de la i -ème séquence de débits sous le seuil S (Figure 5). Lorsque S est un débit de crise (par ex. le DOE - Débit Objectif d'Étiage - en dessous duquel des restrictions d'usage de l'eau sont appliquées), la fiabilité qualifie la probabilité d'observer le système dans un état satisfaisant. Nous avons choisi de fixer S au *QMNA5* (valeur adoptée en pratique dans les systèmes d'alerte sécheresse en France). Nous dirons qu'il y a **défaillance** lorsque le débit est en dessous du seuil S .

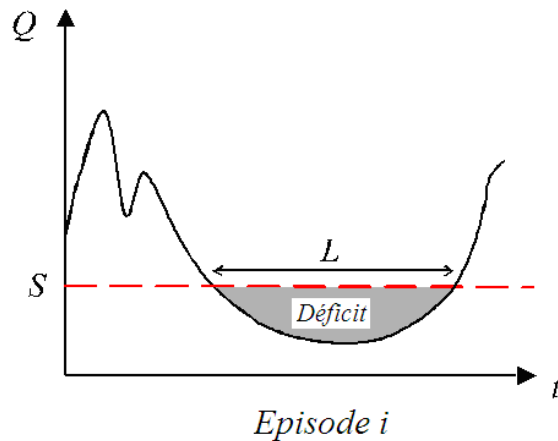


Figure 5 : Définition des variables caractérisant les défaillances en étiage

Une analyse sur un échantillon de stations peu influencées de trois grands secteurs français montre que la fiabilité avec $S = QMNA5$ évolue très peu d'un bassin à un autre (Figure 6) : environ 40% des bassins présentent une valeur de *QMNA5* entre Q95 et Q98, débits journaliers classés pour les fréquences 95% et 98% ; pour 50% d'entre eux, le *QMNA5* se situent entre Q98 et Q99. La fiabilité est communément entre 95 et 99%, c'est-à-dire que le débit est supérieur au *QMNA5* entre 95% et 99 du temps selon le bassin.

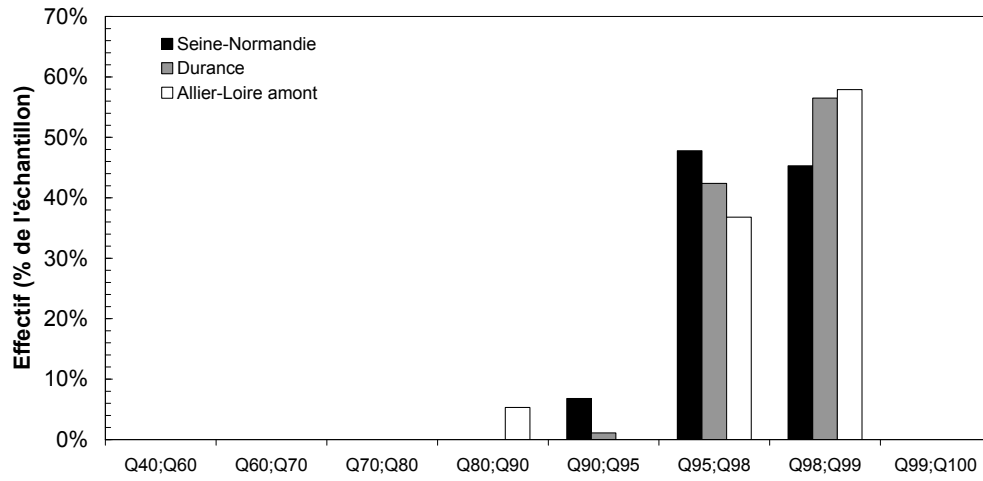


Figure 6 : Comparaison du QMNA5 aux variables extraites des courbes des débits classés

Performance des modèles hydrologiques en restitution du passé

Les modèles hydrologiques, alimentés par les forçages SAFRAN, ont restitué des débits sur la période 1970- 2005 sauf GARDENIA sur le bassin de la Somme (1989-2002) et GR4J (un minimum de 16 ans entre 1970 et 2005).

Reconstitution des variations journalières

Des critères numériques permettent de quantifier la performance des modèles sous climat présent, i.e. la les écarts entre simulation et observations. Nous avons repris les indicateurs classiques en hydrologie, dérivés du critère de Nash-Sutcliffe (1970) :

$$\begin{aligned} - C1 &= \left[1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q(t) - Q^*(t))^2}{\sum_{t=1}^n (Q(t) - \overline{Q(t)})^2} \right] \\ - C2 &= \left[1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\sqrt{Q(t)} - \sqrt{Q^*(t)})^2}{\sum_{t=1}^n (\sqrt{Q(t)} - \sqrt{\overline{Q(t)}})^2} \right] \\ - C3 &= \left[1 - \frac{\sum_{t=1}^n (\ln(Q(t)) - \ln(Q^*(t)))^2}{\sum_{t=1}^n (\ln(Q(t)) - \ln(\overline{Q(t)}))^2} \right] \end{aligned}$$

où $Q(t)$ et $Q^*(t)$ sont respectivement les débits observé et simulé au jour t , n le nombre total de pas de temps. Le critère de Nash sur les logarithmes des débits, $C3$, met davantage l'accent sur la restitution des basses eaux que le critère de Nash sur les valeurs brutes $C1$ qui lui est plus exigeant sur la restitution des hautes eaux. Les valeurs égales à zéro ont été remplacées par la précision des valeurs accessibles dans les fichiers (ex. 0.001 l/s dans les fichiers de la banque HYDRO) pour le calcul de $C3$. Les différents aspects du régime hydrologique ont le même poids dans la valeur du critère de Nash calculé sur les racines carrées des débits $C2$. Ces critères prennent en compte toutes les erreurs du modèle sur la période de reconstitution. Ils varient entre $-\infty$ à 1. Lorsque le modèle est parfait, le critère est égal à 1.

Nous avons rassemblé l'ensemble des critères associés à chaque bassin pour chaque modèle. Nous en avons construit la distribution empirique (Figure 7). Cette représentation permet d'apprécier la performance des modèles sur l'ensemble des stations. Nous identifions des allures bien différentes selon le

type de modèle. Les modèles conceptuels dont les paramètres ont été optimisés automatiquement sur les observations fournissent les critères les plus satisfaisants : les critères de Nash sont tous positifs pour GR4J et EROS/GARDENIA tandis qu'environ 30% des bassins traités par les autres modèles présentent des valeurs de C3 négatives. GR4J a été calé en maximisant le critère C2. Plus de 60% des bassins modélisés par MODCOU ont des valeurs de C3 inférieures à 0.5. Le pourcentage est de 50% pour SIM, et pour CLSM, de 16% pour GR4J et finalement de 7% pour EROS/GARDENIA.

Nous pouvons également remarquer que les points associés à C3 se situent au-dessus des courbes relatives à C1 et C2. Les modèles semblent globalement moins performants en étiage qu'en crue, en particulier pour les modèles à bases physiques (CLSM, MODCOU et SIM). Vu la contribution importante des nappes au débit dans le bassin de la Seine, il est normal que les résultats de MODCOU et SIM se ressemblent, puisqu'ils y partagent la même description des aquifères. Les résultats de MODCOU et SIM en Figure 7 traduisent donc certainement la difficulté à optimiser partout un modèle finement spatialisé à bases physiques (avec la difficulté que pose la continuité du milieu souterrain, qui est négligée dans les modèles semi-distribués ou globaux).

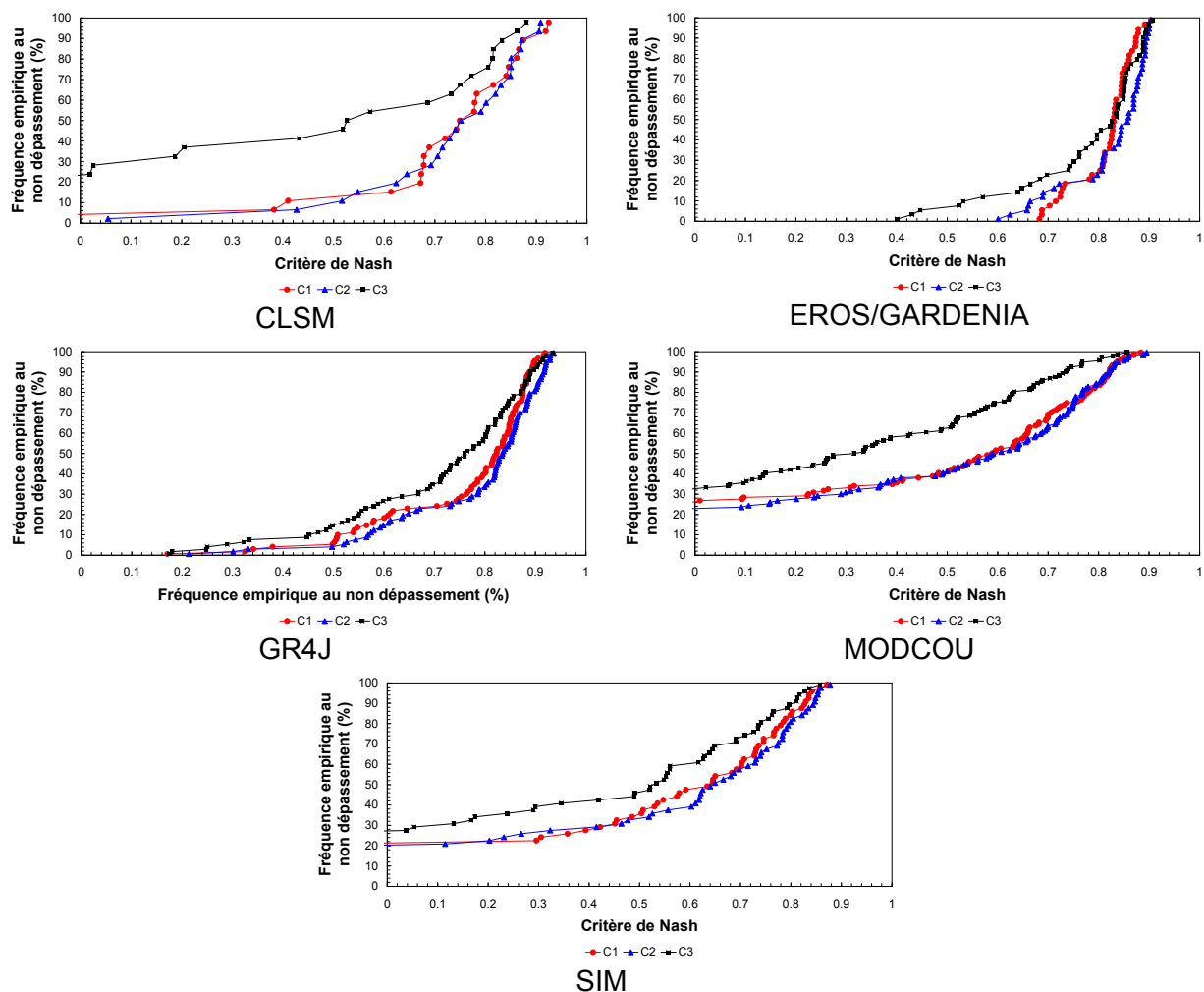


Figure 7 : Distribution empirique des critères de Nash calculés pour chaque modèle hydrologique

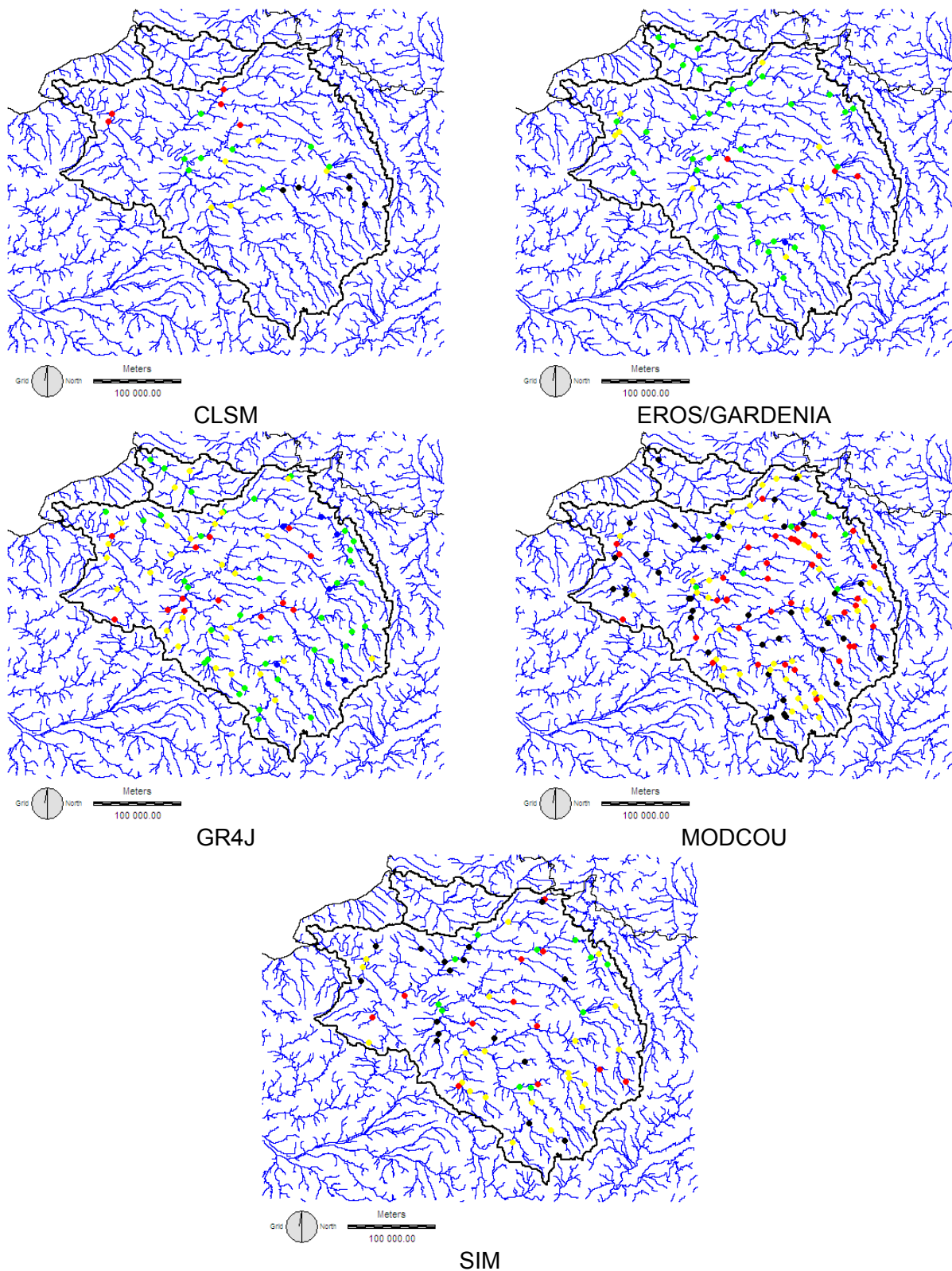


Figure 8 : Carte des critères de Nash calculés sur les logarithmes des débits journaliers pour chaque modèle hydrologique

La Figure 8 apporte un regard spatial. Chaque point représente un bassin traité. Le code couleur renseigne la qualité des reconstitutions en étiage : ● $C3 > 90\%$; ● $75\% < C3 \leq 90\%$; ● $50\% < C3 \leq 75\%$; ● $0 <$

$C3 \leq 50\%$; ● $C3 \leq 0\%$. Nous ne percevons pas de structure régionale sur les cartes. Les bonnes et mauvaises restitutions se répartissent uniformément sur le secteur étudié. De même, nous n'avons pas identifié de lien entre la performance et la taille du bassin versant.

Reconstitution des écoulements de base

Nous avons également examiné la performance des modèles au travers du *BFI* « Base Flow Index ». Le *BFI* est révélateur de l'existence de stocks d'eau plus ou moins important. Cet indicateur varie entre 0 et 100%. Plus il est élevé, plus la contribution des stocks d'eau est importante. Sur un bassin pluvial, un *BFI* proche de 100% est donc révélateur d'une forte composante souterraine sur les débits du cours d'eau. En zone de montagne, un *BFI* élevé peut aussi être obtenu sur des écoulements influencés majoritairement par la fonte des neiges. Divers algorithmes existent pour estimer le *BFI* à partir d'une série temporelle de débits. L'algorithme utilisé ici est celui de (Tallaksen et Van Lanen, 2004). Le débit de base est estimé par interpolation linéaire entre n points constituant les minima locaux de n périodes non recouvrantes d'une durée égale à 5 jours prises sur l'ensemble de la chronique. Le *BFI* est la moyenne des débits de base (en bleu sur les graphiques) divisée par la moyenne des débits du cours d'eau.

