



**HAL**  
open science

# Impact du changement climatique sur les étiages de la Loire. Evaluation et projections pour le XXI<sup>e</sup> siècle

A. Bernard

► **To cite this version:**

A. Bernard. Impact du changement climatique sur les étiages de la Loire. Evaluation et projections pour le XXI<sup>e</sup> siècle. Sciences de l'environnement. 2010. hal-02593325

**HAL Id: hal-02593325**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02593325>**

Submitted on 15 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ETIAGES DE LA LOIRE

## Évaluation et projections pour le XXI<sup>e</sup> siècle

**BERNARD Alexis**

**Gestion des Cours d'Eau et du Littoral  
Promotion 55**

*Le 01-07-2010*

Président du jury : DELOLME Cécile  
Maître de TFE : VIDAL Jean-Philippe  
Expert : HINGRAY Benoît



# NOTICE ANALYTIQUE

	<b>NOM</b>	<b>PRENOM</b>	
<b>AUTEUR</b>	BERNARD	Alexis	
<b>TITRE DU TFE</b>	Impact du changement climatique sur les étiages de la Loire		
	<b>ORGANISME D’AFFILIATION ET LOCALISATION</b>	<b>NOM PRENOM</b>	
<b>MAITRE DE TFE</b>	Cemagref Lyon, unité Hydrologie-Hydraulique	VIDAL Jean-Philippe	
<b>COLLATION</b>	73 pages	2 annexes (3 pages)	27 réf. biblio.
<b>MOTS CLES</b>	Changement climatique, chaîne de modélisation hydroclimatique, étiage, biais, incertitudes, saisonnalité		
<b>TERMES GEOGRAPHIQUES</b>	Bassin versant de la Loire		
<b>RESUME</b>	<p>Le changement climatique d’origine anthropique devrait dans le siècle à venir modifier le cycle hydrologique. De récents projets de recherche étudient l’impact du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques, et notamment les étiages sévères.</p> <p>Le projet HydroQual s’intéresse à ces aspects sur le bassin versant de la Loire. Les projections hydrologiques issues des chaînes de modélisation sont analysées en utilisant la méthode du Sequent Peak Algorithm pour identifier et caractériser les événements d’étiages (durée, déficit, saisonnalité).</p> <p>Les modèles hydrologiques rencontrent en temps présent des difficultés à reproduire les bas débits observés, qui s’expliquent par l’influence anthropique sur les débits d’étiage.</p> <p>Les projections hydrologiques indiquent une baisse des bas débits et un allongement des étiages. L’ampleur des changements projetés est de nature à remettre en cause la gestion actuelle de la ressource en eau. La dispersion des projections est grande et traduit la propagation d’une cascade d’incertitudes dans la chaîne de modélisation.</p>		
<b>ABSTRACT</b>	<p>Anthropogenic climate change should affect the hydrology over the next century. Recent research project looked at the climate change effects on the hydrological droughts.</p> <p>The HydroQual project deals with these topics on the river Loire catchment. Hydrological projections produced by different modelling suites are processed using the Sequent Peak Algorithm in order to identify and characterize drought events (duration, deficit, seasonality).</p> <p>Hydrological models fail to reproduce recorded drought events accurately, partly because of the anthropogenic influence on low flows.</p> <p>Hydrological predictions show a decrease of low flow values and longer drought events. The magnitude of the change could lead to reconsider current practices of water resource management. The large dispersion of projections reflects the cascade of uncertainties in the modelling suite.</p>		

# Remerciements

Mes remerciements s'adressent en premier lieu à Jean Philippe Vidal pour sa disponibilité et ses précieux conseils. Ces nombreuses suggestions m'ont toujours fait progresser dans mon exploitation des données et la rédaction de ce rapport.

Merci à Eric Sauquet pour m'avoir fourni les données sans jamais rechigner à corriger les petites erreurs. Merci également à Vincent Bustillo et à toutes les personnes impliquées dans le projet HydroQual pour les données transmises.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Benoit Hingray qui a accepté d'assurer la tâche d'expert en portant ainsi un intérêt à mon travail de fin d'étude. Je tiens également à remercier Cécile Delolme, qui, en plus de tenir le rôle de présidente de jury, m'a apporté un réel soutien.

Merci aussi à mes deux camarades de bureau, Benoît Terrier et Antoine Bard. Ils m'ont aidé à résoudre de nombreux problèmes et ont entretenu une excellente ambiance de travail dans notre bureau.

Merci, aux membres du Cemagref ayant prêté intérêt à mon travail pour leurs remarques pertinentes et avisées.

