ICC-HYDROQUAL

Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, Régime thermique, QUALité des eaux

Action 1 : Evolution hydroclimatique de la Loire et de ses affluents sous changement climatique

Rapport final, novembre 2010

Participants:

Agnès Ducharne (UMR Sisyphe, Université Paris VI, CNRS)
Dominique Thiéry (BRGM, Service Eau, Orléans)
Eric Sauquet, Jean-Philippe Vidal, Alexis Bernard (Cemagref, UR HH, Groupement Lyon)
Vincent Bustillo, Florentina Moatar (Université François-Rabelais de Tours, UMR ISTO- Tours)

Début du contrat : 1 février 2009

Responsable du projet : Florentina Moatar
Université François-Rabelais de Tours
UMR ISTO – équipe de Tours
Parc de Grandmont
37 200 Tours

Contact : florentina.moatar@univ-tours.fr

PLAN LOIRE GRANDEUR NATURE

ETABLISSEMENT PUBLIC LOIRE

l'Europe s'engage dans le bassin de la Loire
Fonds Européen de Développement Régional

UNIVERSITÉ FRANÇOIS - RABELAIS TOURS

isyphe

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Cemagref

Table des matières

Table des matières 1

1 Introduction 3

1.1 Le projet ICC-HYDROQUAL 3
1.2 Le bassin versant de la Loire à Montjean 3
1.3 Données disponibles 6
1.3.1 Climat 6
1.3.2 Hydrologie 8

2 Variables statistiques analysées 9

2.1 Climat 9
2.1.1 Caractéristiques moyennes 9
2.1.2 Caractéristiques extrêmes 9
2.2 Hydrologie 10
2.2.1 Caractéristiques moyennes 10
2.2.2 Caractéristiques extrêmes 10
2.3 Représentations graphiques associées 12
2.4 La température de l'air 14
2.4.1 Moyennes mensuelles 14
2.4.2 Extrêmes 14
2.5 La pluviométrie 18
2.5.1 Moyennes mensuelles 18
2.5.2 Extrêmes 23
2.6 Synthèse 36

3 Reconstitution de l'hydrologie de surface actuelle et projections pour le XXIe siècle 37

3.1 Evaluation des outils de modélisation hydrologique 37
3.1.1 Reconstitution des variations journalières 37
3.1.2 Reconstitution des débits caractéristiques 40
3.1.3 Conclusion 45
3.2 Réponse hydrologique aux projections climatiques 48
3.2.1 Les variables de moyennes eaux 48
3.2.2 Les variables de hautes eaux 67
3.2.3 Les variables de basses eaux 83
3.3 Synthèse 94

3.3.1 Analyse de la Loire à Montjean 94
3.3.2 Analyse régionale et typologie de bassins versants 96

Conclusion 101

Bibliographie 103

1 Introduction

L'objectif de ce rapport est de décrire l'évolution des caractéristiques du climat (précipitation et température) et du régime hydrologique du bassin hydrographique de la Loire en amont de Montjean au cours du XXIe siècle, résultat obtenu dans le cadre du projet ICC-HYDROQUAL (action 1).

1.1 Le projet ICC-HYDROQUAL

Le projet ICC-HYDROQUAL (Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDROlogie, Régime thermique, QUALité des eaux, APR FEDER/EPL, 2009-2010) réunit l'Université François Rabelais de Tours, l'UMR Sisyphe, le BRGM et le Cemagref. Ce projet a pour objectif général d'étudier l'influence du changement climatique sur le comportement des cours d'eau du bassin de la Loire ainsi que des niveaux piézométriques des nappes. Ce projet vise aussi à analyser les conséquences des modifications climatiques sur le régime thermique et la qualité biogéochimique (nutriments et eutrophisation) qui sont des éléments essentiels à la définition du « bon état écologique » au sens de la DCE. Deux analyses sont menées conjointement de façon spatiale et de manière couplée (hydrologie et qualité physico-chimique) : d'une part sur le temps présent, d'autre part par analyse des impacts des scénarios climatiques, de façon continue jusqu'à l'horizon 2100.

Ce rapport présente les résultats obtenus pour l'action 1, « Hydrologie ».

1.2 Le bassin versant de la Loire à Montjean

La Figure 1 présente le bassin versant de la Loire à Montjean et le découpage en 68 sous-bassins effectué dans le cadre du projet ICC-HYDROQUAL. Les analyses climatique et hydrologique ont été réalisées sur chacun de ces sous-bassins.

La Figure 2 et le Tableau 1 identifient des bassins versants spécifiques dont la sélection repose sur le découpage de la France en douze grandes régions au régime pluviométrique homogène proposé par Champeaux et Tamburini (1996). Un zoom de ce découpage est proposé sur la Figure 3. Sur cette base, douze sous-bassins représentatifs de la Loire émargent à cinq zones climatiques. Ils illustreront les traitements statistiques effectués sur la climatologie en sus du regard spatial global.

Un ensemble de onze stations a également été privilégié pour l'analyse des évolutions des variables hydrologiques. Elles correspondent aux dernières stations hydrométriques des grands affluents avant confluence avec la Loire et trois stations de la Loire :

- la Loire à Nevers ;
- l'Allier à Cuffy ;
- la Loire à Cosne-sur-Loire ;

- le Cher à Savonnieres ;
- l'Indre à Saint-Cyrans ;
- la Creuse à Leugny ;
- la Vienne à Nouatre ;
- le Loir à Durtal ;
- la Sarthe à Saint-Denis ;
- le Maine à Angers ;
- la Loire à Montjean.

Elles permettent de faire des comparaisons à des observations.

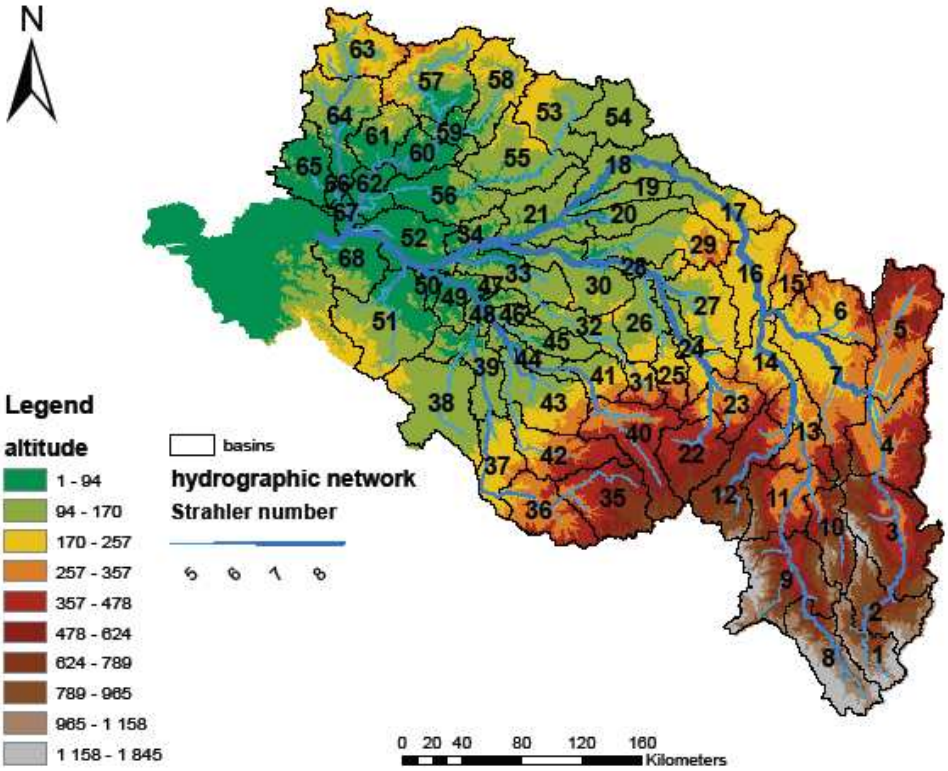


Figure 1 : Découpage du bassin versant de la Loire à Montjean en 68 sous-bassins, d'après Bourgin (2009)

Sous bassin versant	*Climats associés*	*Principales caractéristiques*
la Loire à Chadrac 1 ; la Loire à Bas en Basset 2 ; l'Allier à Brioude 8	Climat cévenol. Climat abrité intégrant Limagne, Forez et partie du Maconnais	Double influence : précipitations rares (caractère abrité) et violentes en automne (caractère cévenol)
l'Arroux à Digoin 5	Climat continental	Extrêmes en hiver
le Cher à Saint Victor 22 ; la Vienne à Palais 35 ; la Vienne à Etagnac 36	Secteur Massif Central (Aubrac, montagne limousine, monts du Cantal)	Précipitations pouvant dépasser 2000 m/an ; extrêmes en automne et hiver
le Cher à Savonnieres 30 ; le Thouet à Chacé 51 ; le Loir à Morée 53 ; la Mayenne à St Fraimbault 63 ; la Loire à Montjean 68	Climat océanique et océanique dégradé	Précipitations peu intenses observables toute l'année

Tableau 1 : Sous-bassins représentatifs de la pluviométrie actuelle de la Loire

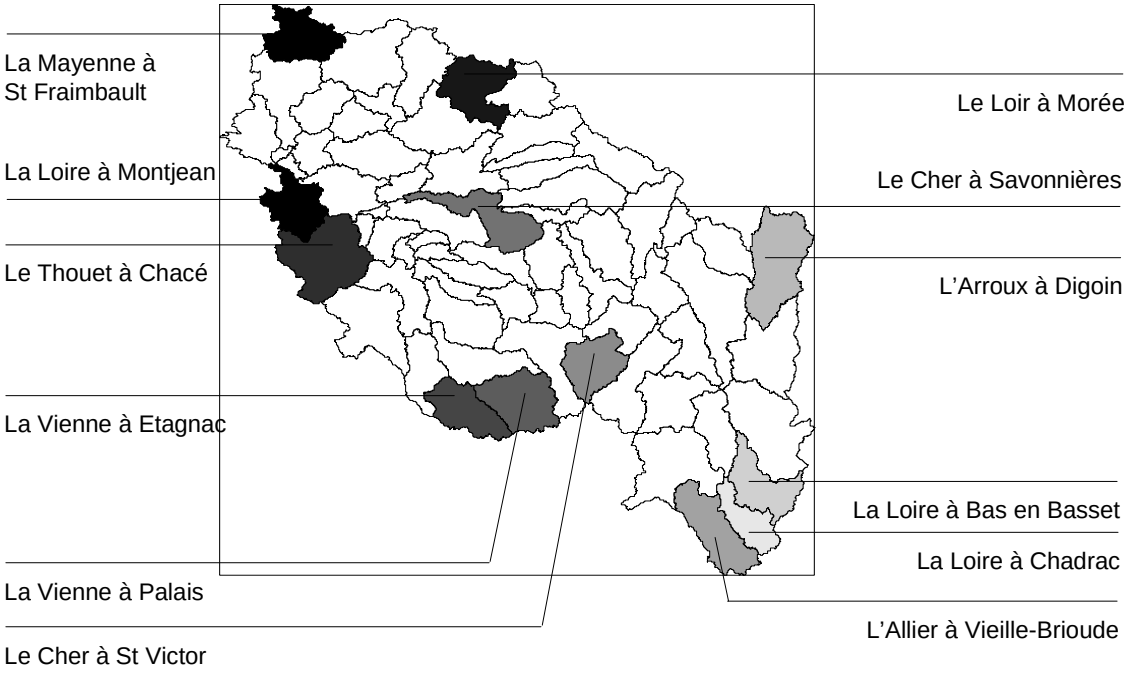


Figure 2 : Localisation des sous bassins d'intérêt pour l'étude des forçages climatiques

Figure 3 : Zonage climatique d'après Champeaux et Tamburini (1996) - Zoom sur le bassin de la Loire

1.3 Données disponibles

1.3.1 Climat

Plusieurs jeux de données climatiques ont été mis à disposition du projet ICC-HYDROQUAL, et en premier lieu la réanalyse atmosphérique Safran (Vidal *et al.*, 2010) constituant les pseudo-observations de référence à l'échelle de 8 km et au pas de temps journalier sur le bassin sur la période 1970-2008. Ces données ont été ensuite agrégées à l'échelle des 68 sous-bassins versants de la Loire. Nous manipulerons des moyennes spatiales associées à des surfaces comprises entre 124 et 3662 km².

Un ensemble de 21 projections climatiques à haute résolution couvrant la période 1950-2100 a de plus été mis à disposition du projet. Ces projections à haute résolution sont issues de projections globales listées dans le Tableau 2. Elles ont été désagrégées à l'aide de la méthode par types de temps développée au CERFACS (Boé, 2006 ; Pagé *et al.*, 2008) sur la grille 8 km, puis agrégées, elles aussi, par sous-bassin versant. Seules les projections issues du modèle Arpège sont disponibles de manière continue sur la période 1950-2100. Les autres projections sont disponibles sur trois périodes : 1950-2000 (PR ou PST dans la suite, pour présent), 2046-2065 (MS pour milieu de siècle) et 2081-2100 (FS pour fin de siècle).

Trois familles de projections et les types d'incertitudes associés doivent être distingués :

- les projections sous scénario d'émissions A1B (Nakićenović et al., 2000) des modèles de circulation générale (GCMs) du 3e projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP3,

Meehl et al., 2007) qui ont été utilisés pour le quatrième rapport du GIEC (IPCC, 2007) sont repérées en noir dans le Tableau 2. La dispersion de ces projections donne ainsi une estimation de l'*incertitude liée à la configuration des modèles de circulation générale* ; dans la suite du document, les statistiques calculées sur ces projections seront identifiés par l'appellation « multi-GCMs sous scénario A1B » ;

- le modèle Arpège V4 a été forcé par trois scénarios d'émissions : A1B (en vert dans le Tableau 2), A2 (rouge) et B1 (bleu). La dispersion de ces trois projections donne ainsi une estimation de l'*incertitude liée aux scénarios d'émissions* ;
- le modèle Arpège V3 a été utilisé pour produire quatre réalisations différentes du climat du XXIe siècle sous scénario A1B, à partir de quatre états initiaux différents. La dispersion de ces projections donne enfin une estimation de l'*incertitude liée aux propriétés stochastiques du climat*.

Dans ce document, nous exploiterons de manière privilégiée les premiers scénarios (les 14 projections du CERFACS) aux différents horizons. Ils sont en nombre suffisant pour permettre un traitement statistique (calcul de moyenne et d'écart-type). Les résultats d'Arpège apparaîtront sur les graphiques, mais seront exclus des calculs : pour éviter une sur-représentation d'Arpège et pour éviter de mêler des éléments non comparables dans les analyses (scénarios A1B et A2).

Nom	Pays	A1B	A2	B1
CCCMA CGCM3.1 T63	Canada	■		
CNRM-CM3	France (Météo-France)	■		
CSIRO-MK3.0	Australie	■		
GFDL-CM2.0	États-Unis (NOAA/GFDL)	■		
GFDL-CM2.1	États-Unis (NOAA/GFDL)	■		
GISS-AOM	États-Unis (NASA/GISS)	■		
GISS-ER	États-Unis (NASA/GISS)	■		
INGV ECHAM4	Italie	■		
IPSL CM4 IPSL	France (IPSL)	■		
MIROC 3.2 MEDRES	Japon (Université de Tokyo)	■		
MIUB ECHO-G	Allemagne/Corée	■		
MPI-ECHAM5	Allemagne	■		
MRI CGCM 2.3.2a	Japon (MRI)	■		
NCAR CCSM3	États-Unis (NCAR)	■		
ARPEGE V4	France (Météo-France)	■	■	■
ARPEGE V3	France (CERFACS)	■ (x4)		

Tableau 2 : Liste des projections climatiques globales utilisées. Les différentes couleurs correspondent aux différentes familles de projections décrites dans le texte

1.3.2 Hydrologie

Parmi les 68 sous-bassins versants de la Loire, 60 comportent des stations hydrométriques, et 47 d'entre elles possèdent des chroniques longues d'au moins 15 ans sur la *période de référence 1974-2000*. Ces 47 chroniques seront donc utilisées comme référence dans la suite, même si certaines d'entre elles sont plus ou moins anthropisées. Dans la suite du document, la moyenne « *multi-site* » désignera la moyenne spatiale, calculée sur les 47 valeurs disponibles aux stations de référence.

Les séries climatiques (Safran et projections climatiques) ont été transformées en chroniques de débit à l'aide de deux modèles hydrologiques : EROS et CLSM. Le modèle EROS (Ensemble de Rivières Organisées en Sous-bassins) a été développé par le BRGM (Thiéry, 1995). EROS est un modèle semi-distribué qui utilise la discrétisation en 68 bassins versants. Il s'agit d'un modèle « en grappe » où chaque sous-bassin utilise le modèle conceptuel global GARDENIA à base hydrogéologique (Thiéry 2003). Le modèle CLSM (Catchment Land Surface Model) développé par l'UMR Sisyphe (Ducharne *et al*., 2000 ; Gascoin *et al*., 2009) est aussi un modèle semi-distribué mais avec des bases physiques. Il s'agit d'un modèle hydrométéorologique utilisant les bilans de flux et d'énergie régissant l'interface eau-sol-atmosphère. Ces modélisations hydrologiques ont été réalisées à l'université de Tours et à l'UMR Sisyphe pour CLSM, et au BRGM pour EROS. Pour chacun des 68 sous-bassins sont donc disponibles une chronique simulée par chacun des modèles hydrologiques sous forçage Safran sur la période de référence, plus 42 projections hydroclimatiques (21 projections climatiques $\times$ 2 modèles hydrologiques) pour chacune des périodes PR, MS et FS.

2 Variables statistiques analysées

Ce chapitre introduit les différents types d'analyses statistiques effectuées sur les variables climatiques d'une part, et sur les variables hydrologiques d'autre part.

Les effets du changement climatique sur chaque variable seront exprimés en anomalie par rapport au temps présent simulé par les GCMs. Nous supposerons – *et ce sont des hypothèses très fortes que nous ne sommes pas en mesure de vérifier avec les outils actuels* – que :

- l'effet du changement climatique est indépendant des biais de modélisation en temps présent (écart entre observations et simulations avec le GCM en temps présent) ;
- cet effet est mesurable et mesuré par des anomalies :
  - relatives entre la caractéristique de pluie ou de débit calculée en temps présent et celle calculée à l'horizon considéré ;
    $\Delta Y\% = 100(Y_{HORIZON} - Y_{TEMPS\ PRESENT}) / Y_{TEMPS\ PRESENT}$
    Cette anomalie pourra être appliquée dans certaines des analyses aux observations pour une estimation de la variable corrigée des biais de la chaîne de simulation :
    $\hat{Y}_{HORIZON} = (1 + \Delta Y\% / 100) Y_{OBS}$
  - « brutes » pour des variables de température :
    $\Delta Y = (Y_{HORIZON} - Y_{TEMPS\ PRESENT})$

2.1 Climat

2.1.1 Caractéristiques moyennes

Nous avons considéré les douze températures moyennes mensuelles et les précipitations solides et liquides mensuelles.

2.1.2 Caractéristiques extrêmes

Nous avons retenu des caractéristiques descriptives de l'intensité (ou sévérité) et de la saison d'occurrence des événements. Le choix s'est porté sur :

- les températures journalières maximales annuelles de période de retour 10 ans, *TJXA*10, *i.e.* ayant une probabilité 1/10 chaque année d'être dépassées. Ces quantiles sont calculés par ajustement de la loi de Gumbel sur des échantillons de valeurs maximales annuelles ;
- les quantiles de pluie sur 1 jour *PJXA*10 et intensité moyenne sur 6 jours de période de retour 10 ans, *i.e.* ayant une probabilité 1/10 chaque année d'être dépassés. Ces quantiles sont calculés par ajustement de la loi exponentielle sur des échantillons de valeurs supérieures à un seuil ;

- des statistiques circulaires, inspirées de Young *et al*. (2000), pour décrire la saison des extrêmes pluviométriques. Elles sont calculées comme suit. Considérons les dates *Dj* associées aux valeurs de l'échantillon. Ces dernières sont exprimées en nombre de jour depuis le 1er janvier (entre 1 et 366 pour les années bissextiles, entre 1 et 365 sinon), puis interprétées en angle en radian :

  $$\theta_j = 2\pi \frac{D_j}{365}$$

  Ces dates sont repérées en coordonnées polaires $(FND(j)\cos(\theta_j);\ FND(j)\sin(\theta_j))$ où *FND*(*j*) désigne la Fréquence au Non Dépassement empirique de la *j*ème valeur. Les événements les plus forts se situent à proximité du cercle unitaire. Finalement, la position moyenne des *n* événements est donnée par :

  $$x_\theta = \frac{\sum_{j=1}^{n} FND(j)\cos(\theta_j)}{\sum_{j=1}^{n} FND(j)} \qquad y_\theta = \frac{\sum_{j=1}^{n} FND(j)\cos(\theta_j)}{\sum_{j=1}^{n} FND(j)}$$

  Pour caractériser l'échantillon, sont retenus finalement l'angle du moyen vecteur :

  $$\theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) \text{ si } x_\theta > 0 \qquad \theta = \arctan\left(\frac{y_\theta}{x_\theta}\right) + \pi \text{ sinon}$$

  et la longueur du vecteur : $r = \sqrt{x_\theta^2 + y_\theta^2}$. Une valeur de *r* proche de 1 révèle un échantillon fortement saisonnalisé. A l'opposé, une valeur proche de 0 reflète l'absence de saison à risque. L'angle est finalement retransformé en date entre le 1er janvier et le 31 décembre, pour identifier le jour de l'année moyen autour duquel se concentrent les événements.

2.2 Hydrologie

2.2.1 Caractéristiques moyennes

Nous avons considéré :

- le module *QA* et les douze débits mensuels moyens interannuels *QMi*, *i*=1,…,12 ;
- le Base Flow Index (*BFI*) : dans l'application sur le bassin de la Loire, il est interprété comme la proportion d'écoulement issu des stocks souterrains par rapport à l'écoulement de surface total. Cet indicateur varie entre 0 et 100%. L'algorithme utilisé exploite uniquement les débits (Tallaksen et Van Lanen, 2004) et fournit en résultat intermédiaire une chronique des écoulements de base au pas de temps journalier.

2.2.2 Caractéristiques extrêmes

Comme pour le climat, des variables descriptives de l'intensité (ou sévérité) et de la dynamique (principalement une durée) vont décrire l'évolution des extrêmes hydrologiques. Elles ont été choisies pour leur mise en œuvre automatique aisée sur un grand nombre de chroniques et ont, pour une grande majorité, déjà été retenues dans le cadre du projet RexHyss (Ducharne *et al*., 2009). Les variables d'intérêt sont :

- les variables circulaires identiques à celles calculées sur les pluies renseignant la saisonnalité des événements extrêmes ;
- le débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans, *QJXA*10, *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 (*QJXA*) de débits journaliers observés pour chacune des années hydrologiques disponibles de la station hydrométrique ;
- le débit *Q*10 extrait de la courbe des débits classés, valeur dépassée 10% du temps ;
- 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 calculé la durée de dépassement de la moitié du débit de pointe Q_{max}. *D* en est la médiane ;
- le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche *QMNA*5 (ayant une probabilité 1/5 chaque année de ne pas être dépassé). La variable d'intérêt intervient dans un cadre réglementaire de gestion des eaux. Le *QMNA*5 est calculé, ici, par ajustement de la loi Log-normale à l'échantillon constitué des plus faibles débits mensuels observés pour chacune des années disponibles de la station hydrométrique (*QMNA*) ;
- le débit *Q*90 extrait de la courbe des débits classés, valeur dépassée 90% du temps. Il est ici utilisé comme valeur de débit d'étiage ;
- la fiabilité, définie par rapport à un seuil de débit *Seuil*, qui est la proportion de valeurs observées dans la chronique au-dessus de la valeur *Seuil* :

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

  où *Ltot* 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*. Lorsque *Seuil* est un débit d'étiage de crise, la fiabilité qualifie la probabilité d'observer le système dans un état satisfaisant. Nous avons choisi de fixer *Seuil* au *QMNA*5 (valeur de référence adoptée dans les systèmes d'alerte sécheresse en France) et de calculer *F* en exploitant les débits de base, obtenus précédemment pour déterminer le *BFI*. Nous dirons qu'il y a défaillance lorsque le débit est en dessous de la valeur *Seuil*.

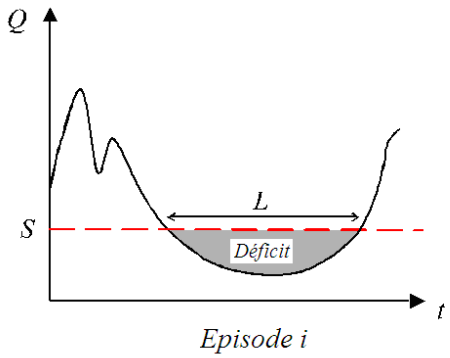


Figure 4 : Définition des variables caractérisant les défaillances en étiage

D'autres variables descriptives des étiages ont été examinées par Bernard (2010). Le lecteur intéressé pourra s'y reporter.

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 (1933) 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 1er août de l'année *N* et s'achève le 31 juillet de l'année *N*+1. Pour les étiages, l'année hydrologique à considérer correspond à l'année civile. L'année à considérer pour l'extraction des températures maximales annuelles *TJXA* est également l'année civile.

2.3 Représentations graphiques associées

Nous fournirons les résultats sous la forme « classique » des boîtes à moustache. En complément, le type de graphique de la Figure 5 sera utilisé lorsque nous analyserons les variables climatiques : il permet d'examiner la dispersion entre projections, d'identifier à la fois les biais des modélisations et également les tendances entre différents horizons (PST ou PR, MS et FS).

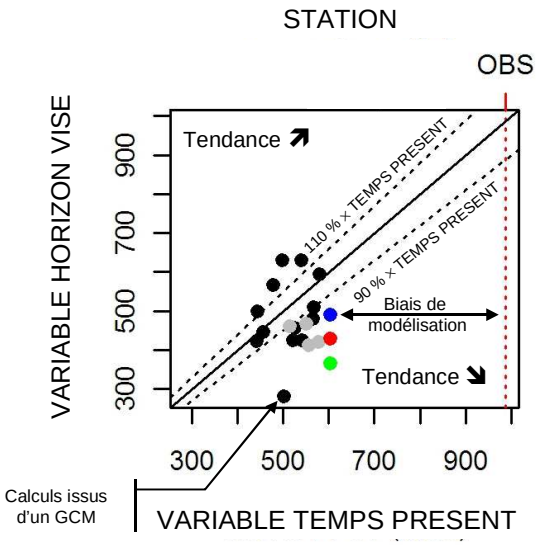


Figure 5 : Graphique type pour l'analyse locale des changements sur une variable climatique à un horizon visé

Chaque point représente les résultats d'un modèle climatique. L'abscisse est la valeur obtenue avec les forçages sous conditions actuelles, l'ordonnée la valeur issue du même GCM à l'horizon d'intérêt. La droite verticale rouge positionne la valeur de référence, *i.e.* observée actuelle, sur l'axe des abscisses. La distance des points à cette verticale est le biais sous climat présent.

La droite en trait continu noir est la première bissectrice. Elle définit une frontière entre deux espaces : les points se situant en dessous indiquent des tendances à la baisse à l'horizon d'intérêt et les points au dessus une tendance à la hausse.

Les droites en pointillé sont les enveloppes à +ou – 10 % de la valeur obtenue sous climat présent. Elles définissent *de manière subjective* le caractère significatif des tendances.

Les simulations Arpège sous scénarios SRES A1, B1 et A2 se positionnent selon une verticale, car elles partagent la même réalisation en temps présent.

Nous avons repris une représentation similaire pour l'analyse des variables hydrologiques. Nous avons ajouté à la Figure 5 une valeur de référence issue de la modélisation hydrologique avec Safran (SAF). L'écart entre SAF et OBS lu sur l'axe horizontal permet d'apprécier la capacité du modèle pluie-débit à reconstituer la variable examinée. La distance entre chaque point et la droite verticale rouge renseigne les biais cumulés de la chaîne de simulation (du climat restitué par le GCM à l'hydrologie restitué par le modèle hydrologique).

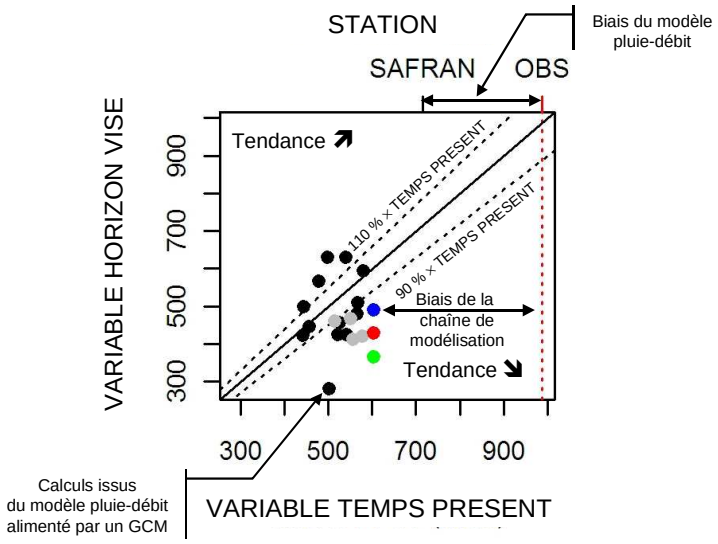


Figure 6 : Graphique type pour l'analyse locale des changements sur une variable hydrologique à un horizon visé

Reconstitution du climat présent et projections pour le XXIe siècle

Les modèles climatiques sont réputés décrire le climat passé, en restituant ses principaux modes de variabilité spatiale et temporelle, mais en aucune manière, il ne faut rechercher dans ces simulations temps présent les événements historiques observés car ils ne fournissent qu'une réalisation possible du passé. Après désagrégation, les réalisations du climat passé proposées par les GCMs doivent reproduire les principales caractéristiques de la variabilité observée à l'échelle régionale. L'évaluation de la chaîne de simulation climatique est indispensable avant d'en exploiter les résultats. Le diagnostic consiste à vérifier si les statistiques de pluies et de température[1] simulées par les 21 GCMs est bien restitué sur les sous bassins de la Loire (en intensité et en caractère saisonnier). L'analyse se concentrera sur les 68 chroniques de précipitations et de températures journalières.

2.4 La température de l'air

2.4.1 Moyennes mensuelles

La Figure 7 présente l'évolution des températures moyennes mensuelles sur chacun des sous-bassins versants de la Loire entre la période 1971-2000 et le milieu de siècle (MS) et la fin du siècle (FS), telle que donné par la moyenne multi-GCMS sous scénario A1B. On peut constater un réchauffement sur l'ensemble du bassin, plus prononcé en fin de siècle. Ce réchauffement est plus important en été et automne, pour atteindre près de 4℃ en août en fin de siècle.

2.4.2 Extrêmes

Le premier commentaire concerne la reconstitution des extrêmes. Les scénarios temps présent proposent des valeurs de *TJXA*10 proches des valeurs issues de Safran bien que légèrement plus faibles. L'effet du changement climatique se manifeste sans surprise sur les extrêmes de températures dès le milieu de siècle. Les nuages de points se situent dans la partie supérieure des graphiques et leur barycentre se situe à proximité de la droite enveloppe supérieure en revanche en milieu de siècle (avec une anomalie moyenne multi-GCMs sous scénario A1B entre 1.6 et 3.3℃ pour les onze sous bassins de la Figure 8). Les changements sont plus importants en fin de siècle avec une anomalie moyenne cette fois de 2.6 à 4.3℃. La dispersion sur la température extrême évolue peu avec l'horizon (l'écart-type des anomalies s'écarte peu de 0.8℃ en milieu de siècle contre 1.0℃ en f in de siècle). Les valeurs d'écart-type sont plus faibles que les moyennes, les changements semblent donc significatifs.

[1] Nous nous limiterons à ces deux variables car elles sont les premiers facteurs qui influencent l'hydrologie.

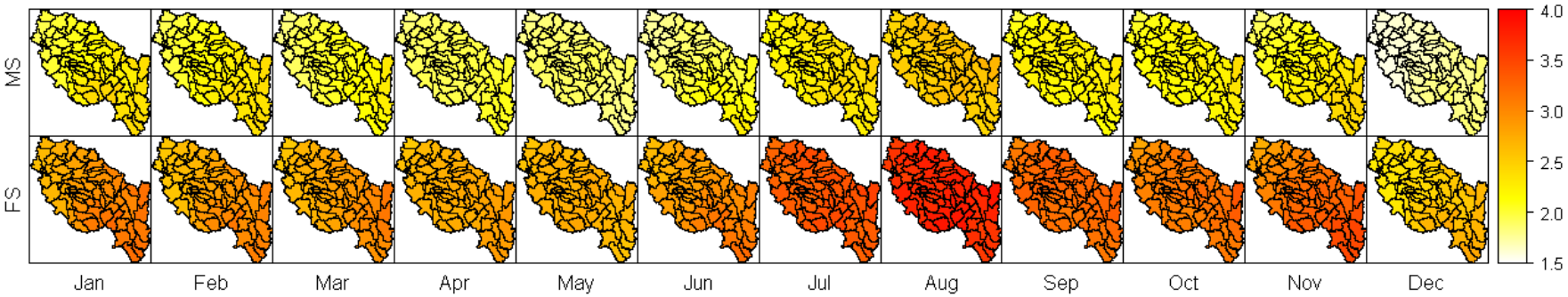


Figure 7 : Anomalie moyenne multi-GCMs sous scénario A1B (famille noire dans le Tableau 2) des températures moyennes mensuelles (en °C), entre la période 1971-2000 et le milieu du siècle (MS) et la fin du siècle (FS)

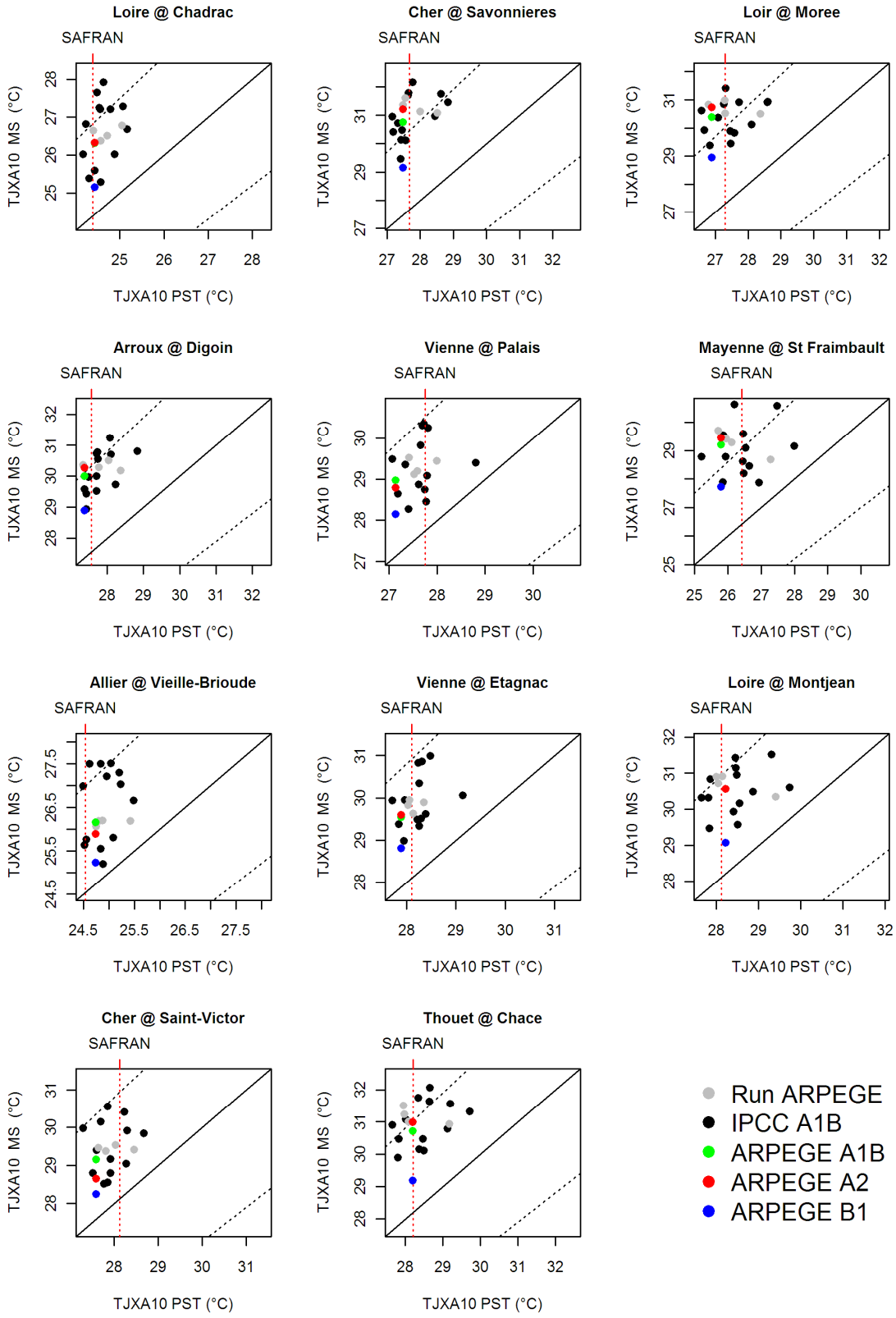


Figure 8 : Evolution de TJXA10 en milieu de siècle

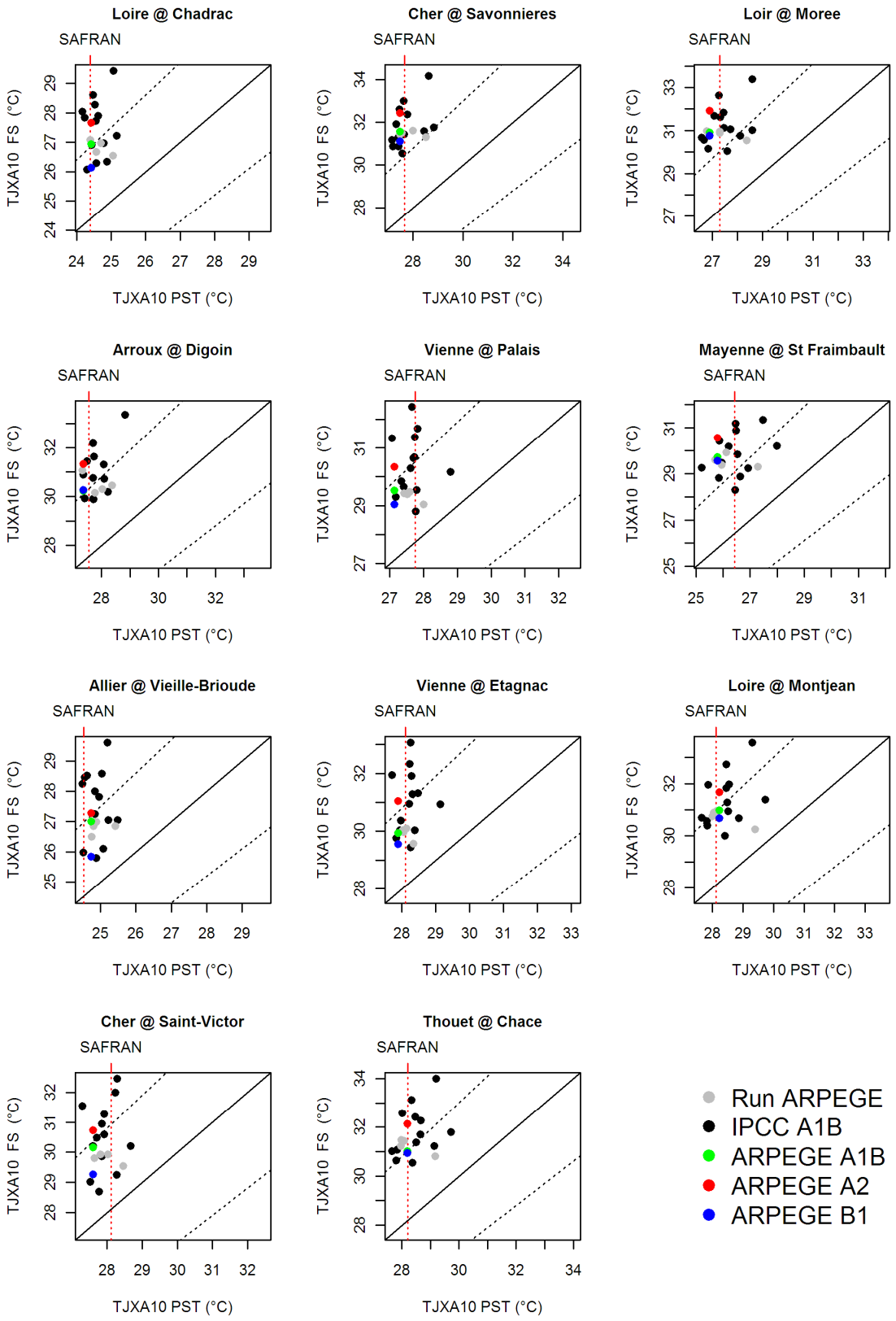
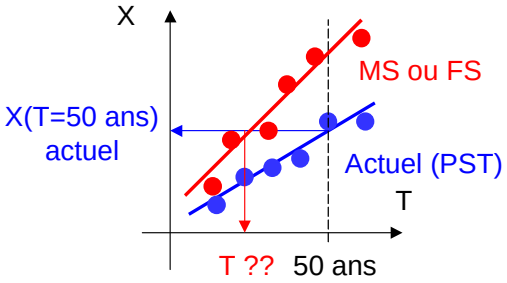


Figure 9 : Evolution de TJXA10 en fin de siècle

Une autre manière d'appréhender les évolutions des extrêmes et de calculer les dérives en fréquence des extrêmes. Si on s'intéresse à un événement rare de période de retour (50 ans, par exemple) : quelle sera sa période de retour aux différents horizons ? On exploite pour cela les ajustements réalisés aux différents horizons : on extrait le quantile de période de retour 50 ans dans la distribution temps présent et on calcule sa période de retour selon la loi de Gumbel en MS ou FS. Le Tableau 3 fait état des changements observés. A titre de référence nous avons précisé les quantiles issues de Safran (1971-2000). Les calculs montrent que les événements extrêmes (ici, les jours considérés très chauds sous climat présent) vont être plus fréquents : de 50 ans, on converge vers des temps moyens entre événements de 5 ans et cela de manière très homogène sur le territoire.