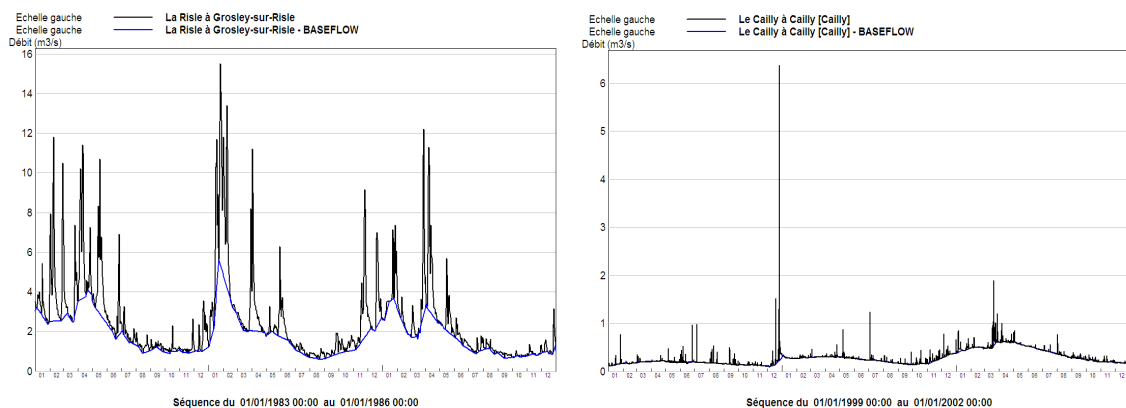


Figure 9 : Exemples de partition entre débit total (en noir) et débit de base (en bleu) sur deux cours d'eau normands – à gauche BFI = 0.668, à droite BFI = 0.962

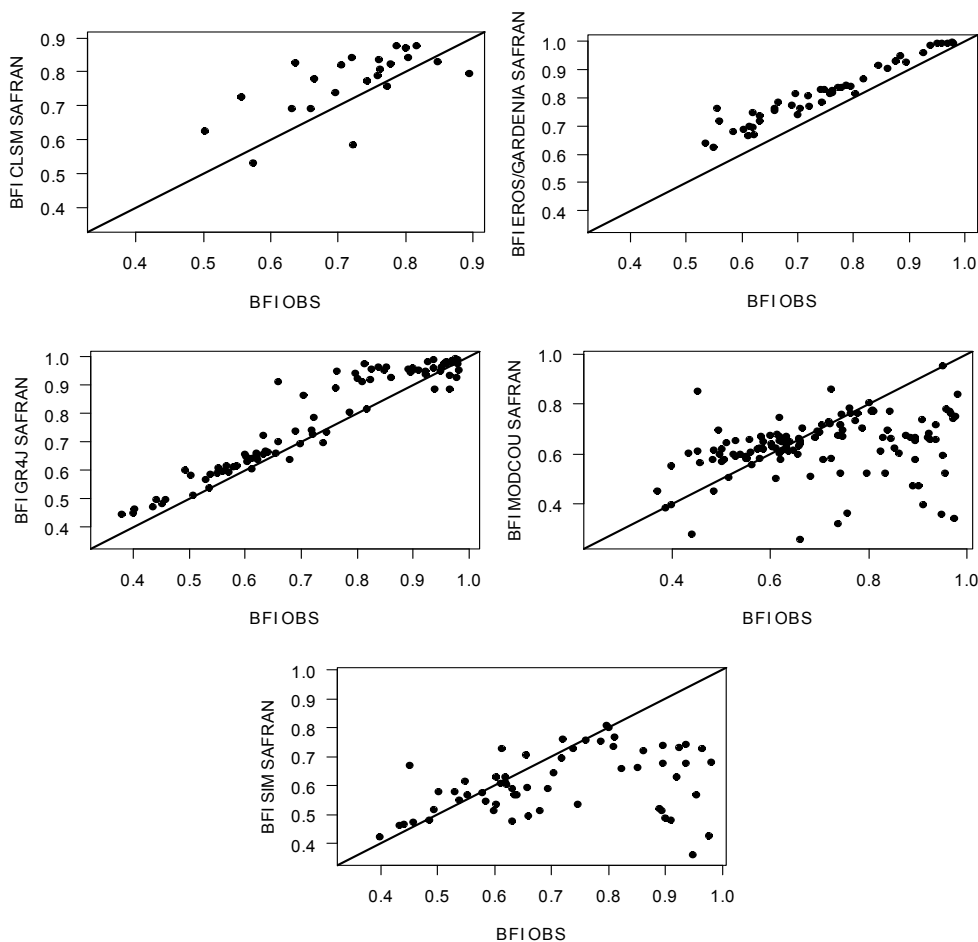


Figure 10 : Comparaison BFI observés et reconstitués pour chaque modèle hydrologique – chaque point est un bassin traité par le modèle ; la première bissectrice est représentée en trait épais

Les valeurs de BFI calculées sur les séries reconstituées par les modèles hydrologiques à partir des forçages SAFRAN et celles obtenues sur les chroniques observées sont comparées en Figure 10 :

- les BFIs calculés sur les séries reconstituées par MODCOU se concentrent autour de 0.70 ; le modèle semble atténuer la différenciation entre bassins pour ce qui concerne la fraction des écoulements de base ;
- SIM a des difficultés à modéliser des bassins avec de fortes contributions du souterrain (les valeurs des BFIs plafonnent à 80%) ; les BFIs de ce modèle sont en fait très proche d'un sous-ensemble des BFIs de MODCOU, ce qui n'est pas surprenant puisqu'ils partagent la même description des aquifères.
- EROS/GARDENIA et GR4J surestiment la valeur du BFI tout en étant les plus proches des valeurs observées.

Reconstitution des variations saisonnières

Il s'agit de vérifier la restitution des moyennes des débits mensuels, nous avons examiné ici les statistiques de quatre mois représentatifs des quatre saisons communément adoptées par les météorologues (DJF, MAM, JJA, SON). Pour évaluer les résultats obtenus par les différents modèles, nous nous sommes appuyés sur le biais relatif médian $BiaisR$ et la racine de l'erreur relative quadratique moyenne $RERQM$ qui traduit la dispersion des écarts (« relative RMSE » en anglais).

Modèle		$QM_{Janvier}$	QM_{Avril}	$QM_{Juillet}$	$QM_{Octobre}$	Moyenne
CLSM	$BiaisR$	0.087	0.112	0.091	0.055	0.086
	$RERQM$	0.171	0.201	0.276	0.255	
EROS/GARDENIA	$BiaisR$	0.057	0.021	0.131	0.042	0.063
	$RERQM$	0.117	0.087	0.251	0.144	
GR4J	$BiaisR$	-0.068	-0.083	0.121	0.040	0.002
	$RERQM$	0.133	0.130	0.185	0.164	
MODCOU	$BiaisR$	0.143	-0.085	-0.116	0.397	0.085
	$RERQM$	0.373	0.267	0.525	1.191	
SIM	$BiaisR$	0.081	-0.059	-0.189	0.004	-0.041
	$RERQM$	0.281	0.230	0.428	0.320	

Tableau 1 : Biais et erreur-type des écoulements mensuels pour chaque modèle hydrologique.

L'analyse est restreinte aux quatre mois au centre des trimestres DJF, MAM, JJA et SON.

Les statistiques du Tableau 1 montrent que :

- les performances sont globalement équivalentes sur les termes mensuels. La moyenne des erreurs relatives médianes $BiaisR$ reste inférieure à 10% en valeur absolue quel que soit le modèle ;
- nous pouvons noter de plus grandes difficultés à restituer les débits de juillet. Le biais et la dispersion y sont en général plus élevés, ce qui correspond bien aux analyses précédentes sur les $QMNA5$;
- les modèles finement distribués (MODCOU et SIM) fournissent globalement des reconstitutions un peu moins précises que les modèles semi-distribués ou globaux (GR4J, CLSM, EROS/GARDENIA), ce qui s'explique par le fait que la mise en oeuvre ou non de procédures de calage (ex. le bilan hydrique SIM n'est pas calé) est plus ou moins contraignantes (sur une variable ou plusieurs variables, avec une composante spatialisée ou non).

Reconstitution des extrêmes

Les écarts entre $QJXA10$, D , $QMNA5$ et $Fiabilité$ reconstitués et observés sont mesurés par $BiaisR$ et par $RERQM$ sur l'ensemble des stations traitées. En complément, nous avons calculé la pente α de la régression (ajustée avec l'ordonnée à l'origine imposée à zéro) entre variables observées X_{OBS} et variables reconstituées $X_{MH-SAFRAN}$, et ce pour chaque modèle hydrologique MH. Dans ce cadre, la loi de la régression ajustée est : $X_{MH-SAFRAN} = \alpha X_{OBS}$, et α est à comparer à 1 qui correspond à une reconstitution

parfaite ; $\alpha > 1$ signifie que le modèle hydrologique MH propose des valeurs en moyenne supérieures aux observations, et inversement.

Reconstitution en crue

L'examen des statistiques reportées dans le Tableau 2 montre que les modèles ont des performances sensiblement équivalentes pour ce qui concerne le quantile de crue QJXA10.

Les modèles ont tous tendance à sous-estimer le quantile décennal QJXA10, en particulier MODCOU et SIM (les valeurs de pente s'écartent significativement de 1). Ce comportement s'explique essentiellement par leurs difficultés à restituer les régimes de crue des bassins les plus productifs (pour lesquels QJXA10 > 150 l/s/km²) (Figure 11). Les différences sont plus marquées sur la reconstitution de la durée caractéristique D. Encore une fois, MODCOU et SIM peinent à reconstituer la dynamique de crue des bassins aux écoulements soutenus.

<i>Modèle</i>		<i>QJXA10</i>	<i>D</i>
CLSM	<i>BiaisR</i>	0.026	0.296
	<i>RERQM</i>	0.378	0.784
	α	0.943	1.113
EROS/GARDENIA	<i>BiaisR</i>	-0.045	0.580
	<i>RERQM</i>	0.151	1.129
	α	0.850	1.101
GR4J	<i>BiaisR</i>	-0.036	0.000
	<i>RERQM</i>	0.252	2.524
	α	0.946	0.967
MODCOU	<i>BiaisR</i>	0.075	0.000
	<i>RERQM</i>	0.930	0.800
	α	0.875	0.132
SIM	<i>BiaisR</i>	-0.148	0.600
	<i>RERQM</i>	0.551	1.968
	α	0.676	0.073

Tableau 2 : Comparaison des caractéristiques de crue reconstituées issues des modèles alimentés par la base de données SAFRAN aux observations

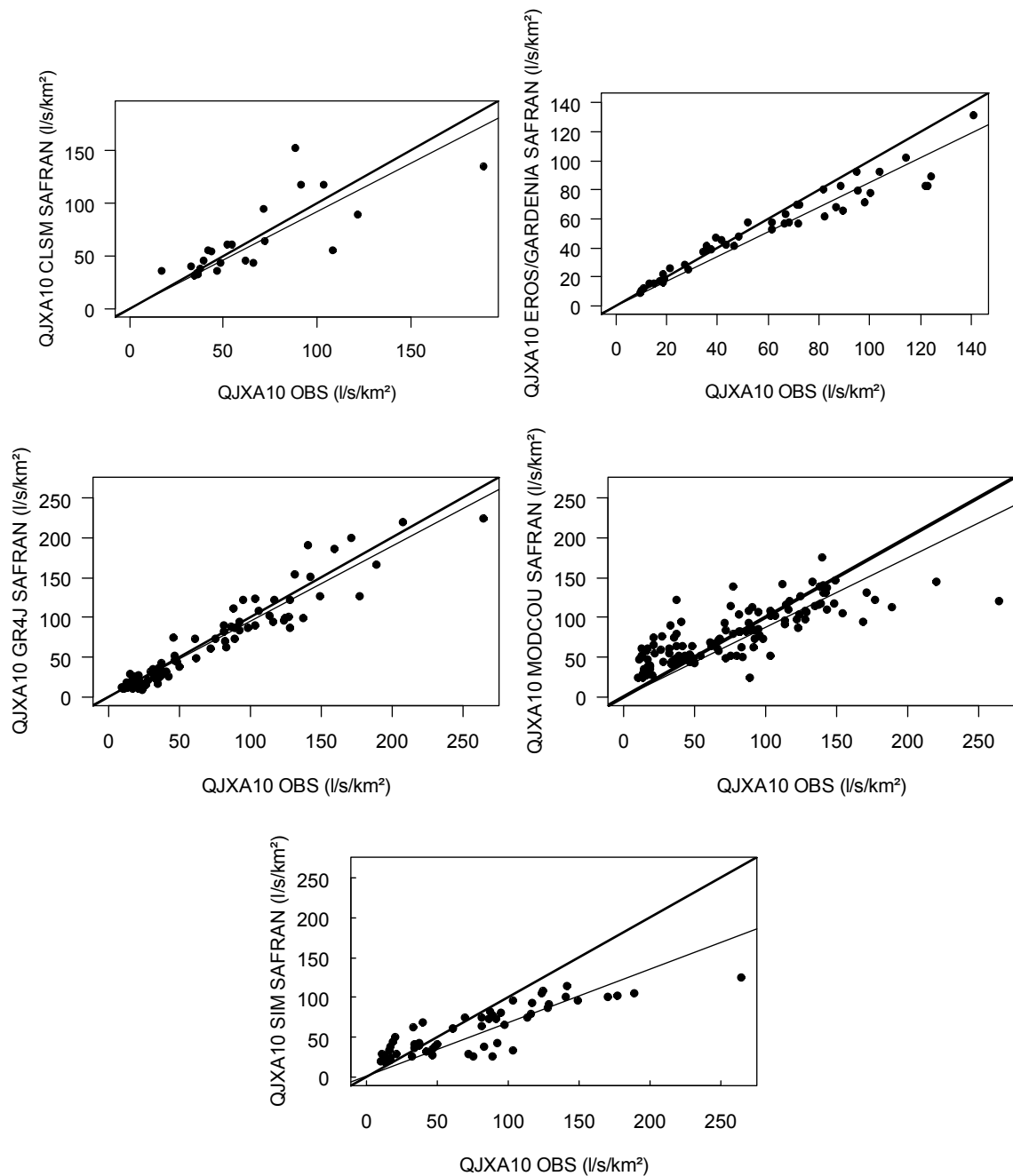


Figure 11 : Quantiles journaliers décennaux observés et reconstitués par les modèles hydrologiques – chaque point est un bassin traité par le modèle ; la première bissectrice est représentée en trait épais ; la droite de régression ajustée est en trait fin

Reconstitution en étiage

Le Tableau 3 montre que :

- la fiabilité est bien restituée par les modèles forcés par SAFRAN ; SIM et MODCOU semblent malgré tout fournir des valeurs plus faibles que celles issues des observations (pentes 0.69 et 0.57). Ceci est la conséquence d'écoulements moins soutenus (cf. biais sur les BFIs) ; la proportion de jours au-dessus du QMN5 observé est donc moindre que celle attendue.
- GR4J semble le plus apte à reproduire le QMNA5 (α proche de 1)

- EROS/GARDENIA surestime en moyenne le QMNA5, dans une proportion proche de 30% (pente 1.21) malgré une faible dispersion, conséquence certainement d'un BFI systématiquement surestimé;
- les aptitudes satisfaisantes en moyenne de CLSM à reconstituer les étiages masquent une grande dispersion des performances locales, visible sur la Figure 7.

<i>Modèle</i>		<i>QMNA5</i>	<i>Fiabilité</i>
CLSM	<i>BiaisR</i>	-0.254	-0.071
	<i>RERQM</i>	0.493	0.094
	α	0.8458	0.9352
EROS/GARDENIA	<i>BiaisR</i>	0.281	0.006
	<i>RERQM</i>	0.794	0.032
	α	1.206	1.032
GR4J	<i>BiaisR</i>	0.076	-0.002
	<i>RERQM</i>	1.911	0.023
	α	1.001	1.001
MODCOU	<i>BiaisR</i>	-0.343	-0.011
	<i>RERQM</i>	3.018	0.049
	α	0.566	0.869
SIM	<i>BiaisR</i>	0.141	-0.086
	<i>RERQM</i>	3.669	0.106
	α	0.685	0.872

Tableau 3 : Comparaison des caractéristiques d'étiage reconstituées issues des modèles alimentés par la base de données SAFRAN aux observations

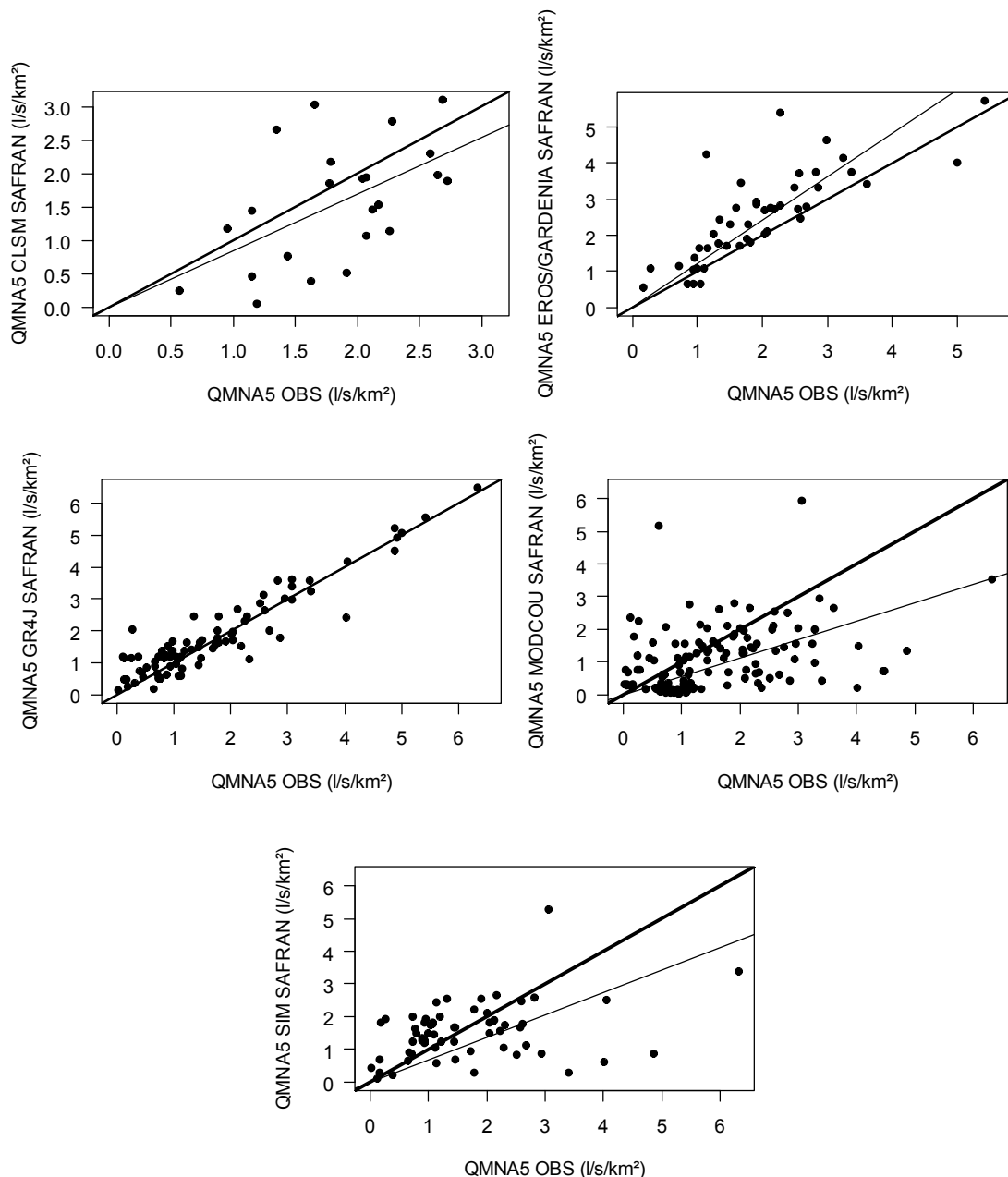


Figure 12 : Quantiles mensuels quinquennaux secs observés et reconstitués par les modèles hydrologiques – chaque point est un bassin traité par le modèle ; la première bissectrice est représentée en trait épais ; la droite de régression ajustée est en trait fin

Réponse hydrologique aux forçages des GCMs temps présent

Les modèles climatiques (GCMs) sont réputés décrire le climat passé, en restituant ses principaux modes de variabilité spatiale et temporelle, mais en aucune manière dans sa chronologie, car ils ne fournissent qu'une réalisation possible du climat passé. Après désagrégation, cette réalisation du climat passé reproduit les principales caractéristiques de la variabilité observée à l'échelle régionale (voir annexe du volet V1). En réponse, on attend donc que les modèles hydrologiques simulent des séries de débits aux propriétés identiques à celles présentes dans les observations. En aucune manière, il ne faut rechercher dans les simulations temps présent des GCMs les événements majeurs historiques ni mesurer la qualité des

restitutions par les critères de Nash. L'évaluation de la chaîne de modélisation consiste donc à vérifier que les modèles hydrologiques alimentés par ces forçages simulés reproduisent correctement les quatre caractéristiques statistiques précédentes (QJXA10, D, QMNA5 et Fiabilité), *i.e.* presque aussi bien que ces mêmes modèles alimentés par SAFRAN.