Ces trois mois de stage n'auraient pas été aussi agréables sans la convivialité et la bonne humeur de l'équipe HH du Cemagref.

# Table des matières

<b>Table des matières</b>	<b>5</b>
<b>Table des figures</b>	<b>8</b>
<b>Introduction</b>	<b>10</b>
<b>1 Contexte et démarche</b>	<b>12</b>
1.1 Le changement climatique et ses conséquences sur le cycle hydrologique . . . . .	12
1.2 Démarche d'étude d'impact du changement climatique . . . . .	13
1.2.1 Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre . . . . .	13
1.2.2 Modèles de circulation de générale . . . . .	14
1.2.3 Descente d'échelle pour créer des projections locales . . . . .	15
1.2.3.1 La descente d'échelle dynamique . . . . .	16
1.2.3.2 La descente d'échelle statistique . . . . .	17
1.3 Les études d'impacts sur l'hydrologie : le contexte français . . . . .	18
1.4 Les spécificités du projet HydroQual . . . . .	19
1.4.1 Domaine d'étude . . . . .	19
1.4.2 Données hydrologiques . . . . .	20
1.4.3 Données météorologiques observées . . . . .	22
1.4.4 Les données climatiques utilisées . . . . .	23
1.4.5 La modélisation hydrologique . . . . .	25
1.5 Synthèse . . . . .	27
<b>2 Outils et méthodes</b>	<b>29</b>
2.1 Caractérisation des étiages . . . . .	29

2.1.1	Analyse des bas débits . . . . .	29
2.1.2	Caractérisation des épisodes d'étiages . . . . .	30
2.2	Traitement des données avec le logiciel R . . . . .	33
2.2.1	Pour l'étude des bas débits . . . . .	33
2.2.2	Pour l'étude des épisodes d'étiages . . . . .	33
2.2.3	Traitement de l'ensemble des chroniques . . . . .	33
2.3	Les notions de biais et d'incertitude . . . . .	34
2.3.1	Définition des périodes . . . . .	34
2.3.2	Évaluation des biais sur la période de référence . . . . .	35
2.3.3	Les différentes sources d'incertitudes . . . . .	36
2.3.3.1	Incertainces sur les données . . . . .	36
2.3.3.2	Incertainces sur les méthodes et outils . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Évaluation de la capacité à reproduire les étiages en temps présent</b>	<b>39</b>
3.1	Biais liés à la modélisation hydrologique . . . . .	39
3.1.1	Sur les Q90 . . . . .	39
3.1.2	Sur les indices extraits du SPA . . . . .	41
3.1.2.1	Résultats . . . . .	41
3.1.2.2	La notion d'influence anthropique sur les bas débits . . . . .	42
3.1.3	Synthèse sur les biais liés à la modélisation hydrologique . . . . .	46
3.2	Biais liés aux simulations climatiques . . . . .	47
3.2.1	Sur les Q90 . . . . .	47
3.2.2	Sur les indices SPA . . . . .	48
3.3	Critères de saisonnalité . . . . .	50
3.4	Conclusion sur l'évaluation en temps présent . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Projections et incertitudes pour le XXI<sup>e</sup> siècle</b>	<b>52</b>
4.1	Étude des bas débits . . . . .	52
4.2	Étude de la distribution des débits de la Loire à Montjean . . . . .	54
4.3	Caractérisation des étiages et comparaison au temps présent . . . . .	54
4.3.1	Occurrence . . . . .	57

4.3.2	Durée . . . . .	57
4.3.3	Sévérité . . . . .	61
4.3.4	Saisonnalité . . . . .	61
4.4	Conclusion sur les projections . . . . .	61
	<b>Conclusion</b>	<b>64</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>67</b>