Station	*TJXA*10(Safran) (℃)	T en MS (ans)	T en FS (ans)
La Loire à Chadrac 1	26.5	7.3	3.3
L'Arroux à Digoin 5	29.7	7.0	3.6
L'Allier à Brioude 8	26.8	16.2	7.6
Le Cher à Saint Victor 22	30.5	19.5	10.5
Le Cher à Savonnieres 30	29.5	3.7	2.1
La Vienne à Palais 35	30.1	23.1	6.7
La Vienne à Etagnac 36	30.3	12.6	4.8
Le Thouet à Chacé 51	30.7	7.9	4.3
Le Loir à Morée 53	29.7	6.8	3.7
La Mayenne à St Fraimbault 63	29.1	12.0	5.2
La Loire à Montjean 68	30.5	13.8	5.7

Tableau 3 : Changements des extrêmes de température exprimés en période de retour (moyenne multi-GCMs sous scénario A1B)

2.5 La pluviométrie

2.5.1 Moyennes mensuelles

La Figure 10 présente l'évolution des précipitations totales mensuelles sur chacun des sous-bassins versants de la Loire entre la période 1971-2000 et le milieu de siècle (MS) et la fin du siècle (FS), telle que donné par la moyenne multi-GCMs sous scénario A1B. On peut constater une légère augmentation des précipitations au printemps, et une forte diminution le reste de

l'année, particulièrement prononcée en été. La Figure 11 présente l'évolution similaire de la neige, et montre un e réduction drastique (supérieure à 50 %) et une absence quasi-totale de neige en octobre sur le bassin.

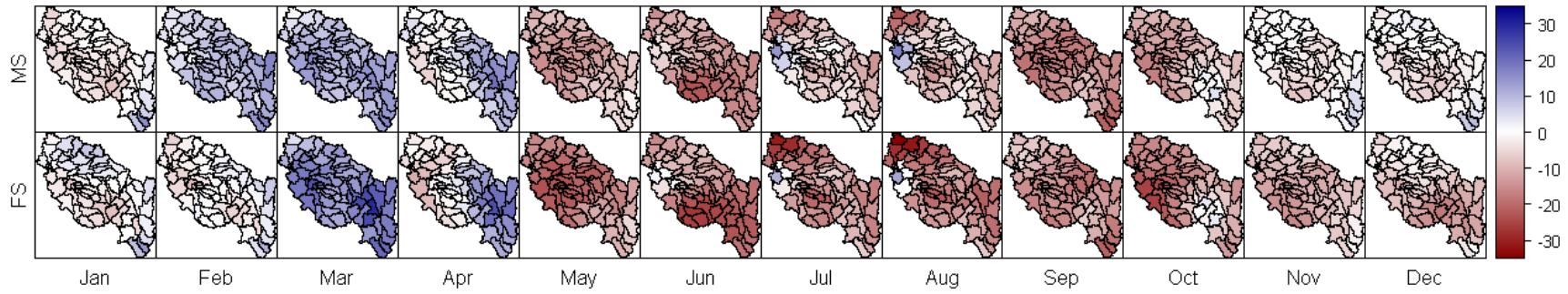


Figure 10 : Anomalie moyenne multi-GCMs sous scénario A1B (famille noire dans le Tableau 2) des précipitations totales moyennes mensuelles (en %), entre la période 1971-2000 et le milieu du siècle (MS) et la fin du siècle (FS)

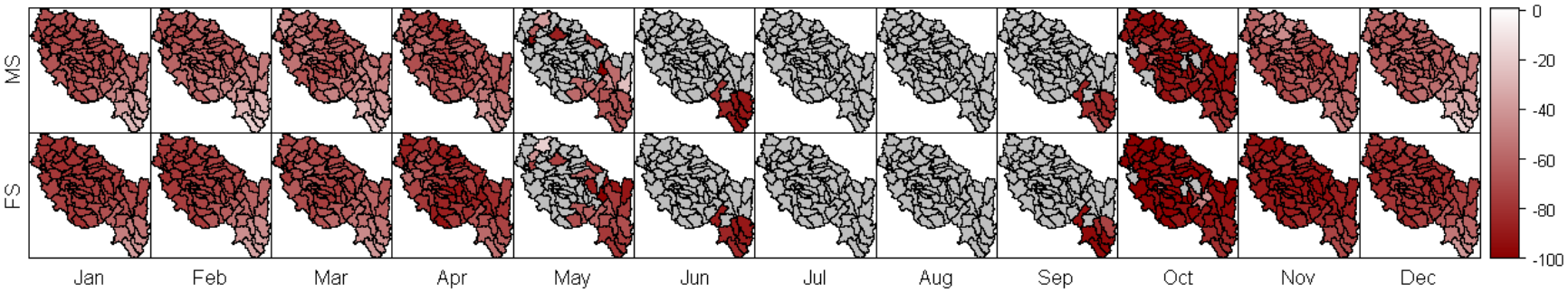


Figure 11 : Anomalie moyenne multi-GCMs sous scénario A1B (famille noire dans le Tableau 2) des précipitations solides (neige) mensuelles (en %), entre la période 1971-2000 et le milieu du siècle (MS) et la fin du siècle (FS). En gris sont représentés les zones/mois où aucune précipitation solide n'a été simulée par les GCMs en climat présent

2.5.2 Extrêmes

L'analyse repose sur un échantillon représentatif de valeurs fortes extraites des séries temporelles. Nous avons privilégié la méthode d'échantillonnage par valeur supérieure à un seuil pour les pluies. Cette procédure consiste à retenir la valeur maximale d'un ensemble d'évènements indépendants ayant dépassé un seuil donné en veillant à respecter plusieurs critères :

- les valeurs extraites doivent être indépendantes, c'est-à-dire ne pas être issues d'un même événement ou que l'une soit conditionnée par l'autre ; trois paramètres : le seuil *S*, le rapport entre valeurs maximales et minimum local entre pointes sélectionnées □ et la durée inter-événement *D** alimentent une procédure d'extraction semi-automatique ;
- l'échantillon doit être homogène. Notamment, les propriétes statistiques doivent être stationnaires dans le temps. Dans notre cas, l'hypothèse de stationnarité ne sera pas nécessairement respectée puisque les variables sont obtenues sous changement climatique.

La procédure est appliquée aux données brutes et aux chroniques agrégées sur 6 jours pour les différentes fenêtres temporelles *PR*, *MS* et *FS*. Les échantillons permettent d'examiner la saisonnalité des pluies journalières extrêmes *PJXA* et l'intensité de la pluie journalière maximale annuelle de période de retour 10 ans sur un jour (*PJXA*10) et 6 jours (*P6JXA*10).

2.5.2.1 Saisonnalité

Les calculs des statistiques circulaires ont été effectués dans un premier temps sur les données Safran (Figure 12). Ils fournissent la référence pour les analyses aux différents horizons. Chaque point représente un événement caractérisé par sa fréquence au non-dépassement et son occurrence dans l'année. Le vecteur de norme *r* et d'angle □ (en orange) permet de matérialiser la saisonnalité (plus la flèche est grande, plus le caractère saisonnier est affirmé).

Les observations montrent que les régimes pluviométriques des secteurs amont de la Loire et de l'Allier et du sous-bassin de l'Arroux présentent une forte composante saisonnière. L'influence cévenole se manifeste sur le régime des pluies journalières avec des risques accrus d'événements intenses en automne. A l'opposé, le caractère saisonnier est estompé sur les secteurs sous influence climatique océanique (Loire à Montjean ; Thouet à Chacé). Des particularités locales sont perceptibles : les pluies extrêmes du Cher à Saint-Victor, au centre du secteur d'étude, semblent ainsi se concentrer en été.

Le même traitement a été réalisé sur les réalisations temps présents des GCMs. A titre de référence, sur les graphiques sont placées, en orange, les flèches associées à Safran (Figure 13). Globalement la dynamique saisonnière des pluies extrêmes, quand elle est manifeste, est bien reproduite dans les forçages climatiques en temps présent : les directions et longueurs des flèches associées aux différentes réalisations sont comparables à celles relatives à Safran.

Les graphiques issus des traitements en fin de siècle montrent une saisonnalité modifiée :

- peu de flèches se situent dans le quart « juillet-octobre ») ; la Loire amont présenterait moins d'épisodes automnaux et il y aurait un glissement des pluies fortes vers l'hiver ;
- le Cher à Saint Victor se distingue, de nouveau, avec des extrêmes au printemps ;
- les secteurs sans saison à risque présente désormais un régime pluviométrique plus contrasté (*r* plus grand en fin de siècle notamment à proximité de l'estuaire de la Loire).

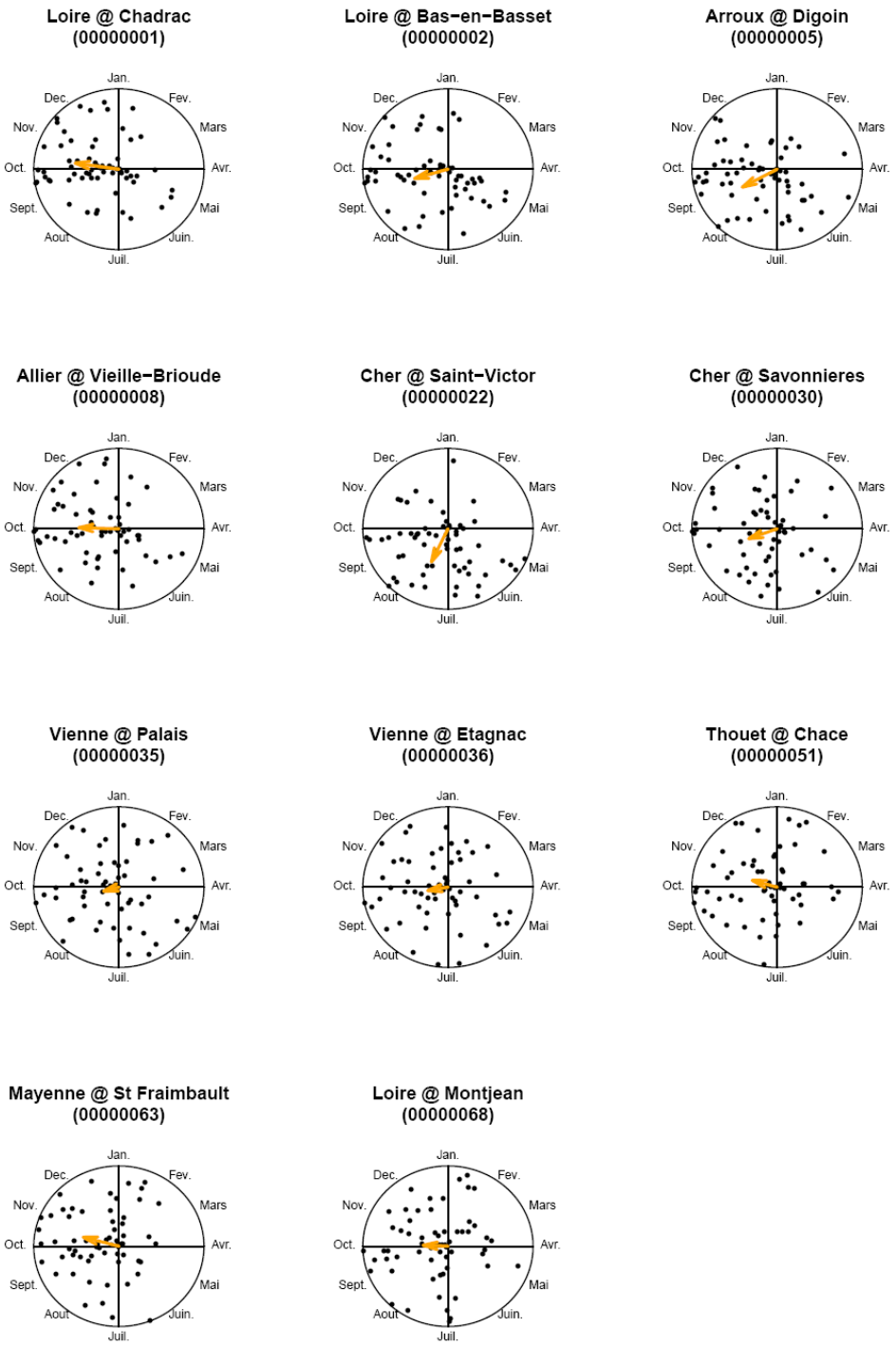


Figure 12 : Saisonnalité des pluies extrêmes de référence en temps présent (Safran)

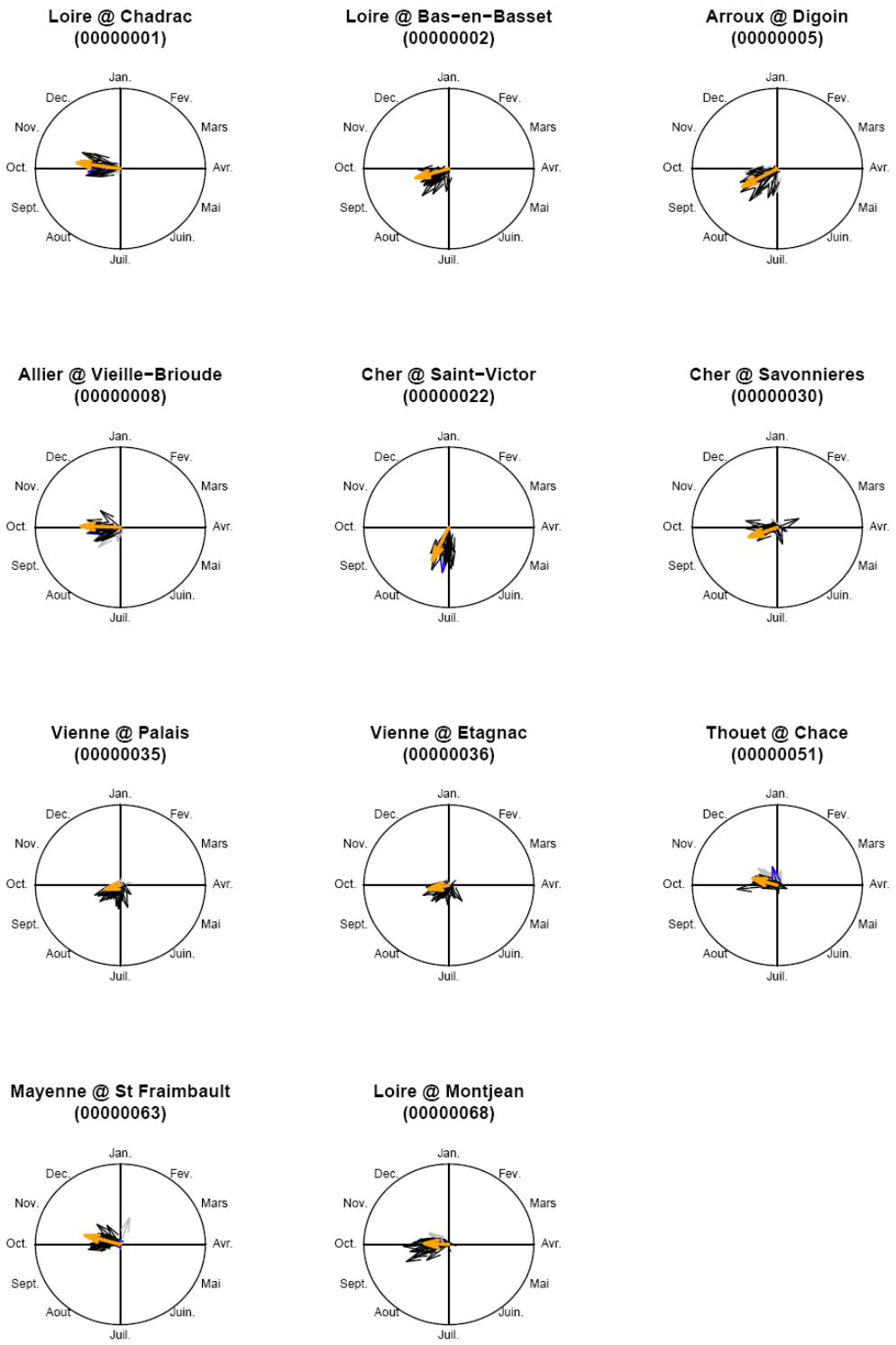


Figure 13 : Saisonnalité des pluies extrêmes selon les GCMs en temps présent (flèches noires : projections A1B du CERFACS ; flèches grises : runs d'Arpège ; flèches de couleur : Arpège sous différents scénarios SRES ; flèches orange : référence Safran)

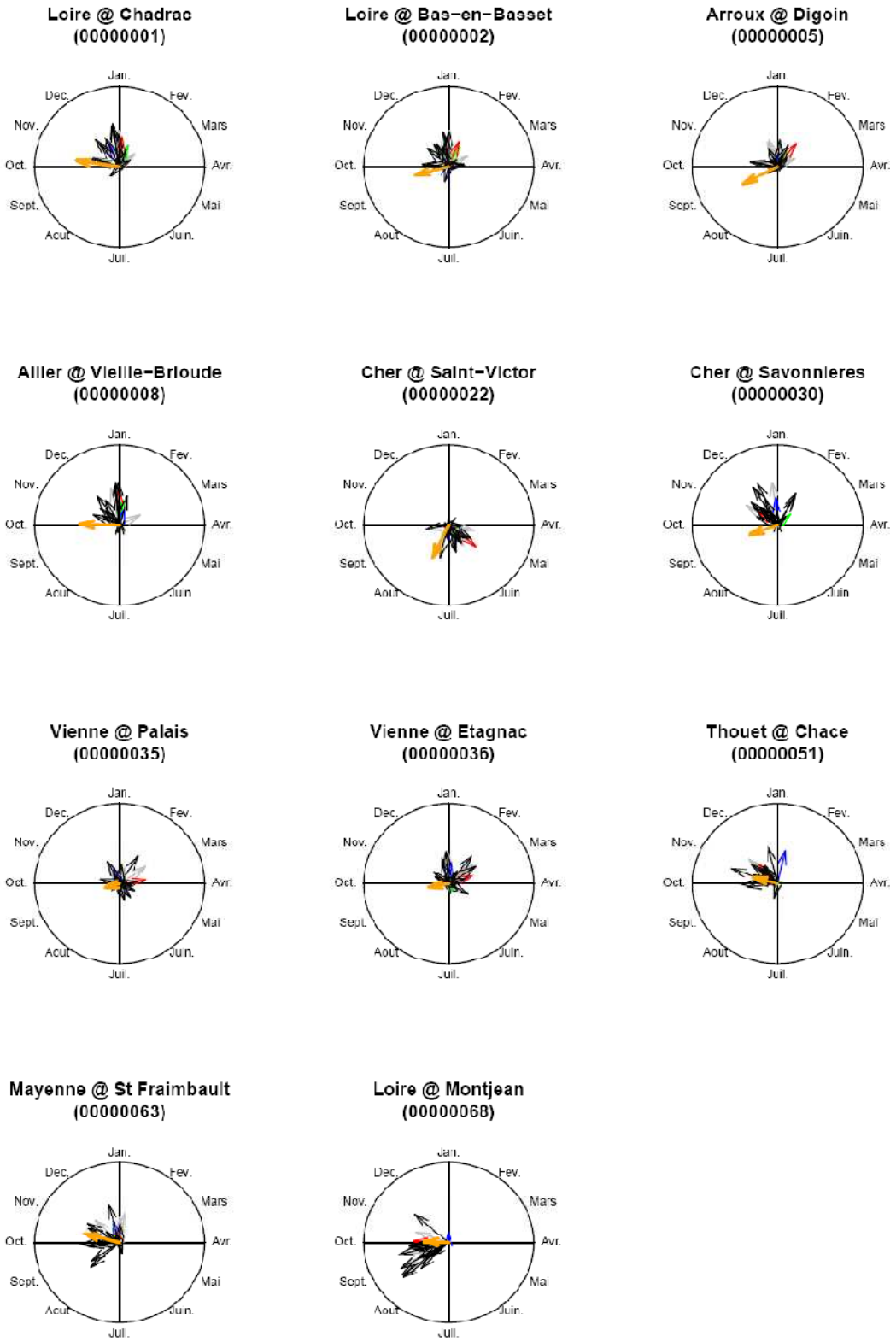


Figure 14 : Comme la Figure 13, mais en fin de siècle

2.5.2.2 Intensité

Les graphiques et tableaux de synthèse relatifs aux variables *PJXA*10 et *P6JXA*10 montrent des points de convergence sur l'évolution des extrêmes pluviométriques :

- les points se situent pour la plupart à gauche de la droite de référence Safran, ce positionnement est signe d'une sous-estimation de la variabilité des extrêmes restituée par les outils de simulation climatique ;
- une tendance est perceptible pour les secteurs sous influences cévenoles mais elle est à nuancer compte tenu de la forte dispersion autour de la première bissectrice en particulier (jusqu'à +/-40% de la valeur de référence en fin de siècle) ;
- en dehors des secteurs sous influence cévenole, la plupart des points se concentrent entre les deux droites enveloppes : par exemple, nous en recensons 20 sur 21 pour le Cher à Savonnières, 16 sur 21 pour la Mayenne à St Fraimbault, pour la variable *PJXA*10, en milieu de siècle. La proportion des points diminue en fin de siècle entre les deux droites, mais reste majoritaire ;
- le positionnement du nuage autour de la première bissectrice souligne l'absence de tendance partagée par l'ensemble des projections en milieu et fin de siècle ; les tendances restent incertaines du fait que l'écart-type est du même ordre de grandeur que ou supérieure à la moyenne des anomalies ; il est donc difficile de conclure sur l'évolution des pluies extrêmes ;
- les évolutions sur *PJXA*10 se situent entre –10% et +20% selon les projections A1B du CERFACS ;
- sur la base de l'écart-type des anomalies, la dispersion est accrue en fin de siècle sur la variable *PJXA*10 ; ceci est moins perceptible pour *P6JXA*10 ;
- en fin de siècle, les extrêmes de cumuls sur 6 jours sont moins impactés en moyenne que ceux associés aux pluies journalières.

	Anomalie *PJXA*10 MS		Anomalie *PJXA*10 FS		Anomalie *P6JXA*10 MS		Anomalie *P6JXA*10 FS	
Station	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
La Loire à Chadrac 1	15.6	9.6	14.8	17.5	10.1	8.9	3.4	10.8
La Loire à Bas en Basset 2	16.5	9.5	18.4	14.5	7.2	9.6	2.7	9.3
L'Arroux à Digoin 5	0.5	6.6	-0.4	9.7	4.2	8.6	-0.5	5.3
L'Allier à Brioude 8	19.1	8.1	20.7	14.5	8.4	8.7	1.7	14.2
Le Cher à Saint Victor 22	0.2	10.7	-0.9	8.6	-2.4	8.2	-2.5	7.4
Le Cher à Savonnieres 30	-3	5.4	-7.6	8.8	-0.7	8.1	0.2	7.3
La Vienne à Palais 35	-1.1	7.8	-2.7	7.7	-0.8	7.1	0.6	6
La Vienne à Etagnac 36	-0.2	8.2	-2.7	11.9	0.7	6.7	0.5	7.9
Le Thouet à Chacé 51	2.3	7.8	10.8	10.2	4.1	8.4	6	11.8
La Mayenne à St Fraimbault 63	-2.2	8.1	-4.2	7.6	-2.7	11	-1.8	7.6
La Loire à Montjean 68	9	10.5	11.1	15.5	7.5	8.7	6.9	10.4

Tableau 4 : Changements des extrêmes de précipitation exprimés en %

(statistiques multi-GCMs sous scénario A1B)

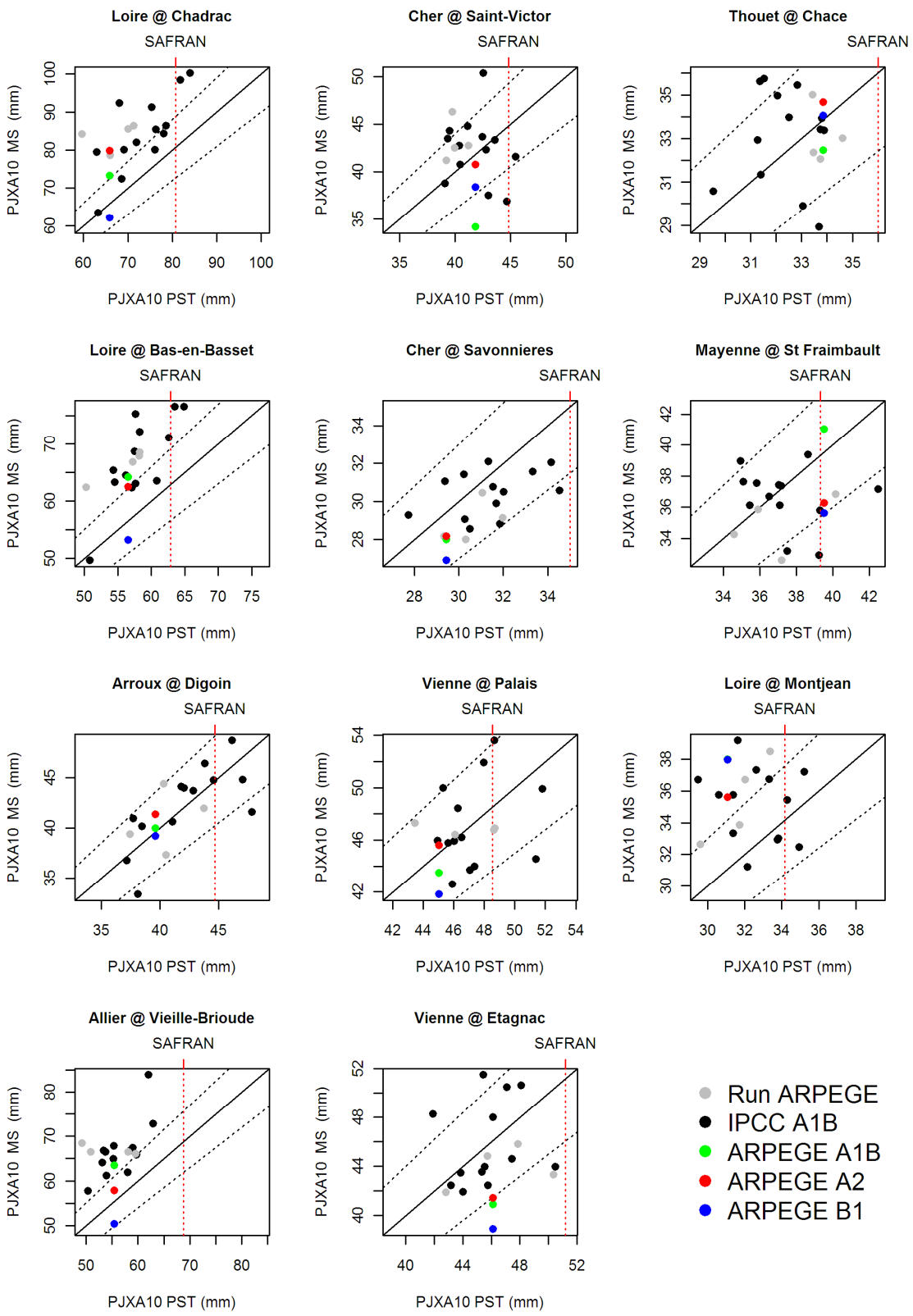


Figure 15 : Evolution de PJXA10 en milieu de siècle

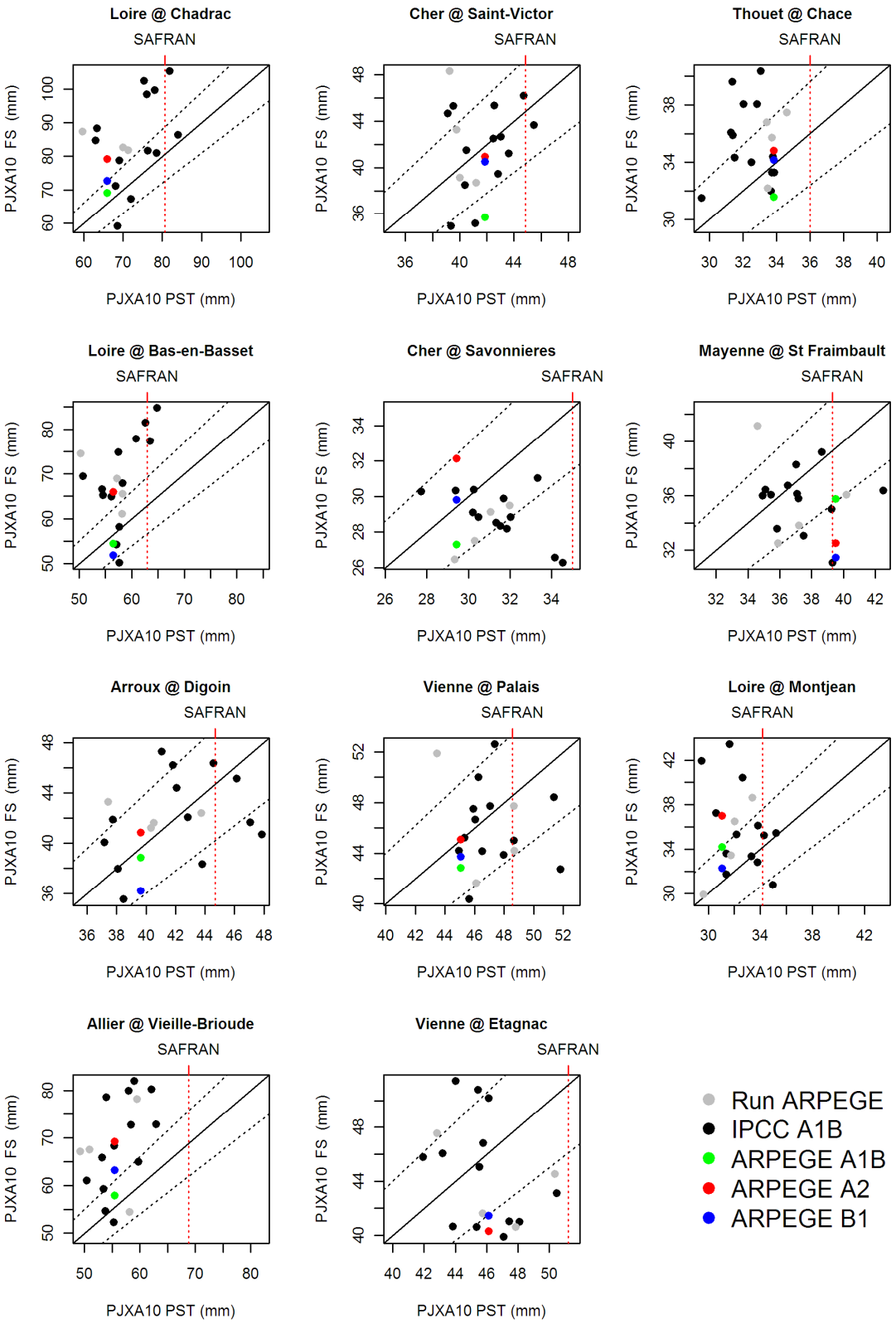


Figure 16 : Evolution de PJXA10 en fin de siècle

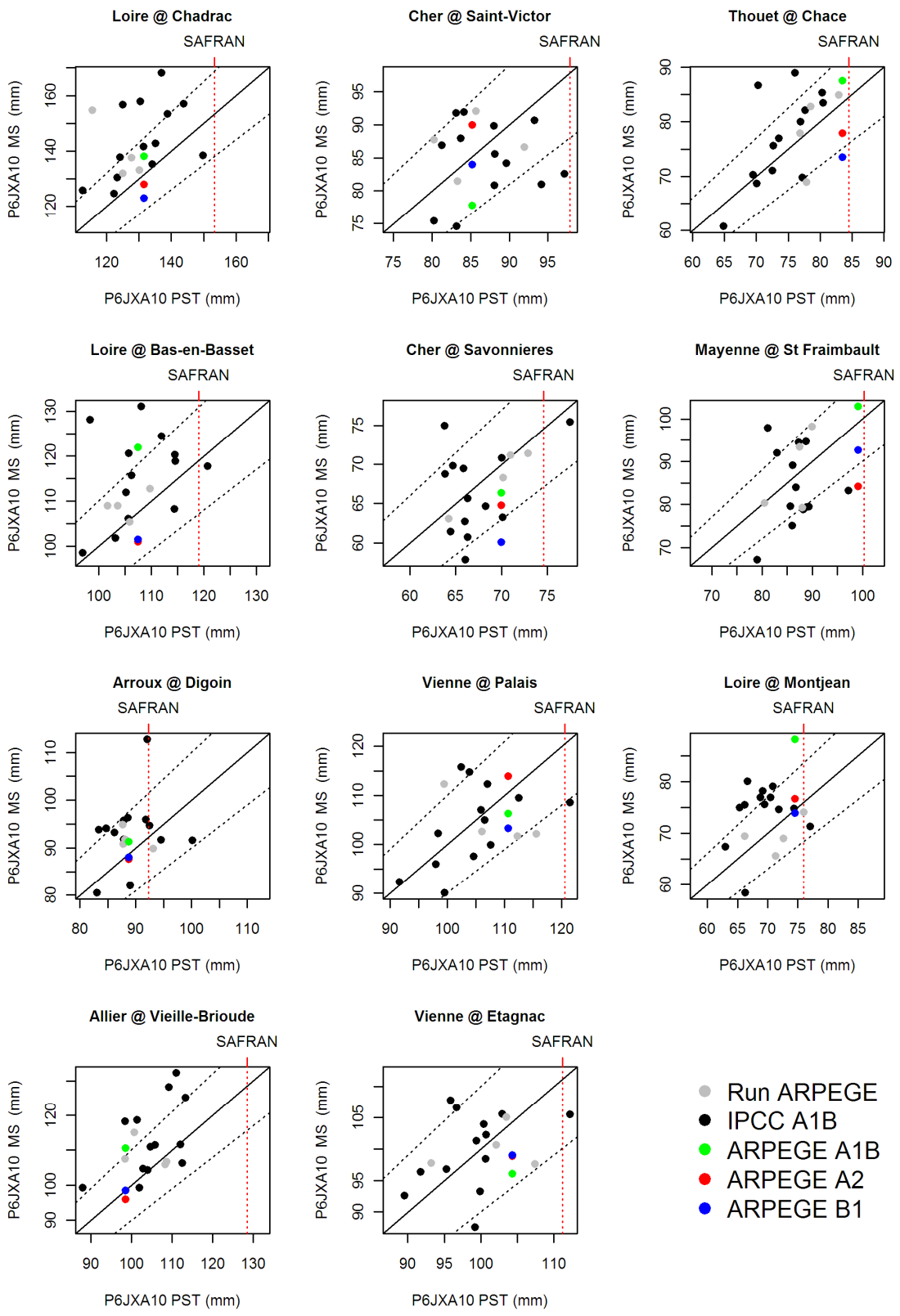


Figure 17 : Evolution de P6JXA10 en milieu de siècle

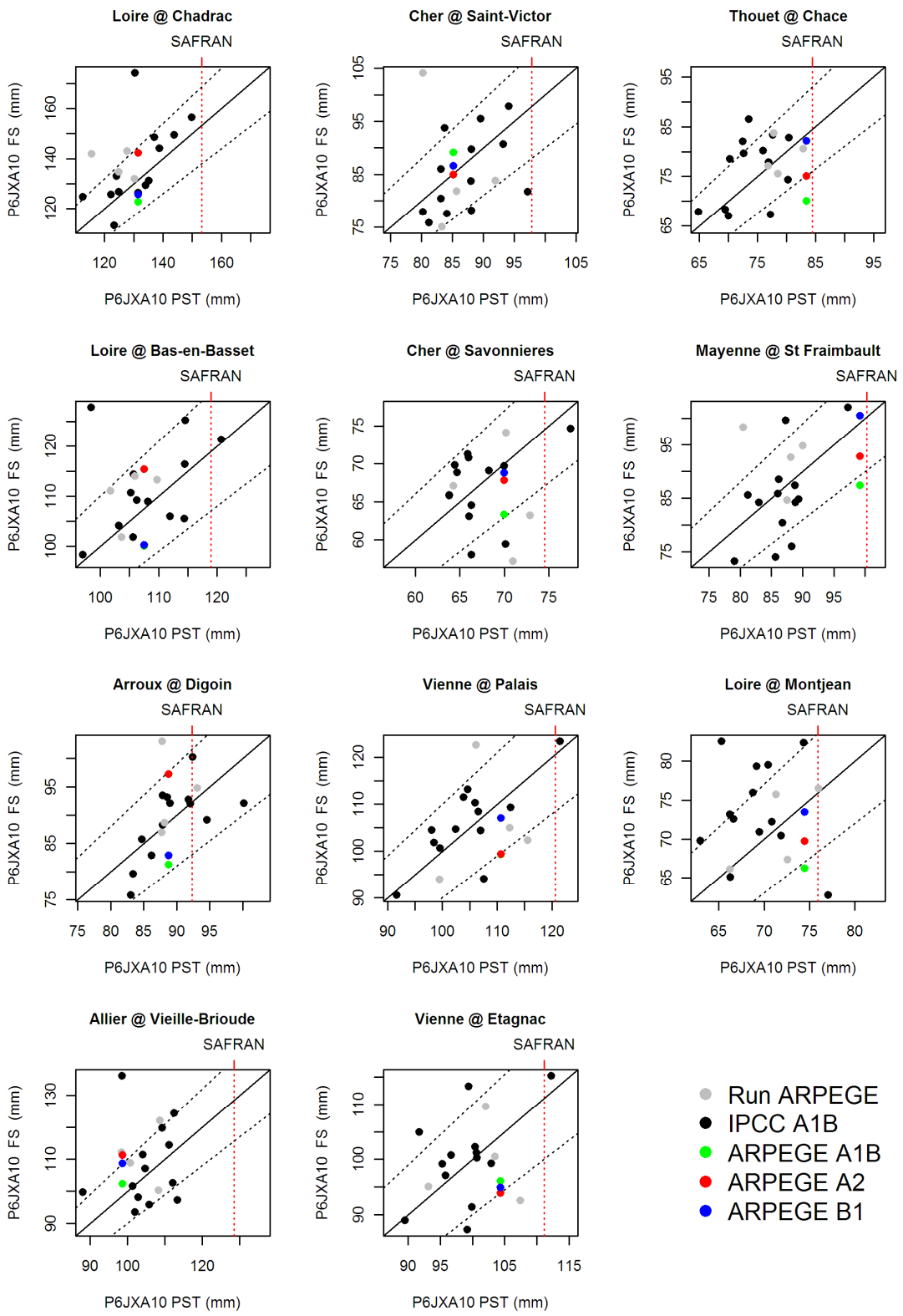


Figure 18 : Evolution de P6JXA10 en fin de siècle

En complément des analyses locales, plusieurs cartes ont été dressées pour dégager des tendances régionales :

- la Figure 19 représente la variabilité spatiale de *PJXA*10, telle que le propose la base de données Safran ; nous observons un fort contraste sur le bassin : les plus forts quantiles sont localisés en tête de bassin sous influences du climat cévenol tandis que les plus faibles valeurs s'observent dans le secteur nord-ouest au relief plus modéré et soumis aux influences océaniques ;
- la Figure 20 est la carte des moyennes de *PJXA*10 multi-GCMs en temps présent. Nous retrouvons les mêmes contrastes spatiaux que ceux identifiables sur la Figure 19. L'examen des différences entre moyennes multi-GCMs en temps présent de *PJXA*10 et valeurs issues de Safran permet de quantifier les biais : certes, la variabilité spatiale est bien reproduite, mais dans l'ensemble, les extrêmes des séries de pluie désagrégées ont tendance à être plus faibles que ceux observés ;
- les deux cartes (Figure 22 et Figure 23) décrivent enfin les changements attendus en milieu et fin de siècle. Ces derniers sont mesurés par la différence entre moyennes multi-GCMs en temps présent et celles aux deux horizons considérés. Les évolutions les plus significatives sont attendues sur les têtes de bassin de l'Allier et de la Loire (augmentation de l'ordre de 10 mm en milieu de siècle sur les secteurs en amont de Villerest pour la Loire et de Vieille-Brioude pour l'Allier, qui se confirme en fin de siècle). Les modifications sont moins perceptibles ailleurs (entre –3 et 5 mm avec une médiane proche de zéro en milieu de siècle) : anomalie négative sur le bassin de la Vienne et du Loir (climat océanique dégradé) et anomalie positive sur la Mayenne et la Sarthe (climat océanique). Les tendances qu'elles soient positives ou négatives se renforcent en fin de siècle exception faite des secteurs fortement impactés en milieu de siècle (Loire et Allier amont).