Notre analyse s'appuie donc sur le biais relatif, la racine carrée de la moyenne des écarts relatifs quadratiques et la pente, pour les 4 caractéristiques des débits extrêmes ci-dessus. Elle complète l'analyse réalisée dans les volets V1 et V2 sur la qualité des précipitations et des débits simulés sous scénarios temps présents désagrégés. Nous disposons de 6 simulations hydrologiques forcées par des scénarios désagrégés pour EROS/GARDENIA, de 8 pour MODCOU et de 9 pour CLSM, GR4J et SIM. Les boîtes à moustaches des Figure 13 à Figure 16 décrivent la dispersion des BiaisR, RERQM et α pour chaque modèle et chaque variable. Le rectangle est défini par les premier et troisième quartiles et coupé par la médiane, la longueur des moustaches correspond à 1,5 fois l'écart interquartile. .

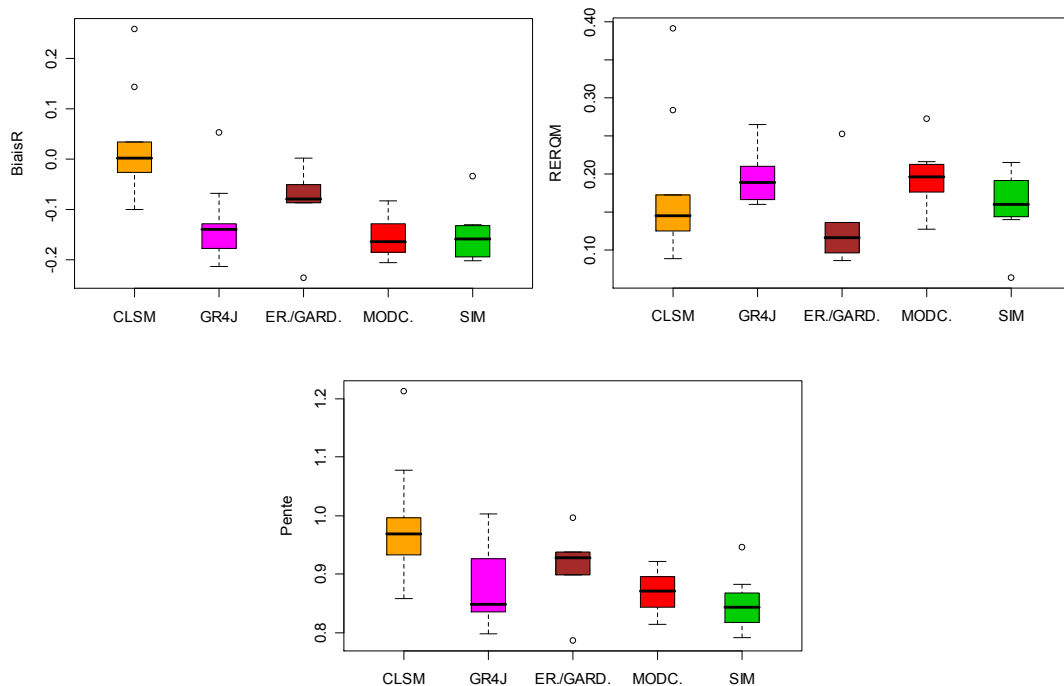


Figure 13 : Indicateurs de qualité de reconstitution du QJXA10 sur la base des réalisations des GCMs temps présent (valeurs relatives en % par rapport aux valeurs simulées sous forçage SAFRAN)

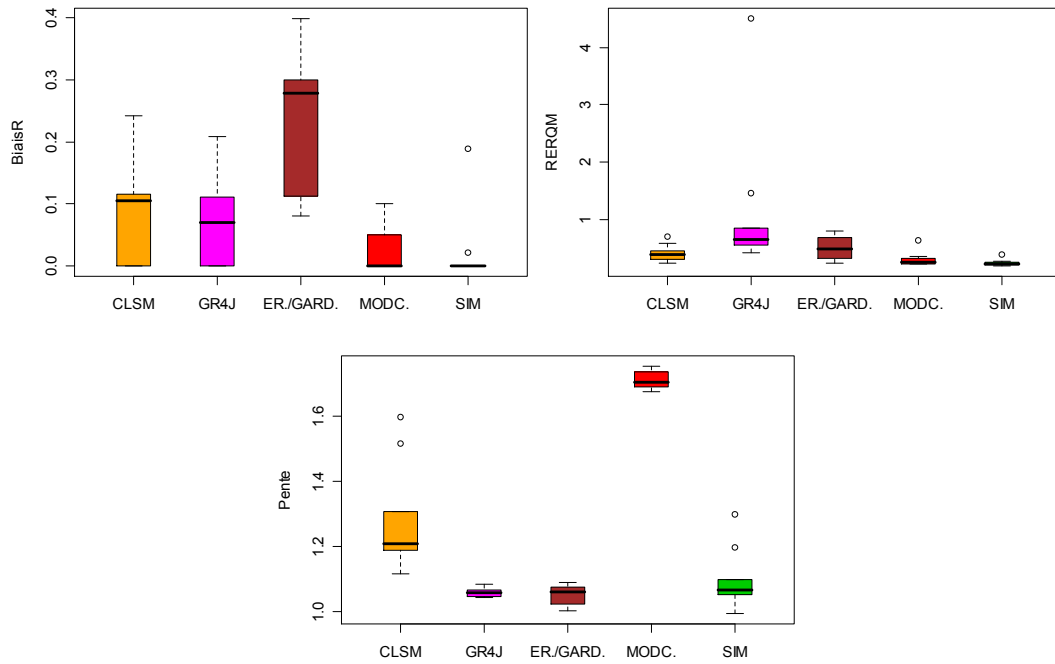


Figure 14 : Indicateurs de qualité de reconstitution de D sur la base des réalisations des GCMs temps présent (valeurs relatives en % par rapport aux valeurs simulées sous forçage SAFRAN)

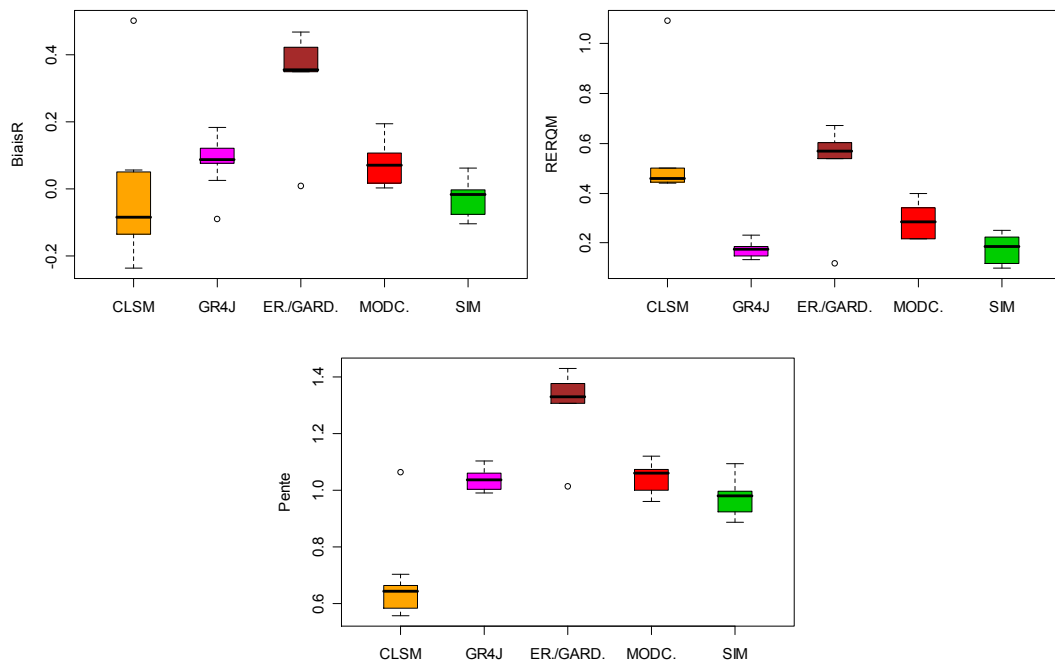


Figure 15 : Indicateurs de qualité de reconstitution du QMNA5 sur la base des réalisations des GCMs temps présent (valeurs relatives en % par rapport aux valeurs simulées sous forçage SAFRAN)

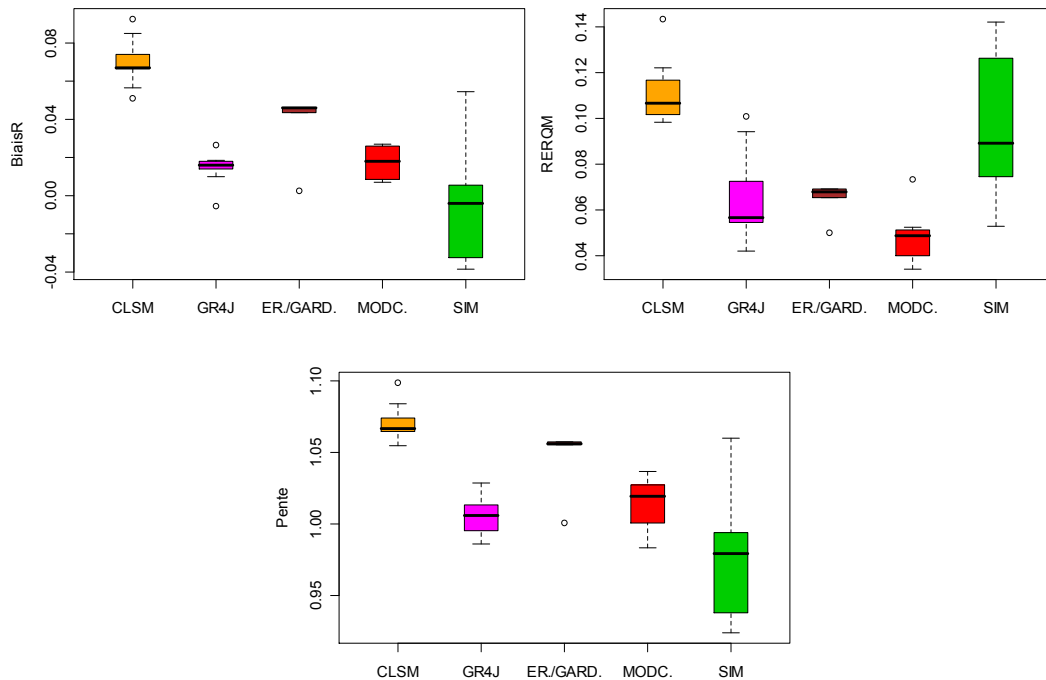


Figure 16 : Indicateurs de qualité de reconstitution de la Fiabilité sur la base des réalisations des GCMs temps présent (valeurs relatives en % par rapport aux valeurs simulées sous forçage SAFRAN)

Les résultats montrent que :

- le biais relatif entre les QJXA10 estimés à partir des scénarios désagrégés et calculés à partir des forçages SAFRAN évolue entre -0.08 et 0.32 , avec une dominance nette des biais relatifs négatifs (Figure 13) ;
- CLSM et EROS/GARDENIA se ressemblent en termes de reconstitution de QJXA10, les écarts aux résultats obtenus avec SAFRAN sont faibles ; les trois autres modèles ont tendance à sous estimer ces débits de référence de crue à l'échelle du secteur Seine-Somme ;
- EROS/GARDENIA sont les seuls à sur-estimer de manière notable le QMNA5 (d'environ $+30\%$ par rapport aux résultats obtenus avec SAFRAN). Les autres modèles fournissent des résultats équivalents à ceux obtenus avec la base SAFRAN ; le biais relatif entre les QMNA5 estimés à partir des scénarios désagrégés et calculés à partir des forçages SAFRAN évolue entre -0.05 et 0.10 ; on peut noter une légère tendance à des biais positifs (Figure 14) ;
- CLSM au contraire montre une sous-estimation des QMNA5 simulés sous scénarios temps présent par rapport aux valeurs simulées sous forçage SAFRAN. Ces derniers intègrent en effet l'influence historique des barrages-réservoirs de l'amont du bassin de la Seine, alors que les débits simulés sous scénarios, dans un souci de cohérence entre le temps présent et le futur où la gestion des barrages est inconnue, supposent cette influence toujours nulle, quelle que soit la période considérée, y compris donc en temps présent.

- les valeurs de pente calculées pour la durée caractéristique D pour MODCOU sont très influencées par les résultats de la Somme à Abbeville. Cette station étant exclue, α évolue entre 1.13 et 1.30 ; en général, les durées de crue sont allongées.

De manière générale, les régimes hydrologiques ainsi simulés sous scénarios temps présent présentent moins de variabilité que ceux restitués par SAFRAN.

Synthèse

Les modèles appliqués représentent une gamme étendue des structures disponibles dans la communauté des hydrologues. Ils présentent des avantages et des défauts identifiés dans l'analyse de performance sous climat présent :

- les modèles conceptuels (GR4J et EROS/GARDENIA) se révèlent très efficaces à reconstituer les valeurs observées dans le passé. Ceci s'explique par la facilité du calage, et par le fait que les influences anthropiques actuelles sont implicitement décrites dans la structure du modèle pluie-débit. Cette composante anthropique calée sur l'actuel peut cependant biaiser les projections futures de débits, surtout en étiage ;
- les modèles à base physiques (MODCOU, SIM, CLSM) s'avèrent finalement moins aptes à reconstituer les étiages, malgré des performances globalement satisfaisantes sur les extrêmes en crue ;
- les procédures de calage, quant elles sont exploitées, ne sont pas uniformes, plus ou moins contraignantes, s'exprimant sur un ou plusieurs termes descriptifs du cycle de l'eau. Il faut noter que le bilan hydrique (ou fonction de production) du modèle SIM n'est pas calé ; il ne faut pas s'attendre à une parfaite adéquation aux observations.
- les modèles distribués permettent en revanche la prise en compte explicite des transferts naturels entre les masses d'eau souterraines ainsi que des influences anthropiques sur les débits et les aquifères (prélèvements, rejets, diversions). Ils garantissent ainsi une bonne cohérence du fonctionnement hydrologique depuis l'amont jusqu'à l'aval des bassins modélisés, en temps présent comme sous changement climatique.
- CLSM présente une structure hybride, avec une spatialisation semi-distribuée qui facilite le calage par rapport aux modèles finement distribués, et une base physique, dont les contraintes empêchent une optimisation réelle au cours du calage, mais garantissent *a priori* (sans que ce soit cependant vérifiable) une trajectoire sous changement climatique respectueuse des lois physiques retenues, comme pour les modèles SIM et MODCOU.

Nous avons pu noter que les modèles ont des performances équivalentes en apports mensuels mais c'est leur comportement sur les extrêmes qui les différencient :

- GR4J et EROS/GARDENIA présente les meilleures performances même si EROS/GARDENIA a une tendance à surestimer les débits d'étiage ; ceci résulte de la souplesse de

leur structure, capable de restituer les débits simulés sans contrainte physique : il s'agit de modèles comportementaux ;

- les débits d'étiage simulés par CLSM en tenant compte de l'influence historique des barrages-réservoirs se comparent de manière acceptable avec les débits observés influencés. Cependant les débits simulés sous scénarios désagrégés n'intégreront pas cette influence, ce qui réduit les $QMNA5$, comme démontré sur les débits simulés sous scénarios temps présent ;
- MODCOU et SIM fournissent des résultats acceptables. Ils peinent cependant à reconstituer des étiages soutenus et les crues des bassins très productifs, ce que l'on peut résumer par un comportement un peu trop « tamponné ».

Nous avons également estimé la contribution des écoulements de base aux débits totaux à l'échelle annuelle au travers du *BFI* (« Base Flow Index »). Si les modèles proposent des valeurs de $QMNA5$ cohérentes, ce n'est pas le cas pour les BFI, qui sont distribués de manière bien distincte selon les modèles, ce qui laisse présager des comportements différenciés sous changement climatique.

Comme tous les modèles, les modèles hydrologiques utilisés dans le projet RExHySS-ci sont imparfaits. Ils permettent cependant d'esquisser les principales tendances à l'échelle régionale. Du fait de différences d'efficacité et de structure, nous nous attendons à des réponses diverses sous scénarios climatiques. Elles sont en l'état toutes acceptables, il n'y a pas de bonnes ou mauvaises raisons pour éliminer un des modèles hydrologiques sur la seule base des analyses ci-dessus. Les comparaisons des débits simulés et des observations ne renseignent que sur la capacité des modèles à restituer les composantes du régime hydrologique en temps présent. Une bonne performance du modèle est une condition nécessaire mais non suffisante pour qu'il soit crédible dans le futur. Les scénarios de changement climatique utilisés dans le cadre de RExHySS correspondent à des conditions hydro-climatiques différentes des conditions actuelles (volets V1 et V2) si bien que tous les modèles hydrologiques fonctionneront en extrapolation (en dehors des gammes observées et utilisées pour le calage et/ou la validation). La pertinence de leurs projections repose donc sur l'hypothèse de stationnarité des processus actuellement en jeu, i.e. que les processus qui dominent actuellement continueront dans les conditions futures. Pourtant, certains processus qui sont maintenant minoritaires pourraient avoir une importance plus marquée sous changement climatique en particulier dans les situations extrêmes. Cette source d'incertitude sur nos résultats n'est pas quantifiable a priori, et sera donc négligée dans l'analyse, par nécessité.

Evolution des extrêmes hydrologiques sous scénarios climatiques

Les séries traitées sont les N chroniques simulées par les différents « assemblages » de :

- modèle hydrologique MH (parmi CLSM, EROS/GARDENIA, GR4J, MODCOU, SIM) ;
- GCM/méthode de désagrégation GCMMD (parmi G0, G1, CC, GM, MR, EC, RC1, RC2, RD2, RD1, A1, A2 ; acronymes définis dans le volet V1) ;
- périodes : PST (présent, pour ce qui est disponible entre 1950 et 2010), MS (pour ce qui est disponible entre 2046 et 2065), FS (pour ce qui est disponible entre 2081 et 2100).

Le Tableau 4 fait la synthèse des projections considérées pour chaque modèle. Le nombre de simulations réalisées est équivalent d'un modèle hydrologique à un autre (entre 5 et 7 pour le milieu de siècle). Il est au minimum de 10 pour la fin de siècle, exception faite de EROS/GARDENIA (seuls quatre scénarios ont été considérés ; les statistiques calculées seront de fait moins robustes).