# Table des figures

1.1	Schéma de synthèse illustrant la démarche utilisée pour une étude d'impact du changement climatique. . . . .	14
1.2	Émissions mondiales de GES . . . . .	15
1.3	Changement sur les températures et précipitations en Europe . . . . .	16
1.4	Notion de descente d'échelle intégrée à l'étude d'impact . . . . .	17
1.5	Représentation du bassin de la Loire découpé en 68 sous bassins . . . . .	20
1.6	Descriptif des stations utilisées . . . . .	21
1.7	Pluviométrie annuelle moyenne sur la période 1971-2000 . . . . .	22
1.8	Schéma de fonctionnement simplifié d'un MCG. . . . .	23
1.9	Illustration des différentes « familles » de projections. . . . .	24
1.10	Variation relative en % de la pluviométrie mensuelle en milieu de XXI <sup>e</sup> siècle (2046-2065) . . . . .	25
1.11	Variation relative en % de la pluviométrie mensuelle en fin de siècle (2081-2100) . . . . .	26
2.1	Chronique de débits journaliers illustrant les problèmes d'interdépendance et des événements mineurs. . . . .	30
2.2	Définition d'un épisode d'étiage par la méthode du Sequent Peak Algorithm . . . . .	31
2.3	Chroniques disponibles pour étudier l'impact du changement climatique . . . . .	35
3.1	Comparaison des Q90 simulés par le couple Safran-Modèle hydrologique avec les Q90 observés . . . . .	40
3.2	Biais liés à la modélisation hydrologique traduits par les indices SPA . . . . .	41
3.3	Chroniques des débits et séquences SPA de la Loire à Villerest . . . . .	42
3.4	Comparaison de la méthode SPA entre les observations et le couple Safran-CLSM . . . . .	44
3.5	Chroniques des débits et séquences SPA de la Loire à Montjean . . . . .	45
3.6	Illustration du biais induit par la simulation climatique . . . . .	47

3.7	Q90 des chroniques issues des 14 projections utilisant les différents MCG . . . .	48
3.8	Comparaison des indices SPA sur la période de référence . . . . .	49
3.9	Saisonnalité des début, fin et date du déficit maximum pour la station Loire à Montjean . . . . .	50
4.1	Projections sur les Q90 aux horizons MS et FS . . . . .	53
4.2	Dispersion de la famille multi-MCG sur les Q90 projetés. La dispersion est figurée par l'écart type relatif ou coefficient de variation. . . . .	55
4.3	Courbes des débits classés pour la station Loire à Montjean pour les périodes PST, MS et FS . . . . .	56
4.4	Nombre moyen d'événements par an . . . . .	58
4.5	Nombre moyen de jours par an appartenant à une séquence d'étiage . . . . .	59
4.6	Dispersion inter-MCG représentée à l'aide de l'écart type en jours de la série des 14 projections hydrologiques multi-MCG. . . . .	60
4.7	Changement de saisonnalité des étiages pour la Loire à Montjean avec le mo- dèle Eros . . . . .	62

# Introduction

## L'étiage sévère : un risque hydrologique majeur en France

La sécheresse peut prendre plusieurs définitions selon le point de vue adopté. La sécheresse météorologique se traduit comme un déficit de pluies sur une région et une période donnée. La sécheresse agricole correspond à un défaut d'eau disponible dans le sol pour le métabolisme et donc la croissance des cultures. Enfin, en hydrologie, la sécheresse se traduit par une réduction importante des débits (hydrologie de surface) et/ou un épuisement des réserves d'eau dans le sol et nappes phréatiques (hydrogéologie). Ainsi, l'étiage<sup>1</sup> sévère sera synonyme de sécheresse hydrologique. Chaque type de sécheresse a des conséquences sociales et économiques différentes.

Aujourd'hui, les sécheresses hydrologiques sont des facteurs de pression importants sur les hydrosystèmes. Les usages de l'eau en période estivale sont multiples : prélèvements agricoles et industriels, usage domestique, énergie... Les étiages sévères ont donc des conséquences importantes sur la société. Les sécheresses de 1976 et plus récemment de 2003 et 2005 ont rappelé en France que la ressource en eau n'était pas illimitée et pouvait être un facteur de stress important pour la société. Les sécheresses hydrologiques ont des conséquences sur les écosystèmes en intervenant sur les caractéristiques physico-chimiques du milieu. La dilution des substances rejetées par les activités humaines n'est plus assurée en cas d'étiage sévère. La réduction des débits et l'augmentation des températures de l'eau peuvent être létales pour les écosystèmes fluviaux.

## Objectifs

Le travail réalisé vise à évaluer les démarches mises en place pour étudier les impacts du changement climatique sur l'hydrologie des systèmes fluviaux. Nous nous appuierons pour cela sur le bassin versant de la Loire, plus grand bassin fluvial du territoire Français. L'établissement Public Loire a lancé en 2007 un projet d'adaptation au changement climatique. Première étape logique de ce projet, la connaissance des impacts du changement climatique

---

<sup>1</sup>L'étiage est synonyme de basses eaux et correspond à la période où le débit est minimum. Ce n'est pas un phénomène exceptionnel dans la mesure où chaque année hydrologique dispose d'au moins un étiage.

est indispensable à la démarche d'adaptation. Cette étape présente un volet hydrologie visant à étudier les impacts sur les extrêmes posant la question de la ressource en eau (pour les étiages) et des risques hydrologiques (en particulier pour les inondations). Les données exploitées sont issues du projet ICC-HydroQual (Université de Tours (UMR ISTO), UMR Sisyphe, BRGM, Cemagref ).