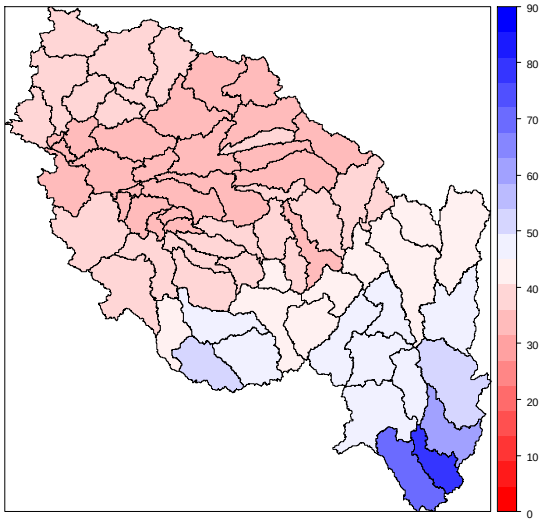


Figure 19 : Carte de PJXA10 selon Safran (en mm)

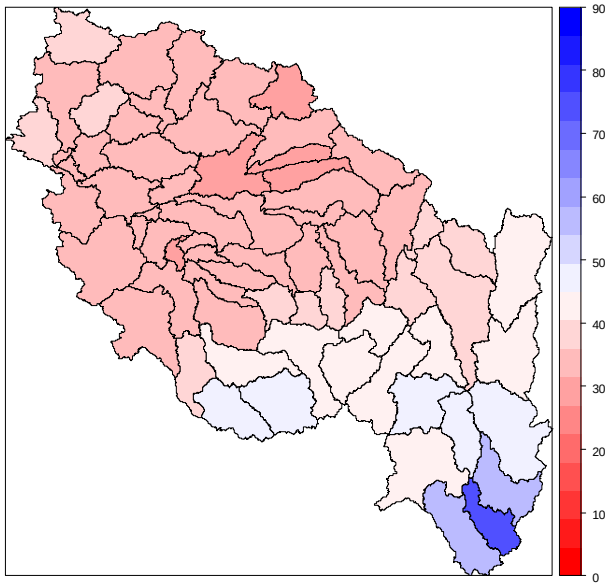


Figure 20 : Moyenne multi-GCMs de PJXA10 sous climat présent (en mm)

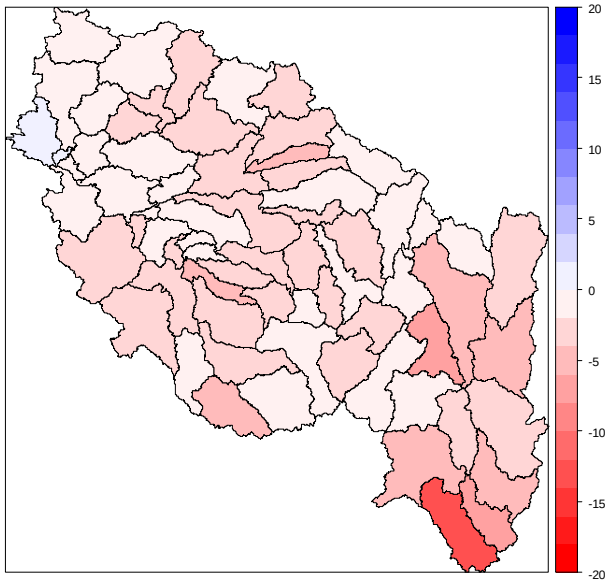


Figure 21 : Moyenne multi-GCMs des écarts de PJXA10 en temps présent par rapport à la climatologie de Safran (en mm)

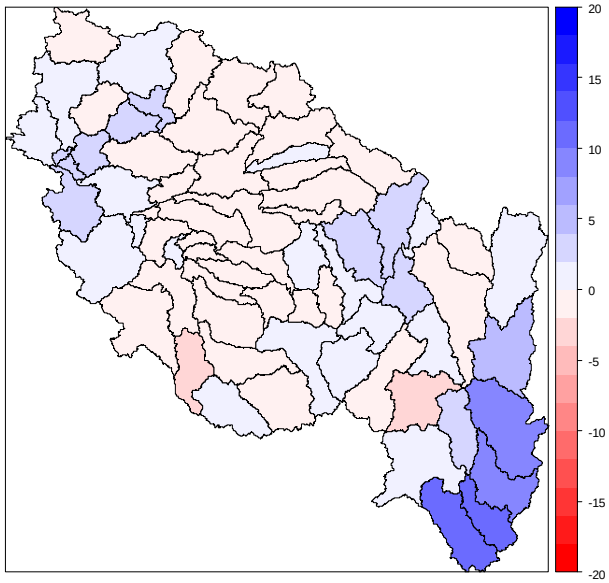


Figure 22 : Anomalie moyenne multi-GCMs de PJXA10 sous scénario A1B en milieu de siècle (exprimée en mm)

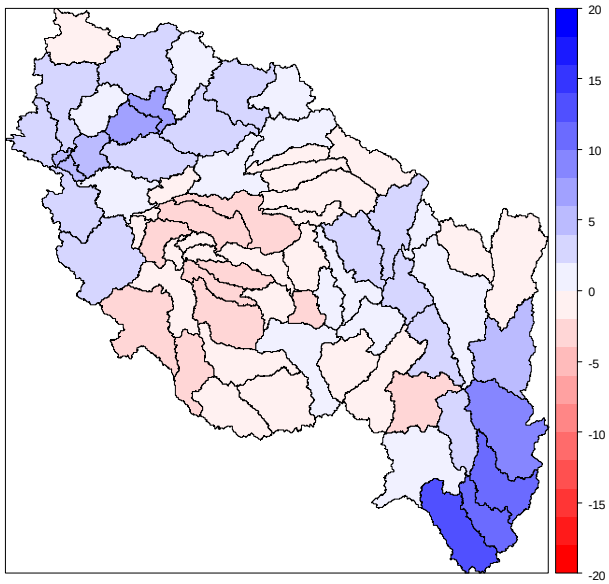


Figure 23 : Anomalie moyenne multi-GCMs de PJXA10 sous scénario A1B en fin de siècle (exprimée en mm)

2.6 Synthèse

Les analyses réalisées semblent indiquer :

- des changements importants sur les températures maximales annuelles. Sur la base des 14 projections A1B, l'augmentation du quantile décennal en milieu de siècle se situe entre 1.6 et 3.3℃. Elle est de 2.6 à 4.3 ℃ en fin de si ècle, soit une augmentation du même ordre de grandeur que les températures moyennes (Figure 7) ;
- des modifications profondes de la pluviométrie de l'Allier et de la Loire amont : augmentation du quantile de pluie journalière décennal et décalage temporel progressif de la saison des extrêmes vers l'hiver avec diminution des épisodes d'automne ;
- des modifications moins marquées des intensités sur la partie aval du bassin (une majorité de changement dans la limite à +/-10%) : tendance à l'augmentation sur la partie nord-ouest et tendance à la diminution sur le secteur Loire moyenne ;
- des incertitudes fortes sur les pluies fortes tant sur le signe de la tendance que sur son intensité. Cette constatation est à mettre en relation avec l'évolution des précipitations moyennes (Figure 10) qui inclue une forte diminution en été/automne, mais aussi de légères augmentations au printemps.

3 Reconstitution de l'hydrologie de surface actuelle et projections pour le XXIe siècle

Nous aurons comme pour le climat deux regards : le premier sur le passé, le second sur le futur. Les modèles hydrologiques ont fait l'objet de calage pour reconstituer au mieux les débits observés lorsqu'ils sont alimentés par les données Safran. Ils sont loin d'être parfaits et nous chercherons à évaluer la chaîne de modélisation dans son ensemble (propagation des biais de modélisation depuis le climat jusqu'à l'hydrologie). Les simulations des débits aux différents horizons seront examinées, ceci inclut un regard sur les sorties des modèles hydrologiques forcés par la climatologie des GCMs en temps présent (on souhaite retrouver des statistiques de débits cohérentes avec celles issues de ces mêmes modèles alimentés par Safran). Nous concentrerons nos analyses sur l'écart entre les caractéristiques modélisées sous forçages temps présent de chaque GCM et ces mêmes caractéristiques par le même GCM en temps futur, qui quantifiee comme nous l'avons précisé plus haut l'effet du changement climatique.

3.1 Evaluation des outils de modélisation hydrologique

Afin de faire une comparaison équitable, nous avons choisi une période commune de simulations de débits issues des modèles pluie-débit. Safran est disponible entre le 1er août 1971 et le 31 juillet 2007. Les GCMs reproduisent un climat représentatif du présent pour la plupart avant 2000. Les modèles sont influencés par des mauvaises conditions initiales dans les premières années de simulations. L'exclusion d'une période de mise en route en début de simulation permet de limiter les erreurs du modèle induites par une méconnaissance des conditions initiales. Il faut ôter trois ans pour EROS et pour CLSM. Finalement, une période commune a été choisie afin de mesurer la capacité des modèles à restituer strictement les mêmes événements : la période de 25 ans, entre **le 1er août 1974 et le 31 juillet 1999**. Toutes les stations n'ont pas fonctionné sur cette période. Les comparaisons concerneront 47 stations, celles disposant de plus de 14 ans entre le 1er août 1974 et le 31 juillet 1999 (durée suffisante pour avoir des statistiques extrêmes robustes et représentatives des 23 ans). L'évaluation examinera la qualité globale des reconstitutions de l'ensemble des chroniques disponibles aux stations puis plus spécifiquement aux variables d'intérêt (§ 2.2 « Hydrologie », page 10).

3.1.1 Reconstitution des variations journalières

Nous avons repris les indicateurs classiques en hydrologie, dérivés du critère de Nash-Sutcliffe (1970) :

- $$C1 = \left[1 - \frac{\sum_{t=1}^{n} \left(Q(t) - Q^*(t) \right)^2}{\sum_{t=1}^{n} \left(Q(t) - \overline{Q(t)} \right)^2} \right]$$

- $$C2 = \left[1 - \frac{\sum_{t=1}^{n} \left(\sqrt{Q(t)} - \sqrt{Q^*(t)} \right)^2}{\sum_{t=1}^{n} \left(\sqrt{Q(t)} - \overline{\sqrt{Q(t)}} \right)^2} \right]$$

- $$C3 = \left[1 - \frac{\sum_{t=1}^{n} \left(\ln\left(Q(t)\right) - \ln\left(Q^*(t)\right) \right)^2}{\sum_{t=1}^{n} \left(\ln\left(Q(t)\right) - \overline{\ln\left(Q(t)\right)} \right)^2} \right]$$

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 exigent 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 -∞ à 1. Lorsque le modèle est parfait, le critère est égal à 1. Des statistiques sur les critères d'efficience sont fournies dans le tableau suivant :

	EROS			CLSM		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Max	0.92	0.93	0.93	0.91	0.90	0.87
3ème quartile	0.88	0.90	0.87	0.83	0.82	0.73
Médiane	0.84	0.87	0.84	0.78	0.76	0.63
1er quartile	0.80	0.83	0.77	0.69	0.68	0.44
Min	0.72	0.68	0.40	0.11	-0.17	-1.14

Tableau 5 : Distribution des critères d'efficience par modèle

Nous constatons, pour ces critères :

- une bonne performance des deux modèles (près de 50% des bassins présentent un critère de Nash ($C1$ ou $C2$) supérieur ou approchant 0.8) ;
- des statistiques plus faibles de $C3$ (systématiquement inférieures à celles de $C1$ et $C2$), signe d'une plus grande difficulté à reproduire les étiages ;
- de meilleurs résultats pour EROS, certainement du fait d'un calage direct sur les données journalières ;

- une plus grande variabilité des performances avec CLSM : des bassins peuvent être très bien reproduits mais également très mal reproduits (valeurs de Nash négatives).

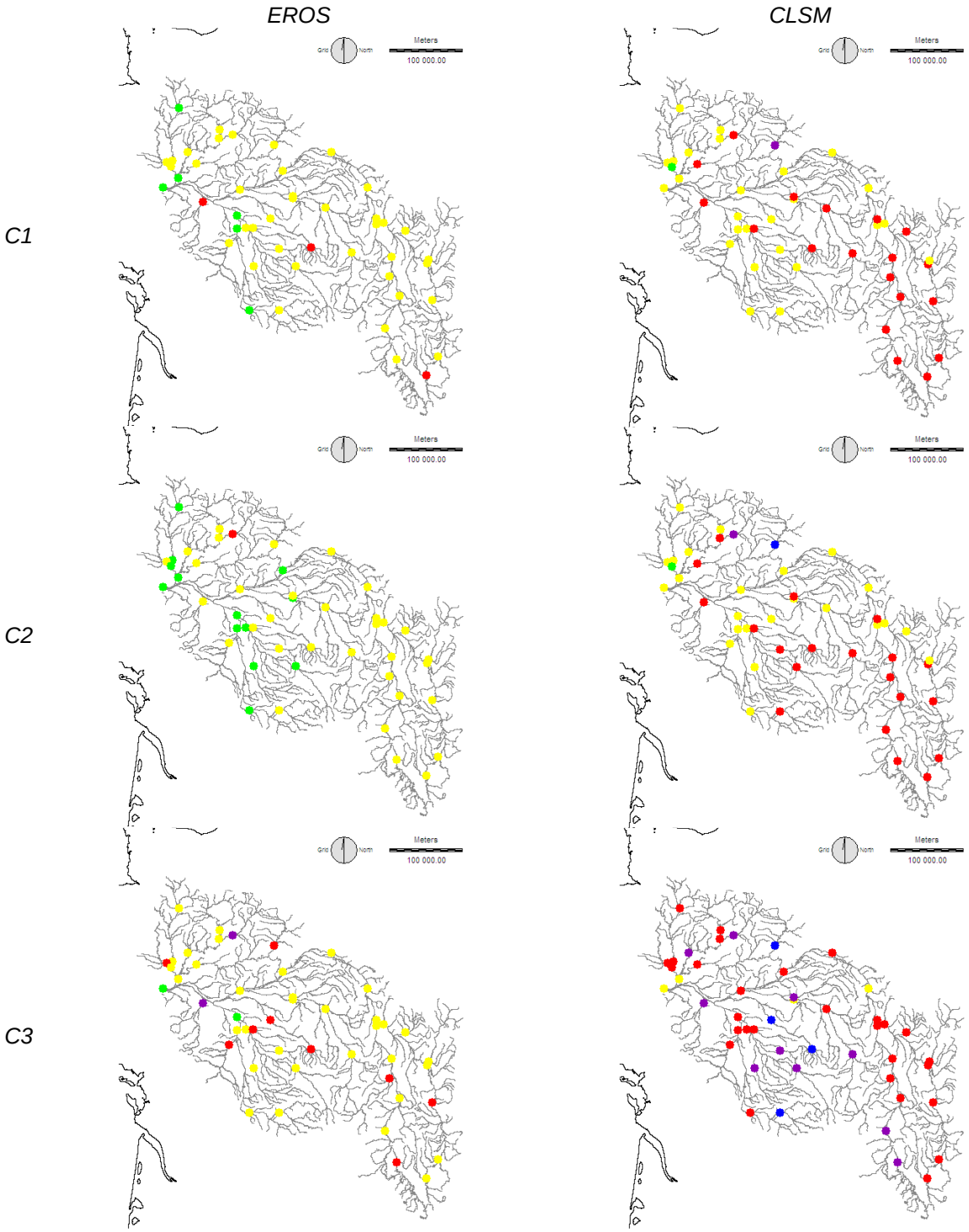


Figure 24 : Carte des critères de Nash calculés sur les logarithmes des débits journaliers pour chaque modèle hydrologique avec le code □ C > 90% ; □ 75% < C □ 90% ; □ 50% < C □ 75% ; □ 0 < C □ 50% ; □ C □ 0%

La Figure 24 propose un regard spatial sur la qualité des modélisations Chaque point représente l'exutoire d'un bassin traité et un code couleur commun indique la valeur des critères de Nash. Il n'y a pas de répartition géographique des stations mal restituées, qui sous-tendrait des déficiences liées à un type de bassin. Il convient de noter que les deux modèles reconstituent avec difficulté les débits du Loir à Morée (2108 km²). Il s'agit d'une station virtuelle déduite par transfert de la station hydrométrique du Loir à Saint-Maur sur Loir (1160 km²). Il n'y a pas eu de calage sur ces données par CLSM (ce qui illustre la difficulté de reproduire les paramètres des modèles en site non jaugé[2]). Enfin, une analyse des évolutions entre la surface drainée et les critères d'efficience montre que la performance augmente avec la taille du bassin versant modélisé. Deux autres bassins posent problème à CLSM : l'Indre amont (station n°31) et la Vienne à Palais (station n°33).

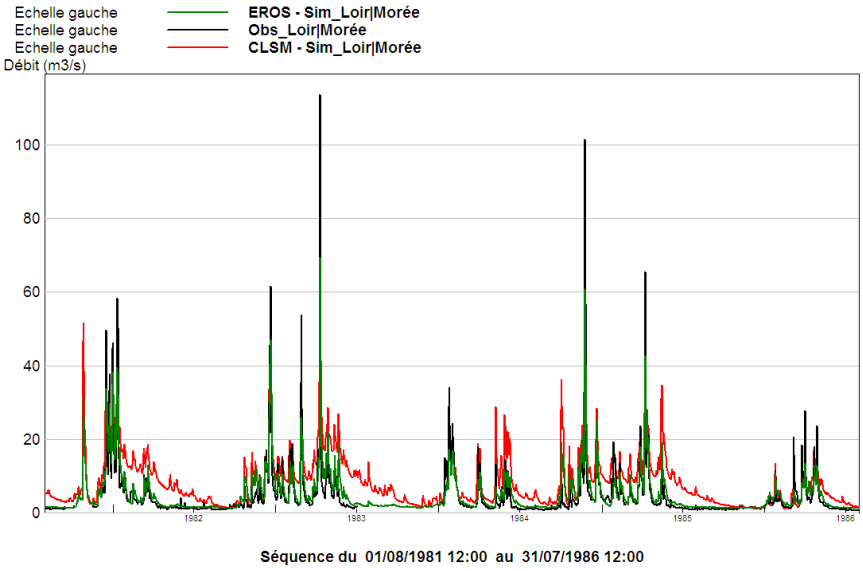


Figure 25 : Extrait des chroniques simulées et observée du Loir à Morée

3.1.2 Reconstitution des débits caractéristiques

Les écarts entre caractéristiques hydrologiques reconstitués et observés sont mesurés par deux critères :

- le critère de Nash *C*1 :

$$C1 = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{M} \left(Q(i) - Q^*(i) \right)^2}{\sum_{i=1}^{M} \left(Q(i) - \overline{Q(i)} \right)^2} \right]$$

[2] Nous n'avons pas connaissance des capacités d'EROS à reproduire l'hydrologie des sites non jaugés, donc aucune comparaison entre fiabilité des deux modèles n'est possible.

- la pente de régression linéaire (□ avec ordonnée à l'origine imposée à zéro) qui renseigne le biais des modèles : □ est à comparer à 1 qui correspond à une reconstitution parfaite ; □ > 1 signifie que le modèle hydrologique propose des valeurs en moyenne supérieures aux observations, et inversement.

entre les débits de référence observé $Q(i)$ et simulé $Q^*(i)$ à la station i, M étant le nombre total de stations analysées (ici M= 47). Les valeurs des débits de référence seront exprimées en l/s/km² dans les analyses régionales pour comparer les bassins indépendamment de leur taille.

3.1.2.1 Ecoulements annuels et des variations saisonnières

La qualité des modélisations est mesurée par les moyennes des débits mensuels de quatre mois au centre des quatre saisons : janvier (*QM*1), avril (*QM*4), mai (*QM*7) et octobre (*QM*10).

Modèle		*QM1*	*QM4*	*QM7*	*QM10*	*QA*	*BFI*
CLSM	C1	0.73	0.72	-2.37	0.58	0.53	-1.87
	□	1.10	1.11	1.67	1.21	1.19	1.20
EROS	C1	0.92	0.88	0.32	0.81	0.98	-0.27
	□	0.94	0.91	1.31	1.15	0.98	1.12

Tableau 6 : Statistiques de performance des modélisations sur les termes annuels et mensuels moyens pour chaque modèle hydrologique

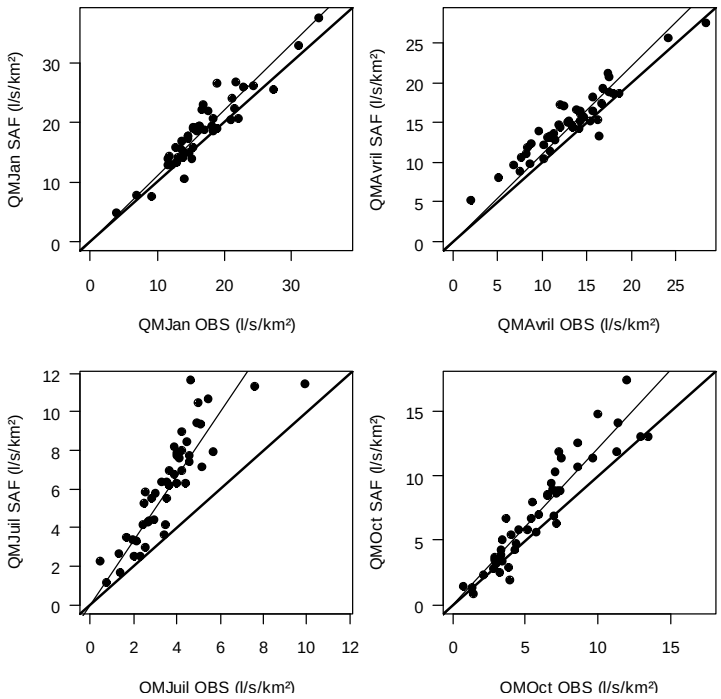


Figure 26 : Comparaison des débits mensuels moyens observés OBS et simulés par CLSM - chaque point est un bassin traité par le modèle ; la première bissectrice est en trait épais ; la droite de régression ajustée est en trait fin

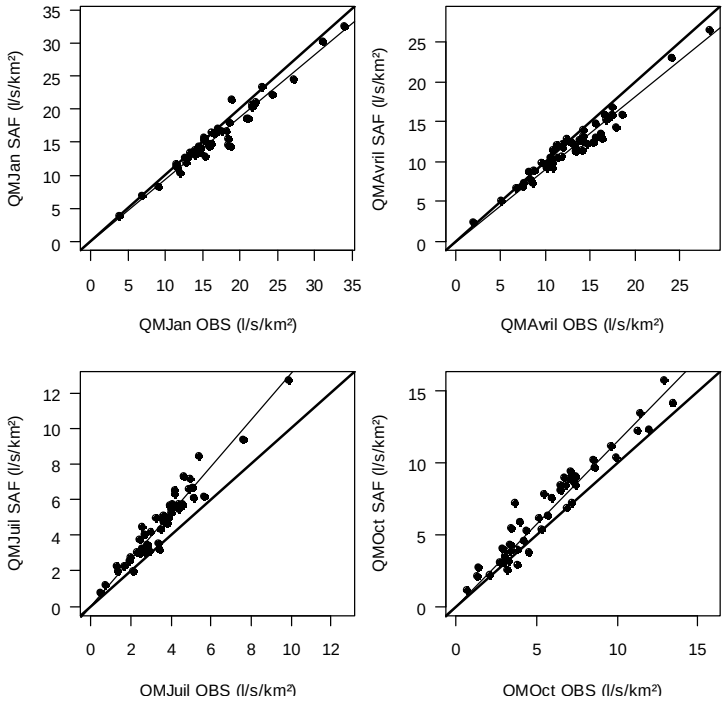


Figure 27 : Même chose qu'en Figure 26, mais avec EROS

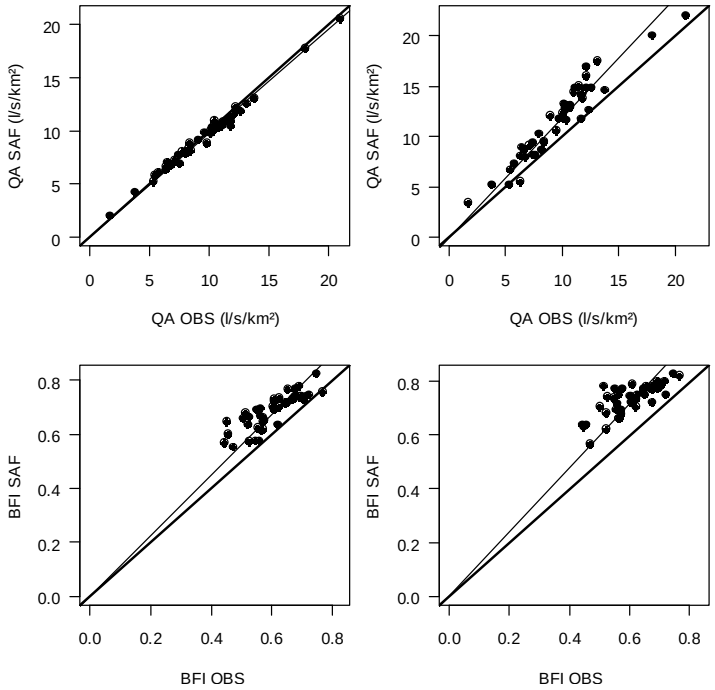


Figure 28 : Comparaison des débits annuels et BFI observés OBS et simulés par EROS à gauche et par CLSM à droite - chaque point est un bassin traité par le modèle ; la première bissectrice est en trait épais ; la droite de régression ajustée est en trait fin

Les statistiques du Tableau 6 montrent que, même si CLSM présente des résultats moins satisfaisants que EROS, ce modèle décrit convenablement les variations saisonnières. Nous pouvons noter de plus grandes difficultés à restituer les débits de juillet. Les deux modèles ont tendance à surestimer systématiquement la contribution des écoulements de base que ceux observés (*BFI* issus des simulations plus forts que ceux calculés sur les observations). Le critère de Nash sur le *BFI* est négatif ; en effet, il est difficile de reconstituer des valeurs présentant une faible variance. Ce biais est quasi identique pour EROS et CLSM. Cette analyse est réalisée sur l'ensemble des valeurs ; ceci ne préjuge pas des biais sur les débits extrêmes.

3.1.2.2 Reconstitution des extrêmes

L'examen des statistiques reportées dans le Tableau 7 montre que les modèles ont des performances sensiblement équivalentes pour ce qui concerne le quantile de crue *QJXA*10.

Les modèles ont tous tendance à sous-estimer le quantile décennal *QJXA*10 (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 *QJXA*10 > 150 l/s/km²) (Figure 29). Les différences sont plus marquées sur la reconstitution de la durée caractéristique *D*. Les statistiques de CLSM sont pénalisées par un bassin aux étiages fortement soutenus pour lequel les débits d'étiage sont très faibles. Les performances diminuent avec le caractère extrême des variables. Les descripteurs de la dynamique sont moins bien reproduits que ceux renseignant les intensités. Le critère de Nash est négatif car les valeurs de *F* sont presque les mêmes sur les chroniques observées (la moyenne de *F* est de 91.9%, le minimum de 85.9% et le maximum de 95.6%). Globalement il n'y a pas de biais de reconstitution sur cette variable (□ est proche de 1). Les durées de crue sont approximativement reconstituées. Les ordres de grandeur sont garantis.

Modèle		*QJXA10*	*Q10*	*D*	*QMNA5*	*Q90*	*F*
CLSM	C1	0.39	0.72	-5.18	0.29	0.48	-3.05
	□	0.69	1.13	1.82	0.78	1.04	0.99
EROS	C1	0.41	0.97	-1.34	0.67	0.70	-1.13
	□	0.69	0.97	1.46	0.96	1.09	1.02

Tableau 7 : Statistique de performance des modélisations sur les caractéristiques relatives aux extrêmes

pour chaque modèle hydrologique

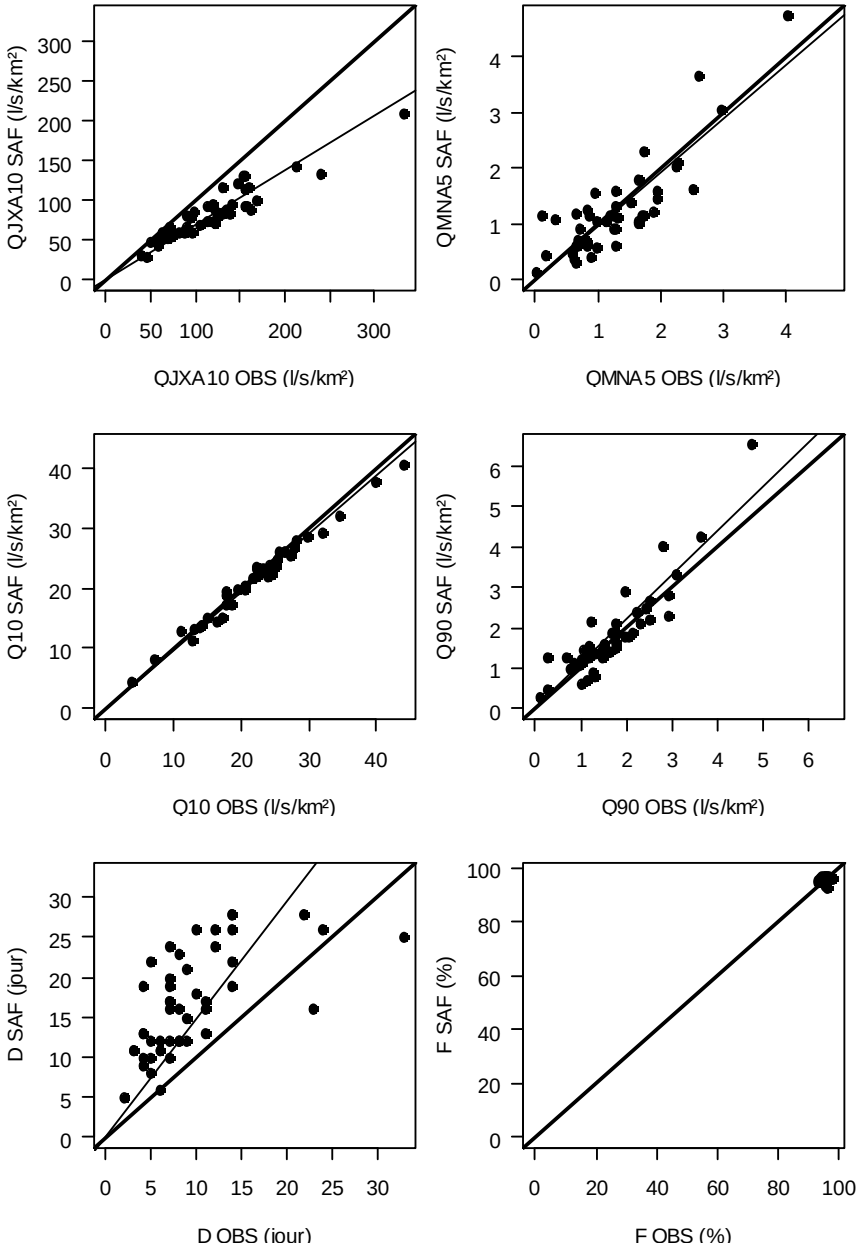


Figure 29 : Variables descriptives des extrêmes observés et reconstitués par EROS – chaque point est un bassin traité par le modèle ; la première bissectrice est représentée en trait épais ; la droite de régression ajustée est en trait fin

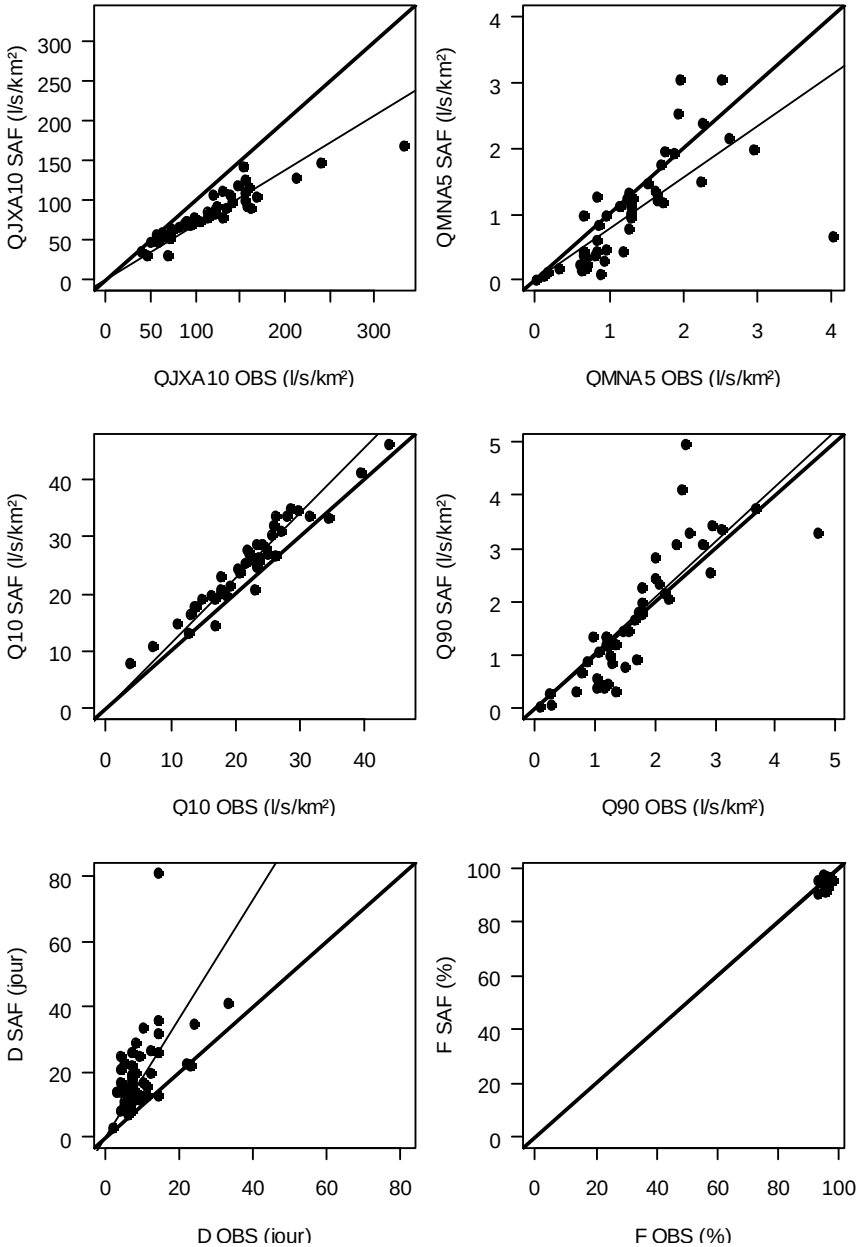


Figure 30 : Même chose qu'en Figure 29, mais avec CLSM

3.1.3 Conclusion

L'analyse des sorties de modèles hydrologiques montre que la transformation pluie-débit est représentée de manière acceptable grâce à la procédure de calage. Les deux modèles donnent la meilleure satisfaction sur les termes moyens. Les débits extrêmes sont moins bien restitués, mais les modèles dans leur ensemble parviennent à reproduire les contrastes spatiaux.