<i>Modèle hydrologique</i>	<i>Nombre de stations</i>	<i>Effectif PST Temps présent</i>	<i>Effectif A1B Milieu de siècle</i>	<i>Effectif A1B Fin de siècle</i>	<i>Effectif A2 Fin de siècle</i>
CLSM	23	9	7	8	2
EROS/GARDENIA	46	6	5	1	3
GR4J	85	9	7	9	3
MODCOU	125	9	7	9	3
SIM	60	9	7	8	2

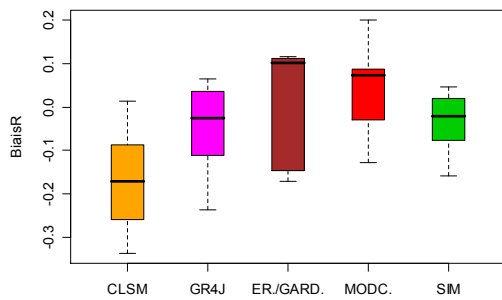
Tableau 4 : Caractéristiques des modèles et scénarios exploités

Analyse statistique

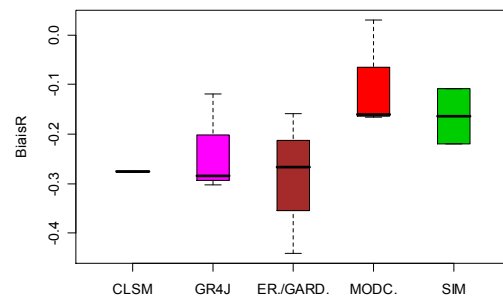
Les évolutions de la variable X seront caractérisées pour chaque modèle MH et couple GCM-méthode de désagrégation (GCMMD) et exprimées en termes de biais relatif entre $X_{MH-GCMMD}(MS \text{ ou } FS)$ et $X_{MH-GCMMD}(PST)$ en chaque station. $X_{MH-GCMMD}(T)$ sont les valeurs prises par la variable X des chroniques obtenues avec les modèles hydrologiques MH alimentés les scénarios des GCM désagrégés pour l'horizon T (PST, MS ou FS). Les estimations de référence sont $X_{MH-GCMMD}(PST)$. Elles sont très dépendantes des différents modèles, fonction de leur structure, des procédures de calage, etc. L'analyse ainsi réalisée permet d'identifier, à l'échelle régionale, la part d'évolution de l'hydrologie portée par le climat à transformation pluie-débit stationnaire.

Nous avons choisi de caractériser les évolutions des variables par le *Biais_R*, ou écart relatif médian, défini ici comme la médiane sur l'ensemble des stations traitées de l'écart relatif entre débit simulé sous scénario de changement climatique et débit simulé sous scénario temps présent. Ce biais relatif médian *Biais_R* a été calculé pour chaque modèle hydrologique et pour chaque sortie de GCM désagrégée. Les boîtes à

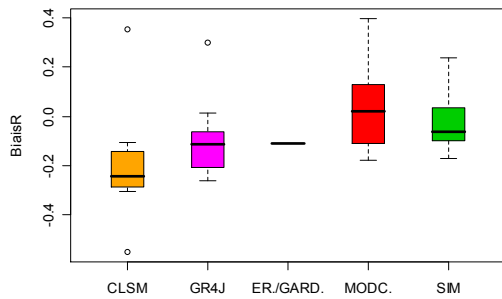
moustache synthétisent la variabilité des *BiaisR* rencontrée sur les bassins de la Seine et de la Somme, variabilité issue des différentes stations et scénarios désagrégés analysés.



A1B Milieu de siècle

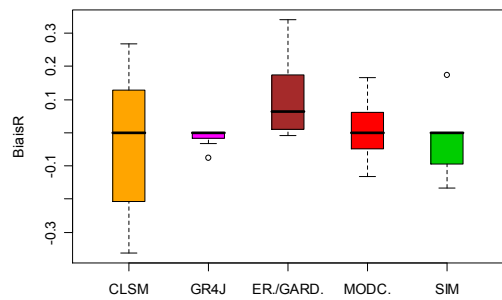


A2 Fin de siècle

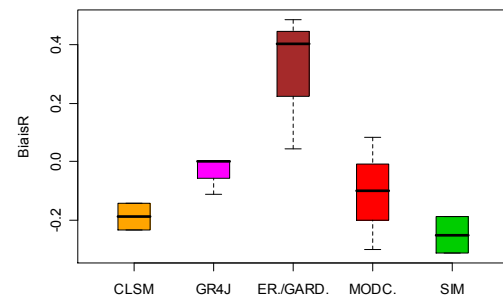


A1B Fin de siècle

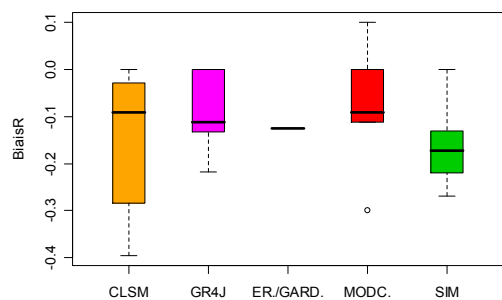
Figure 17 : Ecart relatif médian entre QJXA10 temps présent et QJXA10 pour différents horizons



A1B Milieu de siècle

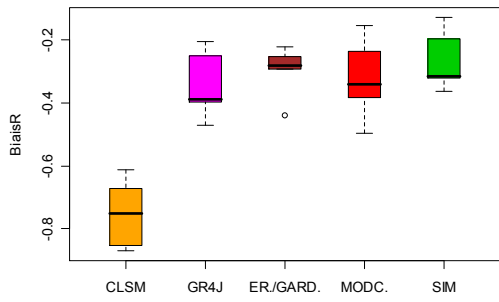


A2 Fin de siècle

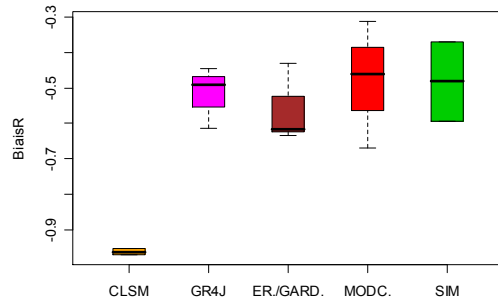


A1B Fin de siècle

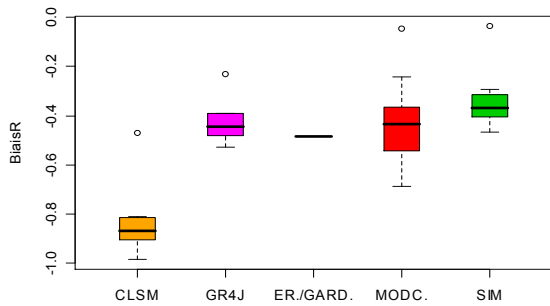
Figure 18 : Ecart relatif médian entre D temps présent et D pour différents horizons



A1B Milieu de siècle

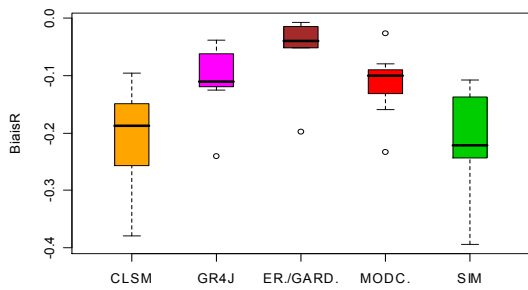


A2 Fin de siècle

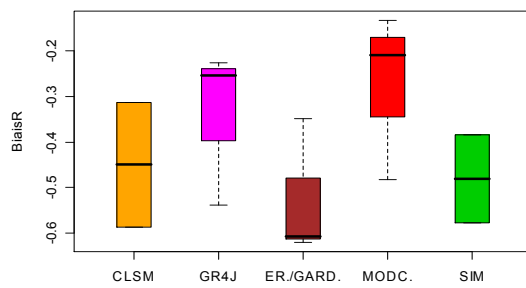


A1B Fin de siècle

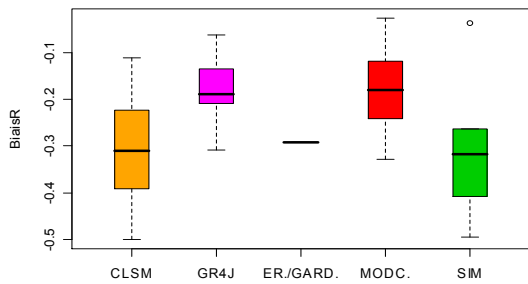
Figure 19 : Ecart relatif médian entre QMNA5 temps présent et QMNA5 pour différents horizons



A1B Milieu de siècle



A2 Fin de siècle



A1B Fin de siècle

Figure 20 : Ecart relatif médian entre Fiabilité temps présent et Fiabilité pour différents horizons

Nous constatons une relative stabilité des variables descriptives des crues au cours du XXI^{ème} siècle (Figure 17, Figure 18). Pour le SRES A1B, la plupart des boîtes relatives à QJXA10 contiennent la valeur zéro, zéro signifiant « absence d'évolution » entre le temps présent et l'horizon examiné : le biais relatif médian évolue entre -34 et 20% tout modèle hydrologique confondu. Une tendance à la diminution du QJXA10 est partagée par quatre modèles hydrologiques pour A2 en fin de siècle (le biais relatif médian évolue entre -44 et 0% ; en moyenne, les crues seraient diminuées de 21%). Les réponses des modèles hydrologiques sont discordantes sur la dynamique des crues : EROS/GARDENIA annoncent des crues plus longues et CLSM des crues beaucoup plus courtes.

En revanche, les étiages seraient de plus en plus sévères (Figure 19). La tendance s'affirme dès le milieu de siècle. Le signal sur le QMNA5 est fort, cohérent et partagé par tous les modèles hydrologiques. Il est plus marqué sur A2 que sur A1B en fin de siècle. L'intensité de la diminution est plus ou moins marquée selon le modèle hydrologique. La réduction pour SIM, MODCOU et GR4J est de l'ordre de 30% en milieu de siècle et de 40% en fin de siècle, avec les scénarios de type A1B. Concernant EROS/GARDENIA, un seul scénario A1B en milieu de siècle a été considéré, d'où l'impression d'absence de dispersion sur les graphiques. CLSM propose enfin des réductions extrêmes quel que soit l'horizon, allant jusqu'à plus de 80% en fin de siècle. Comme discuté dans le volet 2, la réponse de ce modèle au changement climatique doit être prise avec beaucoup de précautions.

Les résultats de CLSM posent une autre question, liée à la nature des débits analysés. En effet, une diminution du débit d'étiage sera relativement plus forte sur des débits naturels que sur des débits influencés par les barrages, puisque les influences anthropiques consistent notamment à soutenir les étiages. Supposons ainsi, de manière très schématique, un débit d'étiage observé de 100 m³/s, correspondant à une valeur naturelle de 50 m³/s ; une baisse relative de 80% sur le débit naturel correspond alors à une baisse absolue de 40 m³/s, qui, sur les débits influencés, en supposant l'anthropisation inchangée, donne une baisse relative de 40% seulement. L'analyse de la réponse relative des débits d'étiages est donc étroitement liée, dans une grande part du bassin de la Seine, à la manière dont l'anthropisation est prise en compte par les modèles hydrologiques.

La fiabilité est estimée pour chaque modèle hydrologique et chaque station par le nombre des jours au-dessus d'un seuil fixe, ici le QMNA5 de temps présent calculé sous forçage SAFRAN (Figure 20). Deux groupements de modèles apparaissent sur les graphiques de fin de siècle : GR4J et MODCOU proposent des diminutions centrées autour de -25% (resp. -20%) ; les trois autres modèles sont plus extrêmes avec des évolutions autour de -50% (-35%) pour les scénarios A2 (resp. A1B). A titre d'exemple, SIM (resp. GR4J) annonce une fiabilité entre 29 et 68% sur le lot de stations traitées (resp. entre 16 et 80%) pour le scénario RD2 : ceci signifie qu'en moyenne, selon SIM (resp. GR4J), le débit serait supérieur au QMNA5 modélisé sous climat actuel entre 3 mois et 8 mois (resp. 2 et 10 mois) contre plus de 11 mois actuellement.

Analyse régionale

Les statistiques donnent des tendances générales. Nous avons souhaité reporter les résultats aux différents points du réseau hydrographique afin d'identifier des disparités régionales et les bassins les plus sensibles aux évolutions du climat. Nous nous sommes concentrés ici sur le *QMNA5* et le *QJXA10*. Pour chaque station et chaque modèle hydrologique, nous avons calculé l'écart relatif entre $X_{MH-GCMMD}(MS \text{ ou } FS)$ et $X_{MH-GCMMD}(PST)$, puis estimé la médiane des rapports par horizon et par SRES. Puis nous avons placé ces valeurs dans différentes classes mesurant l'intensité des changements et finalement reporté les résultats sur une carte. Cependant, la densité de stations modélisées par CLSM ne permet pas de différencier des comportements entre régions. Vu par ailleurs les doutes évoqués ci-dessus sur la baisse très forte des débits simulés par ce modèle, il a donc été écarté de l'analyse qui suit.

Les cartes obtenues avec le *QMNA5* (Figure 21 à Figure 24) sont conformes aux tendances précédemment établies à l'échelle des bassins (Figure 17 et Figure 19). Les bassins évoluent de manière continue vers des étiages plus sévères (du vert vers le noir). La quasi-intégralité des bassins se situe dans la classe de modification la plus extrême dès le milieu de siècle quel que soit le modèle hydrologique. En revanche, les modèles proposent des sensibilités différentes : SIM propose des évolutions marquées au centre du bassin (Figure 24) tandis que les autres modèles suggèrent un plus fort impact en périphérie (voir les résultats de MODCOU pour une distinction nette Figure 23 ; cette répartition est moins perceptible avec EROS/GARDENIA (Figure 21) du fait du choix de peu de bassins de tête modélisés). Cette différenciation rappelle le découpage proposé par Catalogne (2007), en partie guidé par la structure géologique en couronne du bassin de la Seine :

- une zone constituée par le socle hercynien à l'ouest (Cotentin), peu perméable et sans aquifère de surface susceptible d'alimenter les cours d'eau,
- une vaste ceinture perméable à semi-perméable regroupant de nombreux petits aquifères très morcelés à l'est et au sud du bassin parisien,
- une zone centrale, fortement influencée par les eaux souterraines, du fait des importantes formations aquifères affleurant sur la quasi totalité de ce domaine (Craie en jaune et formations tertiaires au centre) et des aquifères alluviaux bien développés le long des cours d'eau ; les seules exceptions sont localement deux petites zones (au centre et au nord) correspondant à un secteur imperméable pour la plus petite et une zone de perte pour la plus étendue (cours d'eau perchés).

Les évolutions des étiages annoncées par MODCOU et par EROS/GARDENIA semblent conformes au fonctionnement hydrogéologique : les bassins sans réserve voient rapidement leurs étiages s'effondrer. Les bassins disposant d'aquifère sont moins impactés – ou leur impact est différé dans le temps à un horizon plus lointain – par le changement climatique. Ils sont aussi cohérents avec le fait que la diminution des précipitations est plus marquée sur le pourtour du bassin (cf. Annexe volet 1). Le comportement différent de SIM n'est pas expliqué. Une possibilité est que le *QMNA5* soit déjà très faible en périphérie, si bien

qu'il ne peut plus diminuer beaucoup (cohérent avec un comportement typique de SVAT qui sous-estime les basses eaux, non corrigé par les nappes de MODCOU, absentes à l'extérieur de l'auréole de la Craie)

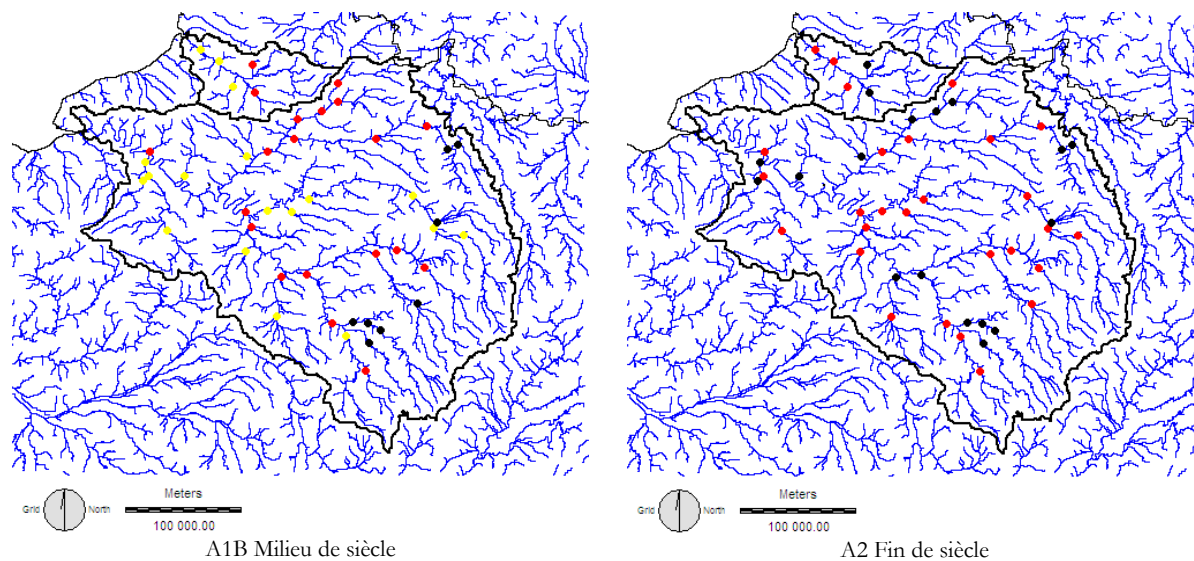
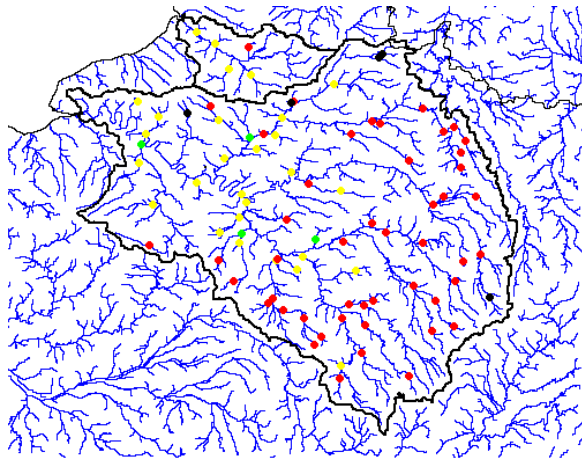
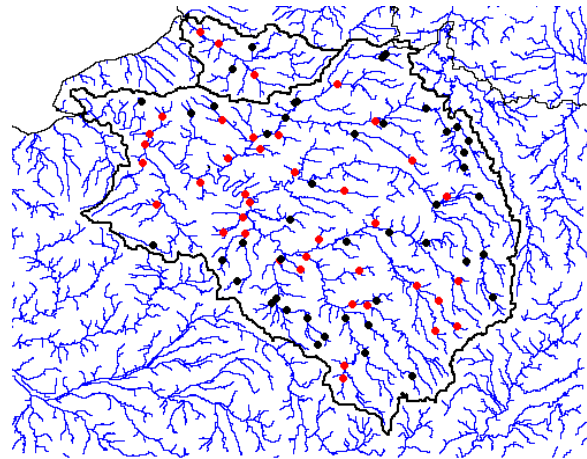