Nous évaluerons les approches mises en place sur leur capacité à reproduire les caractéristiques des étiages en temps présent. Cette étape permettra de mettre en évidence les biais induits par ces approches. Nous nous efforcerons, dans la mesure du possible, d'identifier la source des différents biais pour tendre à réduire ceux-ci et mieux les appréhender dans les prochains projets d'étude d'impact du changement climatique.

Dans un second temps, nous étudierons les projections pour le XXI<sup>e</sup> siècle sous climat anthropiquement perturbé. Des résultats sous différents scénarios seront présentés au côté des incertitudes identifiées. L'étude des incertitudes est importante pour l'amélioration des méthodes. En effet, afin de progresser pour les projets d'études suivants, la communauté d'hydroclimatologues cherche à savoir quelles étapes de la méthode induisent les incertitudes les plus importantes. Il conviendra alors d'accentuer les efforts pour réduire la mauvaise incertitude (celle qui est réductible) et de bien appréhender la bonne incertitude (qu'il ne faut pas chercher à réduire).

Le rapport expose, dans un premier temps, les points de contexte générale et plus spécifique à notre étude. Les outils et méthodes mis en place au cours de notre étude sont développés dans le chapitre 2. Le chapitre 3 s'attache à l'évaluation en temps présent. Enfin, le chapitre 4 expose les projections et les incertitudes associées pour le XXI<sup>e</sup> siècle.

# Chapitre 1

## Contexte et démarche

### 1.1 Le changement climatique et ses conséquences sur le cycle hydrologique

Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) d'origine anthropique causeront très probablement des modifications dans le système climatique. Le système climatique régit et est en interaction permanente avec le cycle hydrologique. Parmi les conséquences prévisibles du changement climatique, les perturbations du cycle hydrologique risquent d'avoir un impact fort sur les hydrosystèmes. Par conséquent, le changement climatique d'origine anthropique est au cœur des préoccupations d'un grand nombre de gestionnaires des cours d'eau. On note une volonté de plus en plus forte d'anticiper les changements futurs pour mieux s'y adapter. Un nombre croissant de projets s'intéressent aujourd'hui aux impacts du changement climatique sur les risques hydrologiques. Parmi ceux-ci, le risque de sécheresse est un des risques principaux pesant sur les hydrosystèmes.

La réponse du système climatique à un changement de composition atmosphérique est complexe et n'est pas connue avec certitude à l'heure actuelle. Une chose est sûre, la réponse à l'échelle du globe ne sera pas homogène. Par exemple, on attend en réponse à l'augmentation des températures une augmentation de l'évapotranspiration et un changement dans les précipitations. Ce changement ne s'appliquera évidemment pas de façon uniforme à l'échelle de la planète et les réponses seront variables selon la région considérée. Pour répondre à ces questions, les Modèles de Circulation Générale (MCG) simulent le système climatique à partir de scénarios de composition de l'atmosphère. La plupart des modèles climatiques semblent s'accorder sur une baisse de la pluviométrie estivale sur une large partie sud de l'Europe à laquelle appartient une grande partie de la France. L'ampleur des changements attendus est cependant très différente selon le MCG considéré.

Les précipitations, qui régissent largement le cycle hydrologique, ne peuvent être si simplement abordées. La pluviométrie est une variable locale qu'un MCG ne peut traiter que de

façon approximative et simplifiée. Il convient alors de mieux comprendre les relations entre un changement global et ces impacts locaux. C'est sur ce point que se situe la complexité des études d'impact qui doivent lier les différentes échelles.

Depuis trente ans, les cours d'eau Français sont largement équipés d'ouvrages hydrauliques permettant d'atténuer les risques hydrologiques. Ces ouvrages sont majoritairement de grands barrages qui permettent, outre leur fonction principale, d'écarter les crues et/ou de soutenir les étiages. Certains barrages sont dimensionnés en fonction des crues qu'ils doivent écarter et/ou des étiages qui doivent être soutenus. Ces ouvrages ne peuvent se multiplier ni être exploités de façon plus intensive, ce qui nous amène à dire que la capacité de réponse aux risques hydrologiques restera limitée. Une des principales questions soulevée par le changement climatique est la capacité de la société à s'adapter aux changements profonds auxquels elle devra faire face. Les équipements en service à ce jour pourront-ils remplir efficacement leur fonction d'atténuation des risques avec les conditions hydrologiques du futur ? C'est aussi en ce sens que l'on doit s'interroger sur le changement climatique.