Il convient de noter que ces modèles ont été créés pour représenter le fonctionnement naturel des bassins versants et que le fait de manipuler de caler les modèles sur des séries influencées par les actions humaines peuvent perturber et donc biaiser en partie les réponses sous changement climatique. L'exemple de la Loire à Villerest donné par Bernard (2010) est repris ici à titre d'illustration.

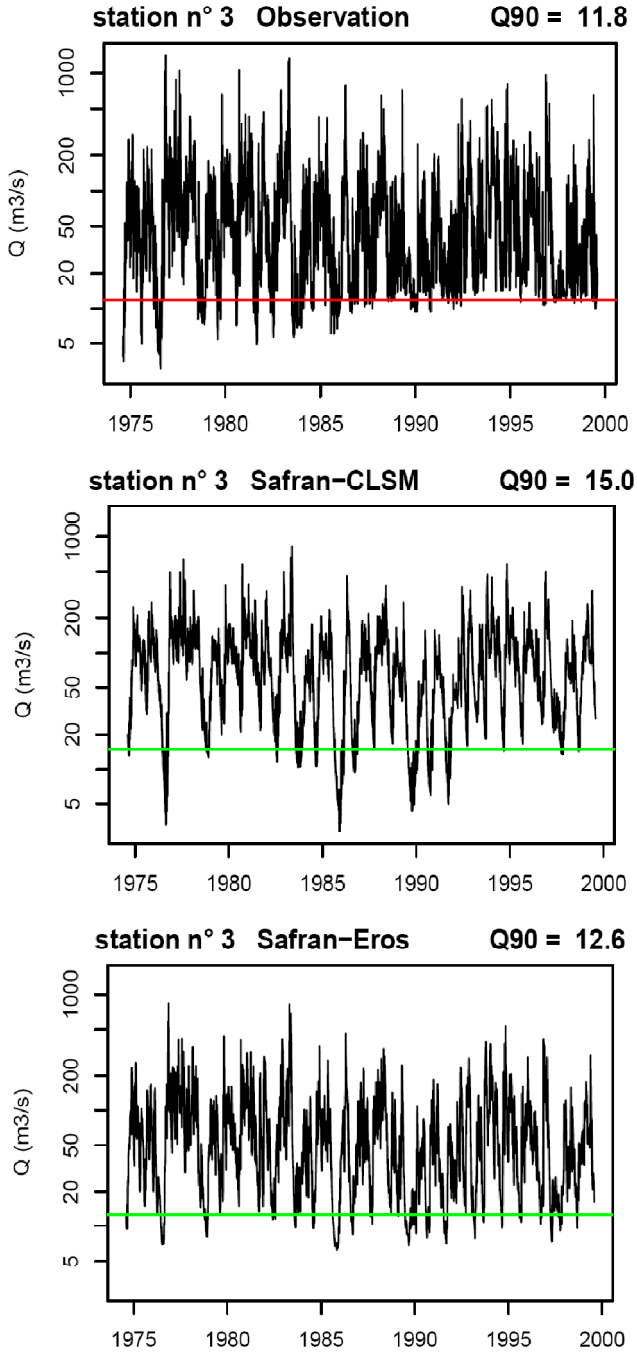


Figure 31 : Débits observés et simulés de la Loire à Villerest et Q90 associés

La Figure 31 représente la chronique observée (en haut) ainsi que les chroniques simulées par des modèles CLSM (au milieu) et EROS (en bas) alimentés par la réanalyse Safran, et les valeurs de *Q*90 correspondantes. La difficulté à reproduire les bas débits vient du fait qu'en aval du barrage de Villerest le débit subit une très forte influence anthropique. Une rupture est perceptible sur les bas débits à la mise en service du barrage de soutien d'étiage en 1984. Cette rupture a des conséquences sur le calage des modèles hydrologiques. En effet, le calage utilisant une chronique avec une rupture, il s'avère que les événements antérieurs à la mise en service du barrage sont sous estimés par la modélisation hydrologique (l'événement de 1976 est ainsi sous-estimé par EROS). Les événements postérieurs à la mise en eau du barrage sont encore moins bien estimés à la vue de la complexité des débits observés. Si les *Q*90 issus des modélisations hydrologiques ne sont pas très différents du *Q*90 observé, il en est tout autre pour les débits encore plus faibles. Ainsi, pour les stations fortement influencées, les séquences d'étiages issues des modèles et des observations seront différentes. En faisant un zoom sur l'année 1985 (Figure 31), on note d'importantes différences entre les chroniques observées et les couples SAFRAN-modèle hydrologique pour toutes les stations de la Loire. En fait, deux barrages de soutien d'étiage ont été mis en service en 1984 sur la Loire amont (barrage de Villerest) et l'Allier (barrage de Naussac). 1985-1986 a été une période de sécheresse sur les bassins de l'Allier et de la Loire (Benmaleck, 2006) au cours de laquelle les barrages ont probablement été largement utilisés. De plus, les deux barrages assurent un débit minimum de la Loire à Gien. C'est à partir du débit à Gien que les interdictions de prélèvements concernant les centrales nucléaires de la Loire moyenne sont décidées.

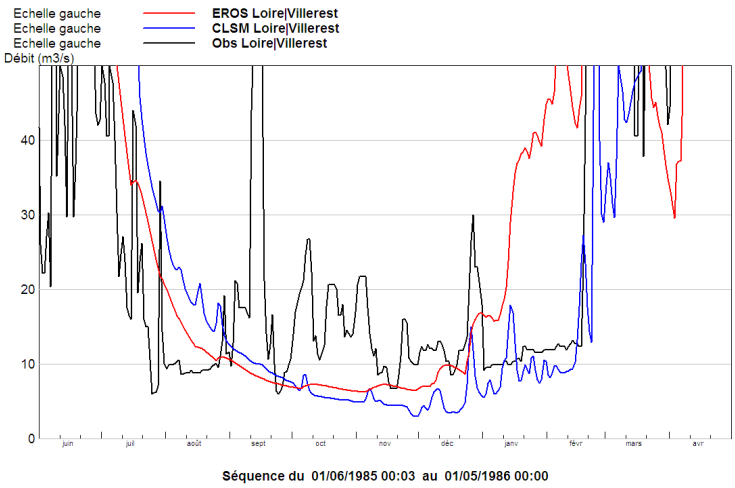


Figure 32 : Débits observés et simulés de la Loire à Villerest et Q90 associés pour l'étiage de 1985

Pour le bassin versant de Villerest situé en amont, la différence entre les observations et les résultats de la modélisation est importante. Si l'on regarde les observations en comparaison avec les débits "attendus" issus de la chaîne Safran-modèle hydrologique, on observe que les bas débits sont limités vers le bas et qu'ils oscillent dans une gamme de valeurs proches du *Q*90. Il est possible que ce seuil, s'il n'est à ce jour pas retenu parmi les valeurs utilisées par les

gestionnaires, soit un seuil autour duquel la régulation du débit intervient. Le soutien d'étiage intervient quand des valeurs critiques pour le maintien des prélèvements en aval sont atteintes (par exemple quand le débit de la Loire plus en aval devient inférieur à un seuil réglementaire). Il est clair pour ce type de bassin versant que les débits d'étiage sont soumis à un impact fort lié à l'usage de l'eau. Si l'on se place sur une station plus en aval, la part du débit soumise à l'influence humaine est a priori diminuée. Le soutien d'étiage peut compenser les prélèvements en été mais globalement des volumes d'eau sont perdus par l'hydrosystème. Pour les stations situées en aval de la station de Villerest, les performances sont globalement meilleures. La fréquence et les durées sont relativement bien représentées par les deux modèles.

La chaîne Safran-modèle hydrologique rencontre des difficultés à reproduire les différentes caractéristiques des étiages (fréquence, durée, déficit, saisonnalité) du fait de la complexité naturelle mais également des actions anthropiques. Pour réduire les biais des modèles hydrologiques, une solution aurait été de "renaturaliser" les débits. Cependant, cette étape s'avère très compliquée à l'échelle d'un grand bassin hydrographique. En effet, pour désinfluencer les débits, il faudrait une connaissance fine des usages de l'eau. Il est très difficile d'obtenir des données concernant la gestion des barrages et des prélèvements agricoles sur une période suffisamment longue et avec un pas de temps journalier sur les 68 sous-bassins versants ayant tous leurs particularités.

3.2 Réponse hydrologique aux projections climatiques

Les résultats en onze stations, correspondant aux dernières stations hydrométriques des grands affluents avant confluence avec la Loire et trois stations de la Loire, sont présentés dans cette section (§ 1.3.2 « Hydrologie », page 8).

3.2.1 Les variables de moyennes eaux

3.2.1.1 Le module

L'analyse du *QA* aux stations confirme le diagnostic établi précédemment sur la bonne capacité des modèles à reconstituer le module lorsqu'ils sont forcés par la climatologie de Safran (Figure 28, page 42). L'estimation obtenue avec Safran est très proche de la valeur observée (cf. les étiquettes sur la bordure supérieure de chaque graphique). Il en est de même pour les estimations du *QA* selon CLSM alimenté par les forçages temps présent : les points se situent de part et d'autre de la droite verticale rouge cependant avec une dispersion parfois forte des points sur l'axe des abscisses. En revanche, EROS a un tout autre comportement : alimenté par les forçages temps présent, il semble systématiquement sous estimer le module.

Le changement climatique se traduit pour les deux modèles par une diminution du module dès le milieu de siècle (une majorité de points se situe sous les droites enveloppes). En fin de siècle, la diminution du *QA* annoncée par CLSM est de 51% (moyenne multi-GCMs multi-site), celle

suggérée par EROS est plus modérée (-33%) et l'écart-type des anomalies est de 15% pour les deux modèles. Les changements pour les onze stations représentatives sont reportés dans le Tableau 8. A noter que la dispersion entre réalisations du modèle Arpège est plus faible que la dispersion multi-GCMs, que ce soit en temps présent ou sous scénario A1B aux horizons futurs.

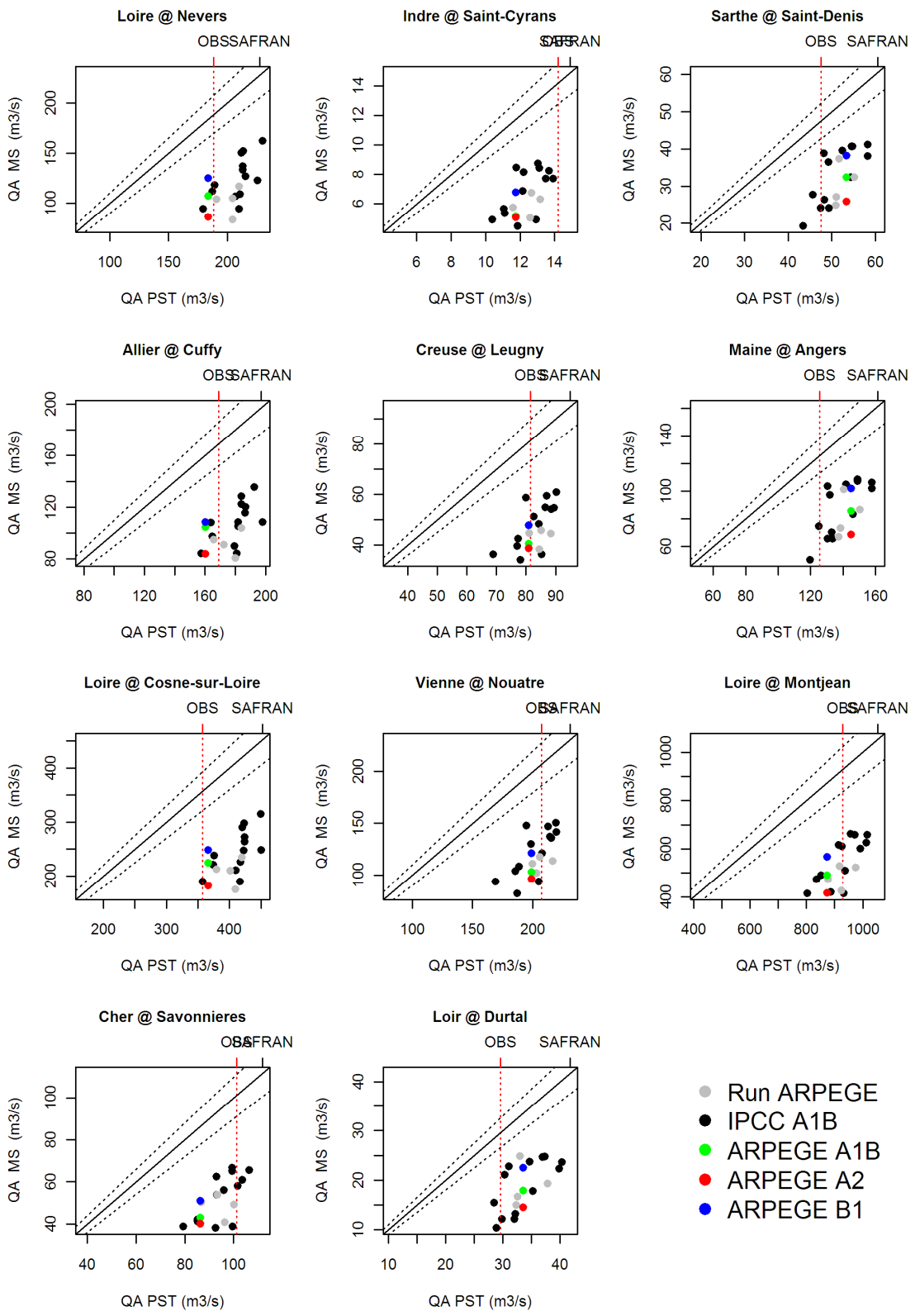


Figure 33 : Evolution de QA en milieu de siècle selon CLSM

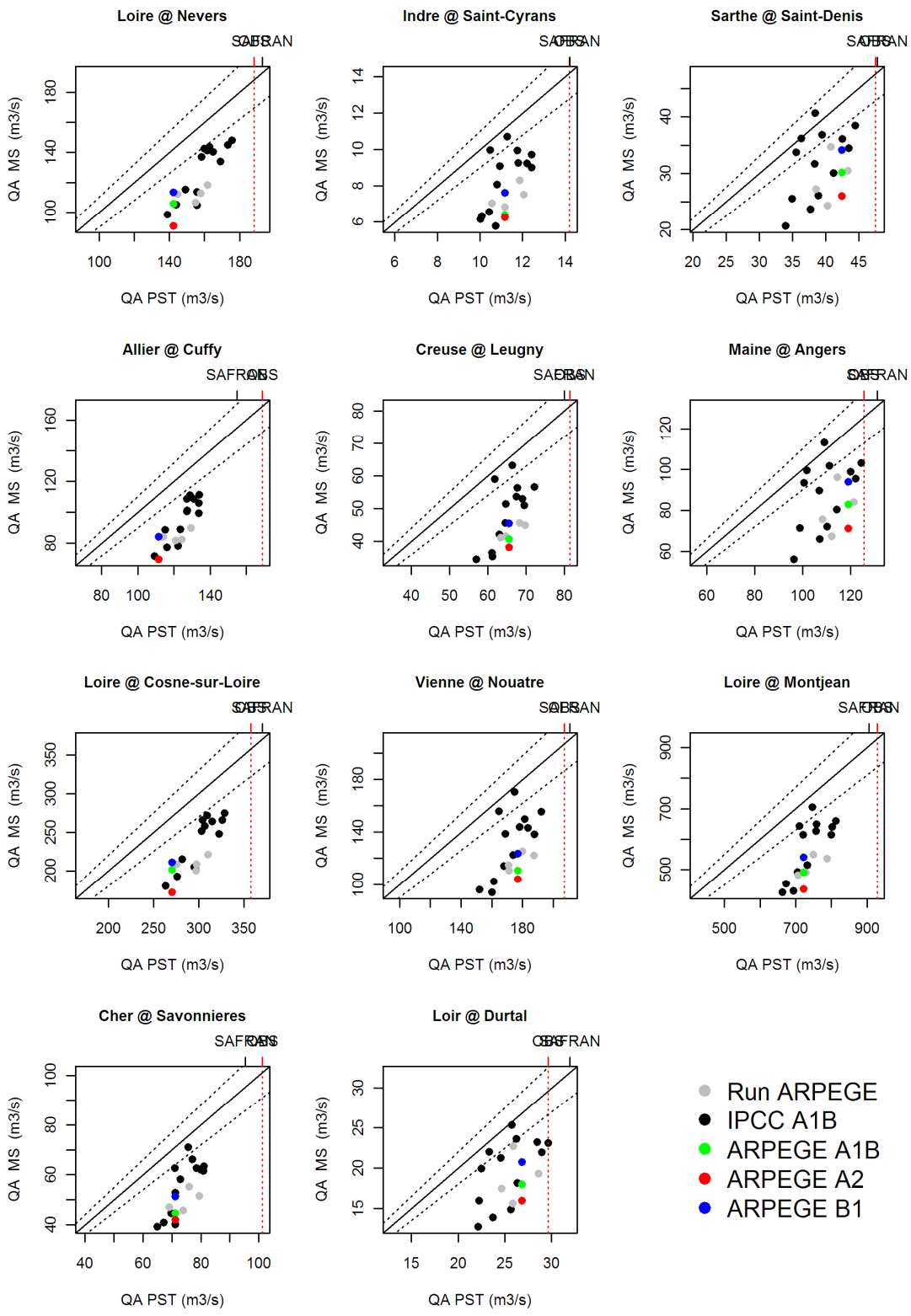


Figure 34 : Evolution de QA en milieu de siècle selon EROS

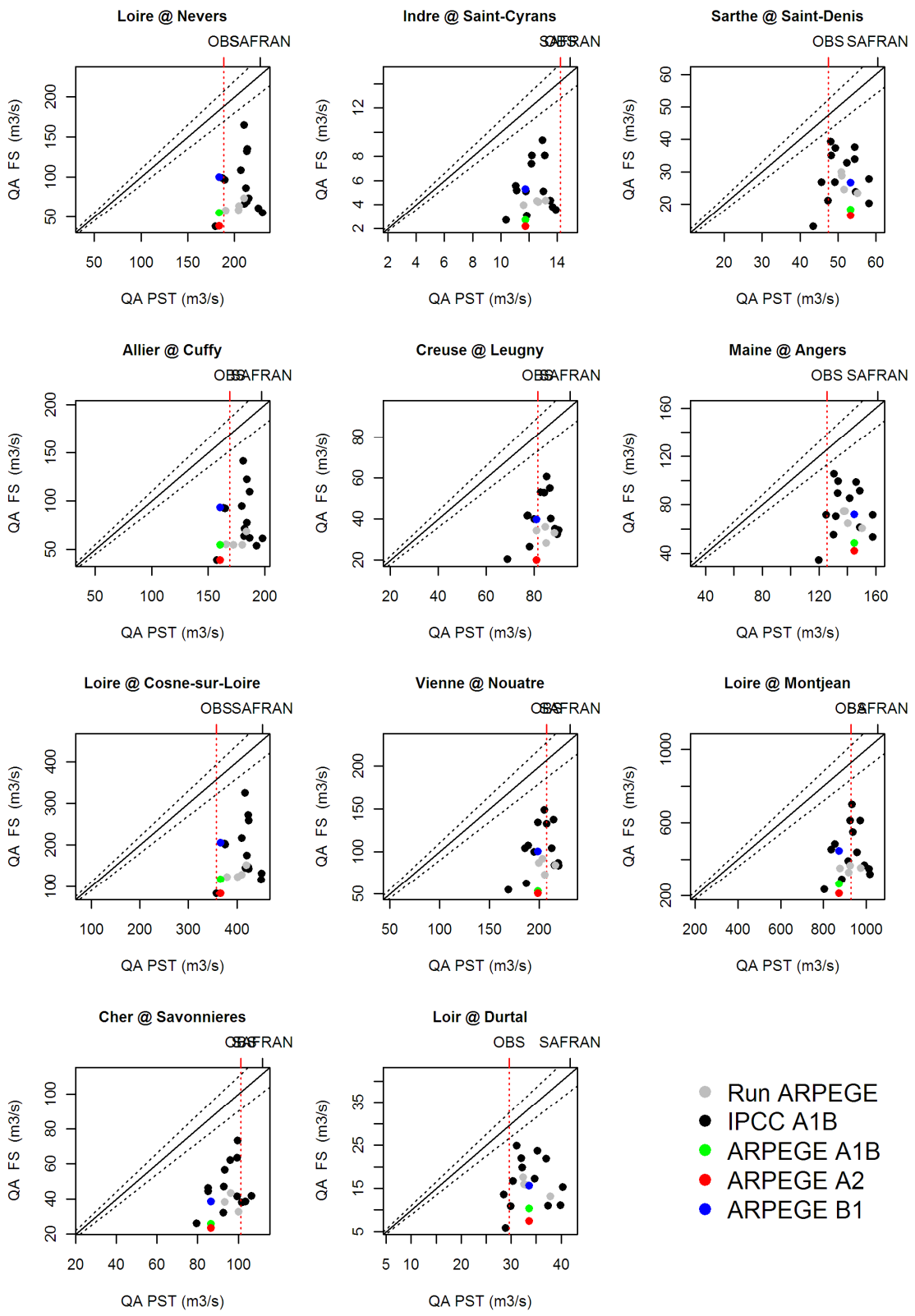


Figure 35 : Evolution de QA en fin de siècle selon CLSM

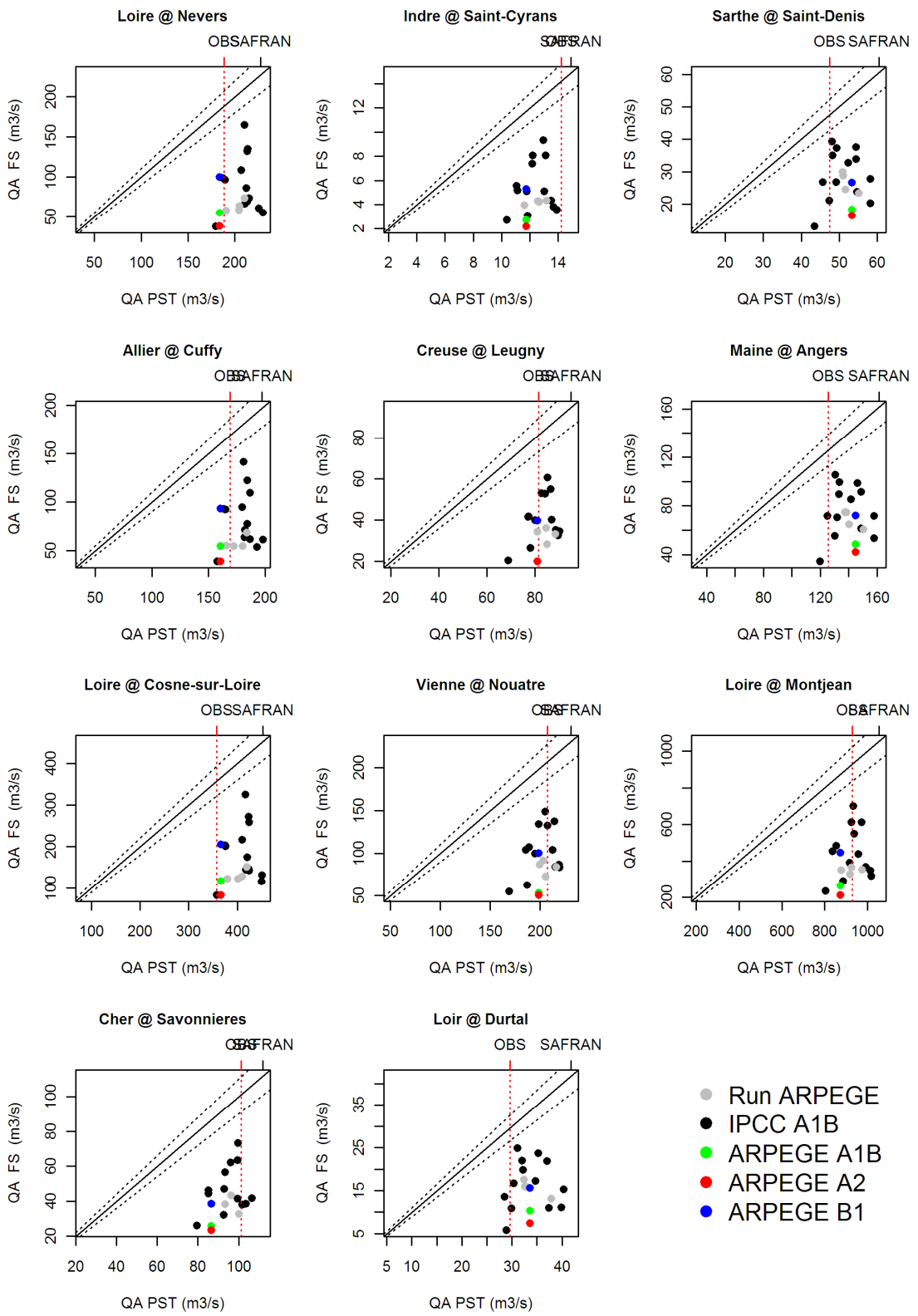


Figure 36 : Evolution de QA en fin de siècle selon EROS

	CLSM				EROS			
	Anomalie *QA* MS		Anomalie *QA* FS		Anomalie *QA* MS		Anomalie *QA* FS	
Station	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
La Loire à Nevers 7	-41.7	9.7	-56.4	16.9	-20.6	8	-32.4	13.7
L'Allier à Cuffy 14	-40.9	8	-53.9	15.8	-24.2	7.7	-35.6	14
La Loire à Cosne-sur-Loire 16	-41.4	8.7	-55.1	16.2	-22.3	7.8	-33.9	13.7
Le Cher à Savonnieres 30	-45	9.1	-50.3	12.8	-25.8	11.6	-37.4	16.6
L'Indre à Saint-Cyrans 32	-45.2	10.9	-55.9	16.1	-25.6	12.6	-37.9	17.1
La Creuse à Leugny 44	-42.1	9.2	-50.7	12.8	-25.5	11.9	-38.2	15.5
La Vienne à Nouatre 48	-40	9.1	-49	13.2	-24	11.5	-36.1	14.9
Le Loir à Durtal 56	-45.2	12.8	-50.8	17.4	-23	13.7	-31.7	17.3
La Sarthe à Saint-Denis 61	-36.2	11.5	-43.2	15.4	-18.5	13.7	-27.2	16
Le Maine à Angers 67	-37.8	11.4	-45.1	15.2	-20.4	13.6	-29	15.7
La Loire à Montjean 68	-41.5	8.4	-51.9	14.5	-23	10.2	-34.2	14.6

Tableau 8 : Changements de QA exprimés en % (statistiques multi-GCMs sous scénario A1B)

3.2.1.2 Les écoulements mensuels et le cycle saisonnier

L'analyse des débits mensuels porte sur le régime hydrologique défini par les douze débits mensuels moyens corrigés des biais de la chaîne de simulation (§ 2 « Variables statistiques analysées », page 9).

Les Figures suivantes montrent pour chaque modèle hydrologique les boîtes à moustache pour chaque mois qui résument la dispersion multi-GCMs des estimations sous scénario A1B. Le rectangle est défini par les premier et troisième quartiles et coupé par la médiane. Les extrémités des moustaches sont définies par la dernière valeur qui est située à une distance du rectangle inférieure à 1.5 fois l'écart interquartile. Les points en dehors des moustaches sont identifiées par des cercles. La moyenne est représentée par un losange noir. Enfin, la courbe noire représente les débits observés en chaque station.

L'examen des graphiques suggère une diminution généralisée des écoulements mensuels (sur la base de la médiane) en cohérence avec la réduction du module perceptible dès le milieu de siècle. En outre,

- CLSM propose une vision plus pessimiste que EROS ;
- en basses eaux, quel que soit le modèle hydrologique, tous les éléments qui constituent les boîtes à moustache se situent sous la courbe des débits observés : la diminution est robuste en période estivale ; la durée de la période d'étiage augmente au cours du XXIème siècle ;

- en hautes eaux, le signal est moins cohérent. Des valeurs de débits mensuels moyens supérieures aux statistiques actuels sont possibles (un seul modèle – EROS entre décembre et avril en milieu de siècle et entre janvier et avril en fin de siècle – les envisage et ces tendances à la hausse ne sont portées que par les extrémités supérieures).

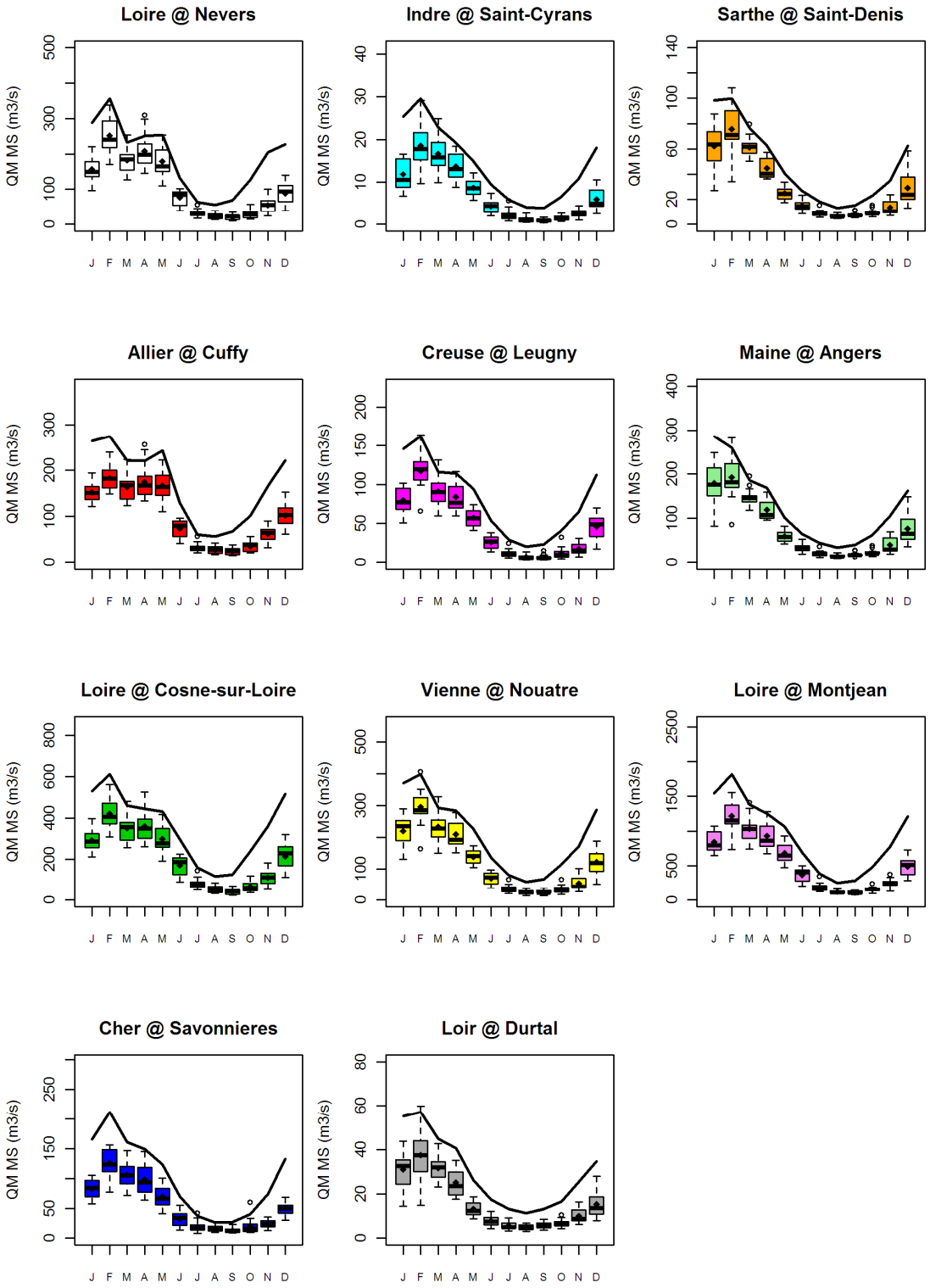


Figure 37 : Estimation des QM débiaisés en milieu de siècle selon CLSM

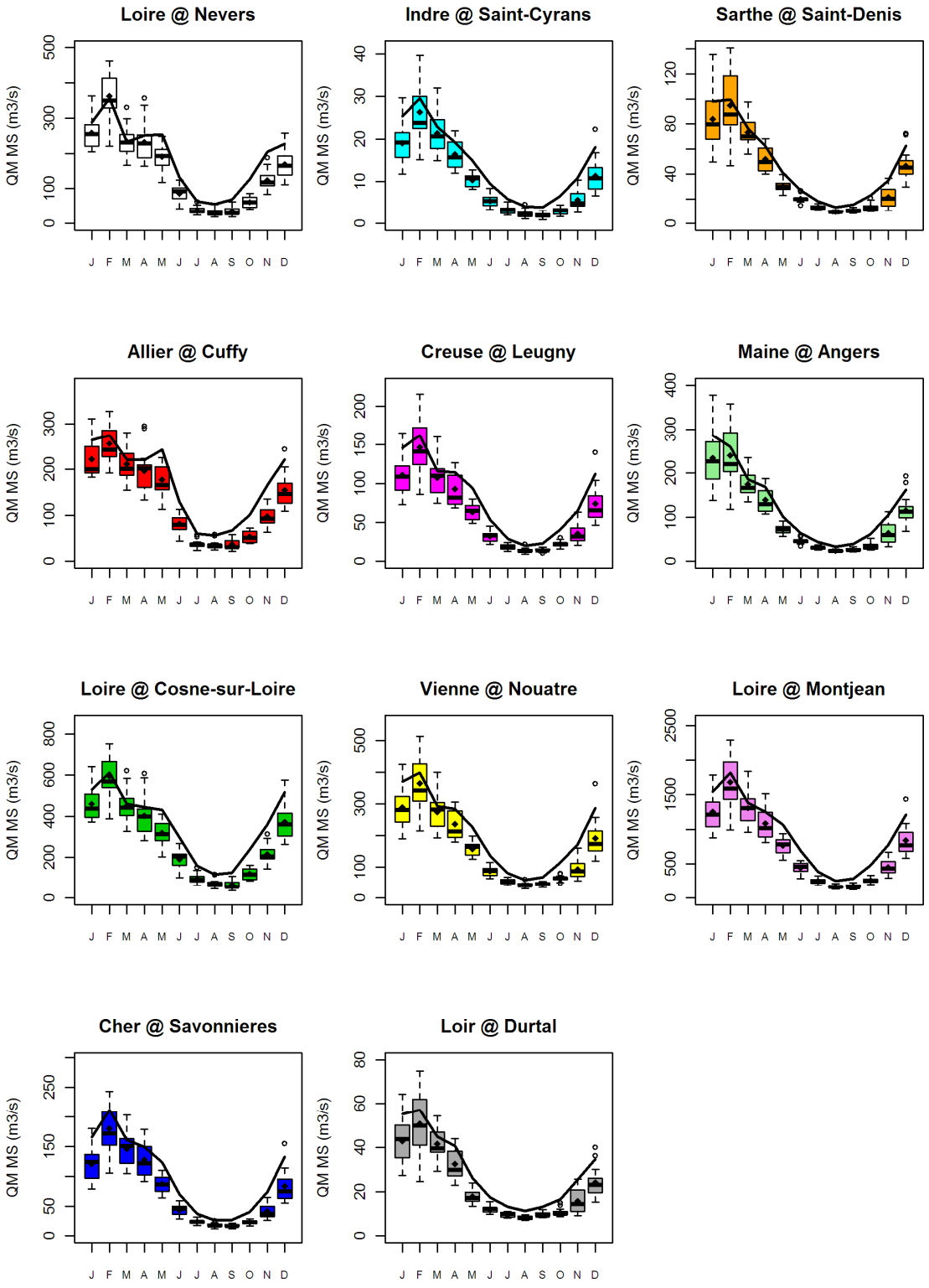


Figure 38 : Estimation des QM débiaisés en milieu de siècle selon EROS

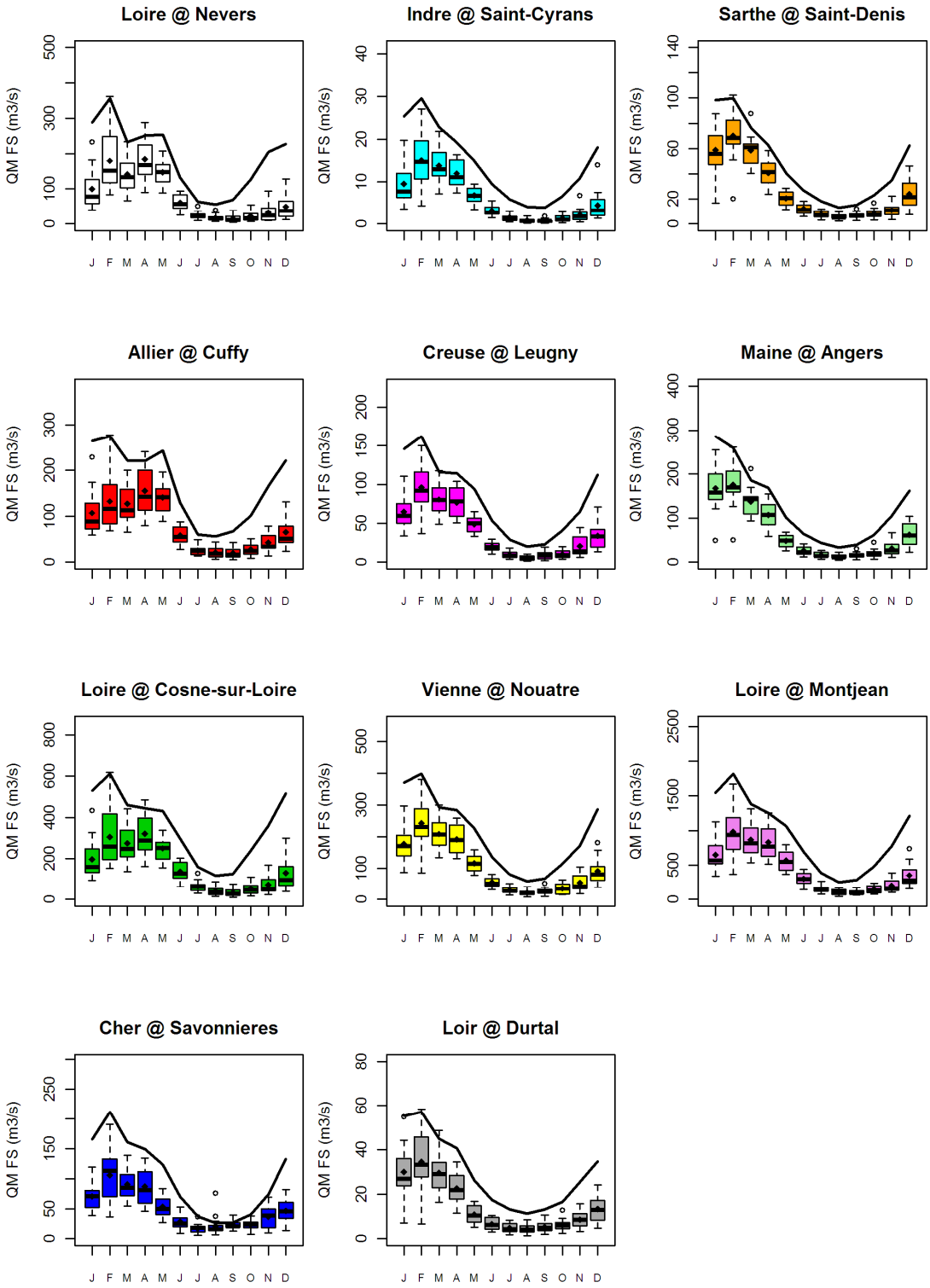


Figure 39 : Estimation des QM débiaisés en fin de siècle selon CLSM

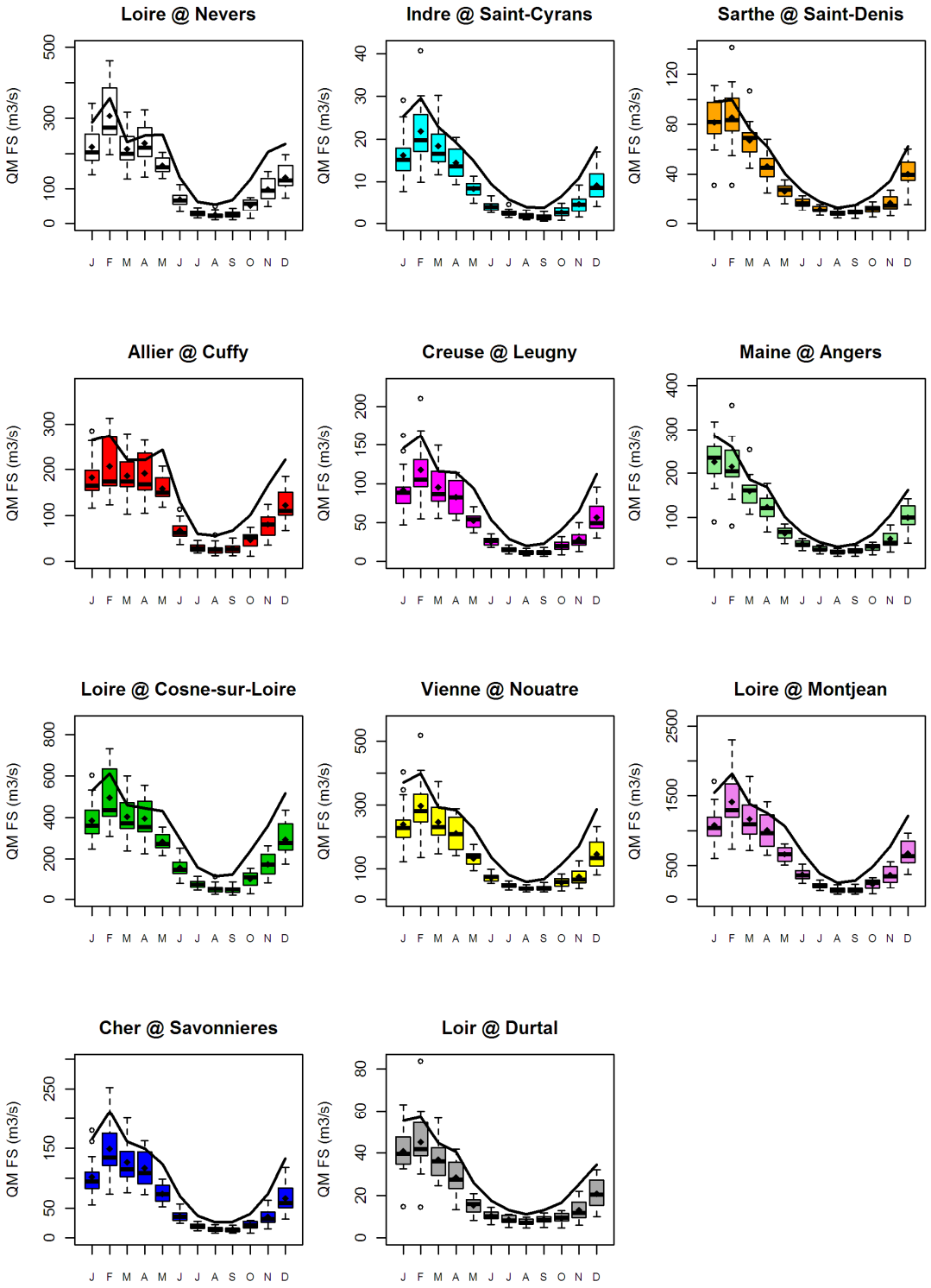


Figure 40 : Estimation des QM débiaisés en fin de siècle selon EROS

Pour mieux apprécier la dynamique saisonnière des écoulements, nous avons cherché à caractériser le cycle annuel décrit par les douze coefficients mensuels *CM* définis par la proportion de l'écoulement annuel écoulé par mois :