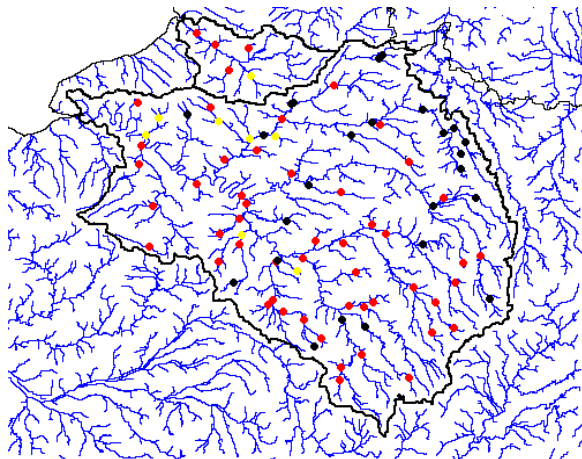
Figure 21 : Carte des évolutions du QMNA5 médian en relatif par rapport à QMNA5_{GCMMD}(PST) – EROS/GARDENIA – (● supérieure à -10% ; ● entre -10 et -25% ; ● entre -25 et -50% ; ● inférieure à -50%)



A1B Milieu de siècle

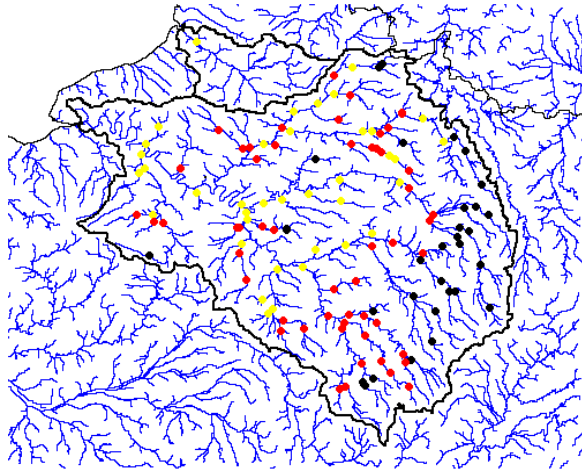


A2 Fin de siècle

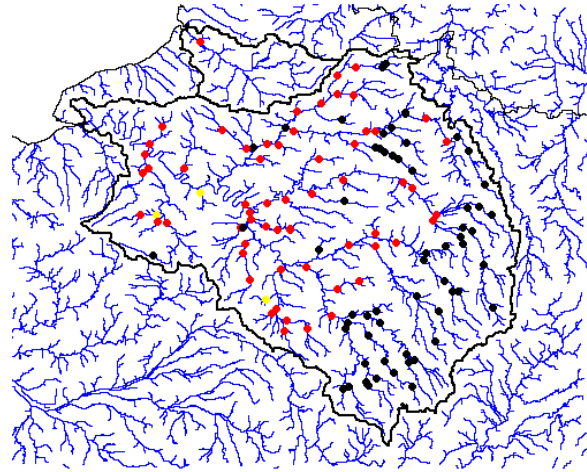


A1B Fin de siècle

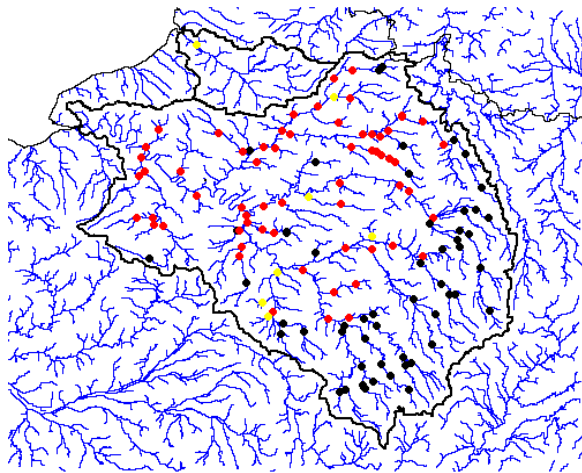
Figure 22 : Carte des évolutions du QMNA5 médian en relatif par rapport à $QMNA5_{GCMMD(PST)} - GR4J$ (● supérieure à -10% ; ● entre -10 et -25% ; ● entre -25 et -50% ; ● inférieure à -50%)



A1B Milieu de siècle



A2 Fin de siècle



A1B Fin de siècle

Figure 23 : Carte des évolutions du QMNA5 médian en relatif par rapport à $QMNA5_{GCMMD}(PST) - MODCOU$ – (● supérieure à -10% ; ● entre -10 et -25% ; ● entre -25 et -50% ; ● inférieure à -50%)

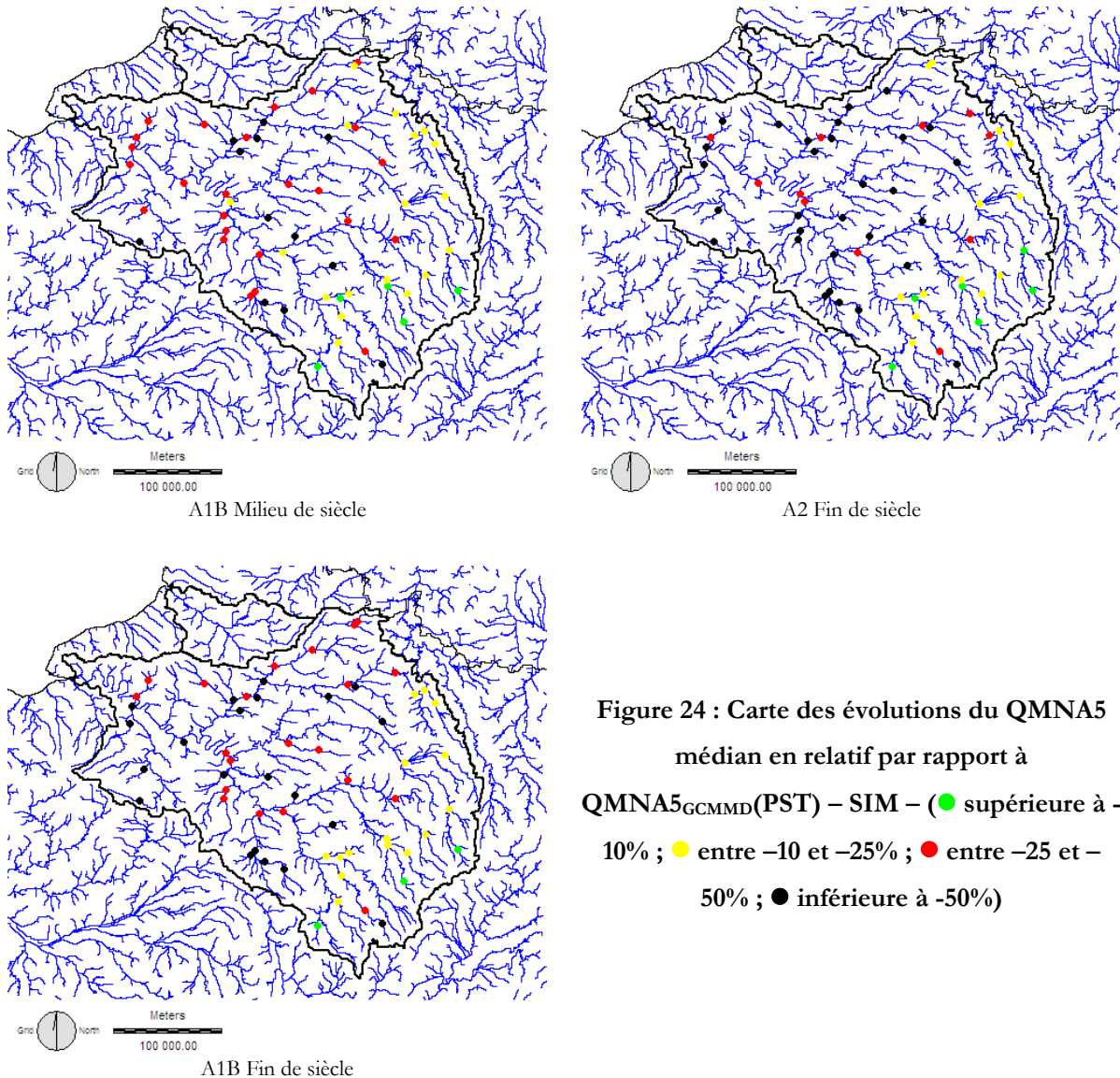


Figure 24 : Carte des évolutions du QMNA5 médian en relatif par rapport à QMNA5_{GCMMD(PST) – SIM} – (● supérieure à 10% ; ● entre -10 et -25% ; ● entre -25 et -50% ; ● inférieure à -50%)

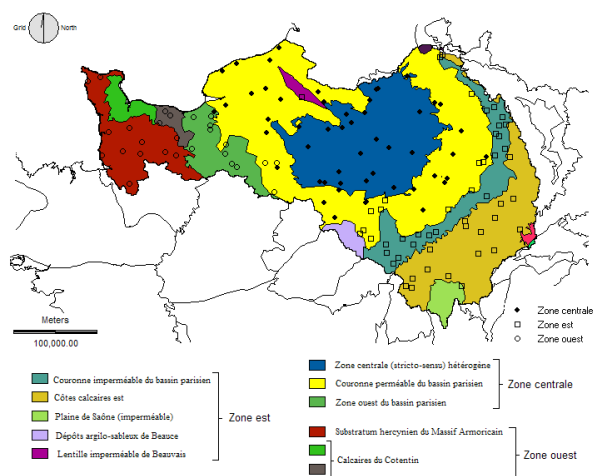


Figure 25 : Regroupement hydrologiquement homogènes de stations hydrométriques, sur la base d'un découpage du territoire en zones hydro-écorégions (extrait de Catalogne, 2007) – les points indiquent des stations hydrométriques de la banque HYDRO

L'évolution du régime de crue est moins marquée que celui des étiages (Figure 26 à Figure 29). Il n'y a aucune évolution supérieure à +10% sur le domaine, quel que soit l'horizon. La majorité des points se répartissent entre les classes du milieu (en jaune et rouge) : le QJXA10 évolue entre -10 et +10% au milieu du siècle (EROS/GARDENIA, MODCOU, SIM). GR4J propose une proportion plus élevée de bassins avec une diminution de -25% (en violet). De manière générale, le quantile de crue est plus fortement diminué en fin de siècle qu'en milieu de siècle, et sous scénario A2 que sous scénario A1B. On observe aussi une tendance plus marquée à la baisse du $QJXA10$ sur le sud du secteur, alors qu'on trouve davantage d'augmentations ou des réductions plus faibles dans le nord. Ces tendances sont cependant moins bien structurées dans l'espace que celles constatées sur les étiages.

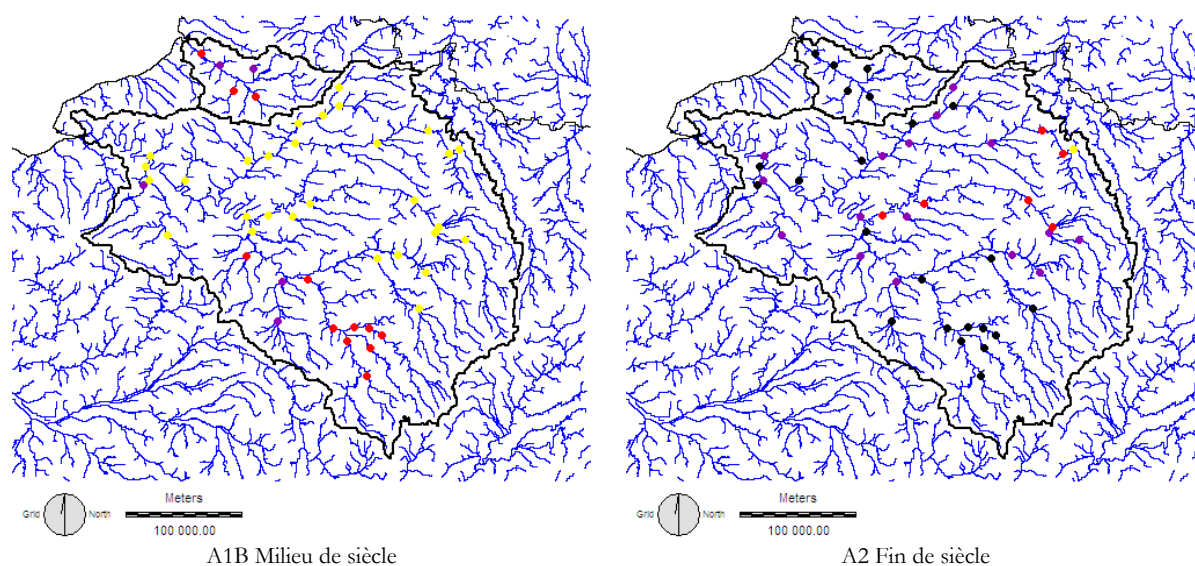
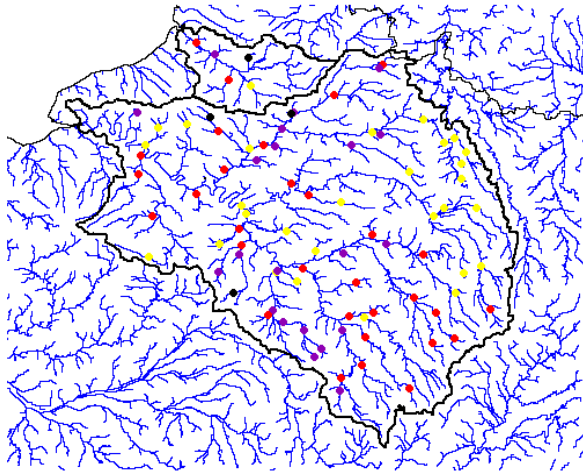
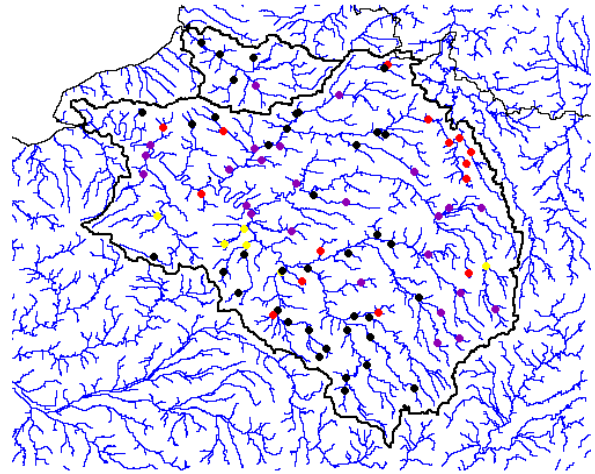


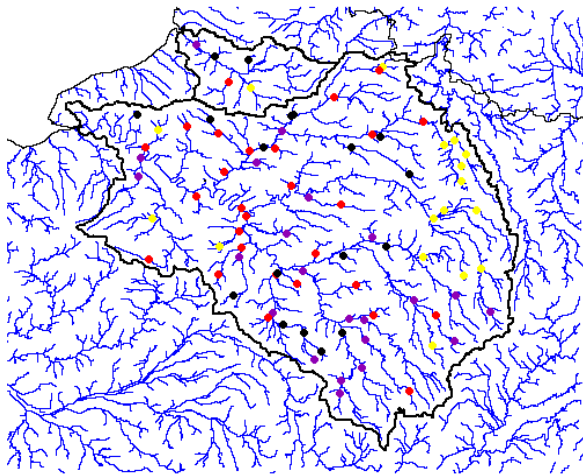
Figure 26 : Carte des évolutions du $QJXA10$ en relatif par rapport à $QJXA10_{GCMMD(PST)}$ – EROS/GARDENIA – (● inférieure à -25% ; ● entre -25 et -10% ; ● entre -10 et 0% ; ● entre 0 et 10% ; ● entre 10 et 25% ; ● supérieure à 25%)



A1B Milieu de siècle

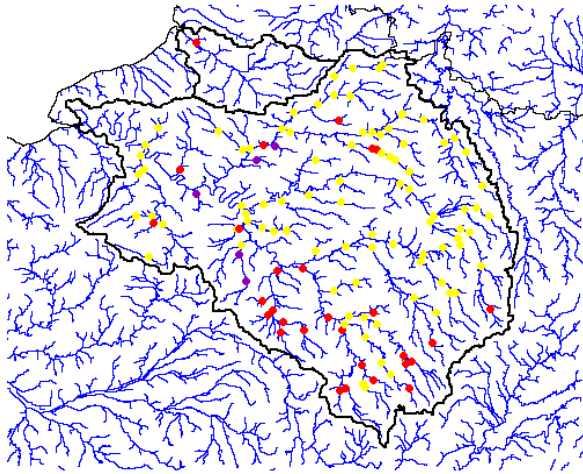


A2 Fin de siècle

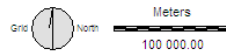
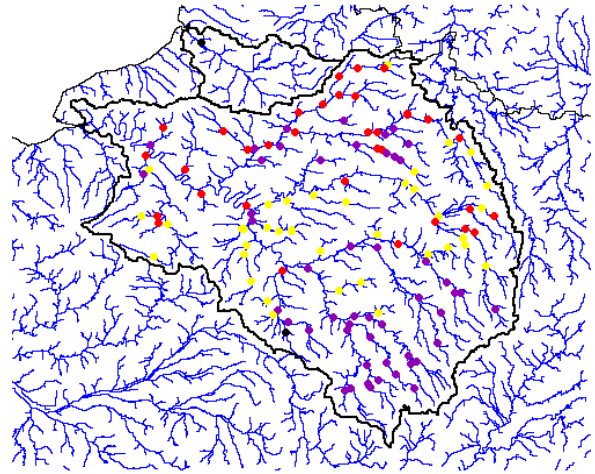