## 1.2 Démarche d'étude d'impact du changement climatique

Pour réaliser les études d'impacts du changement climatique sur l'hydrologie et notamment sur les étiages, il convient d'utiliser des projections climatiques à échelle fine. Par conséquent, le cheminement suivant est appliqué. Dans un premier temps, plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre peuvent être retenus. Ensuite, plusieurs modèles de circulation générale peuvent être utilisés. Ces modèles étant coûteux en temps de calcul, il ne peuvent tourner qu'en utilisant une large résolution. Une étape de descente d'échelle en scénarios locaux est indispensable pour fournir les données aux modèles d'impacts (ici modèles hydrologiques). Pour finir, les projections climatiques à l'échelle adaptée sont utilisées comme forçage des modèles hydrologiques pour étudier l'impact en termes de débits. La figure 1.1 illustre la démarche retenue pour les études d'impact. Chaque étape étant porteuse d'incertitudes, celles-ci se propagent en cascade.

### 1.2.1 Les scénarios d'émission de gaz à effet de serre

Le projet s'intéresse à l'impact du changement climatique sur les étiages en France. Pour démarrer un tel projet depuis une échelle globale, le changement climatique d'origine anthropique doit être dans un premier temps pris en compte. Les différents groupes du GIEC aboutissent régulièrement à l'ajustement des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Nous utiliserons au cours de notre projet les données du SRES (Special Report on Emissions

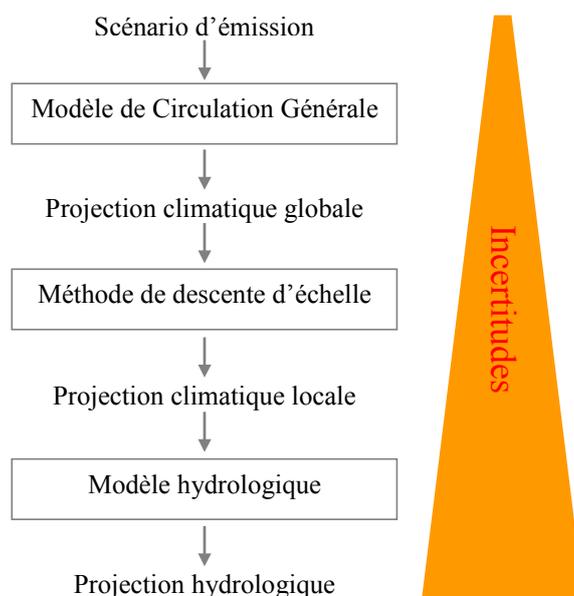


FIGURE 1.1 – Schéma de synthèse illustrant la démarche utilisée pour une étude d’impact du changement climatique.

Scenarios) (Nakicenovic *et al.*, 2000). Les différents scénarios représentent les compositions atmosphériques projetées selon différents scénarios d’émission. Dans un monde de connaissance absolue nous pourrions envisager les impacts du changement de composition de l’atmosphère sur le système climatique sans autre source d’incertitudes. La suite de notre rapport montrera que le changement de composition atmosphérique n’est pas l’unique inconnue d’un problème fort complexe. Trois scénarios d’émissions seront utilisés au cours de notre projet à savoir les scénarios A1B, A2 et B1 (cf. figure 1.2). L’incertitude liée au choix du scénario SRES sera étudiée en utilisant l’unique modèle de circulation générale ARPEGE V4.

## 1.2.2 Modèles de circulation de générale

Pour étudier le changement climatique, les climatologues utilisent de puissants outils numériques : les Modèles de Circulation Générale. Ces modèles simulent le système climatique à l’échelle de la planète. À ce jour, les MCG mobilisent la puissance de calcul des ordinateurs qui est le facteur limitant la résolution des simulations. Les modèles climatiques utilisent comme forçage la composition atmosphérique (issue des scénarios d’émission cités dans la partie 1.2.1) pour produire des projections climatiques. Dans notre projet, nous travaillerons avec un ensemble de 14 MCG représentatifs de la diversité des modèles actuels. Pour étudier la dispersion des modèles, nous travaillerons avec les 14 MCG utilisant le même forçage atmosphérique (à savoir le scénario A1B). Le scénario A1B, bien qu’en retrait sur les mesures actuelles, est considéré comme un scénario moyen et de ce fait a été privilégié dans le cadre de l’AR4 et du projet CMIP3 (Coupled Model Intercomparison Project) (lien vers le site : <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>).