$$CM(i) = \frac{QMi}{QA}$$

où *QMi* et *QA* désignent respectivement débits mensuels moyens interannuels du mois *i* et débits annuels moyens interannuels exprimés en m^3/s. Ces coefficients sans dimension quantifient la proportion de l'écoulement annuel écoulé en moyenne chaque mois. Une manière de caractériser l'évolution de ce pattern est suivre sa projection dans un espace de fonctions appropriées, interprétable en termes d'hydrologie. C'est ce qui a été réalisé dans le cadre d'une action de régionalisation par Sauquet *et al.* (2008) et dans une perspective d'analyse de tendance par Krasovskaia *et al.* (2002 ; 2003) en exploitant une décomposition en Fonctions Orthogonales Empiriques (EOF en anglais). Si on reprend les 872 stations hydrométriques françaises exploitées par Sauquet *et al*. (2008), la projection du pattern observé au point **x** est donnée par :

$$CM(\mathbf{x}, i) = \sum_{j=1}^{K} w_j(\mathbf{x}) f_j(i) + 1/12 \quad i = 1,...,12$$

où les $f_j, j = 1,...,K$ sont des fonctions temporelles (*K* < 12) établies et valides sur le secteur étudié et $w_j(\mathbf{x}), j = 1,...,K$ sont les coefficients de pondération qui varient d'une série à une autre. Les fonctions de forme temporelles ont par construction une moyenne nulle et contribue de manière différenciée à la variance totale présente dans l'échantillon. On ne conserve que les *K* plus importantes contributions en excluant celles assimilables à un bruit (identifiable par leur allure et par la variance qu'elles expliquent).

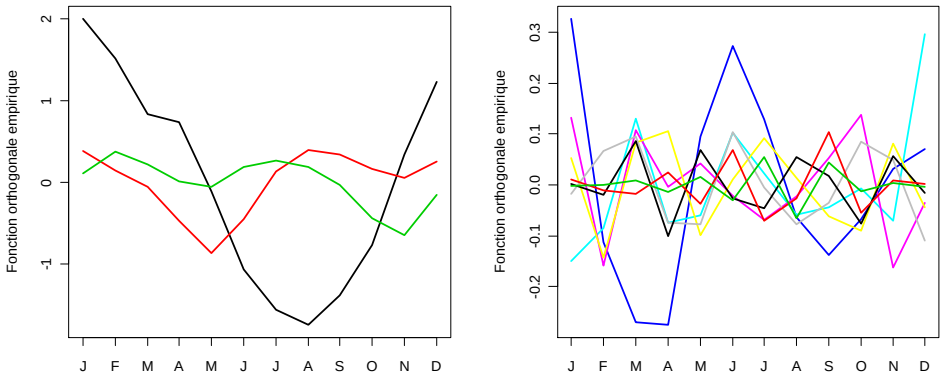


Figure 41 : Fonctions orthogonales empiriques déduites de l'analyse effectuée sur 872 séries de coefficients mensuels calculés sur la période 1981-2000

Nous avons classé les fonctions selon la proportion de variance qu'elles apportent. Les trois premières fonctions présentent les plus fortes variabilités (panel de gauche). Les dernières tendent progressivement vers la fonction nulle (panel de droite). Les quatre premières apportent 96% de la variance totale. En d'autres termes, associées aux coefficients de pondération, elles permettent de

reconstituer 96% de la variabilité observée dans le jeu de données, donc la quasi-totalité. Les sept dernières apportent individuellement moins de 2% de la variance totale ; elles ont peu de pertinence régionale.

La fonction de forme classée en première position f_1 est tracée en noir sur le panel de gauche. Affecté d'un coefficient de pondération positif (w_1>0), l'allure produite (un fort contraste entre valeurs fortes d'hiver et valeurs faibles d'été) évoque un régime pluvial au sens de Pardé (1933). Affecté d'un coefficient de pondération négatif (w_1<0) l'allure produite évoque un régime glaciaire au sens de Pardé (1933) avec un maximum en été. La seconde fonction f_2 en rouge, affectée d'un coefficient de pondération négatif (w_2<0) avec un maximum observé au printemps évoque une contribution de la fonte du manteau neigeux sur les secteurs de montagne. Enfin la troisième fonction f_3 en vert vient moduler l'écoulement en automne. Conformément avec l'allure des EOFs et avec l'interprétation hydrologique qui en découle, nous retrouvons :

- des valeurs w_1 fortement positives sur les bassins sous influence pluviale au régime très contrasté en Bretagne (absence de réserves souterraines) et sur le pourtour méditerranéen,
- des valeurs w_1 fortement négatives sur les bassins glaciaires des Alpes,
- des valeurs w_2 négatives sur les secteurs montagneux et très faibles ailleurs,
- des valeurs w_3 fortement négatives dans le secteur des Cévennes et sur le littoral sud-est, du fait de crues parfois très importantes en automne.

Le régime hydrologique de chaque bassin versant peut être résumé par les trois coefficients de pondération (w_1 , w_2 , w_3) et chaque bassin peut être positionné dans l'espace des pondérations (w_1 , w_2 , w_3). Sur la Figure 42, nous remarquons que les points se concentrent dans le demi-plan défini par w_1>0 traduisant la prédominance des régimes pluviaux.

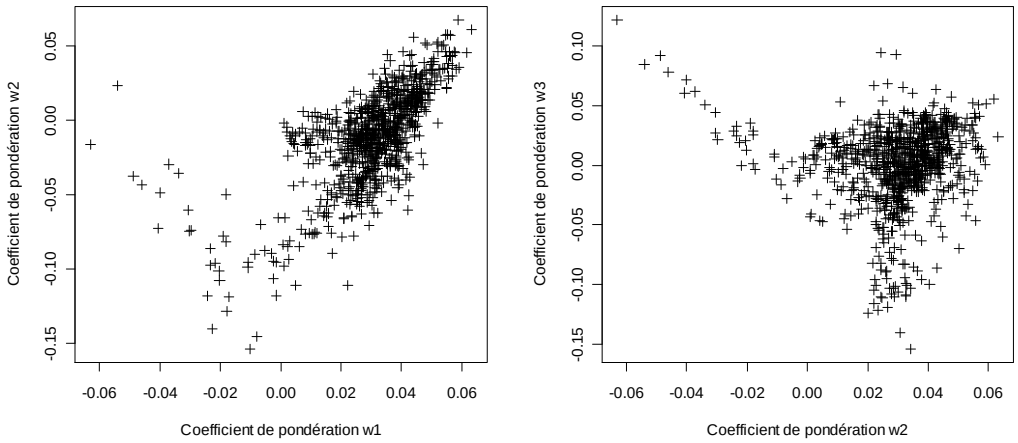


Figure 42 : Projection des régimes hydrologiques de 872 stations françaises pour la période 1981-2000 (une croix + = une station)

La Figure 42 propose une synthèse nationale sur les deux dernières décennies du XXème siècle. Une manière d'examiner les changements est de suivre la trajectoire des bassins versants

dans cet espace, *i.e.* l'évolution des (w_1, w_2, w_3). Si on avait à examiner un bassin de haute montagne, on s'attendrait à un glissement des valeurs négatives de w_1 vers des valeurs plus faiblement négatives ou positives avec le retrait progressif d'un glacier qui l'alimenterait au fil des années. La première opération consiste à vérifier que les 47 chroniques simulés par les modèles alimentés par Safran renvoient la même position que les 47 séries observées. Cet examen est réalisé graphiquement (Figure 43, Figure 44). Les croix orange sont associées aux données effectivement observées. Les points orange sont issus des modèles hydrologiques.

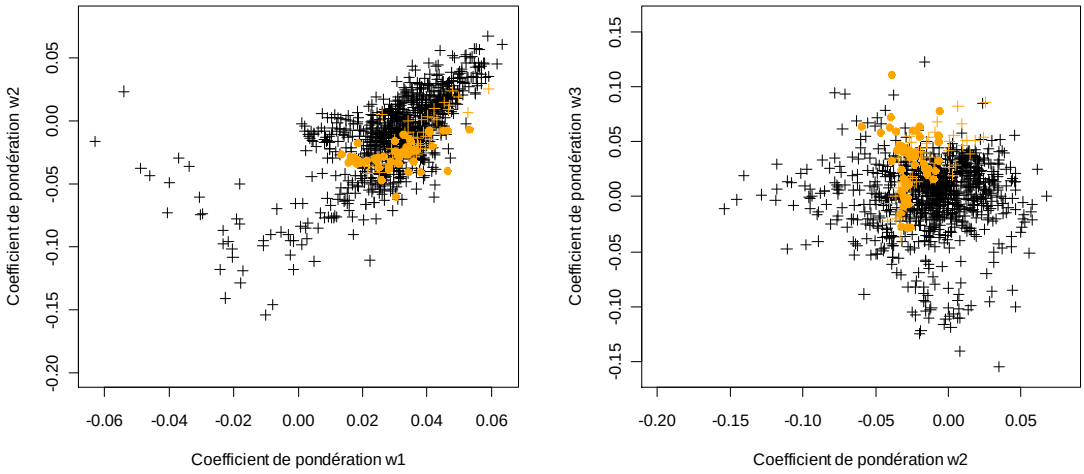


Figure 43 : Projection des régimes hydrologiques de la Loire observés (+) et simulés avec CLSM alimenté par Safran (●) avec pour référence les positions des 872 stations françaises pour la période 1981-2000 (+)

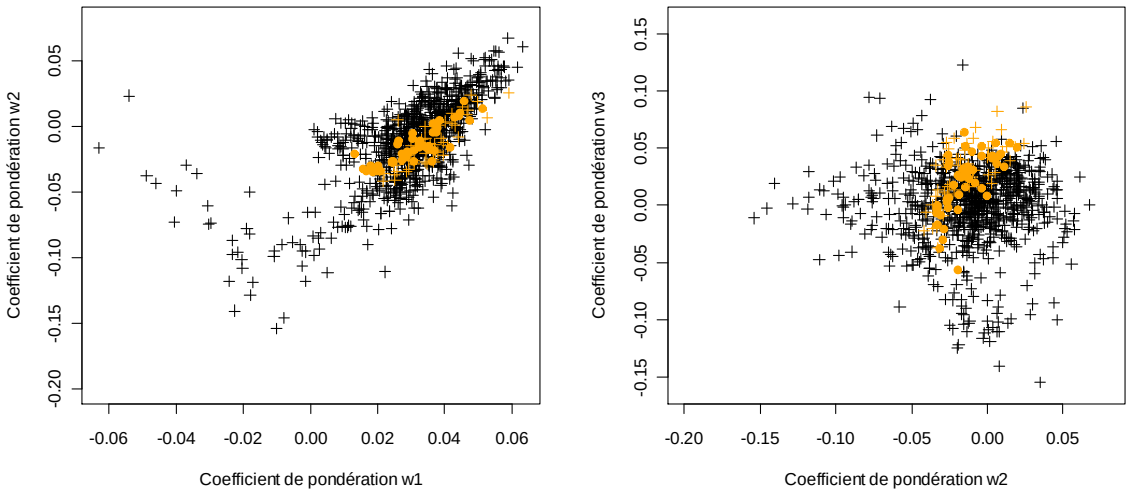


Figure 44 : Même qu'en Figure 42, mais avec EROS

Pour les deux modèles, nous constatons que les nuages de points issus des simulations et ceux issus des observations de la Loire se recouvrent fortement (Figure 43, Figure 44). Les biais

de reconstitution des coordonnées des régimes hydrologiques sont acceptables (globalement plus faibles pour EROS que CLSM). L'analyse des changements s'appuie sur les débits mensuels débiaisés et sur le pattern constitué des moyennes multi-GCMs sous scénario A1B des coefficients mensuels de débit simulés par chaque modèle pluie-débit.

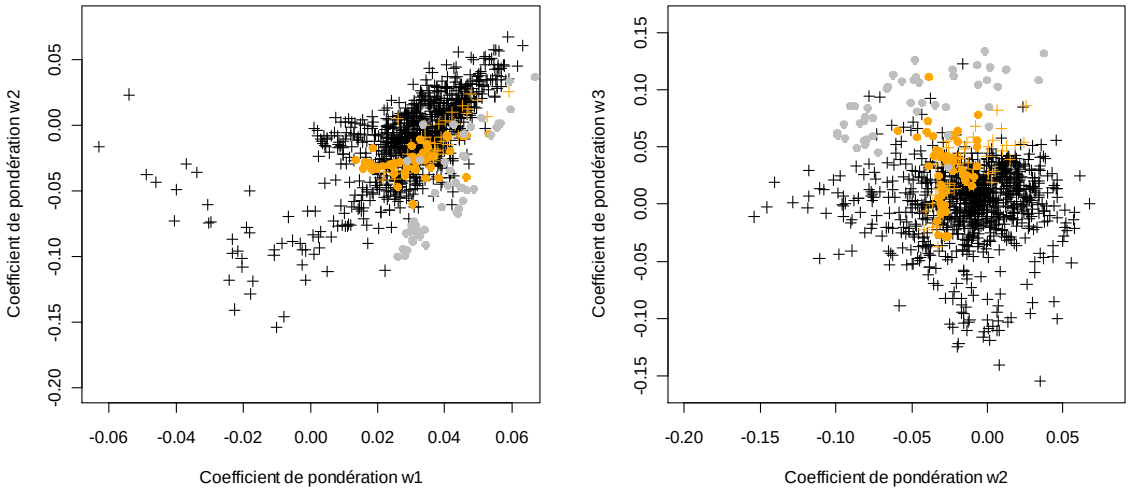


Figure 45 : Projection des régimes hydrologiques de la Loire observés (+) et simulés avec EROS alimenté par Safran (●) et par les scénarios A1B de fin de siècle (●) avec pour référence les positions des 872 stations françaises pour la période 1981-2000 (+)

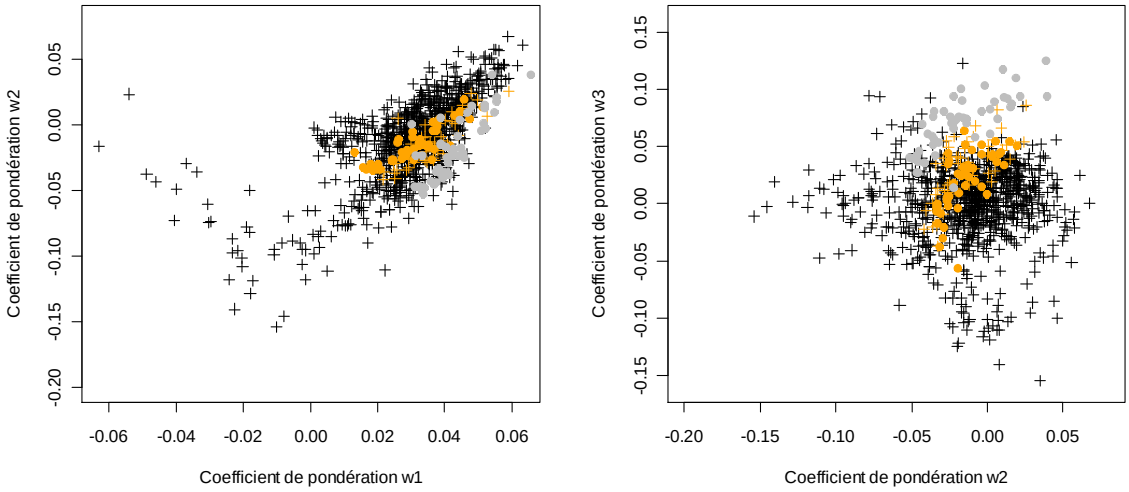


Figure 46 : Même qu'en Figure 45 mais avec EROS

Le changement climatique a pour effet de modifier la position des bassins versants (Figure 45, Figure 46). Nous notons ainsi un mouvement d'ensemble des points dans les différents plan de projection (w_1 , w_2) et (w_2 , w_3), ce qui témoigne d'une forte cohérence régionale. Les valeurs w_1 et w_3 ont tendance à augmenter tandis que les valeurs w_2 ont tendance à diminuer. Notons

également des sensibilités des modèles hydrologiques différentes : avec CLSM le nuage est plus dispersé qu'avec EROS.

L'évolution de w_1 peut être interprétée comme le signe d'un régime plus contrasté. Les changements attendus sur les deux autres coordonnées w_2 et w_3 témoignent d'une déformation du pattern actuel avec un glissement du cœur des hautes eaux vers le printemps : w_3 diminue (signe d'une réduction relative des écoulements d'automne et d'une perte du caractère « cévenole ») tandis que w_2 augmente (signe d'une augmentation relative des écoulements d'automne sans que cela imputable à la neige). Au delà de l'analyse quantifiée des évolutions des coordonnées, il paraît important de souligner que les bassins dans le futur se situent dans des secteurs de l'espace de projection actuellement non couvert par les régimes hydrologiques français. Les gestionnaires se trouveraient dans un contexte de gestion inédit (absence de référence connue en France à ce jour).

3.2.1.3 Le Base Flow Index BFI

Forcés par les sorties de GCM désagrégés en temps présent, les deux modèles hydrologiques proposent des valeurs de *BFI* légèrement supérieures à celles obtenues avec Safran de manière quasi systématique. Ceci serait dû à une variabilité hydrologique simulée moindre que celle présente dans les observations, et moindre que celle présente dans les débits simulés avec Safran.

Les deux modèles hydrologiques proposent des évolutions très différentes du *BFI* : le *BFI* peut chuter fortement au cours du XXIème siècle selon CLSM (cf. le Cher à Savonnières en fin de siècle en Figure 47) tandis qu'il reste stable selon EROS (évolution inférieure à 10%). CLSM suggère un fonctionnement hydrologique des bassins versants parfois très différent de celui observé actuellement. Il n'y aurait qu'une part réduite de contributions de stockage (ici d'origine souterraine) aux écoulements de surface.

Globalement, nous observons une dispersion multi-runs plus faible que celle imputable au choix du GCM en temps présent comme dans le futur : les points en gris sont plus regroupés que leurs homologues en noir.

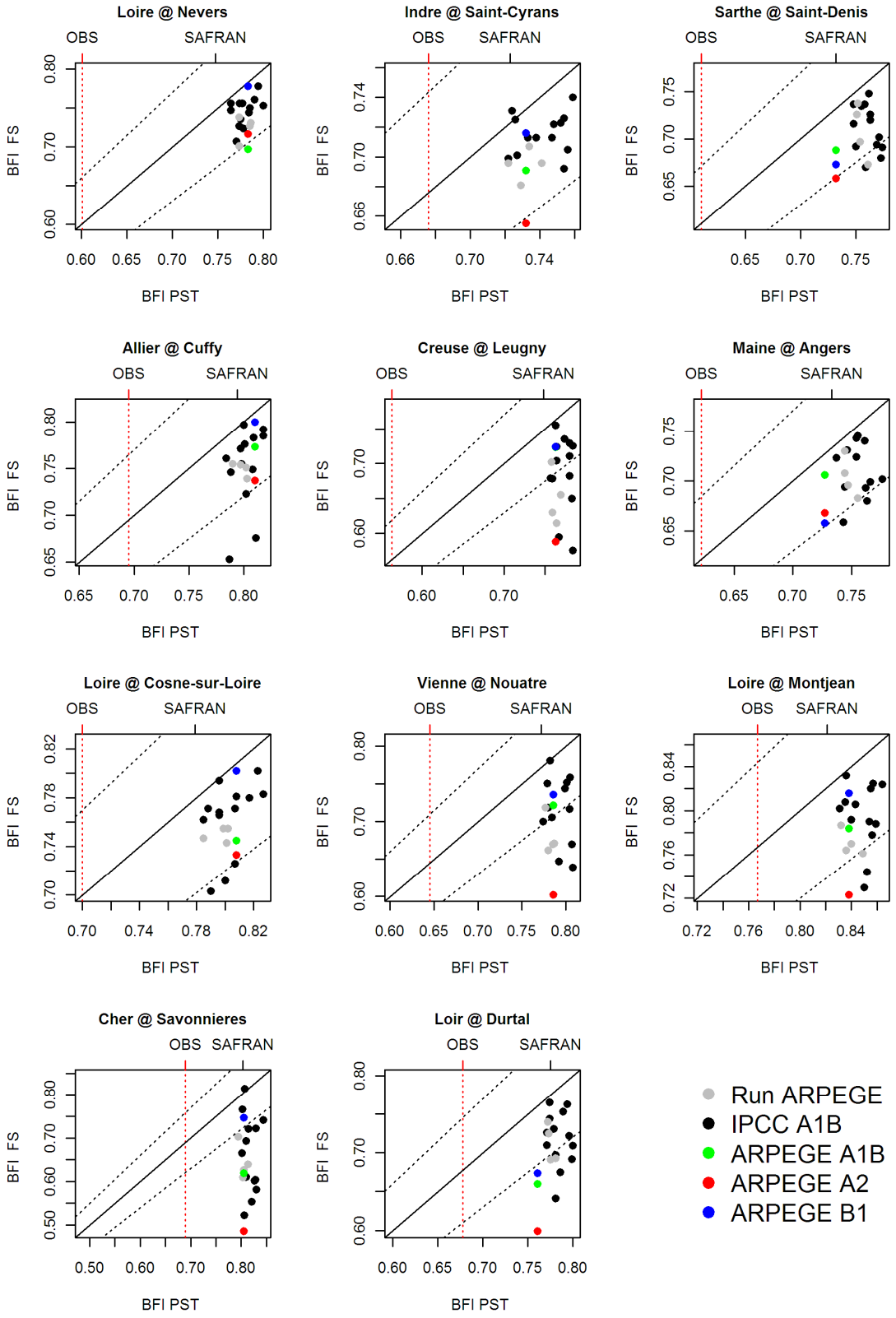


Figure 47 : Evolution de BFI en fin de siècle selon CLSM

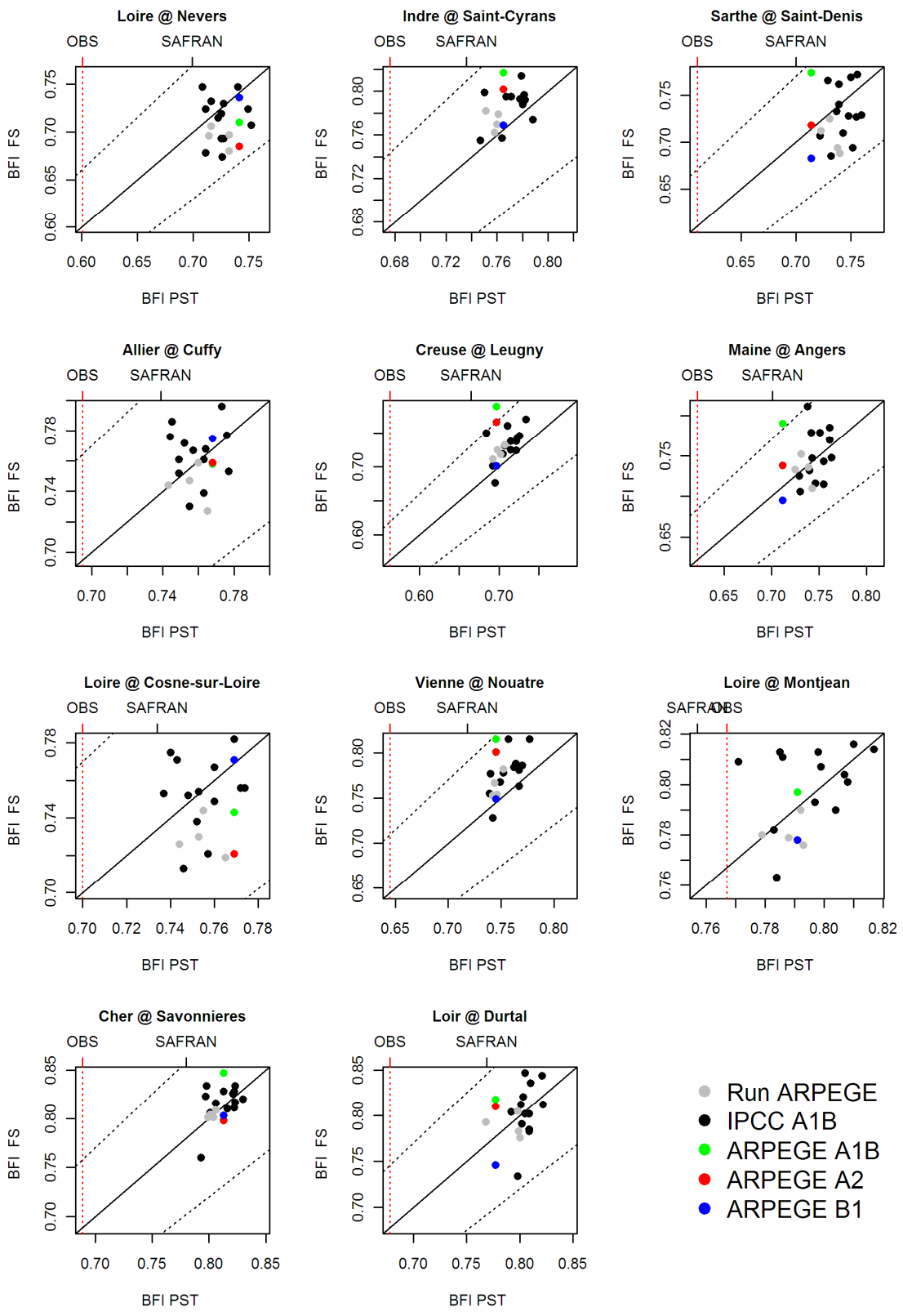


Figure 48 : Evolution de BFI en fin de siècle selon EROS

3.2.2 Les variables de hautes eaux

3.2.2.1 La saisonnalité des événements extrêmes

En temps présent, un léger biais apparaît sur les sorties de CLSM. Les événements extrêmes se positionnent un peu plus tard dans la saison que souhaité : les flèches ont tendance à s'écarter des flèches de référence en orange relatives aux observations et à Safran. Néanmoins les aspects saisonniers semblent bien reproduits : le caractère saisonnier quand il est manifeste dans les observations est restitué dans les débits simulés avec Safran ou avec les forçages temps présent. L'adéquation est meilleure avec EROS. Sous climat futur, les graphiques suggèrent un petit décalage de la saison des crues. Il serait de trois mois au maximum pour la Loire à Cosne-sur-Loire avec CLSM. Pour ce cours d'eau, les événements les plus forts initialement concentrés autour de février seraient observés en fin de siècle autour du mois de mai.