A1B Fin de siècle

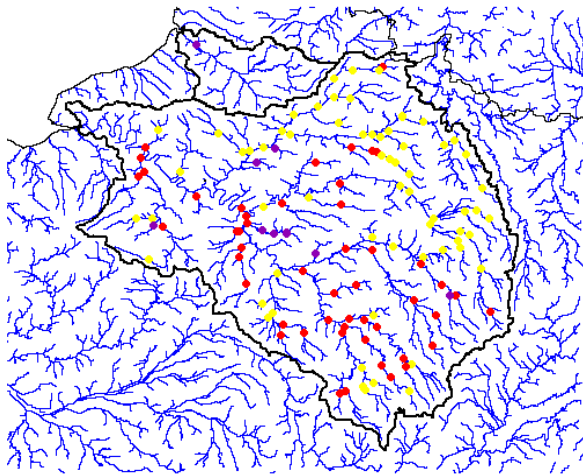
Figure 27 : Carte des évolutions du QJXA10 en relatif par rapport à QJXA10_{GCMMD(PST) - GR4J} – (● inférieure à -25% ; ● entre -25 et -10% ; ● entre -10 et 0% ; ● entre 0 et 10% ; ● entre 10 et 25% ; ● supérieure à 25%)



A1B Milieu de siècle

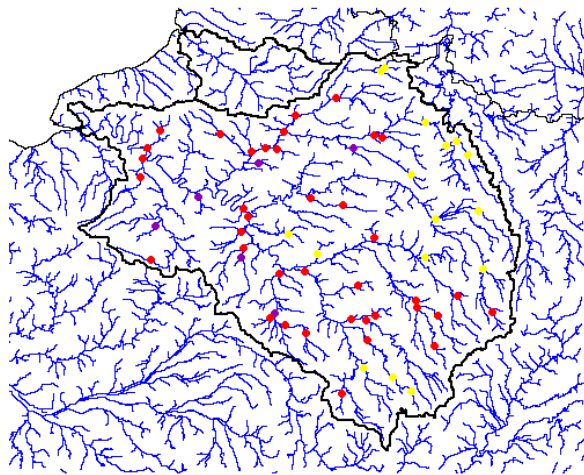


A2 Fin de siècle

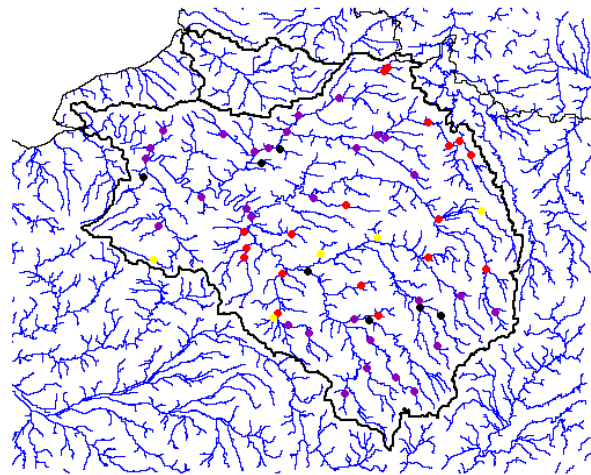


A1B Fin de siècle

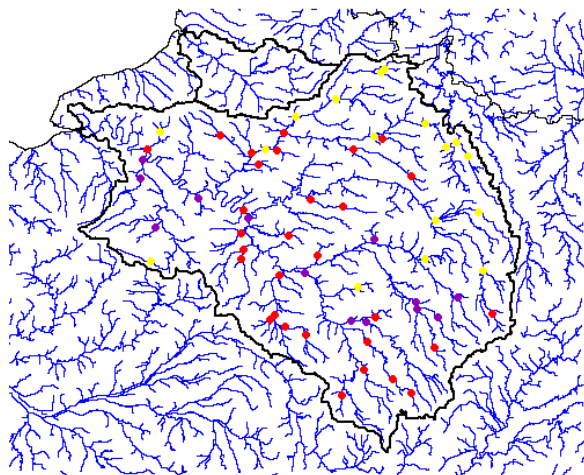
Figure 28 : Carte des évolutions du QJXA10 en relatif par rapport à QJXA10_{GCMMD(PST)} – MODCOU - (● inférieure à -25% ; ● entre -25 et -10% ; ● entre -10 et 0% ; ● entre 0 et 10% ; ● entre 10 et 25% ; ● supérieure à 25%)



A1B Milieu de siècle



A2 Fin de siècle



A1B Fin de siècle

Figure 29 : Carte des évolutions du QJXA10 en relatif par rapport à QJXA10_{GCMMD(PST) - SIM} – (● inférieure à -25% ; ● entre -25 et -10% ; ● entre -10 et 0% ; ● entre 0 et 10% ; ● entre 10 et 25% ; ● supérieure à 25%)

Synthèse

Dans les deux bassins, la réponse au changement climatique des valeurs extrêmes du débit est un peu plus contrastée que celle de l'hydrogramme moyen, puisque les QMNA5 baisseraient fortement, alors que les QJXA10 ne changeraient pas significativement.

La tendance à une sévérité accrue et un allongement des étiages est partagée par les modèles. En fin de siècle, le quantile QMNA5 pourrait diminuer de 40% sous scénario A1B et de plus de 50% sous scénario A2 (estimations médianes établies à l'échelle régionale tous modèles hydrologiques confondus exceptés CLSM). Cette réduction est d'un ordre de grandeur supérieure aux incertitudes pesant sur ce quantile (entre -20 et +20%, médianes des écarts relatifs entre borne de l'intervalle de confiance et valeur centrale sous climat présent sur l'ensemble des stations exploitées).

L'analyse des étiages en termes de fiabilité montre que la durée des séquences de débits faibles au-dessus du QMNA5 actuel (souvent pris par défaut comme seuil d'alerte sécheresse) est diminuée de manière significative. Les crises à gérer et restrictions d'usage aujourd'hui rare seraient plus fréquentes.

On note l'absence d'évolution forte sur les crues, que ce soit sur la dynamique ou sur l'intensité. Les quantiles QJXA10 sont peu modifiés sous changement climatique ; ils évoluent entre -10 et +10% en milieu de siècle (à titre de comparaison, l'intervalle de confiance à 95% en relatif autour du QJXA10 est entre -12% et +25% de la valeur centrale du seul fait des fluctuations d'échantillonnage (valeurs médianes des bornes de l'intervalle de confiance sur les stations exploitées) ; les évolutions sont donc d'un ordre de grandeur inférieur ou équivalent à l'incertitude actuelle) en milieu de siècle. En fin de siècle, le nombre de stations avec des diminutions du QJXA10 est plus important qu'en milieu de siècle ; il faut toutefois être prudent sur l'interprétation de ces tendances. La durée des crues varie peu sous changement climatique.

La spatialisation des résultats sur le QMNA5 fait apparaître des évolutions différenciées selon les secteurs. On retrouve une organisation concentrique qui rappelle des fonctionnements hydrogéologiques actuels pris en compte différemment par les modèles d'où des réponses différentes mais pas cohérentes (cf. les cartes relatives à MODCOU et SIM). Pour mémoire, MODCOU et SIM ont la même description hydrogéologique, mais le bilan hydrique les différencie ce qui peut jouer sur les stocks.

Les tendances sur les très bas débits sont conformes aux évolutions analysées en détail sur les régimes hydrologiques, y compris sur les intensités des changements qui restent encore incertaines (fonction du modèle hydrologique et du scénario). Parmi les représentations hydrologiques, CLSM fournit des résultats extrêmes. Enfin, A2 semble plus extrême que A1B en fin de siècle, bien que cette analyse soit limitée par le nombre de scénarios A2 plus faible que celui des A1B.

Il convient enfin de rappeler que cette étude reste malgré tout un exercice théorique. Nous n'avons pas inséré d'évolution d'occupation du sol, des usages... La part d'anthropisation est certainement non négligeable en étiage, lorsque les débits sont faibles, quand les modifications dues aux actions humaines représentent une proportion non négligeable des écoulements. Nous accédons donc à la réponse hydrologique aux évolutions du climat toutes choses égales par ailleurs. Mais la manière dont évolueront les pressions conditionnera certainement fortement le devenir des étiages.

Le devenir de la Seine à Paris et la Somme à Abbeville

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux résultats obtenus avec le scénario A1B continu (RC1). L'intérêt est de replacer au fil des décennies chacune des caractéristiques extrêmes. Rappelons qu'il ne s'agit que d'un scénario parmi d'autres et que ce choix n'est guidé que par la disponibilité des données sur le siècle. Nous reprendrons ensuite les résultats issus de toutes les combinaisons disponibles, pour discuter les incertitudes. Il faut noter que la Somme n'a été traité que par trois modèles hydrologiques.

Selon le scénario A1B continu

Sur les graphiques qui suivent, nous avons représenté les valeurs extrêmes extraites par année observées ($QMNA$ et $QJXA$) par des points noirs (en distinguant les années avant et après aménagements des grands barrages-réservoirs de Seine). Des points de couleurs représentent ces mêmes variables pour chaque modèle hydrologique. Le trait noir fournit les valeurs de référence calculées sur l'intégralité des observations. Les courbes colorées relient les quantiles estimés sur une fenêtre glissante de 20 ans.

Comme déjà noté à l'échelle régionale sur l'ensemble des scénarios, le quantile $QJXA10$ ne présente pas de tendance marquée à Paris au cours du XXIème siècle selon le scénario A1B continu (Figure 30). Nous notons des fluctuations autour de la valeur actuelle, restituées par les modèles sous climat présent. Cette stabilité s'explique en partie par l'absence de tendance sur le régime des pluies d'hiver susceptibles de générer les événements forts (Figure 31). En début de siècle, la remontée temporaire des valeurs du $QJXA10$ est due aux fluctuations d'échantillonnage : le hasard a conduit à la simulation d'hivers pluvieux, générant un enchaînement de crues fortes dont le poids est non négligeable dans les paramètres de la loi calculés sur une population de 20 individus.

En revanche, une tendance continue à la baisse est perceptible à Paris sur le quantile d'étiage $QMNA45$ en réponse à une diminution de la pluviométrie annuelle et à la hausse des températures (perceptibles sur la température maximale annuelle, représentative de la période estivale, en Figure 31). La réduction est de l'ordre de 40% pour GR4J, MODCOU et SIM et de plus de 50% pour CLSM et EROS (comparaison $QMNA45_{MH-RC}(PST)$ $QMNA45_{MH-RC}(FS)$). Dans cette simulation sous scénario désagrégé, le modèle CLSM n'intègre pas d'influence des barrages-réservoirs et reproduit donc un fonctionnement naturel et une statistique proche de 54 m³/s représentative de la période avant construction des grands barrages. Les autres modèles intègrent implicitement cette influence du fait de leur méthodologie de calage, si bien qu'ils ont tendance à restituer des débits d'étiage plus forts, proche du régime influencé (statistique après construction des grands barrages), à l'exception de EROS/GARDENIA qui surestime les $QMNA5$ par rapport à cette référence.

Notons enfin l'effet distinct des barrages réservoirs sur le régime hydrologique de la Seine : les étiages après construction sont soutenus par les ouvrages en amont de Paris ; de ce fait le *QMNA5* calculé sur la période la plus récente est plus élevé que celui de la Seine dans sa configuration « naturelle ». Les *QJXA10* avant et après construction sont quasi-identiques. Ceci reflète l'influence modeste des barrages en crue sur les événements modestes.

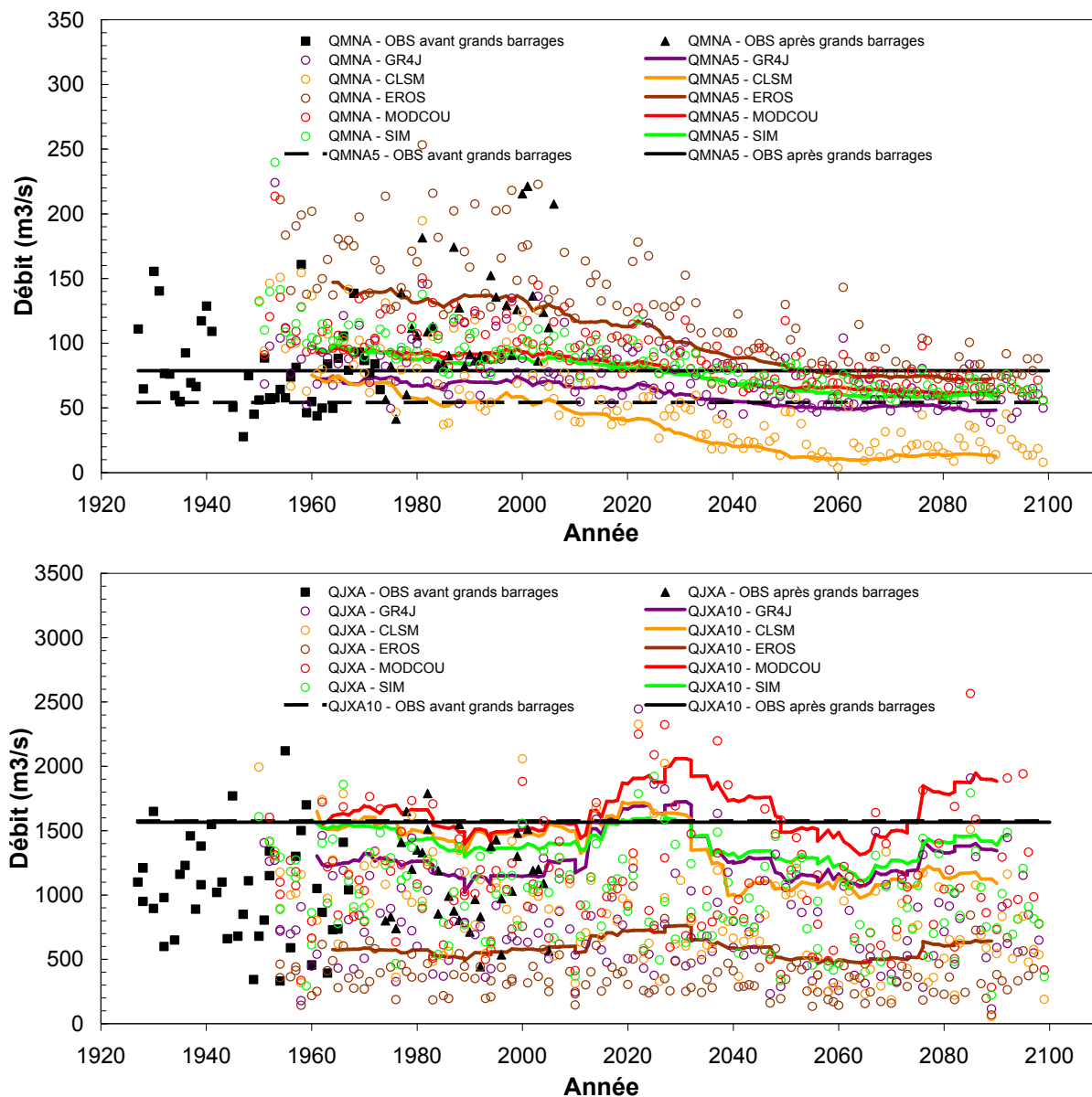


Figure 30 : Evolution des extrêmes hydrologiques pour la Seine à Paris - les points sont les maxima annuels de débits journaliers ; les courbes relient les quantiles estimés sur une fenêtre glissante centrée de 20 ans ; les droites indiquent les valeurs des quantiles observées temps présent.

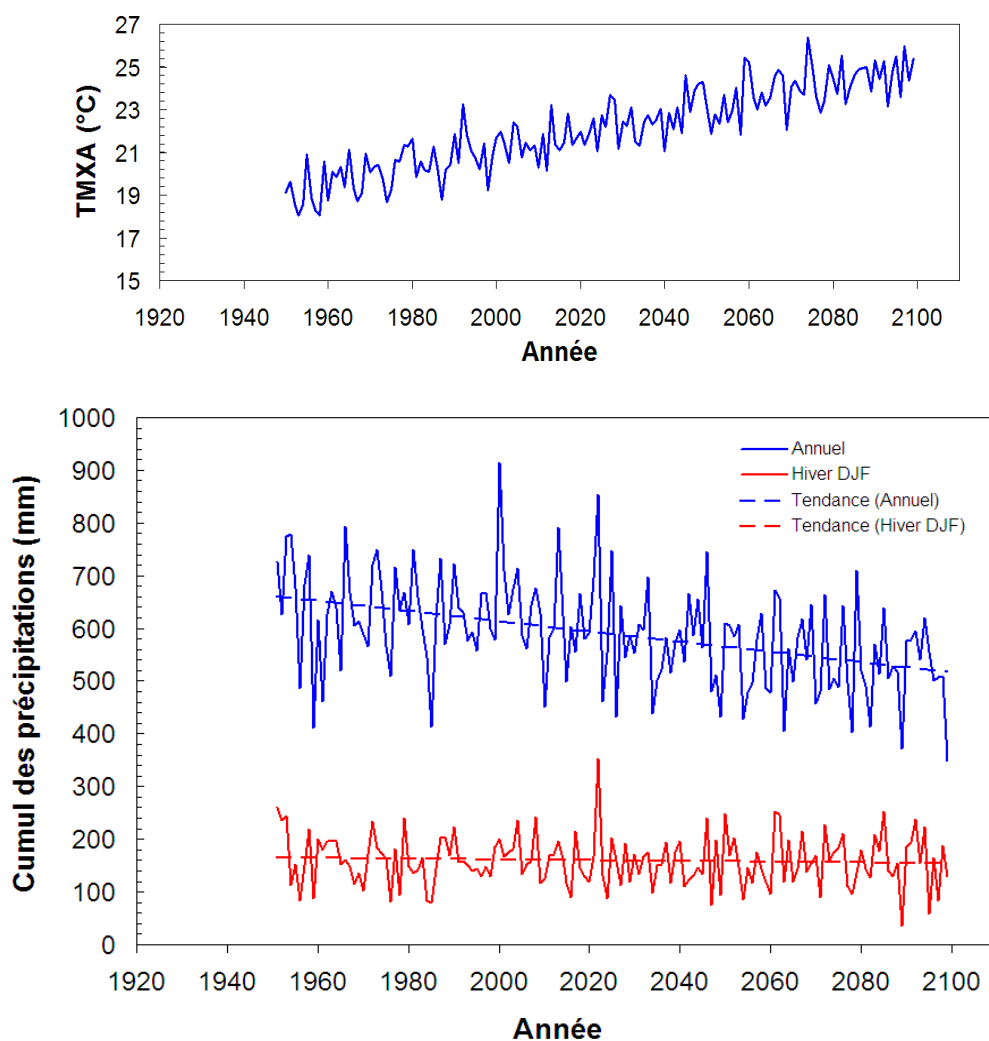


Figure 31 : Evolution de la température mensuelle maximale annuelle et de la pluviométrie sur le bassin unitaire autour de Paris considéré par CLSM, selon le scénario A1B continu (RC1)

Pour la Somme à Abbeville (Figure 32), les débits de crue et d'étiage ont tendance à diminuer de manière continue au cours du XXIème siècle, de l'ordre de -45% pour QJXA10 et entre -30 (MODCOU) et -40% (GR4J et GARDENIA) pour QMNA5 en fin de siècle.