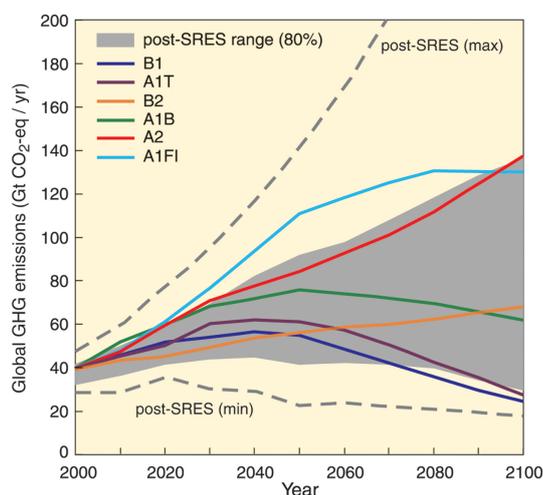


FIGURE 1.2 – Émissions mondiales de GES (en Gt équiv.-CO<sub>2</sub> par an) en l’absence de politiques climatiques additionnelles : six scénarios illustratifs de référence (SRES, lignes colorées) et intervalle au 80e percentile des scénarios publiés après le SRES (post-SRES, partie ombrée). Les courbes en pointillé délimitent la plage complète des scénarios post-SRES. Les GES sont le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub>, le N<sub>2</sub>O et les gaz fluorés. *Source IPCC (2007).*

Les résultats des modèles climatiques sous forçage atmosphérique sont en fait le point de départ de la démarche. En effet, c’est devant les résultats obtenus par les différents groupes de modélisation du climat qu’un constat a été émis : celui de la réduction des précipitations estivales sur la France. C’est à la vue de ces projections que certains usagers et gestionnaires des hydrosystèmes potentiellement impactés ont accompagné le développement des projets d’études d’impacts.

Ainsi, on trouve, dans le résumé à l’attention des décideurs du 4ieme rapport du GIEC, le point suivant.

*Dans le sud de l’Europe, région déjà vulnérable à la variabilité du climat, les changements climatiques devraient aggraver la situation (températures élevées et sécheresse) et nuire à l’approvisionnement en eau, au potentiel hydroélectrique, au tourisme estival et, en général, aux rendements agricoles.*

La figure 1.3 issue de l’AR4 du GIEC montre une réduction des précipitations estivales de façon robuste (90% des modèles au moins concordent). Cette figure montre aussi la résolution typique d’un MCG qui oscille entre 600 km et 250 km. Cette basse résolution illustre la nécessité de recourir à des techniques de descente d’échelle spatiale.

### 1.2.3 Descente d’échelle pour créer des projections locales

Pour une étude d’impact du changement climatique sur les étiages, la méthode consiste à utiliser un forçage atmosphérique sur un modèle hydrologique. Cependant, l’hydrologie nécessite des données à des échelles spatio-temporelles fines. Les MCG ne peuvent pas fournir directement de forçages atmosphériques aux modèles hydrologiques pour une raison simple :