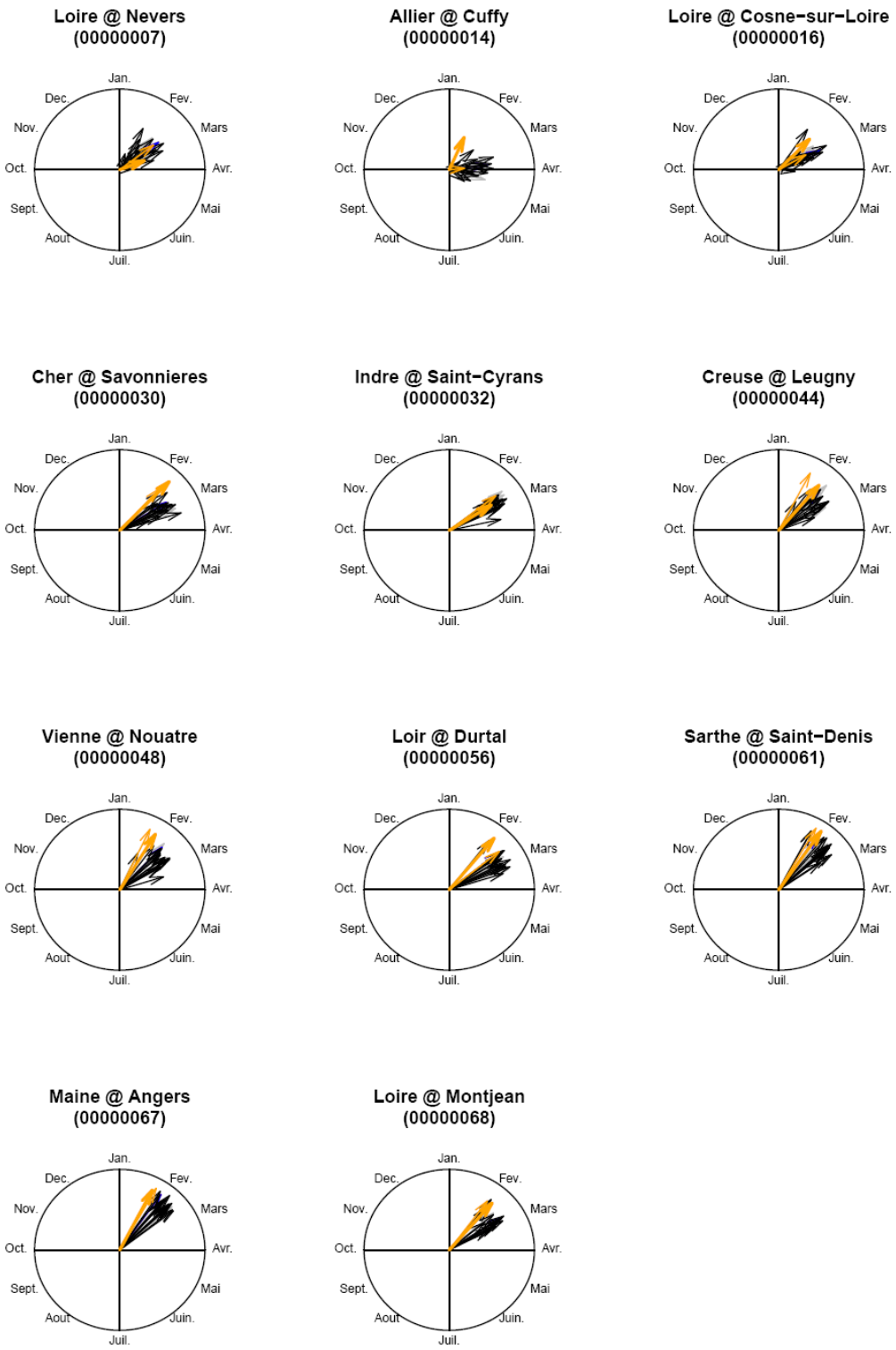


Figure 49 : Saisonnalité en temps présent selon CLSM

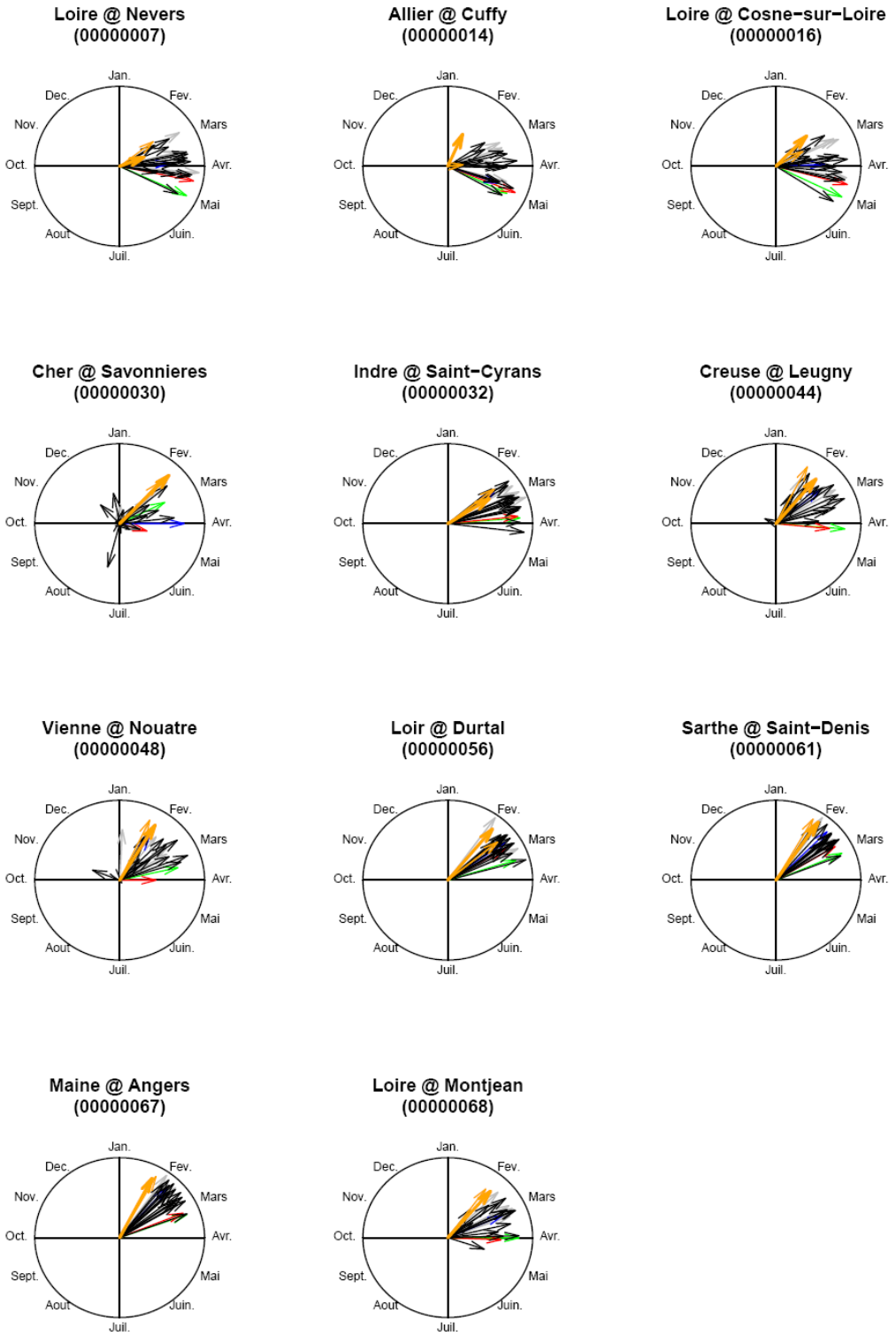


Figure 50 : Saisonnalité en fin de siècle selon CLSM

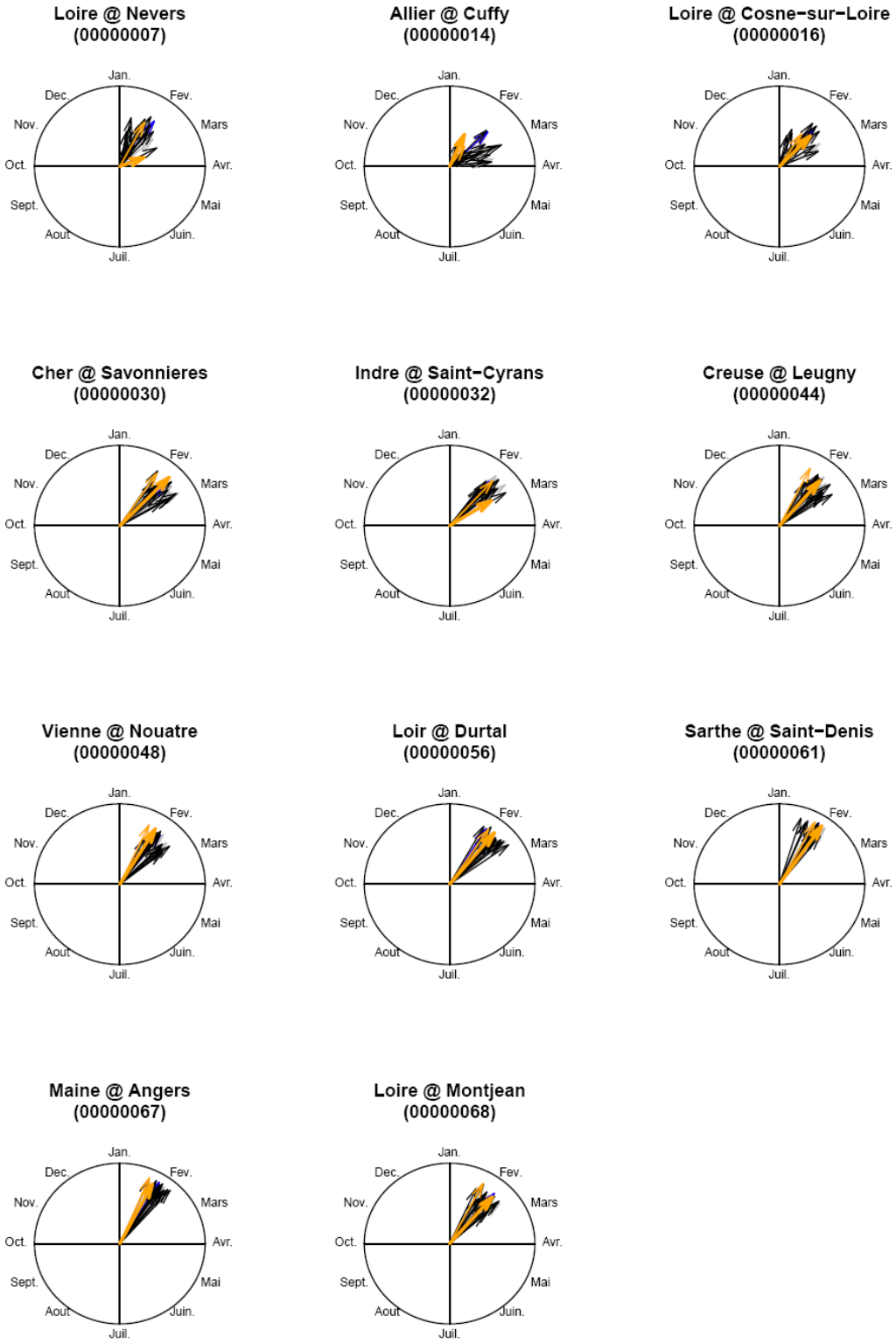


Figure 51 : Saisonnalité en temps présent selon EROS

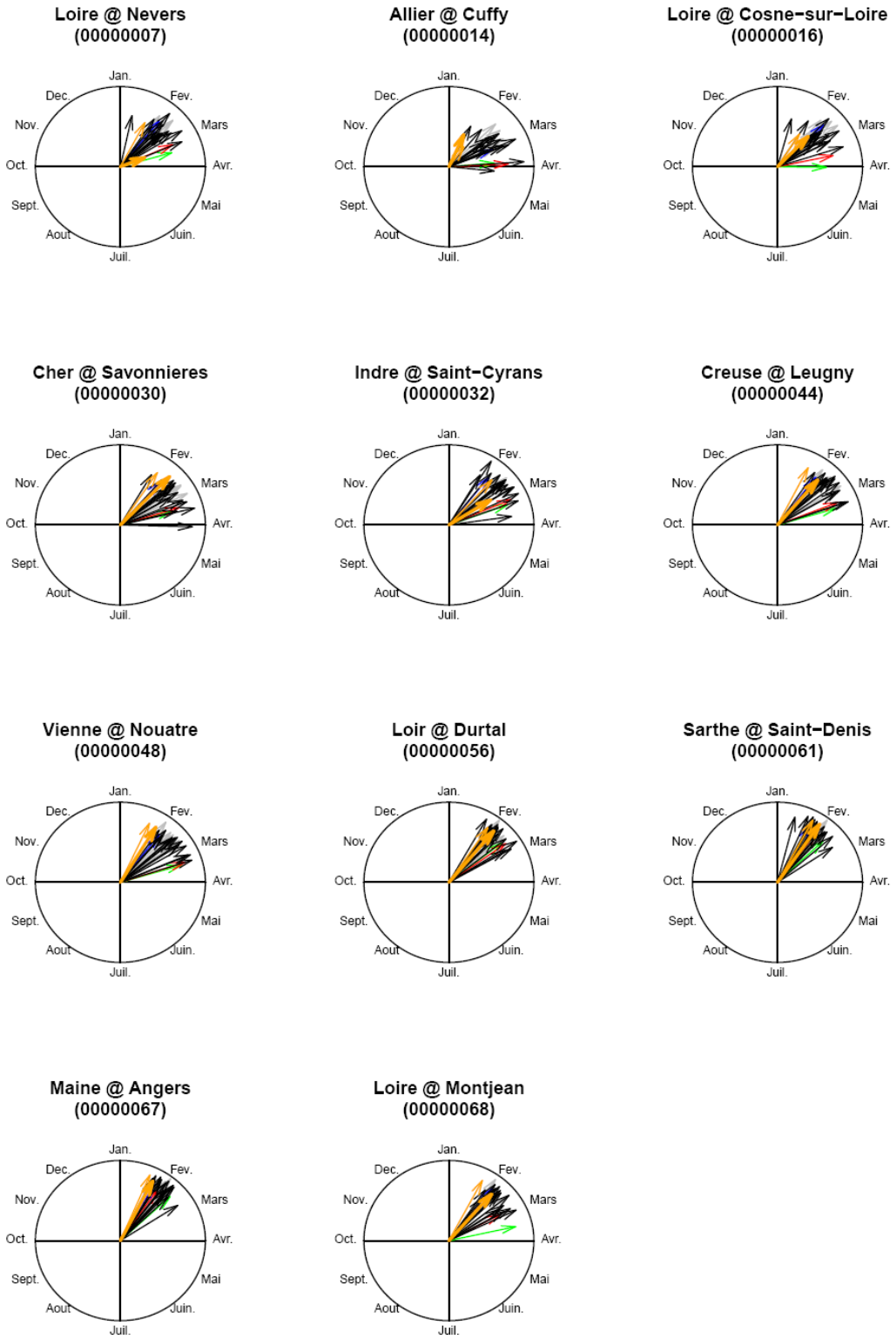


Figure 52 : Saisonnalité en fin de siècle selon EROS

3.2.2.2 Le débit journalier décennal QJXA10

Les graphiques montrent un biais systématique de la chaîne de modélisation en temps présent. Les valeurs de *QJXA*10 simulés sont plus faibles que celles obtenues avec Safran et que les quantiles extraits des débits observés.

Il n'y a pas de tendance partagée sur l'évolution du *QJXA*10. La dispersion des nuages est parfois forte et des points se situent de part et d'autre de la bissectrice.

Le Tableau 9 précise les valeurs moyennes et les écarts-types des anomalies, exprimées en % par rapport aux quantiles estimés en temps présent. On peut noter que CLSM propose des changements plus profonds avec des gammes de valeur très étendues, peut-être aberrantes (cf. Vienne à Nouâtre, la Creuse à Leugny et le Cher à Savonnières quel que soit l'horizon), beaucoup plus étendues que ceux obtenus avec EROS. Les évolutions annoncées par EROS sont plus cohérentes, en fin de siècle les moyennes des anomalies sont négatives. Cependant les écarts-types sont du même ordre de grandeur. La dispersion des résultats est telle qu'il n'est pas possible de conclure de manière définitive sur l'évolution du *QJXA*10.

	CLSM				EROS			
	Anomalie QJXA10 MS		Anomalie QJXA10 FS		Anomalie QJXA10 MS		Anomalie QJXA10 FS	
Station	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
La Loire à Nevers 7	-14.5	13.4	-24.6	21.5	5.4	11.2	-10.1	22.8
L'Allier à Cuffy 14	-6.6	23.9	8.2	37.8	-4.3	19	-20.1	18.2
La Loire à Cosne-sur-Loire 16	-14.9	12.2	-25	18.9	1.3	13.5	-14.2	19.8
Le Cher à Savonnieres 30	28.2	39.1	84.1	82.9	-5.7	17.4	-22	20.9
L'Indre à Saint-Cyrans 32	-22.2	14.7	-35.2	20	-6.3	17	-23.1	25.6
La Creuse à Leugny 44	64.7	89	138.3	104	-3.6	18.8	-23.8	20.2
La Vienne à Nouatre 48	18.4	45.6	38.4	38.4	-3.2	18.9	-21.5	19.7
Le Loir à Durtal 56	-14.7	19.4	-17.5	26.8	-2.2	29.8	-8.9	38.2
La Sarthe à Saint-Denis 61	-5.3	19.1	-2.6	26.2	4.3	31.4	3.7	38.1
Le Maine à Angers 67	-11	18.7	-15.5	23.3	-1.4	28.5	-6	33.3
La Loire à Montjean 68	-15.5	11.3	-26	15.2	-2.8	15.5	-18.7	20.6

Tableau 9 : Changements de QJXA10 exprimés en %

(statistiques multi-GCMs sous scénario A1B)

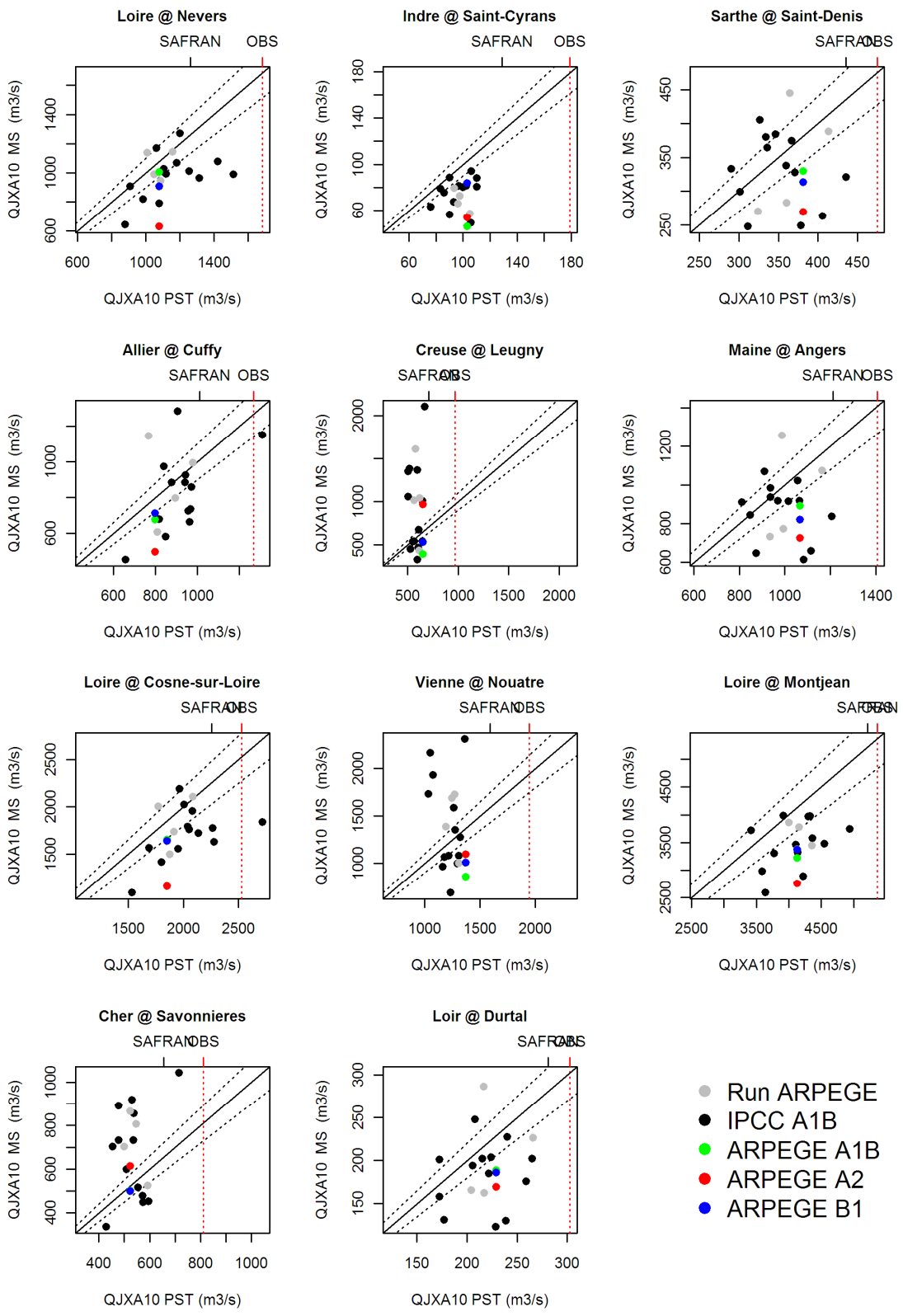


Figure 53 : Evolution de QJXA10 en milieu de siècle selon CLSM

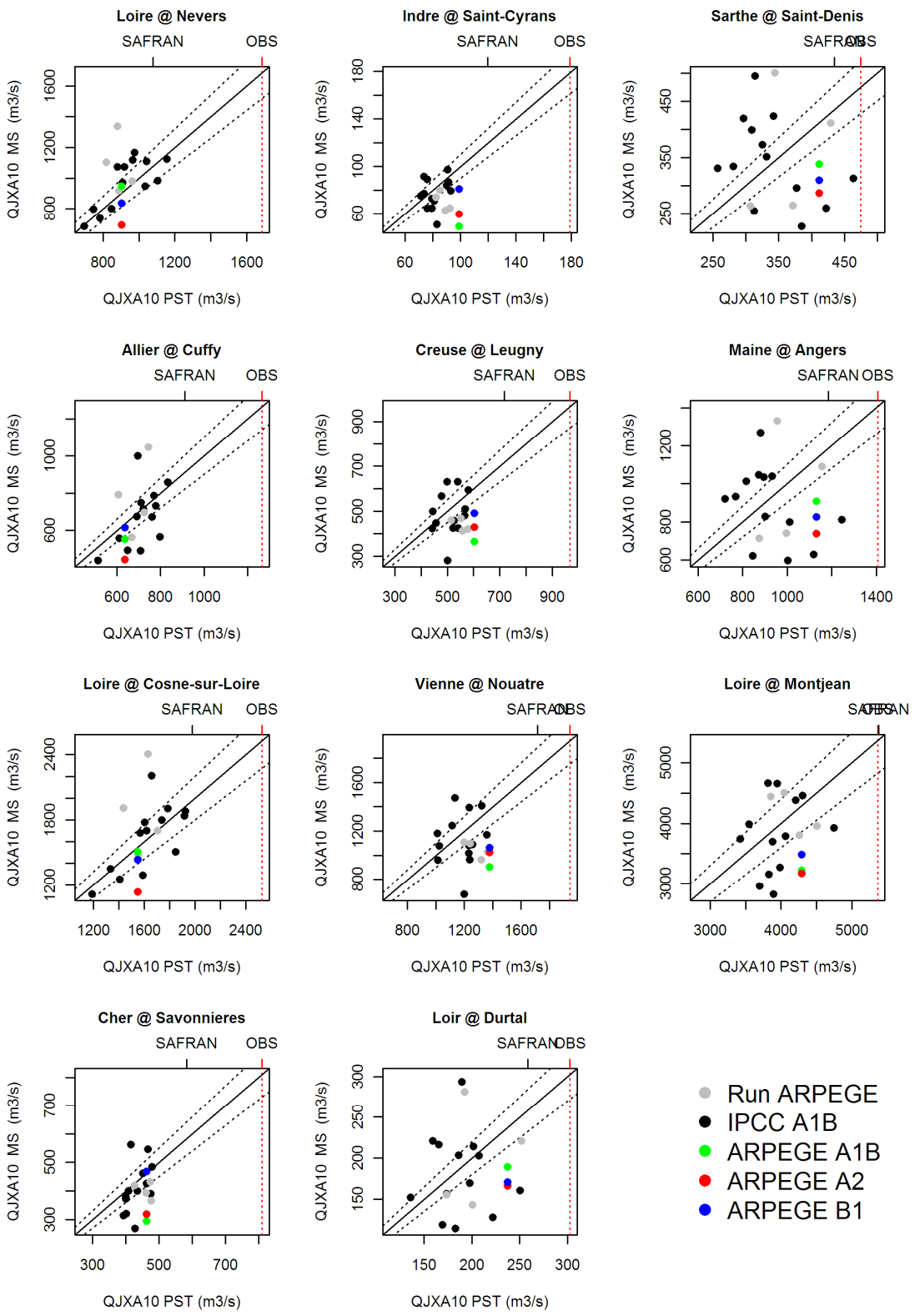


Figure 54 : Evolution de QJXA10 en milieu de siècle selon EROS

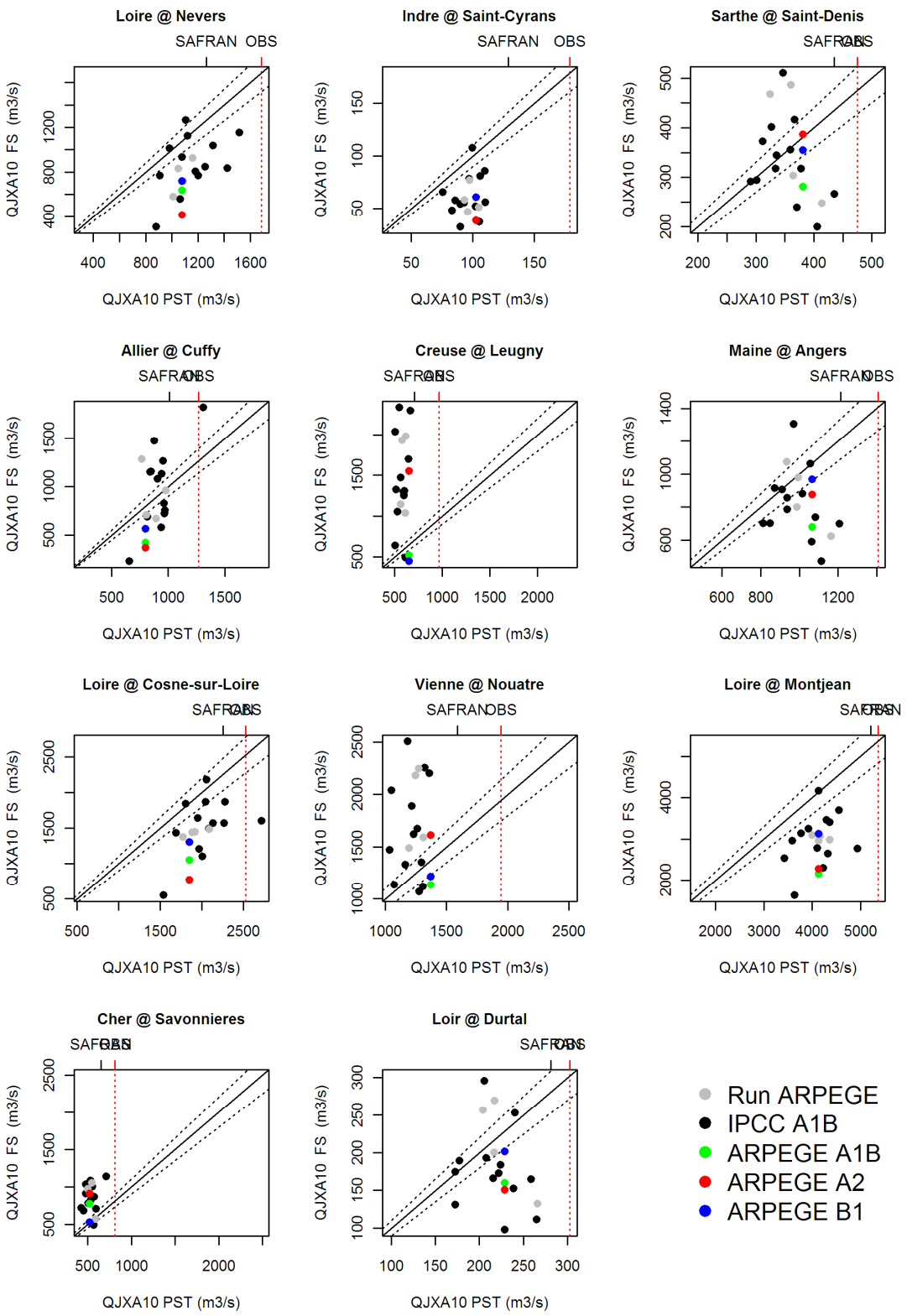


Figure 55 : Evolution de QJXA10 en fin de siècle selon CLSM

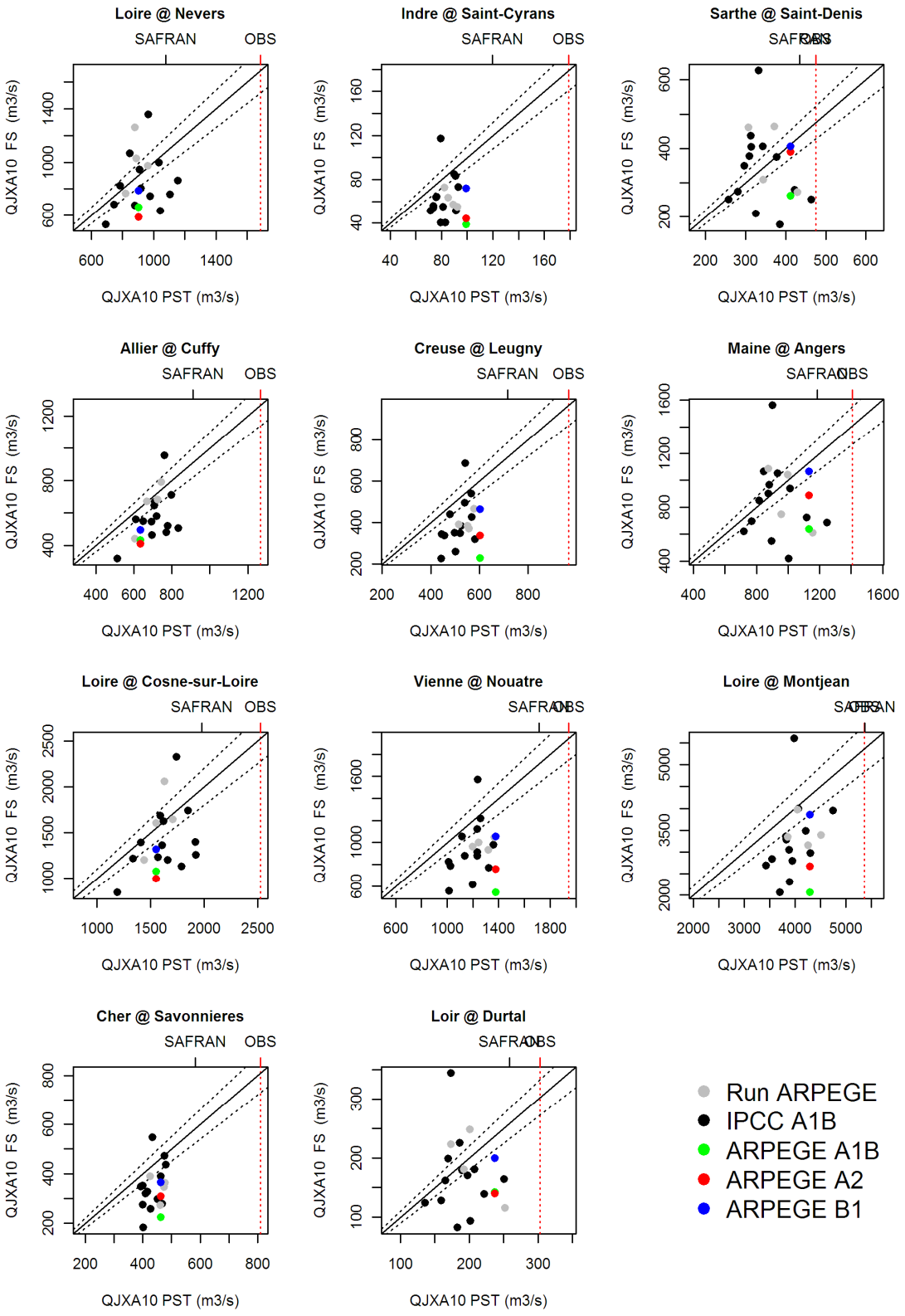


Figure 56 : Evolution de QJXA10 en fin de siècle selon EROS

3.2.2.3 Le quantile Q10 de la courbe des débits classés

La première remarque concerne les biais de la chaîne de simulation. Nous notons l'absence de biais systématique dans les simulations avec les réalisations du climat temps présent (la dispersion des valeurs est faible en projection sur l'axe des abscisses).

Contrairement aux résultats obtenus pour le *QJXA*10, une tendance à la diminution est partagée par les deux modèles. Elle semble significative en fin de siècle (majorité des points sous la droite enveloppe). Sur l'ensemble de 47 stations de référence et les 14 projections A1B, les moyennes des anomalies annoncées par CLSM et EROS sont respectivement de –42.5% et de –28.2% et l'intensité des changements reste inférieure à l'écart-type ce qui assure une certaine significativité des tendances à la baisse (16.7% pour CLSM et 17.1% pour EROS). Les statistiques descriptives des changements sont données dans le Tableau 10.

Le débit de référence *Q*10 est une valeur de hautes eaux dépassée 10% du temps, cependant moins extrême que le *QJXA*10, généralement dépassé moins de 1% du temps et parfois même jamais atteint dans les observations. Cette différence de représentativité statistique (l'une dans les valeurs observables, l'autre plutôt dans les statistiques extrapolées) explique des sensibilités distinctes au changement climatique. Les évolutions du *Q*10 sont plutôt à rapprocher de celles identifiées sur le module (qui se situe dans la gamme de valeurs [*Q*25 ; *Q*35]).

	CLSM				EROS			
	Anomalie *Q*10 MS		Anomalie *Q*10 FS		Anomalie *Q*10 MS		Anomalie *Q*10 FS	
Station	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
La Loire à Nevers 7	-27.6	10.3	-45.9	18.1	-12.9	10.1	-24.7	14.9
L'Allier à Cuffy 14	-28.9	8.5	-46.8	16.8	-15.8	9.3	-28.2	15.1
La Loire à Cosne-sur-Loire 16	-28.1	9.1	-46.1	17.3	-13.9	9.7	-26.1	14.5
Le Cher à Savonnieres 30	-37.2	8.7	-48.6	15.8	-22.5	13.8	-33.5	17.3
L'Indre à Saint-Cyrans 32	-37.5	11.2	-49.2	17.8	-21.7	15.6	-31.7	17.9
La Creuse à Leugny 44	-32.9	10.7	-44.1	14.8	-22.6	15.6	-35	17.2
La Vienne à Nouatre 48	-29.9	10.5	-40.8	14.7	-19.6	15.2	-31.9	16.8
Le Loir à Durtal 56	-37.2	13.5	-45.4	17.8	-20.4	17.3	-29.3	19.1
La Sarthe à Saint-Denis 61	-26.8	12.2	-34.3	15.6	-14.7	15.9	-22.7	17.8
Le Maine à Angers 67	-28.4	12.5	-37	16.1	-16.7	16.1	-24.5	17.3
La Loire à Montjean 68	-30.2	9.3	-43.2	15.1	-16.5	12.5	-27.5	15.4

Tableau 10 : Changements de Q10 exprimés en %

(statistiques multi-GCMs sous scénario A1B)

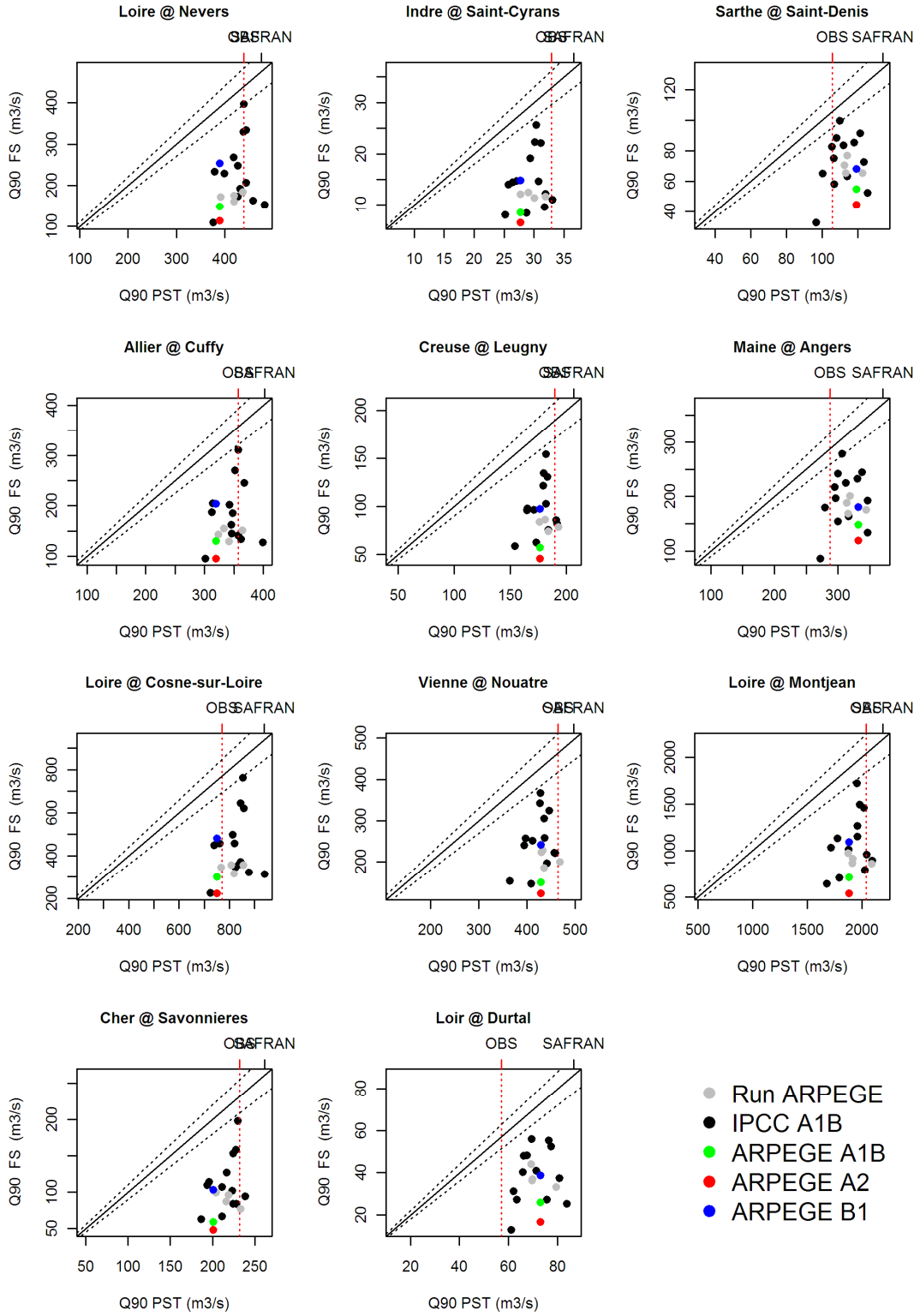


Figure 57 : Evolution de Q10 en fin de siècle selon CLSM

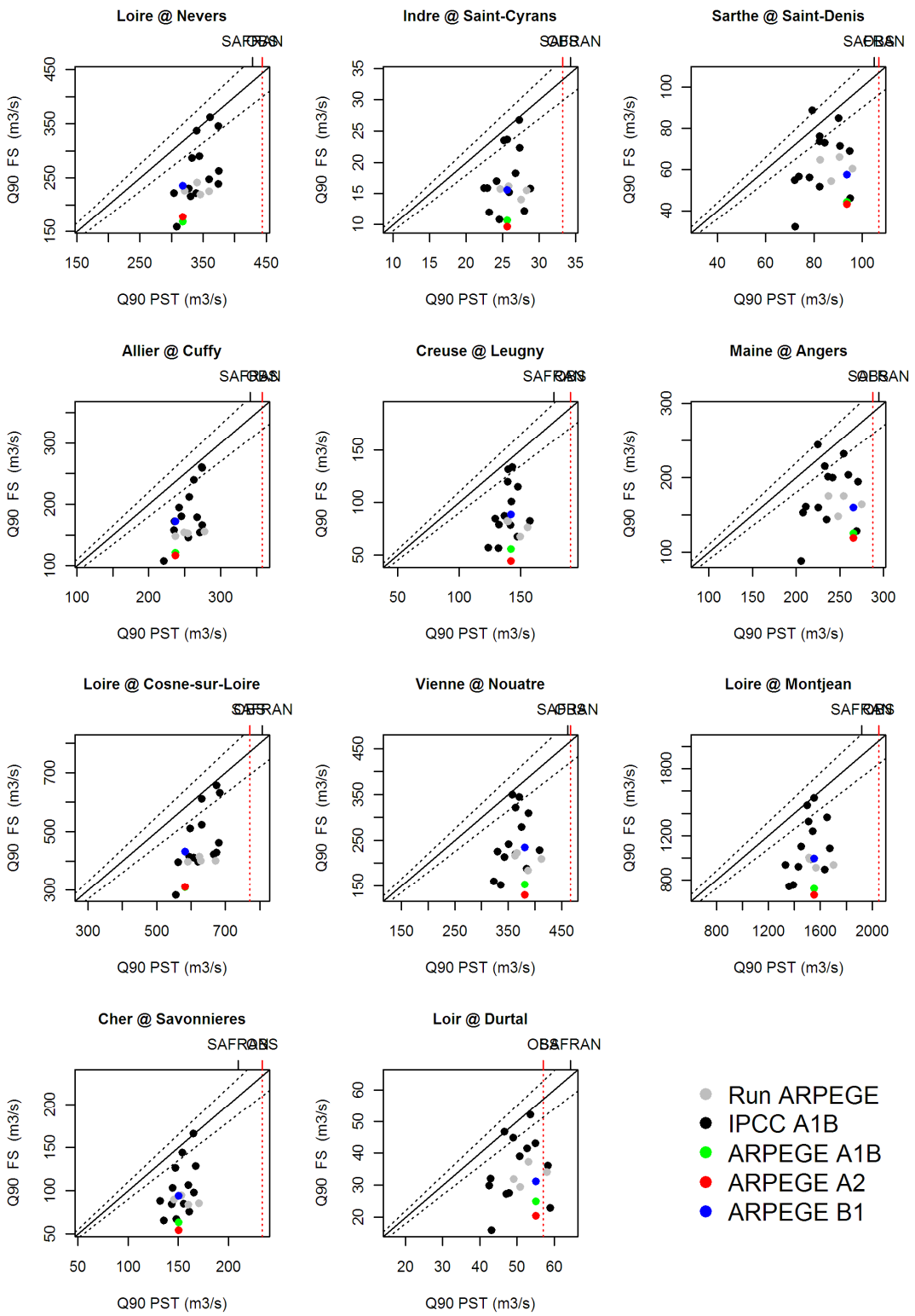


Figure 58 : Evolution de Q10 en fin de siècle selon EROS

3.2.2.4 La dynamique de crue D

La variable *D* est la variable la moins bien modélisée parmi celles choisies pour décrire les évolutions du régime hydrologique. Seul l'ordre de grandeur est garanti par la chaîne de modélisation alimentée par les forçages temps présent. Cette dispersion en temps présent persiste aux différents horizons. Les nuages sont fortement dispersés sur les deux axes des graphiques et s'organisent bien souvent autour de la première bissectrice. En fin de siècle, la moyenne multi-GCMs des anomalies est de 3.7% pour EROS contre -21.2% pour CLSM pour et l'écart-type multi-GCMs est respectivement de 25.3% pour EROS et de 23.7% pour CLSM.

Sous changement climatique, l'absence de soutien des écoulements simulé par CLSM identifiée sur le *BFI* a pour effet une diminution de la phase de récession en crue, ce qui expliquerait la tendance à la diminution des durées des crues. Néanmoins, les tendances sur *D* sont à relativiser étant donnée la forte dispersion des nuages.