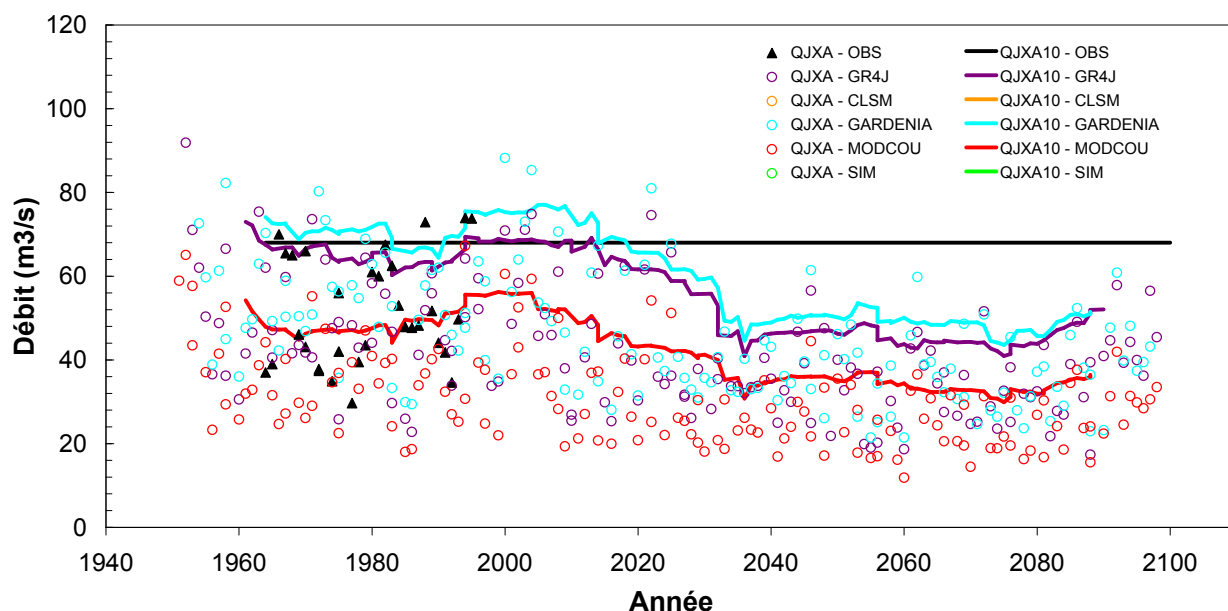
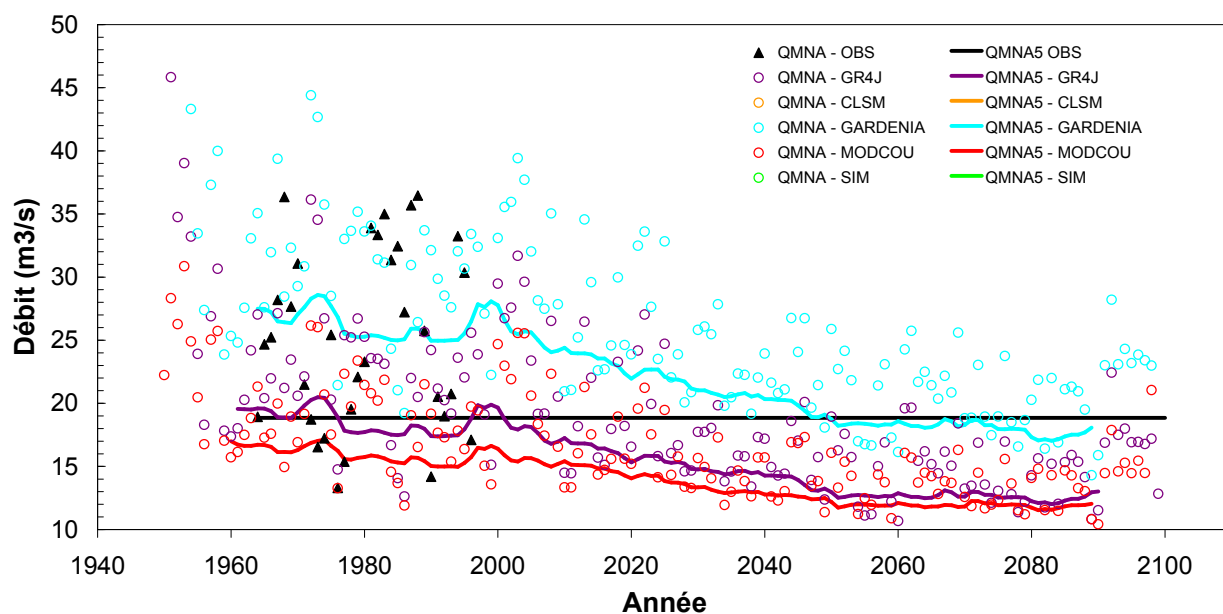
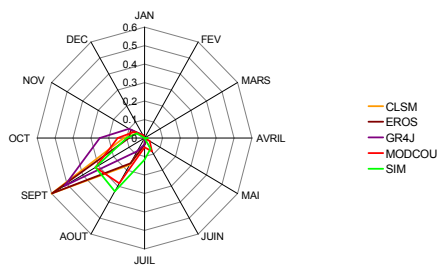


Figure 32 : Evolution des extrêmes hydrologiques pour la Somme à Abbeville - les points sont les minima annuels de débits mensuels ; les courbes relient les quantiles estimés sur une fenêtre glissante centrée de 20 ans ; les droites indiquent les valeurs des quantiles observées temps présent.

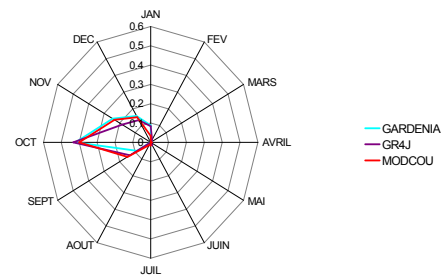
La dernière analyse menée sur le scénario A1B continu à Paris et Abbeville porte sur le caractère saisonnier des étiages. Nous avons relevé le débit correspondant aux minimums de débits mensuels de chaque année (QMNA) pour le scénario continu. Ensuite, pour chaque mois, nous avons comptabilisé le nombre de fois où le QMNA était échantillonné et exprimé ce nombre en terme de pourcentage par rapport au nombre d'année de la période. La Figure 33 montre que, sous climat présent, les étiages les plus sévères se concentrent en début d'automne. Ainsi, près de 60% des QMNA de la Seine à Paris ont été

observés en septembre pour la majorité des modèles en temps présent. Pour la Somme à Abbeville, le mois le plus critique est octobre.

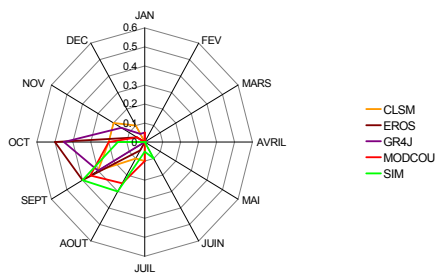
Les courbes en « radar » obtenues sous changement climatique sont bien différentes de celles modélisées sous temps présent. On note une dérive progressive du mois de l'année le plus sec en termes d'écoulement sur la Somme d'octobre à décembre. La dispersion autour du mois au risque d'étiage le plus sévère reste faible (certaine régularité). La dérive est moins significative pour la Seine à Paris, pour laquelle une plus grande dispersion du mois d'occurrence du débit mensuel le plus faible de l'année. Ces remarques sont cohérentes avec la diminution marquée des débits d'automne et d'hiver (cf. Figure 3 de l'annexe du Volet 2). . En terme de gestion, les risques d'étiage sévères de la Seine à Paris seront plus répartis dans le temps. L'allongement de la durée des étiages n'est pas sans conséquence pour la gestion (vigilance sur la période juillet-décembre ; sollicitation prolongée des barrages réservoirs).



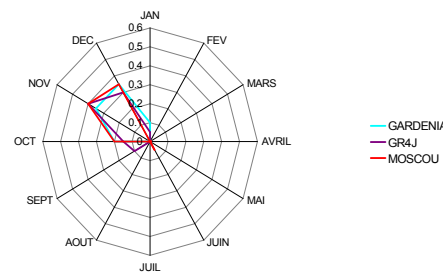
La Seine à Paris - Temps présent



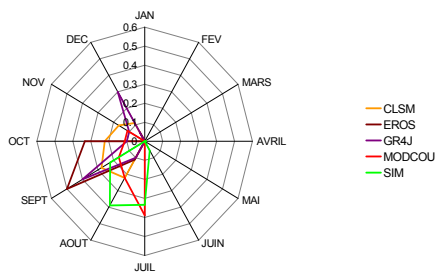
La Somme à Abbeville - Temps présent



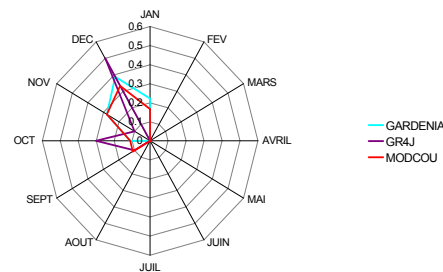
La Seine à Paris - A1B Milieu de siècle



La Somme à Abbeville - A1B Milieu de siècle



La Seine à Paris - A1B et A2 Fin de siècle



La Somme à Abbeville - A1B et A2 Fin de siècle

Figure 33 : Saisonnalité des étiages – mois d'occurrence du QMNA

Généralisation

Le scénario A1B continu n'est qu'un cas particulier du possible changement climatique, privilégié uniquement pour les possibilités d'analyses particulières qu'il offre du fait de son caractère continu sur 150 ans. Nous avons ici synthétisé les résultats de tous les scénarios à Paris et Abbeville, pour y replacer les changements des extrêmes par rapport à l'incertitude associée.

Evolution des étiages

Les Figure 34 et Figure 35 font écho aux Figures 2 et 11 de l'annexe du volet 2. Nous avons mesuré en relatif l'évolution du $QMNA5$ aux deux stations. Ces figures mettent en évidence une forte dispersion dans les simulations notamment pour la Somme à Abbeville.

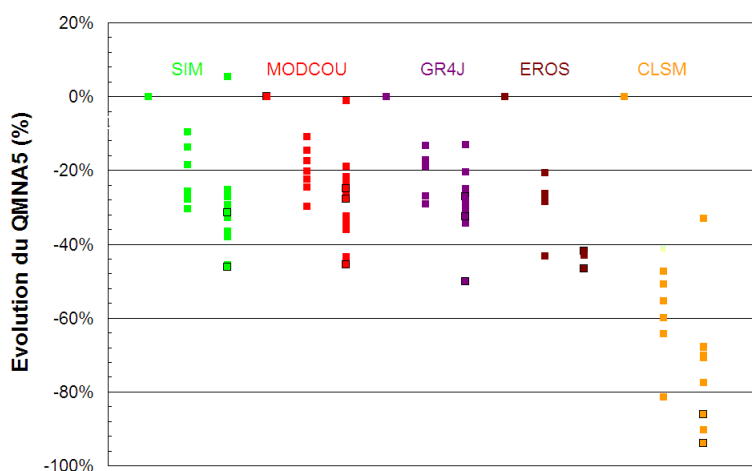


Figure 34 : Evolution du $QMNA5$ simulé pour la Seine à Paris. Les évolutions sont calculées par rapport aux débits simulés avec les sorties de GCM sous climat présent désagrégées. Les points entourés en noir correspondent aux scénarios A2. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent (0% de changement relatif quel que soit le scénario), la deuxième (lorsqu'elle existe) au milieu de siècle, et la troisième à la fin de siècle.

Pour la Seine, en fin de siècle, la réduction sera de l'ordre de 30% quel que soit le modèle hydrologique (hors CLSM), les prévisions les plus pessimistes affichent une réduction de -45% (elles concernent un des scénarios A2). Nous retrouvons ainsi une hiérarchie attendue : les scénarios A1B sont moins impactants que les scénarios A2 (même si le nombre de simulations A2 est faible). L'évolution à Paris sur les $QMNA5$ est similaire à celle observée sur le débit annuel moyen à Poses : il n'y a pas d'amplification nette sur les étiages sévères. A Abbeville, la gamme des évolutions possibles du $QMNA5$ est quasiment la même que celle simulée sur le débit annuel moyen (entre -10 m³/s et 0, soit une réduction entre -30% et 0, cf. volet 2). Les modèles diffèrent en fin de siècle avec des réponses plus extrêmes par GR4J. Dans ce dernier cas, les effets du changement climatique sont plus perceptibles sur les étiages que sur les apports annuels. Ici encore les scénarios A2 sont parmi les plus pénalisants. Notons enfin sur ces deux bassins qu'un des scénarios en fin de siècle, GMF, suggère une absence de changement des $QMNA5$. Ce scénario se

démarque de la tendance centrale relevée sur les résultats de SIM, MODCOU, GR4J et CLSM, ce qui est probablement relié au fait qu'il est le seul à anticiper une augmentation des précipitations annuelles en fin de siècle (+2%).

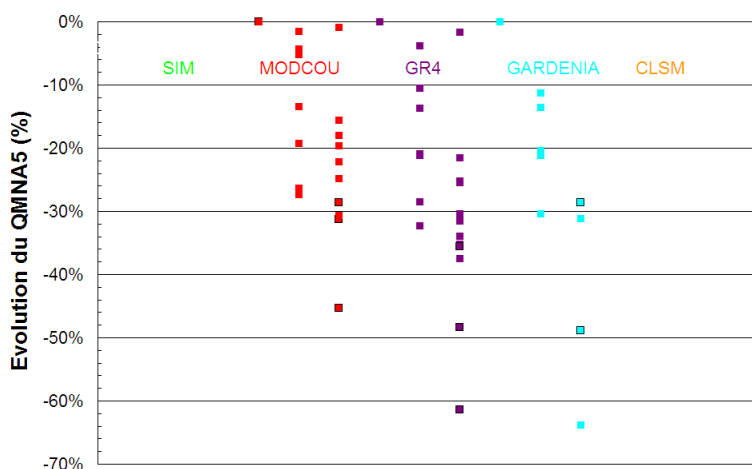


Figure 35 : Evolution du QMNA5 pour la Somme à Abbeville. Les évolutions sont calculées par rapport aux débits simulés avec les sorties de GCM sous climat présent désagrégées. Les points entourés en noir correspondent aux scénarios A2. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent (0% de changement relatif quel que soit le scénario), la deuxième (lorsqu'elle existe) au milieu de siècle, et la troisième à la fin de siècle

Evolution des crues

Nous avons examiné enfin les débits de crue. Nous avons sous climat présent estimé les paramètres de la loi de Gumbel ajustée aux débits journaliers maximaux annuels $QJXA_{MH-GCMMD}(PST)$ extraits des différentes simulations (échantillonnage par maxima annuel). Ensuite nous avons calculé la période de retour associée au $QJXA_{10_{MH-GCMMD}}(M \text{ ou } F)$ dans la distribution ajustée sur les valeurs temps présent $QJXA_{MH-GCMMD}(PST)$ et estimé la médiane par modèle pour différents horizons. Les valeurs supérieures à 10 ans signifient que les crues décennales du futur correspondent à des crues actuelles plus rares, *i.e.* plus sévères, donc que leur débit associé est plus fort que celui des crues décennales actuelles. Cette analyse nous a semblé plus facile interpréter que celle d'un changement relatif de N% du $QJXA_{10}$ (Tableau 6).

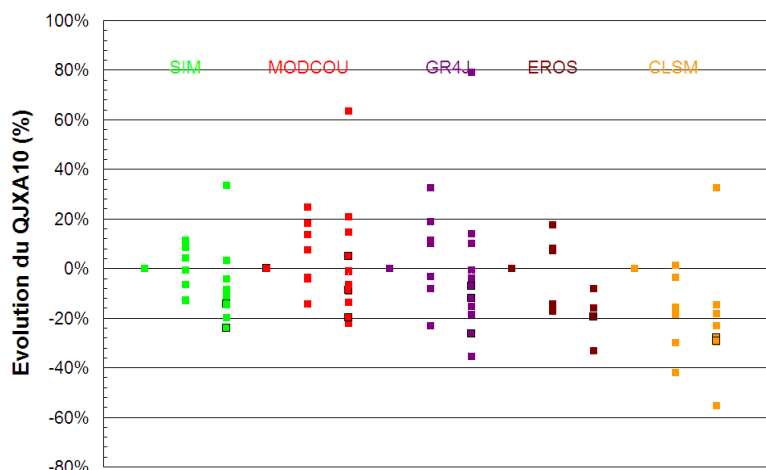


Figure 36 : Evolution du QJXA10 simulé pour la Seine à Paris. Les évolutions sont calculées par rapport aux débits simulés avec les sorties de GCM sous climat présent désagrégées. Les points entourés en noir correspondent aux scénarios A2. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent (0% de changement relatif quel que soit le scénario), la deuxième (lorsqu'elle existe) au milieu de siècle, et la troisième à la fin de siècle.

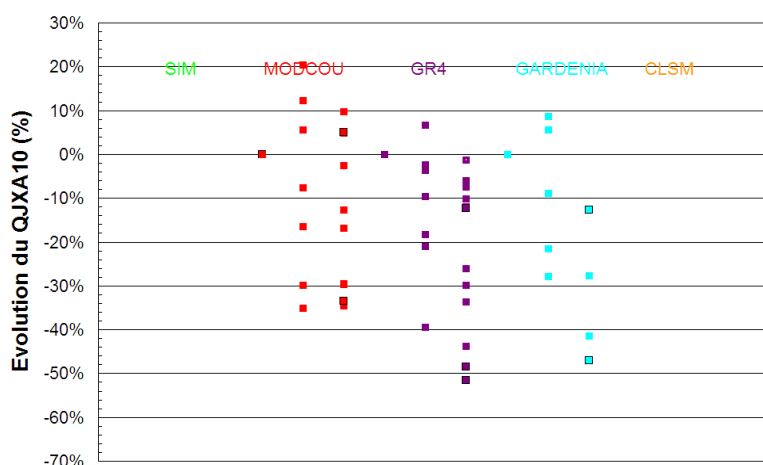


Figure 37 : Evolution du QJXA10 pour la Somme à Abbeville. Les évolutions sont calculées par rapport aux débits simulés avec les sorties de GCM sous climat présent désagrégées. Les points entourés en noir correspondent aux scénarios A2. Pour chaque scénario, la première valeur correspond aux résultats temps présent (0% de changement relatif quel que soit le scénario), la deuxième (lorsqu'elle existe) au milieu de siècle, et la troisième à la fin de siècle.