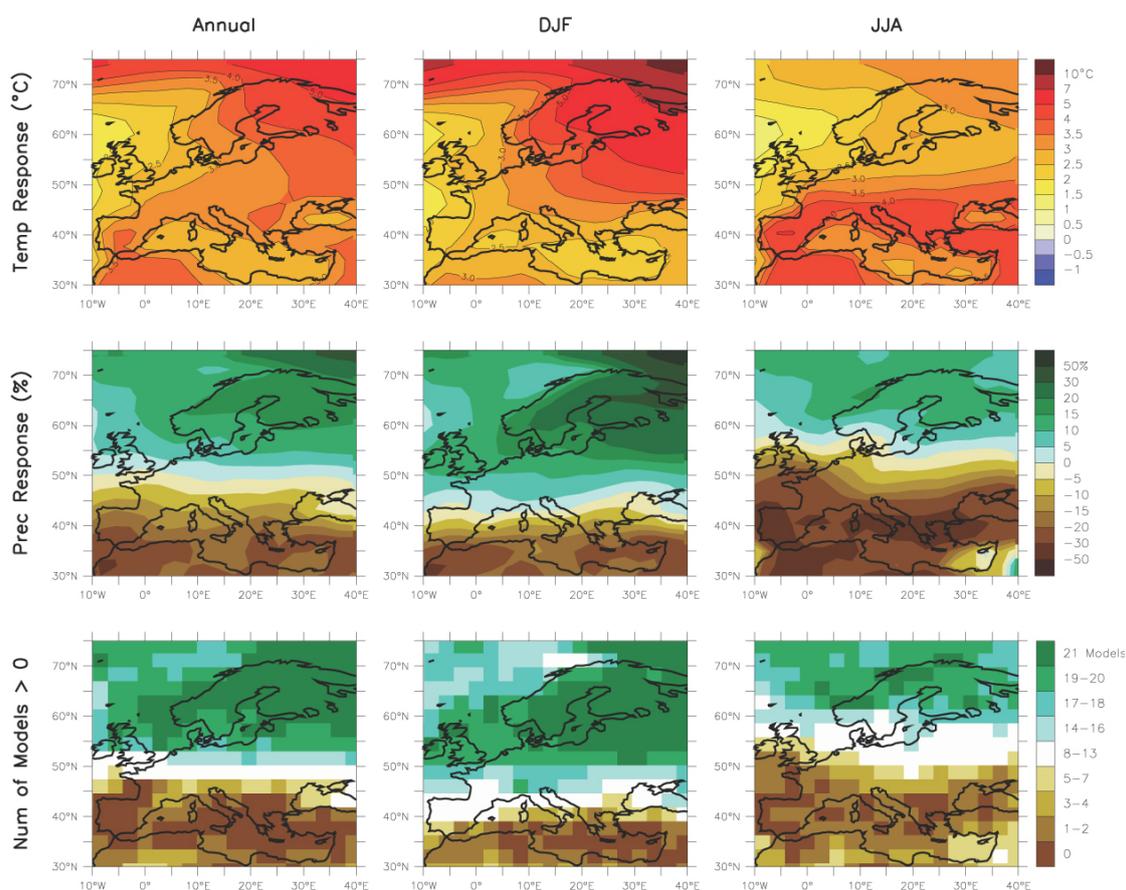


FIGURE 1.3 – Changement sur les températures et précipitations. En haut : changements de température, pour la période 2090-2099, par rapport à la période 1980-1999 (moyenne annuelle, Décembre-Janvier-Février et Juin-Juillet-Août) , moyenne des 21 MCG. Au milieu : idem, avec les variations relatives de précipitation. En bas : nombre de MCG parmi les 21 donnant une augmentation des précipitations. *Source IPCC-AR4*

le temps de calcul. En effet, les MCG ne peuvent figurer les simulations climatiques à une échelle spatiale et temporelle suffisamment fine. Les MCG ne peuvent prendre en compte des caractéristiques ayant un fort impact local (relief...). La simulation climatique étant particulièrement délicate pour les précipitations, des techniques de descente d'échelle ont du être créées pour prendre en compte les particularités locales influençant notamment les précipitations.

Les études d'impacts incluent aujourd'hui toutes une étape cruciale que constitue la désagrégation en projection locale ou descente d'échelle. Nous ne détaillerons pas dans notre rapport l'ensemble des techniques mais un rapide descriptif des différentes méthodes s'impose. Actuellement, deux façons de procéder totalement différentes existent.

### 1.2.3.1 La descente d'échelle dynamique

La descente d'échelle dynamique simule à l'échelle régionale la dynamique du système climatique local. Cette technique repose sur l'utilisation de modèles à plus haute résolution sur

une zone limitée. Il est aussi possible d'utiliser directement des modèles à résolution variable au sein desquels la résolution est augmentée autour de la zone d'étude et est réduite en s'éloignant vers l'antipode. C'est le cas du modèle ARPEGE VR (Gibelin et Déqué, 2003). Ces modèles atmosphériques à résolution variable sont couplés aux modèles basse résolution en utilisant comme forçage les conditions aux limites océaniques fournies par les MCGOA (MCG Océan Atmosphère). Une autre méthode voisine consiste à utiliser un modèle de circulation régionale à aire limitée qui sera couplé à un MCGOA pour les conditions aux limites océaniques et les frontières latérales atmosphériques (Giorgi, 1990). Ces modèles prennent mieux en compte les effets locaux sur le climat (comme par exemple l'effet du relief). Cependant, leur résolution restant limitée, il reste des biais liés à la paramétrisation des phénomènes plus petits que la maille des modèles. Les biais induits par les modèles climatiques peuvent-être corrigés par la méthode quantile-quantile (Déqué, 2003 ; Déqué, 2007). La méthode consiste à corriger les données simulées en utilisant les données « observées » à la résolution désirée.