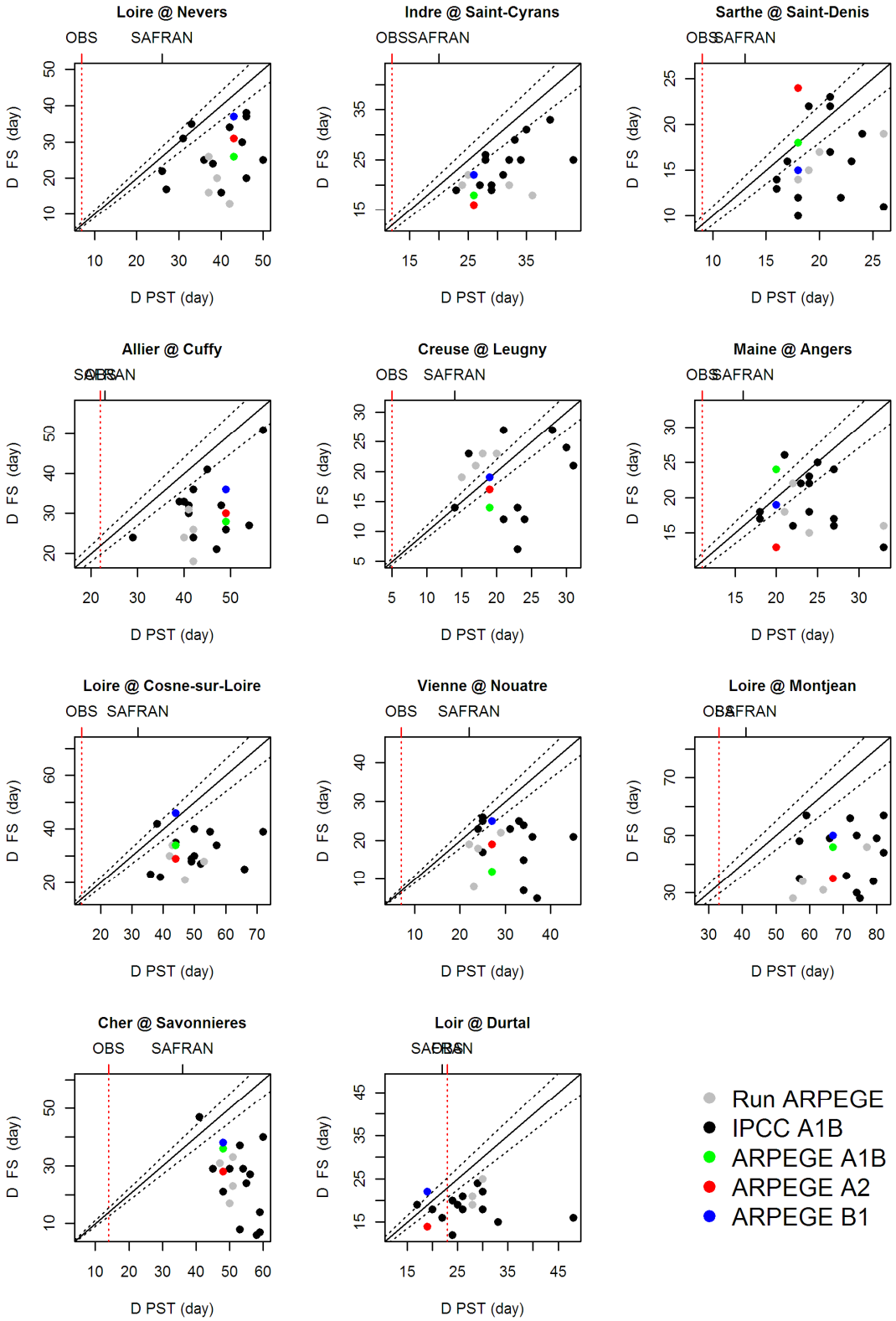


Figure 59 : Evolution de D en fin de siècle selon CLSM

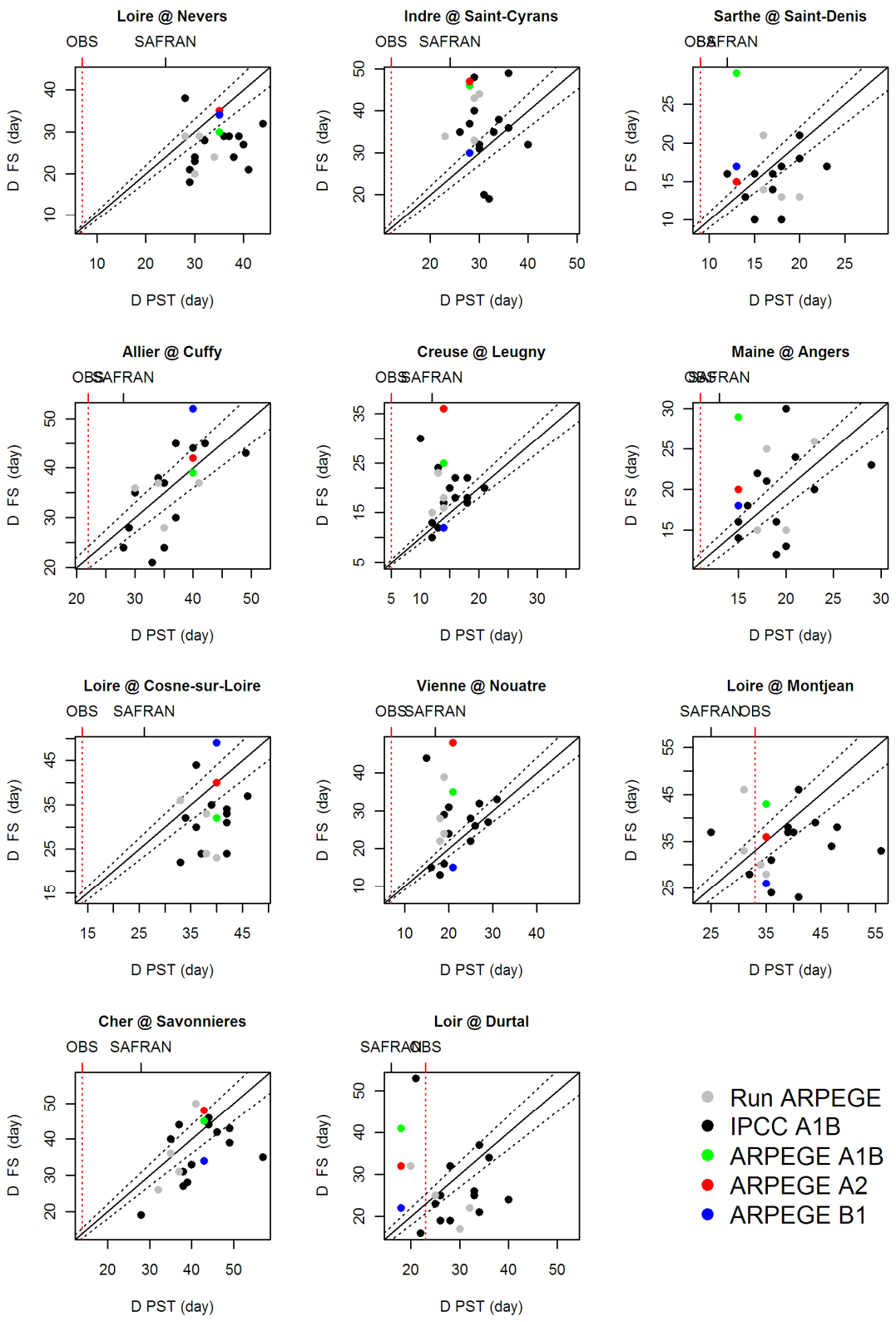


Figure 60 : Evolution de D en fin de siècle selon EROS

3.2.3 Les variables de basses eaux

3.2.3.1 Le débit mensuel minimal annuel de fréquence quinquennale sèche QMNA5

Sous forçages temps présent, EROS et CLSM fournissent des résultats équivalents à ceux obtenus avec la base Safran. Il n'y a pas de biais supplémentaire induit par la représentation du climat en temps présent. Nous retrouvons donc des points projetés sur l'axe des abscisses autour de la valeur SAF.

Les tendances relatives au *QMNA*5 sont partagées par les deux modèles hydrologiques. Les points à quelques exceptions près se situent sous la droite enveloppe quel que soit l'horizon (diminution supérieure à 10%). En milieu de siècle, le *QMNA*5 pourrait diminuer en moyenne de -33.9% selon EROS (statistique multi-GCMs sous scénario A1B). CLSM fournit des résultats plus extrêmes : la réduction serait de l'ordre de -66.7%. Cette réduction est d'un ordre de grandeur supérieure à la dispersion des anomalies (11.9% pour EROS, 13.3% pour CLSM, statistique multi-GCMs), ce qui lui confère un caractère robuste. Les diminutions se confirment et s'accentuent en fin de siècle pour atteindre en moyenne –76% pour CLSM et –47.4% pour EROS avec une dispersion équivalente pour les deux modèles (écart-type multi-GCMs sous scénario A1B proche de 15%).

Le Tableau 11 fait état des changements pour les onze stations.

	CLSM				EROS			
	Anomalie *QMNA*5 MS		Anomalie *QMNA*5 FS		Anomalie *QMNA*5 MS		Anomalie *QMNA*5 FS	
Station	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
La Loire à Nevers 7	-69.4	13.9	-81	15.1	-39.5	13.6	-50.2	16.6
L'Allier à Cuffy 14	-68.9	14.3	-78.7	16.3	-41.9	15.8	-53.1	21
La Loire à Cosne-sur-Loire 16	-68.6	14.3	-79.3	16	-41.2	14	-52.5	18
Le Cher à Savonnieres 30	-53.8	10.6	-63.7	14.7	-30.8	9.2	-47.1	15.2
L'Indre à Saint-Cyrans 32	-67	11.7	-74.2	11.3	-48.1	15.3	-64.8	12.8
La Creuse à Leugny 44	-80.6	7.7	-87.1	7.8	-28.5	7.2	-44	11.8
La Vienne à Nouatre 48	-70.2	9.2	-79.6	11.4	-27.7	7.1	-43.2	11.7
Le Loir à Durtal 56	-54.9	15.6	-60.4	20.7	-22.8	8.9	-32.9	13.7
La Sarthe à Saint-Denis 61	-53.9	14.2	-64.3	18.8	-27.2	8.2	-40.1	15
Le Maine à Angers 67	-55	13.2	-62.1	18.9	-25.5	7.1	-37.2	13.7
La Loire à Montjean 68	-61.4	10.1	-72.1	13.4	-31	8.5	-44.7	14.9

Tableau 11 : Changements de QMNA5 exprimés en %

(statistiques multi-GCMs sous scénario A1B).

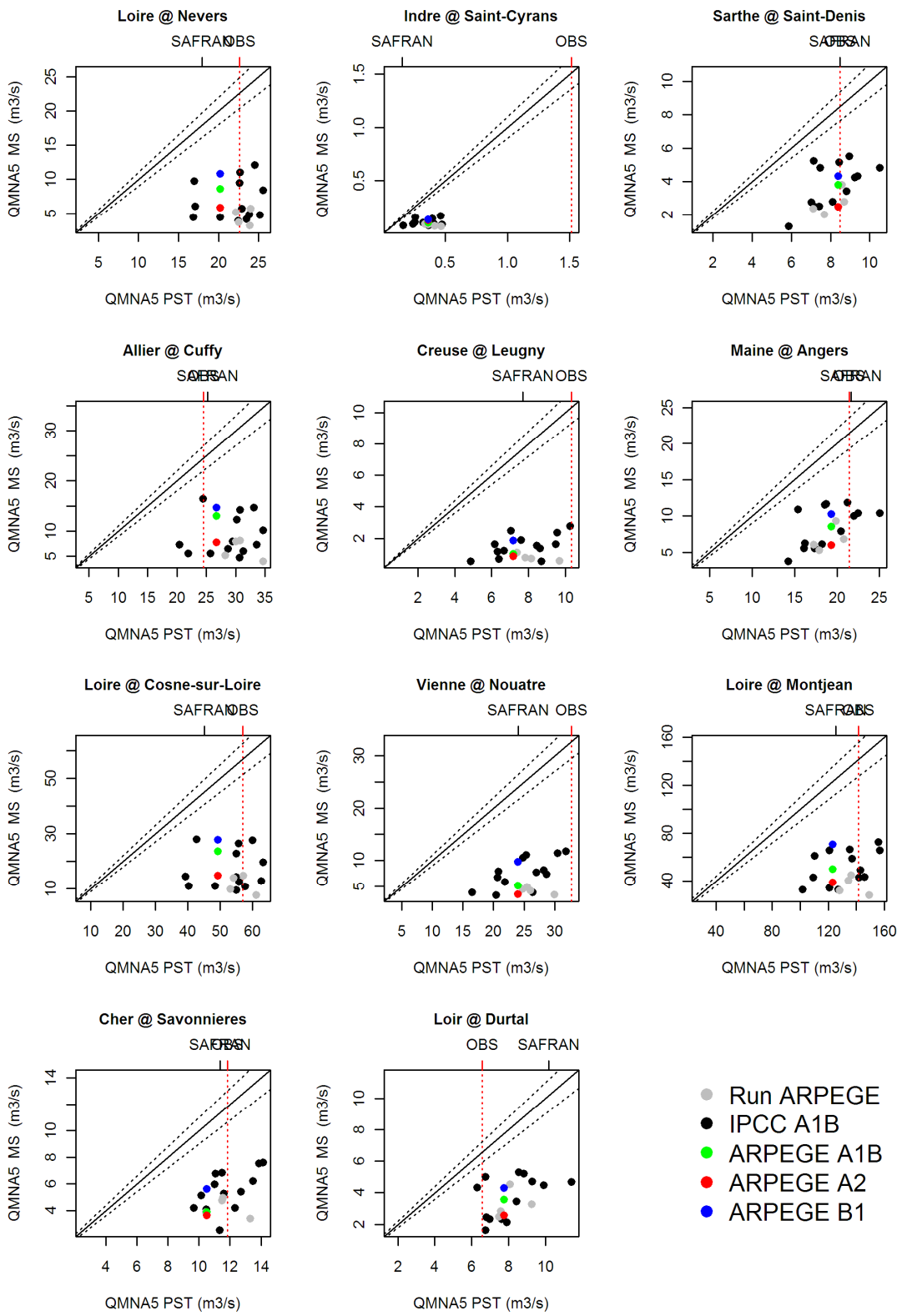


Figure 61 : Evolution de QMNA5 en milieu de siècle selon CLSM

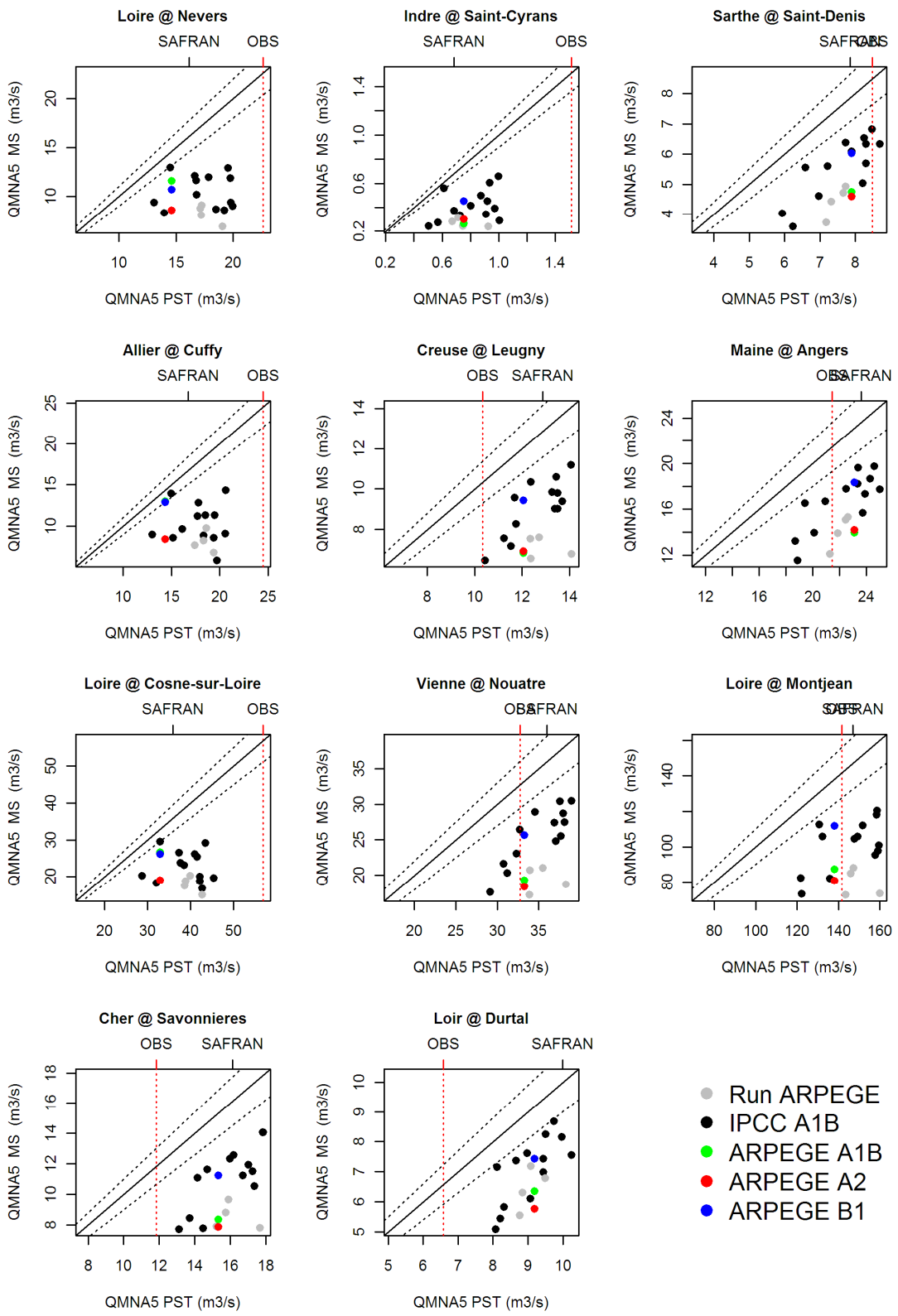


Figure 62 : Evolution de QMNA5 en milieu de siècle selon EROS

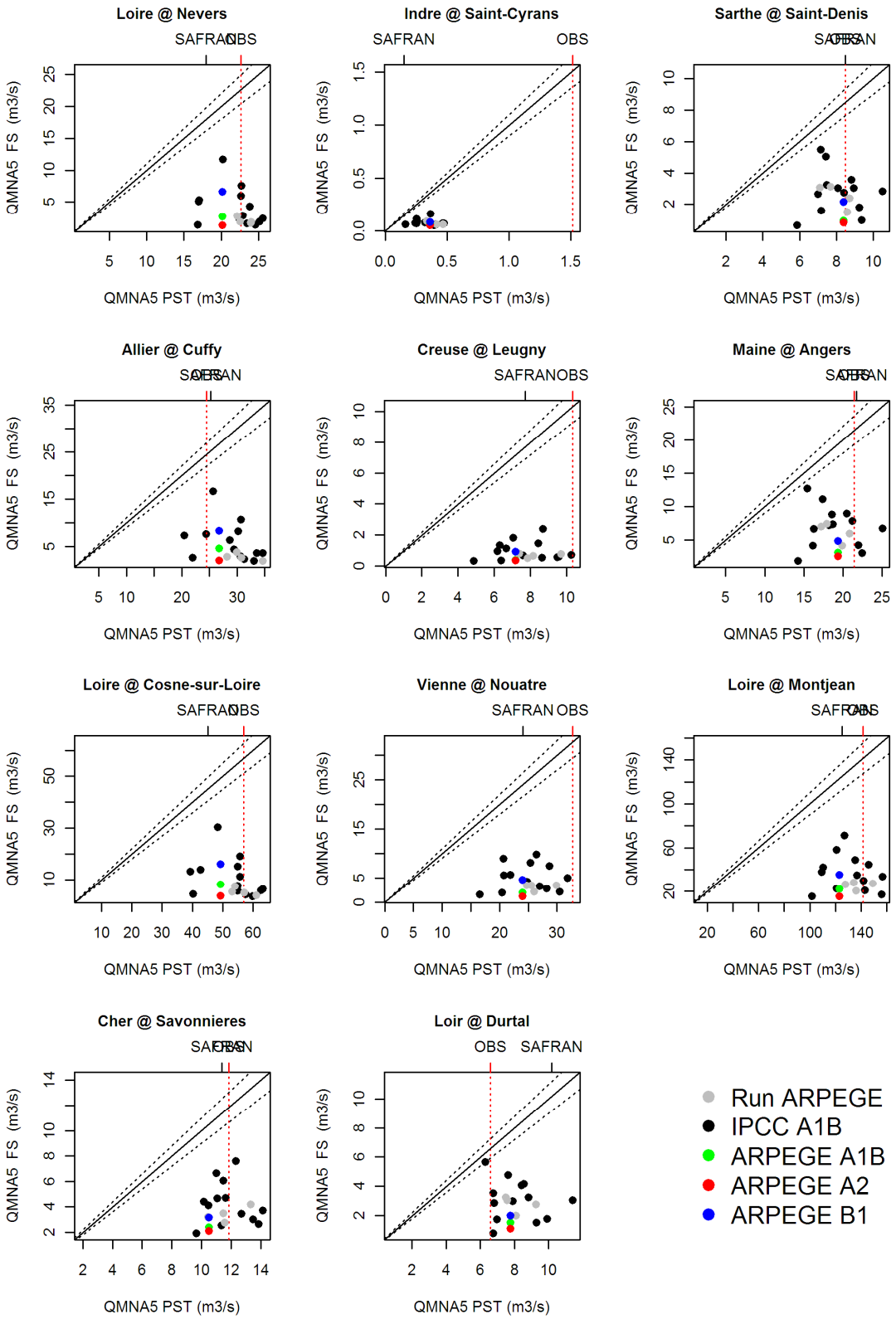


Figure 63 : Evolution de QMNA5 en fin de siècle selon CLSM

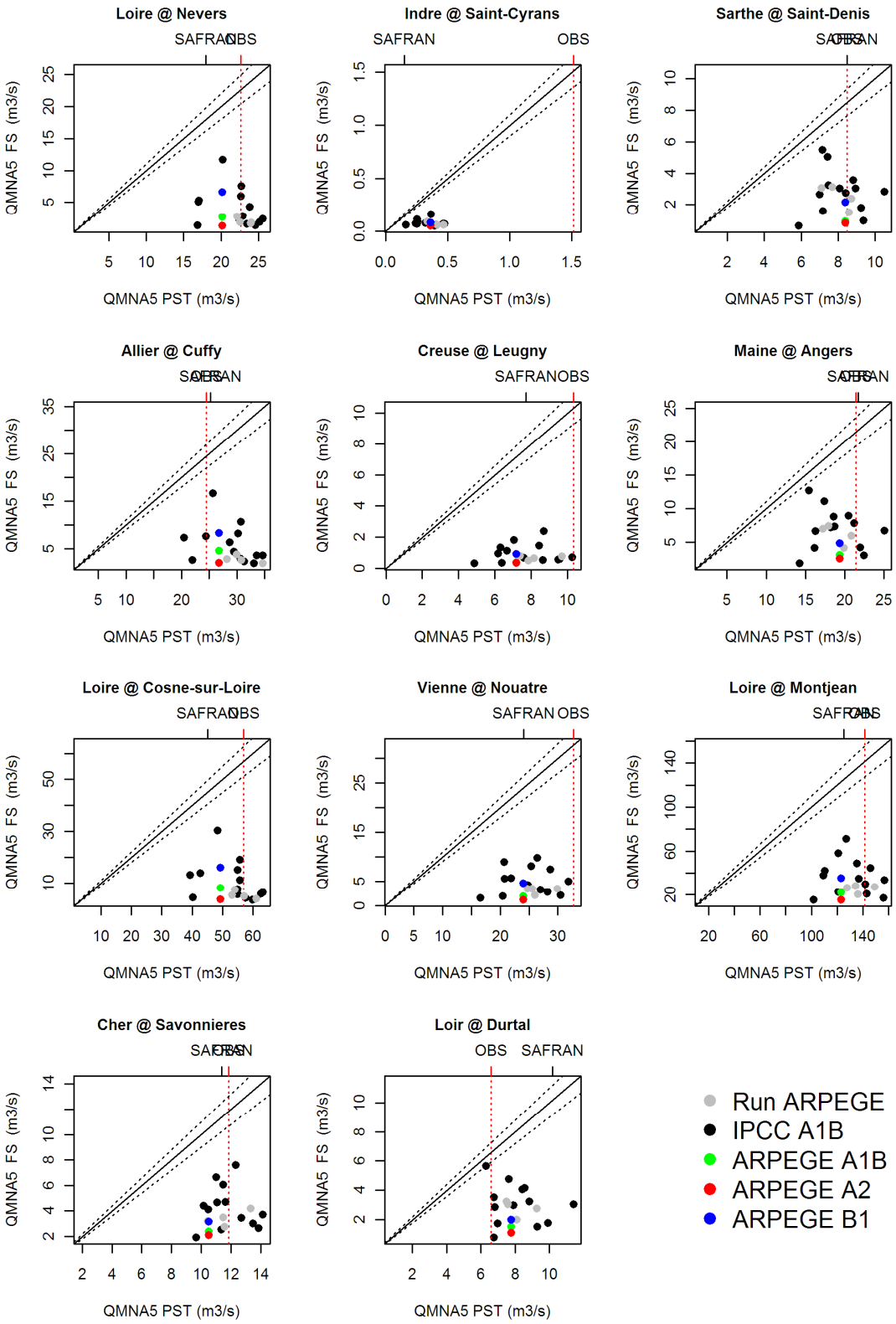


Figure 64 : Evolution de QMNA5 en fin de siècle selon EROS

3.2.3.2 Le quantile Q90 de la courbe des débits classés

L'examen des courbes des débits classés montre que cette variable est proche de *QMNA*5 (sur les 47 chroniques d'observations aux différentes stations, le *QMNA*5 évolue entre *Q*98 et *Q*93). Nous retrouvons des évolutions comparables à celles annoncées sur le *QMNA*5dans les graphiques et tableau suivants.

La gamme des évolutions possibles du *Q90* est quasiment la même que celle identifiée sur le *QMNA*5 : une moyenne de -79.2% (resp. un écart-type de 14.4%) pour CLSM et de -48.2% (resp. un écart-type de 14%) pour EROS en fin de siècle (statistiques multi-GCMs sous scénario A1B). CLSM propose une vision plus pessimiste qu'EROS avec une réduction extrême de cette variable d'étiage.

	CLSM				EROS			
	Anomalie *Q*90 MS		Anomalie *Q*90 FS		Anomalie *Q*90 MS		Anomalie *Q*90 FS	
Station	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
La Loire à Nevers 7	-67.5	13.7	-81.4	15.6	-44	12.5	-55.2	15
L'Allier à Cuffy 14	-64.1	18.7	-79	17.4	-41.9	12	-53.6	17.1
La Loire à Cosne-sur-Loire 16	-65.3	15.7	-79.4	16.5	-43.3	12	-55.2	15.4
Le Cher à Savonnieres 30	-55	9.8	-66.2	14	-32.4	10.7	-47.8	13.8
L'Indre à Saint-Cyrans 32	-82.4	7.1	-88.4	6.5	-47.9	13.1	-63.3	12
La Creuse à Leugny 44	-79.3	8.9	-88.6	8.4	-30.8	8.2	-45.4	11.2
La Vienne à Nouatre 48	-66.8	9.6	-80	11	-30.1	7.9	-44.1	11.6
Le Loir à Durtal 56	-54	15.1	-63.8	18.6	-24.3	9.5	-34.3	13.8
La Sarthe à Saint-Denis 61	-54.3	13.7	-65.9	18.8	-28.5	10.2	-40.4	14.2
Le Maine à Angers 67	-55.1	12.7	-65.6	17.6	-28	8.7	-38.3	13.9
La Loire à Montjean 68	-59.7	10.9	-73.2	14	-34.5	7.9	-47	12.9

Tableau 12 : Changements de Q90 exprimés en %

(statistiques multi-GCMs sous scénario A1B)

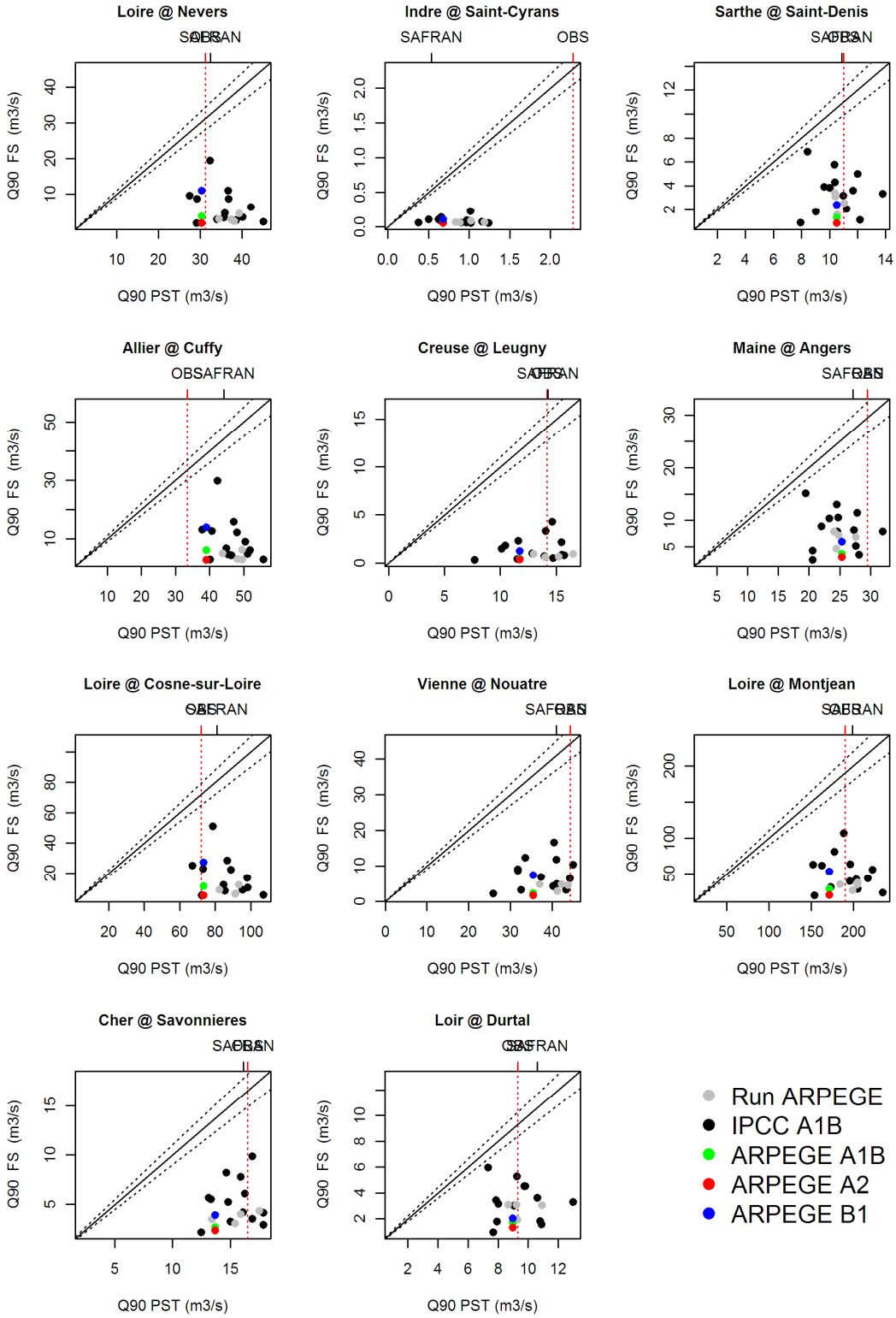


Figure 65 : Evolution de Q90 en fin de siècle selon CLSM

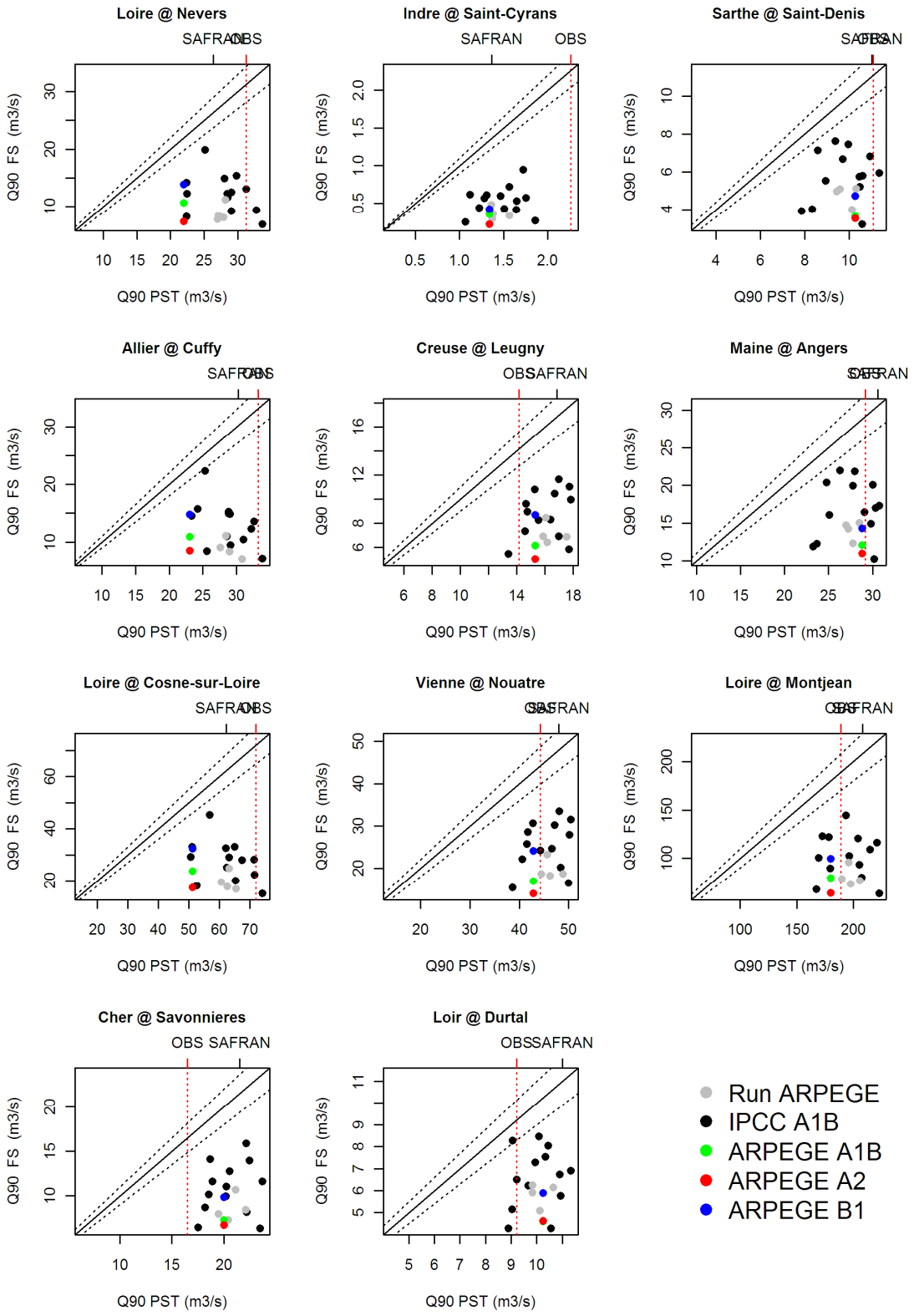


Figure 66 : Evolution de Q90 en fin de siècle selon EROS

3.2.3.3 *La fiabilité*

La fiabilité est calculée en considérant un seuil égal au *QMNA*5 du modèle hydrologique alimenté par les forçages temps présent. Le seuil est donc lié au couple modèle-GCM choisi. L'examen des valeurs de *F* en temps présent montre que le *QMNA*5 se situe, en moyenne, entre 91 et 97% du temps (statistiques calculées sur les 47 stations à partir des réalisations temps présent), gamme de valeurs recouvrante avec celle calculée sur les observations, *i.e.* [93 ; 98]%. C'est une variable qui présente peu de dispersion en temps présent.

L'analyse des étiages en termes de fiabilité montre que la durée des séquences de débits au-dessus du *QMNA*5 actuel (souvent pris par défaut comme seuil d'alerte sécheresse) diminue de manière significative au cours du XXIème siècle. En fin de siècle et avec les projections les plus extrêmes, le débit franchirait le seuil moins de 50% du temps sur certains bassins versants (ex. le Loir à Durtal pour les deux modèles en Figure 67 et en Figure 68). En supposant des modalités de gestion identique à celle en pratique ou vraisemblable actuellement, les crises à gérer aujourd'hui rare (*i.e.* 100-*F*% du temps) seraient plus fréquentes. CLSM comme sur les variables de débit, suggère un avenir plus inquiétant (anomalie moyenne multi-GCMs sous scénario A1B de –30.5% en fin de siècle contre –18.6% pour EROS).