Le Tableau 5 montre ainsi une légère intensification des crues de milieu de siècle à Paris (Tableau 5). Ce qui semble plus robuste est l'évolution entre le milieu et la fin de siècle. Une même tendance est partagée par tous les modèles hydrologiques : la période de retour reste inférieure à 10 ans, signe de crues moins importantes. Ici encore nous n'avons retenu que la médiane, mais l'examen détaillé des périodes de retour sur la Seine à Paris montre quelques exceptions, avec des scénarios prédisant des quantiles décennaux supérieurs à ceux issus des simulations temps présent $QJXA10_{MH-GCMMD}(PST)$. En milieu de siècle, on

dénombrer quasiment autant de scénarios annonçant une augmentation que de scénarios suggérant une baisse. Pour la Somme, les risques d'accentuation des crues semblent peu probables en fin de siècle (seul MODCOU suggère des faibles augmentations inférieures à +10%) ; c'est sur cette base que la SOGREAH a modélisé des scénarios d'inondations (cf. volet 4a). En milieu de siècle, il n'est pas possible de conclure.

	<i>Horizon</i>	<i>CLSM</i>	<i>EROS/GARDENIA</i>	<i>GR4J</i>	<i>MODCOU</i>	<i>SIM</i>
La Seine à Paris	A1B Milieu de siècle	4	14	16	15	10
	A1B et A2 Fin de siècle	3	4	8	8	5
La Somme à Abbeville	A1B Milieu de siècle		5	6	7	
	A1B et A2 Fin de siècle		2	4	3	

Tableau 5 : Période de retour en année des quantiles QJXA10 établis en milieu et fin de siècle dans la distribution statistique temps présent (ajustement à la loi de Gumbel)

	<i>Horizon</i>	<i>CLSM</i>	<i>EROS/GARDENIA</i>	<i>GR4J</i>	<i>MODCOU</i>	<i>SIM</i>
La Seine à Paris	A1B Milieu de siècle	0.832 (1/7)	1.072 (3/5)	1.100 (4/7)	1.076 (4/7)	0.993 (3/7)
	A1B et A2 Fin de siècle	0.721 (1/9)	0.807 (0/4)	0.904 (3/12)	0.962 (4/12)	0.891 (2/10)
La Somme à Abbeville	A1B Milieu de siècle		0.911 (2/5)	0.905 (1/7)	0.924 (3/7)	
	A1B et A2 Fin de siècle		0.654 (0/4)	0.808 (0/12)	0.768 (3/12)	

Tableau 6 : Médiane des rapports de QJXA10_{MH-GCMMD}(MS ou FS)/ QJXA10_{MH-GCMMD}(PST) établis par ajustement à la loi de Gumbel et nombre de scénarios désagrégés proposant une augmentation du QJXA10

En conclusion de cette analyse, on peut s'interroger sur la différence d'évolutions des crues de la Seine à Paris et des crues de la Somme à Abbeville. Il faut peut être chercher une réponse dans la typologie des crues fortes. L'essentiel des crues de la Seine à Paris est formé sur les affluents Yonne, Aube, Marne et Seine en amont, conséquences de pluies intenses sur le Morvan. Les contributions souterraines sont plus faibles à l'échelle annuelle et à l'échelle des épisodes extrêmes que celles relatives à la Somme à Abbeville qui subit davantage des crues de nappe (cf. l'événement de 2001). L'assèchement des nappes (voir volet 2 et plus loin dans cette annexe) peut donc y influencer les crues davantage que dans le bassin de la Seine. A même sollicitation climatique, ces deux bassins versants vont donc répondre différemment du fait de chemins de l'eau et de capacités de stockage différentes.

Le devenir de la piézométrie sur le bassin de la Somme

Les séries de hauteurs piézométriques sont par nature fortement auto-corrélées dans le temps et l'espace. La valeur du jour $J+1$ est ainsi très dépendante de celle du jour antérieur J . L'existence de stocks souterrains engendre un grand effet mémoire qui peut se faire sentir d'une année à l'autre. Les valeurs extraites – y compris les maxima ou minima annuels - sont donc peu adaptées à un traitement statistique classique ; elles ne répondent pas à la propriété souhaitée *i.i.d.*, indépendante identiquement distribuée. Nous avons donc choisi de caractériser la piézométrie par quatre quantiles des courbes des hauteurs classées : Q05, Q20, Q80 et Q95 qui représentent respectivement la hauteur dépassée 5%, 20%, 80% et 95% du temps. Q05 et Q20 sont représentatifs des hauts niveaux et Q80 et Q95 des bas niveaux atteints par les nappes.

Nous avons mené cette analyse à partir des chroniques de hauteur piézométrique simulées par GARDENIA en 57 points (Figure 2), les autres modèles n'ayant pas fourni de valeurs.

En premier lieu, nous avons examiné la qualité des restitutions sous climat passé à l'aide du critère de Nash sur les chroniques journalières de hauteur. Les séries d'observations comportent beaucoup de lacunes : elles sont souvent non continues avec des fréquences de relevés mensuels ou hebdomadaires. La taille des séries évolue entre 41 et 440 valeurs. L'effectif médian est de 169 valeurs. Le critère de Nash sur les hauteurs brutes (C1) est compris entre 0.77 et 0.99 avec une médiane égale à 0.95 signe d'une bonne restitution des valeurs observées (Figure 38).

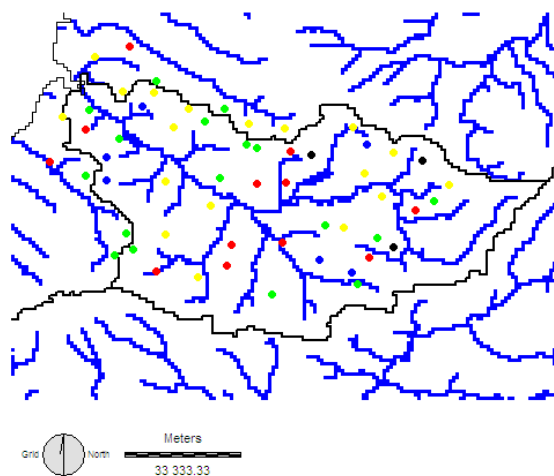


Figure 38 : Qualité des reconstitutions des hauteurs piézométriques - ● $C1 > 975\%$; ● $95\% < C1 \leq 975\%$; ● $90\% < C1 \leq 95\%$; ● $80\% < C1 \leq 90\%$; ● $C1 \leq 80\%$.

GARDENIA reproduit aussi fidèlement les caractéristiques des hauteurs classées observées (Tableau 7). Les écarts médians entre sorties de GARDENIA alimentés par SAFRAN et observations sont inférieurs à 1 mètre et les valeurs de la racine de l'erreur quadratique moyenne $REQM$ montrent la faible dispersion des erreurs autour de la valeur attendue. Les écarts entre valeurs obtenues avec SAFRAN et celles obtenues avec les forçages désagrégés des GCMs sont négligeables (Figure 39).

Modèle		Q05	Q20	Q80	Q95
GARDENIA	Biais	-0.65	-0.54	-0.22	-0.17
	REQM	1.31	1.41	0.80	0.65

Tableau 7 : Biais et erreur-type des niveaux de nappe (en m)

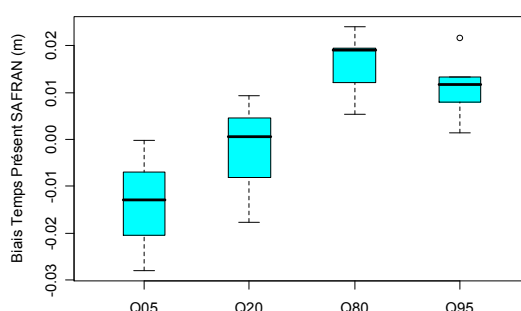


Figure 39 : Ecart entre caractéristiques piézométriques selon GARDENIA alimentés par les GCMs temps présent et caractéristiques selon GARDENIA alimentés par SAFRAN (en m)

La Figure 40 montre une baisse significative des hauteurs piézométriques sous changement climatique. Elle apparaît au milieu du siècle sur les scénarios A1B et s'accroît en fin de siècle sur les scénarios A2. Les valeurs hautes des piézomètres sont plus affectées (la baisse est généralement plus prononcée sur Q05 que sur Q95), comme discuté dans l'annexe du volet 2. Cependant l'incertitude matérialisée par les extrémités des boîtes à moustache est plus forte pour ces caractéristiques extrêmes.

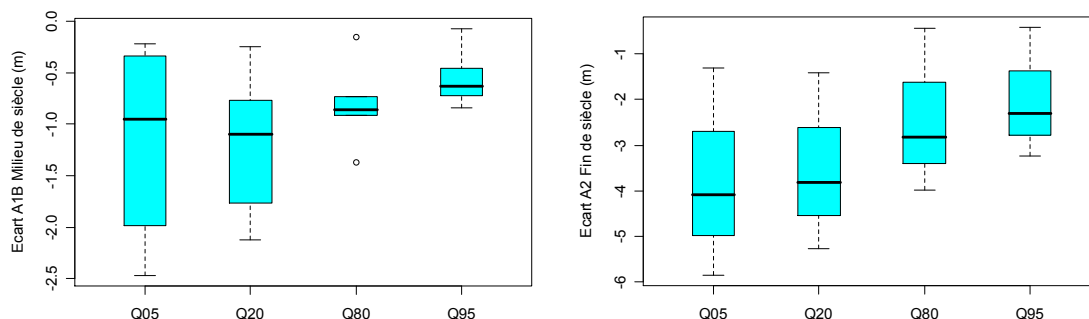


Figure 40 : Evolution des caractéristiques piézométriques selon GARDENIA – les écarts sont évalués par rapport aux résultats avec les forçages des GCMs temps présent

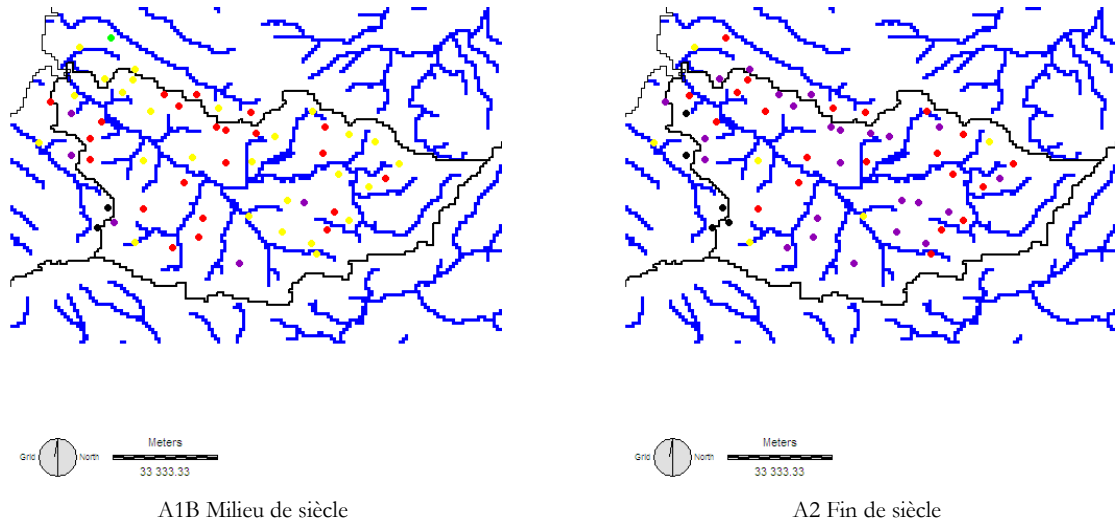


Figure 41 : Carte des évolutions du Q05 par rapport à Q05_{GCMMD(PST)} – GARDENIA– (● inférieure à -8 m ; ● entre -8 et -4 m ; ● entre -4 et -2 m ; ● entre -2 et -1 m ; ● entre -1 et 0 ; ● positive)

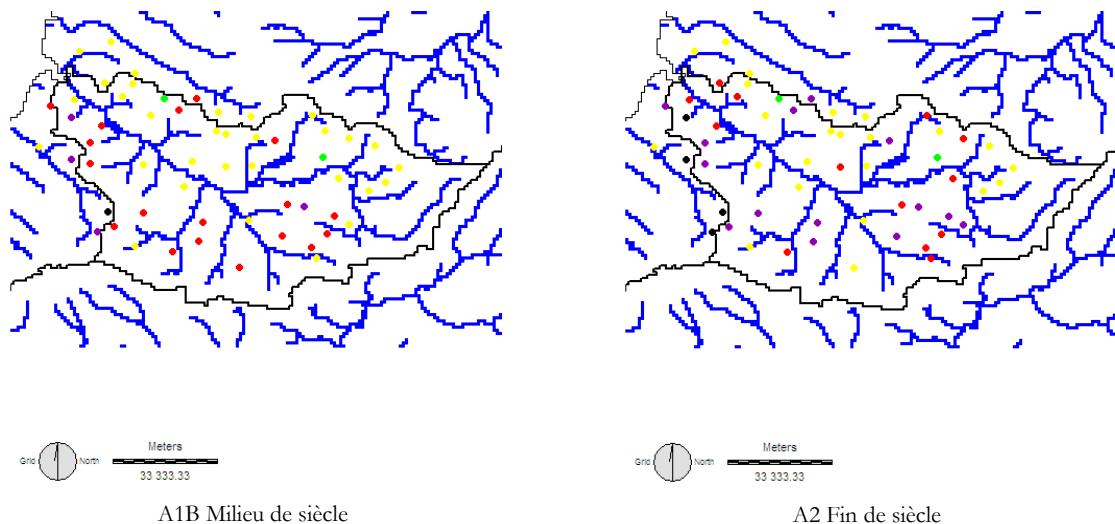


Figure 42 : Carte des évolutions du Q95 par rapport à Q05_{GCMMD(PST)} – GARDENIA– (● inférieure à -8 m ; ● entre -8 et -4 m ; ● entre -4 et -2 m ; ● entre -2 et -1 m ; ● entre -1 et 0 ; ● positive)

La projection des évolutions sur une carte montre la grande uniformité de la réponse au changement climatique sur la piézométrie du bassin de la Somme malgré l'existence de points très impactés sur la frontière ouest du bassin versant (Figure 41, Figure 42). Tous les piézomètres échantillonnent en effet le niveau piézométrique de l'aquifère de la Craie, qui ne présente pas de discontinuité notable dans le bassin de la Somme. Ce sont les évolutions d'un même système cohérent spatialement qui sont étudiées. Cette réponse d'ensemble est manifeste sur la variable Q05. La baisse générale des niveaux piézométriques affecte aussi les plus hautes valeurs (Q95), même si elles varient peu dans certains piézomètres (points de

couleur verte). Cette baisse générale des Q_{95} de hauteur piézométrique est cohérente avec la baisse des Q_{X410} dans le bassin de la Somme à Abbeville.

Enfin, nous constatons que la réponse est plus forte dans les piézomètres dont le niveau moyen actuel est élevé, *i.e.* ceux qui sont sur les plateaux crayeux, par opposition aux fonds de vallée. Cette observation (illustrée par la Figure 43) est conforme aux résultats énoncés dans le volet 2.

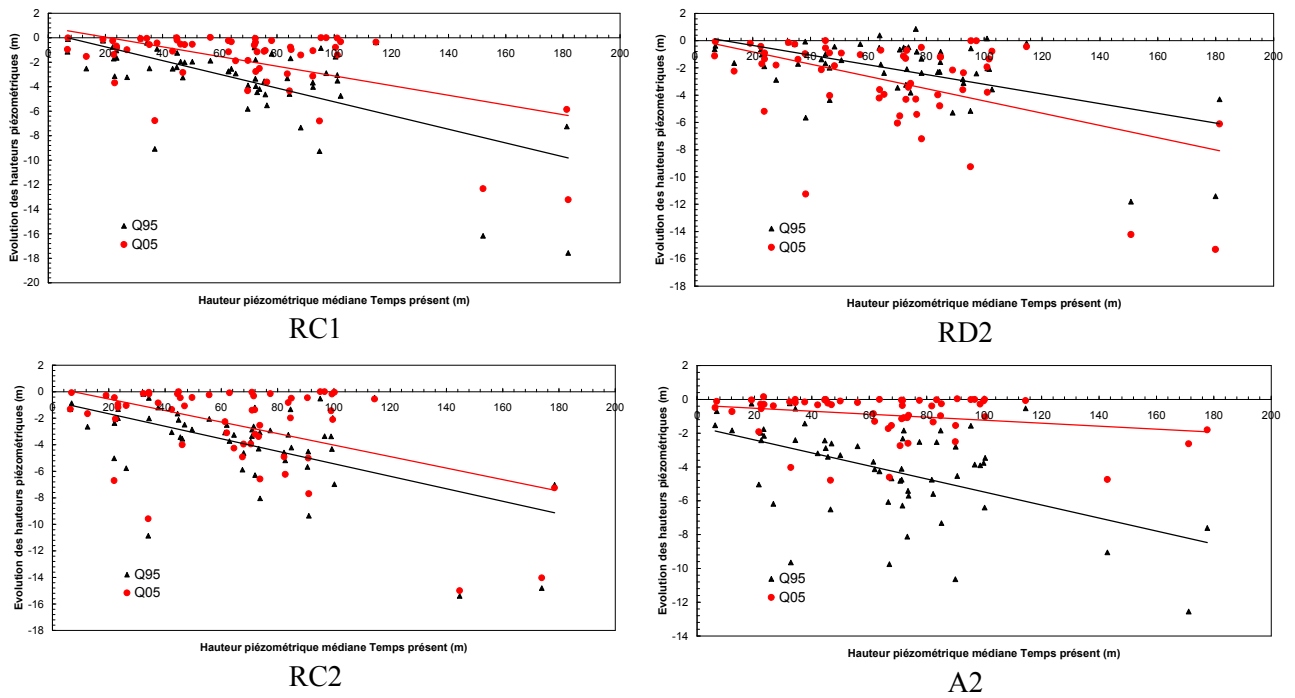


Figure 43 : Evolution de la piézométrie simulés en fin de siècle sur la Somme selon GARDENIA.

Les droites sont obtenues par régression linéaire

Références

Catalogne, C., 2007. Régionalisation des courbes de débits classés sur le bassin Seine-Normandie. Rapport de stage, Master 1 - Hydrogéologie et environnement Université d'Avignon. Cemagref Lyon, 62 pages.

Peters E., van Lanen H.A.J., Torfs P.J.J.F. & Bier G. (2005) Drought in groundwater - drought distribution and performance indicators. *Journal of Hydrology*, 306: 302–317.

Sauquet E., Ramos M.H., Chapel L. & Bernardara P (2008). Stream flow scaling properties: investigating characteristic scales from different statistical approaches. *Hydrol. Processes*, 22(17): 3462-3475.

Tallaksen, L.M., Van Lanen, H.A.J., 2004. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater. *Developments in water science* 48, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, 579 pages.