	CLSM				EROS			
	Anomalie *F* MS		Anomalie *F* FS		Anomalie *F* MS		Anomalie *F* FS	
Station	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
La Loire à Nevers 7	-19.2	8.4	-32.7	14.3	-9.1	4.7	-15.1	7.5
L'Allier à Cuffy 14	-16.9	8.1	-30.5	15	-8.7	4.6	-15.2	8.7
La Loire à Cosne-sur-Loire 16	-18	8.2	-31	14.2	-9.1	4.5	-15.2	7.9
Le Cher à Savonnieres 30	-25.2	7.9	-35.7	14.1	-11.4	5.4	-23.8	12.3
L'Indre à Saint-Cyrans 32	-13.6	4.3	-23.4	9.8	-7.8	3.3	-15	7
La Creuse à Leugny 44	-22.1	5.8	-32.3	10.6	-12.2	5.1	-23.8	10.2
La Vienne à Nouatre 48	-21.1	5.6	-32.5	11.2	-10.4	4.3	-21.5	9.4
Le Loir à Durtal 56	-34.5	14.3	-45.7	21.4	-24.2	13.2	-35.7	20
La Sarthe à Saint-Denis 61	-21.7	8.5	-32.9	16	-10.2	5	-17.9	10.2
Le Maine à Angers 67	-23	8.8	-33.7	15.1	-12.4	5.7	-20.4	11.3
La Loire à Montjean 68	-20.4	6.5	-31.3	12.3	-11	4.3	-20.3	9.9

Tableau 13 : Changements de la fiabilité F exprimés en %[3]

(statistiques multi-GCMs sous scénario A1B)

[3] Attention il s'agit bien de % sur une variable exprimée en %

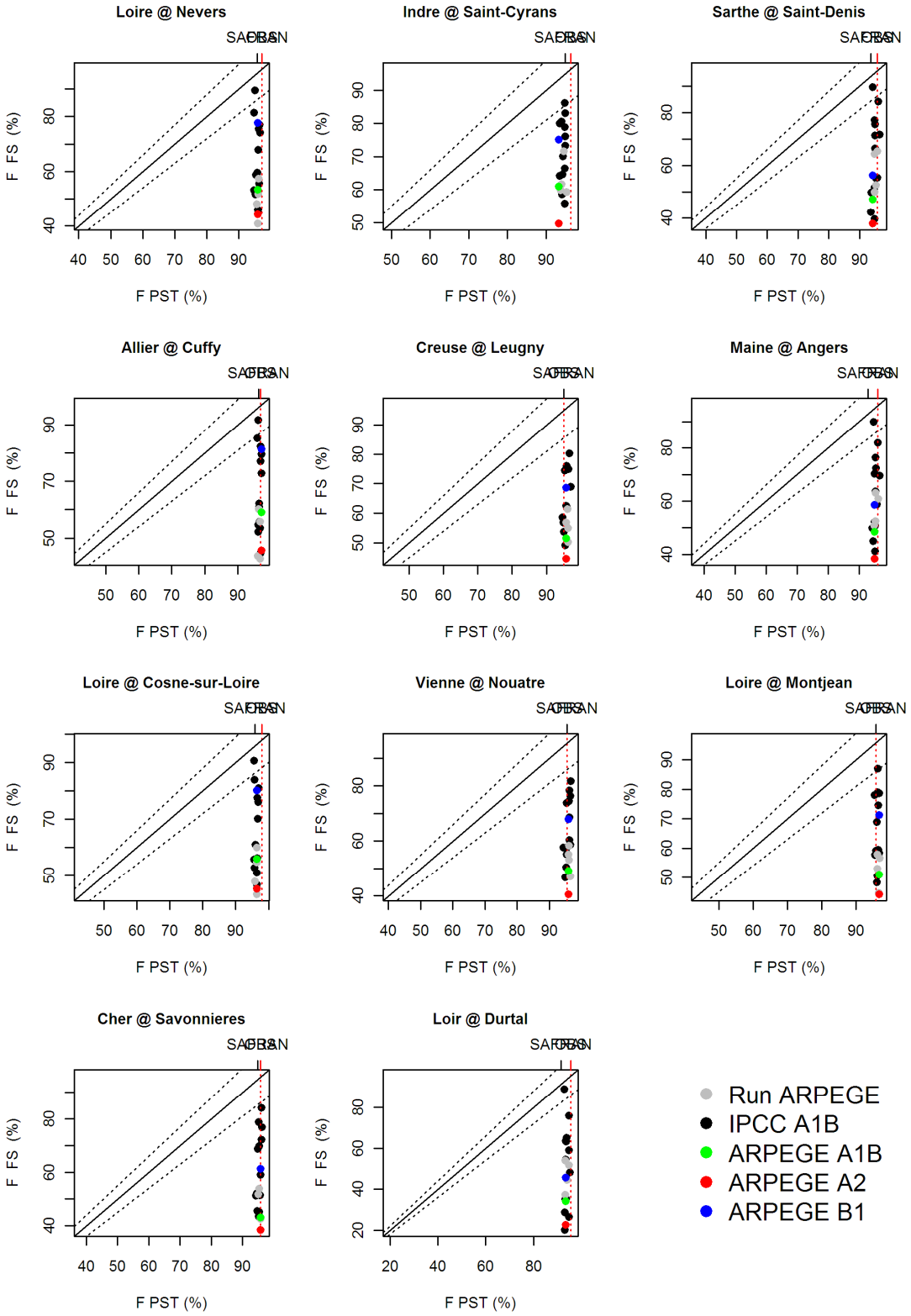


Figure 67 : Evolution de F en fin de siècle selon CLSM

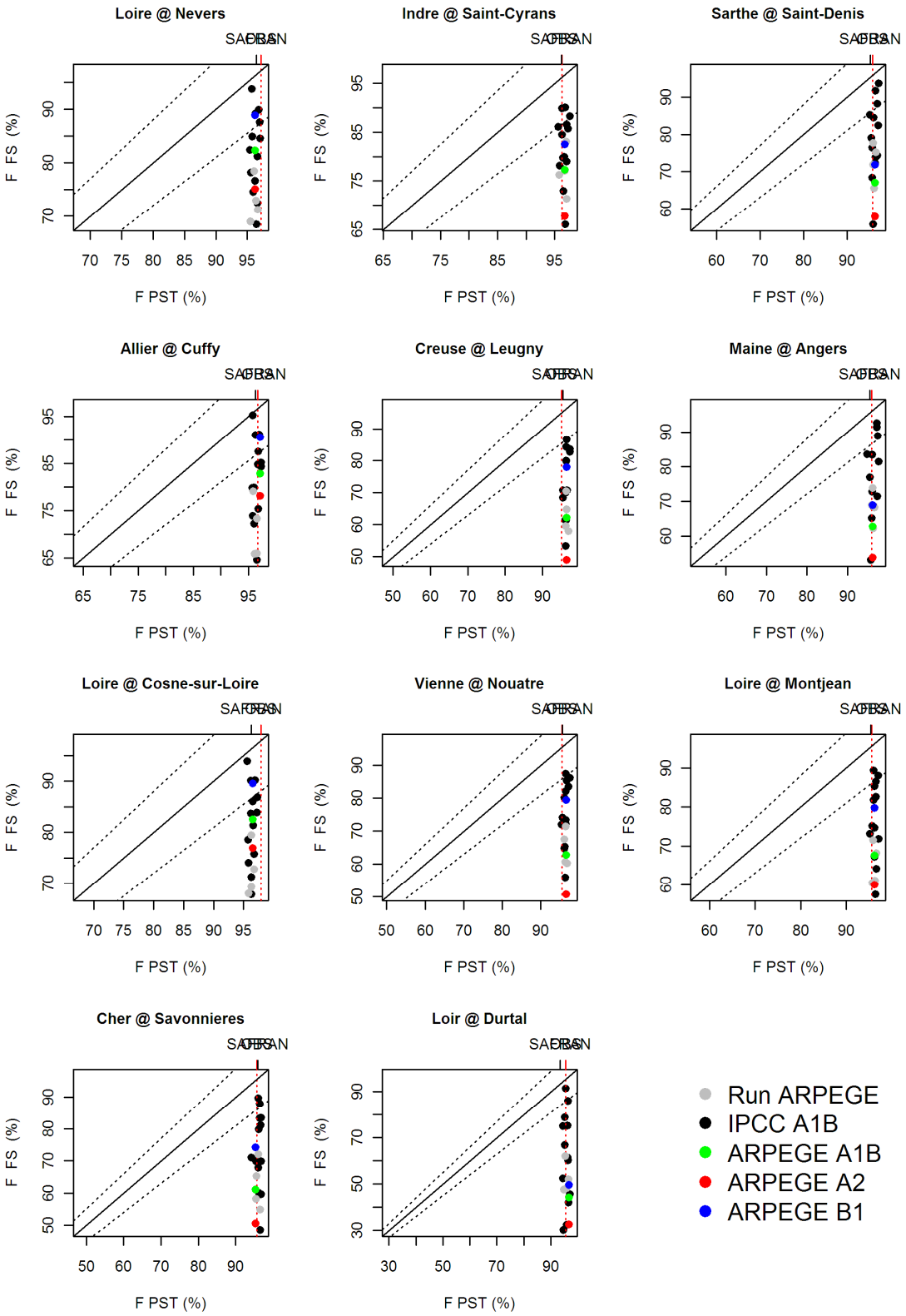


Figure 68 : Evolution de F en fin de siècle selon EROS

3.3 Synthèse

Cette section se veut une synthèse des résultats des sections précédentes. Dans un premier temps, pour appréhender le fonctionnement global du bassin de la Loire, nous avons choisi d'examiner l'évolution de la Loire à Montjean, qui intègre l'ensemble des réponses hydrologiques des affluents. Nous aurons ensuite un regard spatial pour identifier, si elles existent, des tendances partagées sur des secteurs étendus et des sensibilité différentes à l'intérieur du bassin.

3.3.1 Analyse de la Loire à Montjean

Les premiers graphiques de la Figure 69 rappellent les résultats obtenus sur les courbes des débits classés dont nous avons extrait et étudié précédemment les *Q*10 et *Q*90. Nous avons reporté les résultats des modèles hydrologiques obtenus à partir des projections sous scénario A1B issues des 14 GCMs, pour rappeler les biais liés à l'ensemble de la chaîne de simulation. Les courbes descriptives des observations (en noir) et des débits simulés avec Safran (en bleu) sont présentes sur tous les graphes. La baisse de l'ensemble des débits est perceptible sur les deux modèles hydrologiques. Le modèle CLSM simule un assèchement plus prononcé sous climat futur. Il faut également noter une dispersion des réponses attendues augmentant avec l'horizon.

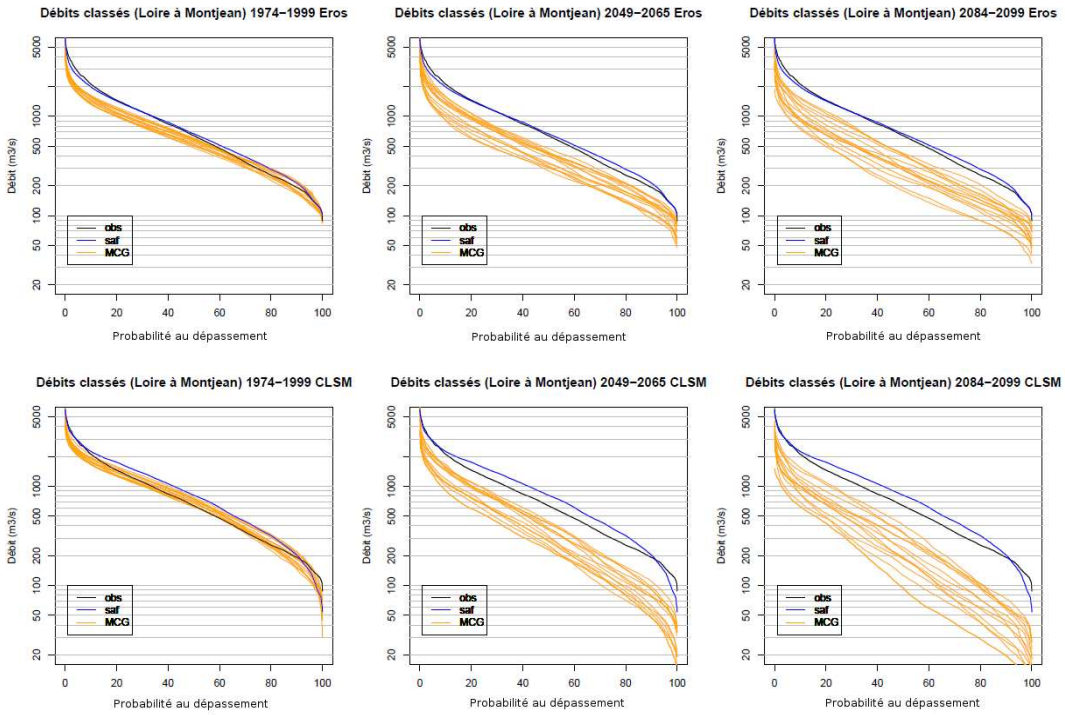


Figure 69 : Courbes des débits classés pour la station de la Loire à Montjean, pour la période PST (à gauche), MS (au milieu) et FS (à droite)

Les distributions des anomalies sur les variables analysées (des douze débits mensuels, nous n'en avons retenu que quatre représentatifs des saisons : janvier, avril, juillet et octobre) sont

synthétisées par des boîtes à moustache établies sur les projections A1B élaborées au CERFACS (cf. page 56 pour une description des éléments des boîtes à moustache).

De manière globale, les médianes et moyennes des variables sont toutes négatives : les variables ont, toutes, tendance à diminuer. L'extension des boîtes à moustache renseignent la dispersion : lorsque les boîtes rencontrent la ligne pointillé (*i.e.* la valeur zéro se situe dans l'intervalle de variation), cela signifie que certaines projections annoncent des tendances à la hausse et d'autres à la baisse : c'est le cas des écoulements de janvier *QM1* (EROS), d'avril *QM*4 (EROS et CLSM), le *BFI* (EROS), le *QJXA*10 (EROS et CLSM), *D* (EROS) et *Q*10 (EROS en MS). Pour les autres variables, les modèles alimentés par les projections A1B retenues semblent indiquer une probable diminution. Les intensités des changements varient cependant avec le modèle hydrologique et avec la projection climatique. CLSM fournit une vision plus extrême, signe d'une plus grande sensibilité aux modifications du climat.

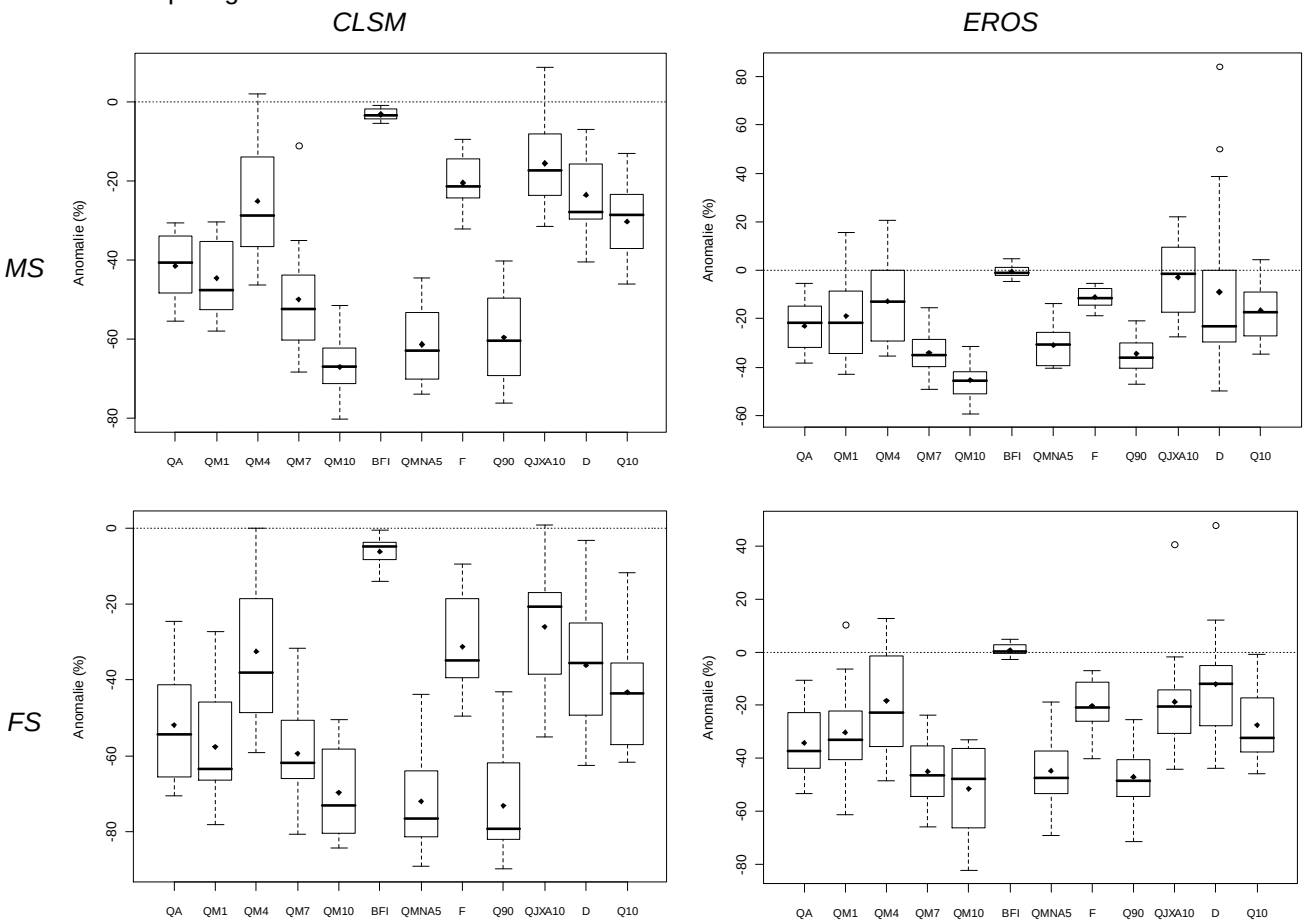


Figure 70 : Évolution des variables hydrologiques sous changement climatique pour la station de la Loire à Montjean. QA : module ; QM1(4-7-10) : débit moyen interannuel de janvier (avril, juillet, octobre) ; BFI : BaseFlow Index ; QMNA5 : débit mensuel de fréquence quinquennale sèche ; F : fiabilité ; Q90 : quantile 90% ; QJXA10 : débit journalier décennal ; D : dynamique de crue ; Q10 : quantile 10%. MS : milieu de siècle ; FS : fin de siècle

3.3.2 Analyse régionale et typologie de bassins versants

Les statistiques (moyennes et écarts-types multi-sites des moyennes multi-GCMs des anomalies sous scénario A1B) du Tableau 14 montrent l'évolution des douze variables examinées précédemment :

	CLSM				EROS			
	MS		FS		MS		FS	
Variable	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type	Moyenne	Ecart-type
QA	-40.1	10.0	-51.2	15.6	-22.1	11.2	-33.3	15.4
*QM*1	-40.4	12.6	-54.1	19.6	-16.6	19.3	-27.9	21.8
*QM*4	-23.4	16.7	-30.6	21.0	-13.1	19.9	-18.8	21.2
*QM*7	-51.3	17.2	-61.4	16.9	-33.5	12.9	-44.1	13.4
*QM*10	-69.1	12.1	-73.2	15.2	-45.7	12.5	-51.8	16.9
BFI	-3.8	2.8	-6.6	4.5	0.1	3.2	1.2	3.3
*QMNA*5	-66.7	13.3	-76.0	14.7	-34.0	12.0	-47.4	15.0
F	-18.4	7.4	-30.5	13.6	-10.6	5.4	-18.6	9.7
*Q*90	-67.2	13.5	-79.2	14.4	-35.6	11.0	-48.2	14.0
*QJX*A10	-4.8	25.2	-0.1	34.5	-1.4	21.2	-14.6	25.3
D	-12.7	24.6	-21.2	23.7	0.0	27.3	3.7	31.0
*Q*10	-29.0	10.7	-42.5	16.7	-17.1	13.9	-28.2	17.1

Tableau 14 : Changements des variables hydrologiques exprimés en % (moyennes multi-sites des statistiques multi-GCMs sous scénario A1B)

Ces chiffres sont globaux. Pour aller plus loin, nous avons souhaité mettre en évidence des contrastes spatiaux, s'ils existent, et examiner les sensibilités aux modifications du climat en effectuant une analyse régionale. Cette étude a pour objectifs de regrouper des bassins versants qui présenteraient des évolutions similaires et d'examiner si ces groupes sont cohérents dans l'espace à des fins de synthèse et d'extrapolation en site non examiné.

Les changements de régime seront examinés au travers des anomalies moyennes multi-GCMs sous scénario A1B calculées sur onze des douze variables. Nous avons en effet exclu la durée de crue *D* compte tenu des très faibles scores en reconstitution avec Safran. Ceci permet de caractériser l'intensité des changements. Nous avons également considéré l'écart-type multi-GCMs des anomalies (*SDAn*) pour quantifier la dispersion des résultats et indirectement les incertitudes liées au choix du GCM toutes choses égales par ailleurs (§ 1.3.1 « Climat », page 6).

À un horizon donné et pour un modèle hydrologique donné, chaque bassin versant sera décrit par un vecteur **Y** de 22 valeurs. Ainsi, pour la station modélisée *i*, *i*=1,…,47 :

$$\mathbf{Y}(i) = [y_j, j = 1,...,22](i) = [MAn(QA), MAn(QM1), MAn(QM4), MAn(QM7), MAn(QM10), MAn(BFI), MAn(QMNA5), MAn(F), MAn(Q90), MAn(QJXA10), MAn(Q10), SDAn(QA), SDAn(QM1), SDAn(QM4), SDAn(QM7), SDAn(QM10), SDAn(BFI), SDAn(QMNA5), SDAn(F), SDAn(Q90), SDAn(QJXA10), SDAn(Q10)]$$

Pour mesurer le degré de similitude entre deux bassins nous avons choisi une distance euclidienne entre les vecteurs :

$$dist(i,k) = \sqrt{\sum_{j=1}^{22} \left(y_j(i) - y_j(k)\right)^2}$$

Enfin, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été appliquée pour effectuer les regroupements. Les résultats sont reportés sur carte, ceci permet de vérifier si les ensembles sont cohérents géographiquement. Les exutoires des bassins appartenant au même groupe sont identifiés par une même couleur. En complément, nous avons calculé les moyennes des vecteurs des bassins de chaque groupe afin d'identifier les principales différences entre assemblage.

Les opérations seront répétées quatre fois (nombre de couples modèle hydrologique – horizon).

Le choix du nombre de regroupements à considérer repose sur un compromis entre homogénéité (tendance à conserver un nombre conséquent de groupes) et volonté de synthèse (souhait d'un nombre réduit de groupes). Ici le diagnostic repose sur l'analyse des sauts de distance identifiés dans le dendrogramme associé à chaque application de la CAH. Ceci nous oriente vers cinq groupes pour EROS (MS et FS) et CLSM (MS) et vers trois groupes pour CLSM (FS).

L'examen des cartes par modèle hydrologique montre des regroupements comparables en termes d'effectif, cohérents géographiquement (les points forment des nuages bien localisés dans l'espace) et temporellement (les regroupements opérés en MS sont similaires à ceux obtenus en FS) pour le modèle EROS. Au contraire, CLSM fait apparaître des groupes de faible effectif, dont les représentants sont disséminés dans l'ensemble du territoire. Les graphiques de gauche de la Figure 72 et de la Figure 73 illustrent les différences sur les moyennes des variables utilisées par la métrique.

Notons pour EROS :

- qu'un groupe apparaît en milieu de siècle en amont des bassins de l'Allier et de la Loire (•), ce sont ceux qui pourraient présenter des augmentations de *QJXA*10 et de débits mensuels de janvier ;
- que la Loire intermédiaire (•) a une réponse homogène et que le regroupement formé en milieu de siècle se retrouve à l'identique en fin de siècle. Il en est de même du groupe (•) rassemblant principalement des bassins de la Vienne ;

- que les bassins identifiés par (•) en milieu de siècle présentent des changements relativement uniformes sur les quatre débits mensuels moyens. Ils se caractérisent par des changements moins prononcés sur les étiages et la dispersion la plus forte sur le *QJXA*10. Ce groupe se scinde en deux entités en fin de siècle (•) qui rassemblera les bassins présentant des faibles évolutions de *QJXA*10 et (•) qui rassemblera les bassins dont la fiabilité change significativement) ;
- qu'un groupe formé de stations de la Mayenne, de l'Indre et de la Creuse amont rassemble les bassins aux changements sur les écoulements de juillet et d'octobre les plus notables sur l'ensemble du bassin de la Loire.

Nous retrouvons ici des partitions suggérées par EROS partiellement cohérentes avec la structure géologique du territoire (Figure 71) et l'évolution des pluies extrêmes (tendance à des augmentations sur le bassin de la Mayenne et en tête des bassins de la Loire et de l'Allier).

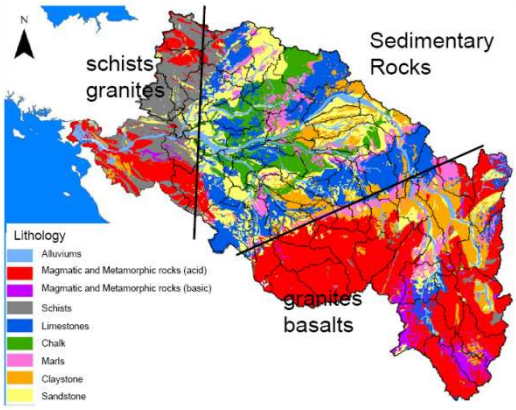


Figure 71 : Structure lithologique (carte extraite de Bourgoin, 2010 ; source V. Bustillo)

Pour CLSM, la partition semble guidée par les évolutions de *QJXA*10 (sur la moyenne et l'écart-type des anomalies). Nous n'interpréterons pas davantage le découpage spatial.

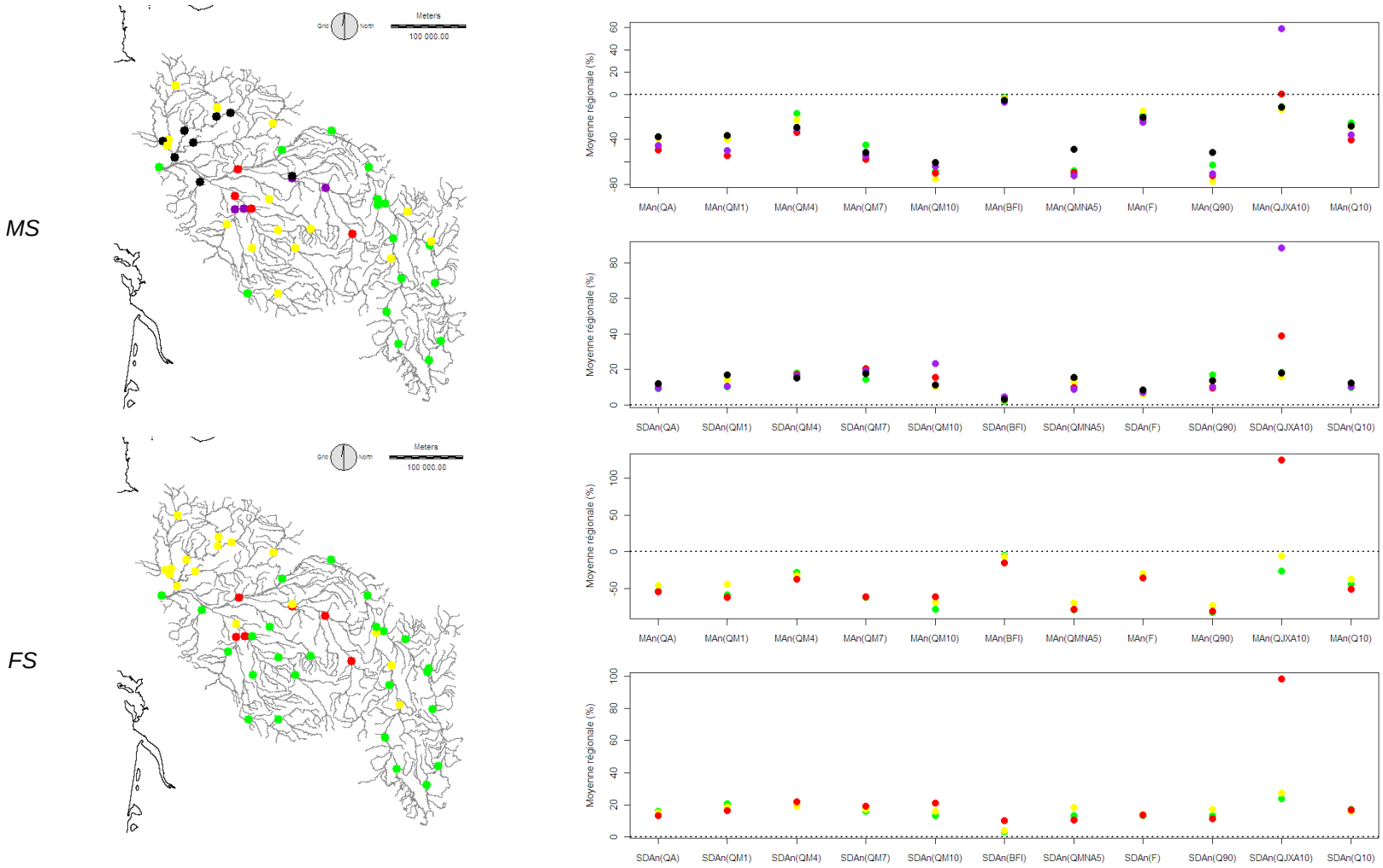


Figure 72 : Assemblages de bassins versants aux réponses hydrologiques similaires selon CLSM

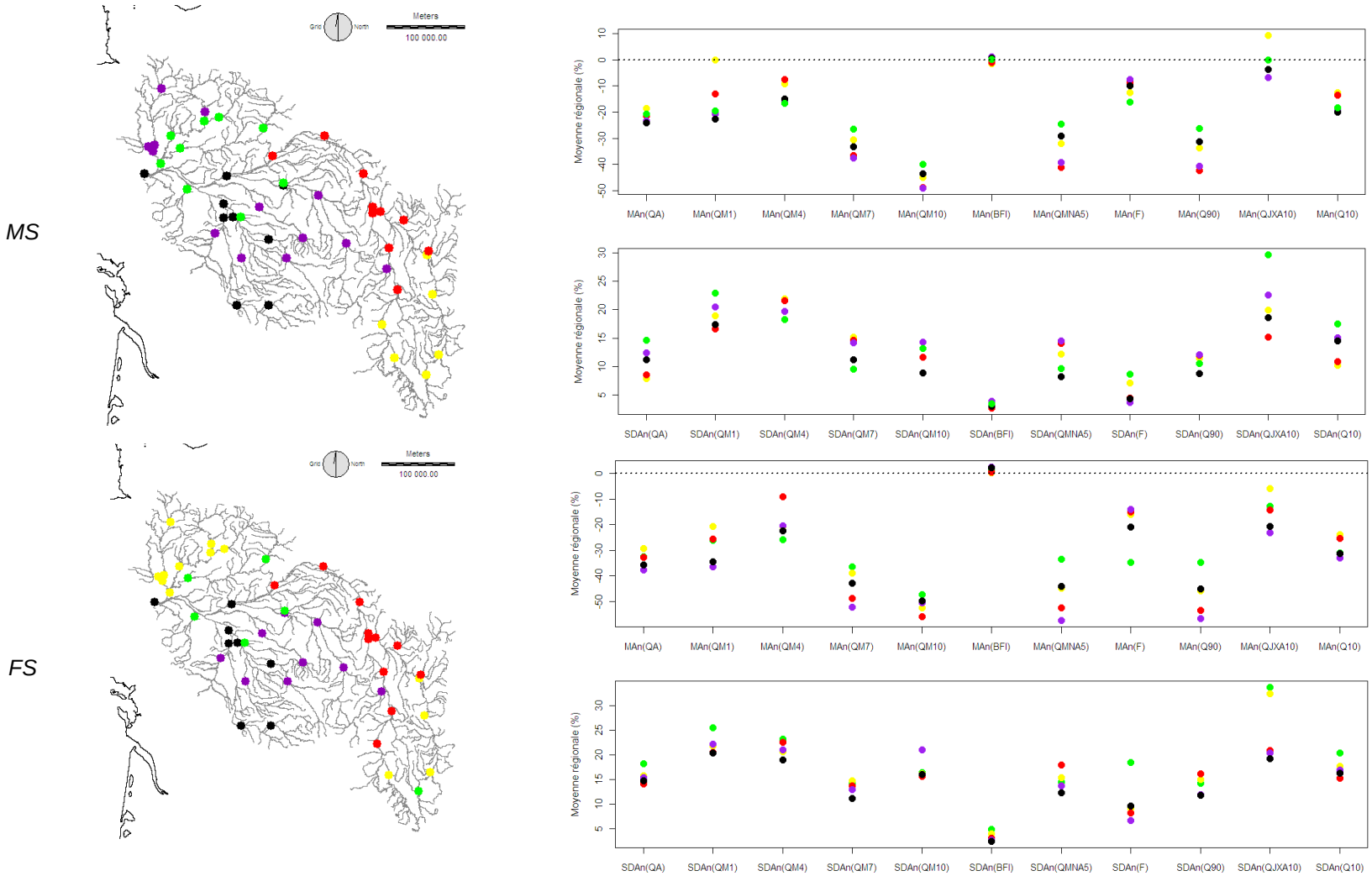


Figure 73 : Assemblages de bassins versants aux réponses hydrologiques similaires selon EROS

Conclusion

Une étude d'impact du changement climatique sur l'hydrologie met en œuvre une chaîne complète de modélisation hydroclimatique, en climat présent comme en climat futur. La construction de cette chaîne de modélisation s'accompagne forcément d'incertitudes, qu'elles soient irréductibles (choix du scénario d'émission de gaz à effet de serre), structurelles (choix du modèle climatique, de la technique de descente d'échelle, du modèle hydrologique et de sa paramétrisation, etc.), ou encore liée à la nature chaotique des processus atmosphériques (influence des conditions initiales sur les projections climatiques). Toute étude d'impact doit donc s'efforcer de présenter aux côtés des résultats les incertitudes associées à l'ensemble de cette chaîne de modélisation, en identifiant et hiérarchisant si possible les différentes sources prises en compte.

Des analyses ont été réalisées en ce sens, avec la volonté de mettre en évidence des incertitudes à tous les niveaux de modélisation, déjà présentes dans les modélisations sous climat actuel (voir également (Bernard, 2010) pour une discussion plus étendue). Cette étape est nécessaire pour mesurer la confiance à accorder aux prédictions issues de ces mêmes modèles dans le futur. Nous avons ainsi examiné la capacité des modèles à reproduire des variables clefs du climat et de l'hydrologie dans les conditions actuelles. Si le modèle n'est pas en mesure de reproduire les conditions actuelles, il sera difficile de croire aux évolutions qu'il propose au cours du XXIe siècle.

Globalement les modèles parviennent à reconstituer les termes moyens (moyennes annuelles ou mensuelles interannuelles). C'est sur les extrêmes qu'ils rencontrent plus de difficulté. Les écarts observés sur les débits peuvent être imputables à la structure imparfaite du modèle ou aux actions humaines qui modifient parfois profondément le signal hydrologique naturel (en étiage notamment) et perturbent le processus de calage et d'évaluation. Malgré leurs faiblesses, les modèles hydrologiques reproduisent convenablement les contrastes spatiaux et sont en l'état tous acceptables. Du fait des différences de structure des modèles, des réponses différentes sous scénarios climatiques sont attendues.

La tendance à une diminution de la ressource en eau est partagée par tous les modèles (diminution du module, donc des volumes disponibles sur l'année et des caractéristiques de la courbe des débits classés). Les étiages seraient plus sévères. Les durées de faibles débits seraient parfois fortement accrues, ceci poserait des problèmes importants si les modes de gestion n'évoluaient pas (une stratégie d'adaptation selon la disponibilité de l'eau serait à élaborer). Ces

changements affectent l'ensemble des bassins versants de manière homogène. Cette modification profonde serait due à l'augmentation des pertes par évapotranspiration et des précipitations totales globalement à baisse (légère augmentation des précipitations au printemps compensée par une forte diminution le reste de l'année).

Il n'y a pas de consensus sur l'évolution des crues. Nous avons pu identifier des secteurs pour lesquels une hausse des pluies extrêmes (*PJXA*10) est possible (Loire et Allier amont et Mayenne). Cependant sur les bassins concernés, les pluies d'automne vont préférentiellement contribuer à la recharge au détriment des écoulements de surface. Des crues sont possibles mais leur occurrence peut être décalée dans le temps (de quelques semaines en moyenne par rapport à la situation actuelle). Des augmentations de *QJXA*10 sont possibles mais elles sont marginales et non partagées par l'ensemble des réalisations de la chaîne de modélisation. Globalement, nous notons l'absence de tendance significative sur les crues, que ce soit sur la dynamique ou sur l'intensité, avec des changements modérés sans cohérence de signe.

Les tendances sur les très faibles débits sont conformes aux évolutions observées sur un bassin voisin : la Seine dans le cadre du projet Rexhyss (Ducharne *et al*., 2009) qui a en commun avec l'usage des 14 projections sous scénario A1B et des modèles EROS et CLSM.

Comme nous l'avons signalé plus haut, les deux modèles hydrologiques forcés par les mêmes entrées climatiques proposent des avenirs différents. CLSM s'avère plus extrême qu'EROS sur les étiages. Il simule un assèchement plus rapide qu'EROS sous projection climatique. Des éléments récents semblent prouver que le comportement de CLSM est sujet à caution sous un forçage climatique plus chaud et sec qu'en temps présent. En effet, le modèle prend en compte une évapotranspiration réelle plus forte que le modèle EROS pour une évapotranspiration potentielle identique (mêmes forçages atmosphériques issus des scénarios climatiques désagrégés pour les deux modèles). C'est le stress hydrique (expliquant en partie la différence entre ETR et ETP) qui est sous-estimé par CLSM. Ainsi, le modèle CLSM simule en permanence la présence d'une nappe perchée modélisant un comportement inadéquat où l'eau est trop disponible, entraînant une surestimation de l'ETR (Ducharne *et al*., 2009).

Pour conclure, il convient de rappeler que *cette étude reste malgré tout un exercice théorique*. Il s'agit de la réponse hydrologique aux modifications climatiques, toutes choses égales par ailleurs. Nous n'avons pas inséré d'évolution d'occupation du sol, des usages… Les actions de l'homme sur le cours d'eau pourront ou non atténuer les effets du changement climatique (ex. le soutien d'étiage par des réservoirs ou prélèvements accrus). Ceci nécessite de mener de front des études sur l'évolution du climat et de l'hydrologie et des réflexions prospectives sur le partage de la ressource.

Bibliographie

Benmaleck, Y. (2006) The most intensive droughts in France and in the department of Loire since 1985, in managing drought and water scarcity in vulnerable environments. Dans “Proceedings of the 10th European Seminar on the Geography of Water”, Institut Géographique Universitaire de Tartu (Estonie). 3.1.2.2

Bernard, A. (2010) Impact du changement climatique sur la Loire – Évaluation et projections pour le XXIe siècle. Rapport de Travail de Fin d'Etudes ENTPE, Gestion des Cours d’Eau et du Littoral.

Boé, J., Terray, L., Habets, F. & Martin, E. (2006) A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *Journal of Geophysical Research*, 111, D23106

Bourgin, F. (2009) Calibration of a catchment-based land surface model in the Loire River basin to assess hydrological impacts of climate change. Rapport de Master of Science in Environmental Engineering, Technische Universität München

Champeaux, J.-L. & Tamburini, A. (1996) Zonage climatique de la France à partir de précipitations (1971-1990) du réseau climatologique d'état. *La Météorologie*, 14, 44-54

Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S. & Rieu, J. (2009) *Projet RExHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme*. Rapport de fin de contrat, programme GICC, septembre 2009, 62 p.

Ducharne, A., Koster, R. D., Suarez, M. J., Stieglitz, M. & Kumar, P. (2000) A catchment-based approach to modeling land surface processes in a general circulation model 2. Parameter estimation and model demonstration. *Journal of Geophysical Research*, 105 (D20), 24823-24838

Gascoin, S., Ducharne, A., Ribstein, P., Carli, M. & Habets, F. (2009) Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the Somme River basin (France). *Journal of Hydrology*, 368, 105-116

IPCC (2007) Climate Change 2007: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L., eds.) Cambridge University Press, 996 p.

Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., Latif, M., McAvaney, B., Mitchell, J. F. B., Stouffer, R. J. & Taylor, K. E. (2007) The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(9), 1383-1394

Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N. & Dadi, Z. (2000) *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge

Krasovskaia, I., Gottschalk, L. & Leblois, E. (2002) Signature d'un climat en évolution dans les régimes hydrologiques de la région Rhône Mediterranée Corse. *La Houille Blanche*, 8, 25-30

Krasovskaia, I., Gottschalk, L., Leblois, E. & Sauquet, E. (2003) Dynamics of river flow regimes viewed through attractors. *Nordic Hydrology*, 34(5), 461-476

Nash, J. E. & J. V. Sutcliffe (1970) River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282–290

Pagé, C., Terray, L. & Boé, J. (2008) *Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08*. Note Technique TR/CMGC/08/64. CERFACS

Pardé, M. (1933) Fleuves et rivières. Collection Armand Colin, Paris, 224 p.

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

Sauquet E., Gottschalk L., Krasovskaia I. (2008). Estimating mean monthly runoff at ungauged locations : an application to France. *Hydrology Research*, vol. 39, n°5-6, p. 403-423.

Thiéry, D. & Moutzopoulos, C. (1995) Un modèle hydrologique spatialisé pour la simulation de très grands bassins : le modèle EROS formé de grappes de modèles globaux élémentaires. Dans : *Régionalisation en hydrologie : application au développement* (Le Barbé, L. & Servat, E., eds.), 285-295

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 p.

Thiéry, D. (2003) *Logiciel GARDÉNIA version 6.0. Guide d'utilisation*. Rapport BRGM/RP-52832-FR

Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. & Soubeyroux, J.-M. (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30(11), 1627-1644

Young, A.R., Round, C.E. & Gustard, A. (2000) Spatial and temporal variations in the occurrence of low flow events in the UK. Hydrology and Earth System Sciences, 4: 35–45