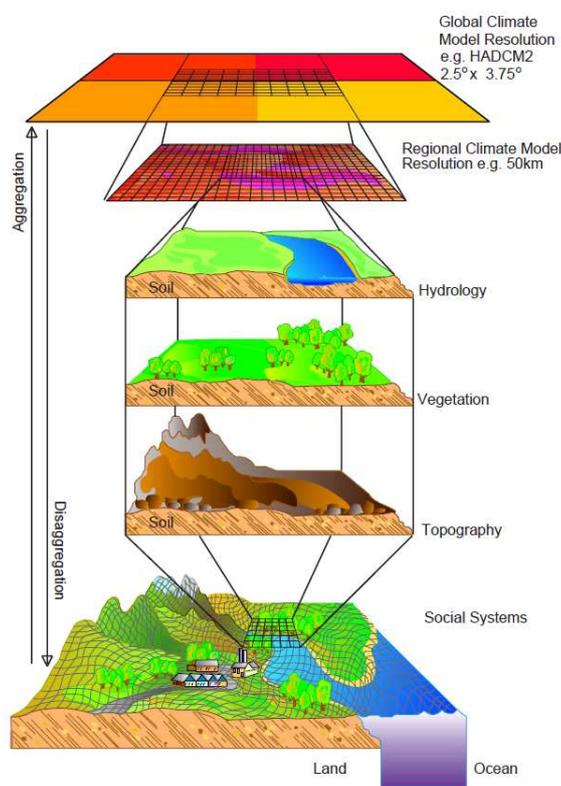


FIGURE 1.4 – Notion de descente d'échelle intégrée à l'étude d'impact (cas de descente d'échelle dynamique). *Source : David Viner, Climate Research Unit, University of East Anglia, R.U.*

### 1.2.3.2 La descente d'échelle statistique

La descente d'échelle statistique ne se fonde pas sur la dynamique climatique haute résolution mais sur des notions statistiques. Le postulat de départ repose sur le fait qu'il existe des relations statistiques entre l'état climatique de grande échelle et les caractéristiques du climat

local. La descente d'échelle statistique utilise les relations établies sur une période de référence entre les prédicteurs (caractéristiques du climat de grande échelle) et les variables climatiques prédites au niveau local (prédicteurs). Des relations appelées fonctions de transfert sont établis à partir des chroniques des prédicteurs et des prédicteurs. Ces fonctions de transfert sont ensuite réutilisées avec les prédicteurs issus des simulations climatiques des MCG.

Cette méthode comporte forcément des biais et incertitudes. Aussi, on cherche toujours à améliorer la qualité des prédicteurs sélectionnés qui doivent être suffisamment robustes mais aussi fortement corrélés avec les variables locales prédites. Enfin, la méthode est porteuse d'une hypothèse importante : le fait que les relations entre prédicteurs et variables prédites restera valable en climat futur modifié. Un autre inconvénient de cette méthode de descente d'échelle est que les phénomènes physiques sont « masqués » derrière les analyses statistiques. Pour le projet HydroQual, c'est la méthode de descente d'échelle dite « des régimes de temps » (Boé, 2007) qui a été retenue. La plupart des données sont issues des données régionalisées par le CERFACS pour le projet SCRATCH08 (Pagé *et al.*, 2008). L'objet de ce projet était de mettre à disposition les différents scénarios issus de l'exercice d'intercomparaison de modèles couplés CMIP3 et ce à l'échelle régionale. Ces données ont déjà été utilisées pour le projet RExHySS (qui avait couvert les bassins de la Seine et de la Somme).

Un des intérêts principaux de la descente d'échelle statistique est le fait qu'elle est applicable aux différentes projections issues des MCG. Les relations établies entre prédicteurs et prédicteurs sont utilisées en utilisant différents scénarios de grande échelle (fournissant les prédicteurs) pour obtenir des scénarios régionaux.

### 1.3 Les études d'impacts sur l'hydrologie : le contexte français

La dernière décennie a été marquée par l'émergence de projets de recherche sur l'impact du changement climatique sur les hydrosystèmes. La première génération de ces projets (GICC-Rhône (Noilhan *et al.*, 2000 ; Leblois, 2003) et GICC-Seine (Ducharne *et al.*, 2004)) ont permis d'étudier l'impact du changement climatique sur les régimes hydrologiques moyens. Ces projets ont utilisé des projections climatiques générées par la méthode des anomalies. Cette méthode consiste à modifier les chroniques atmosphériques observées localement en y ajoutant les perturbations moyennes issues des projections climatiques de grande échelle. Ces projets ne prenaient donc pas en compte les changements sur la dynamique climatique et n'étaient donc pas adaptés à l'étude des extrêmes hydrologiques.

Les avancées des dernières années en termes de descente d'échelle des projections climatiques globales en projections locales ont permis d'entreprendre de nouvelles études d'impacts et de s'intéresser aux extrêmes hydrologiques. Dans le même temps, après la première génération d'études d'impact du changement climatique, les gestionnaires et autres acteurs de l'eau ont

voulu en savoir plus sur les extrêmes (étiages et crues) synonymes de risques hydrologiques. C'est dans ce contexte que les projets GICC-RExHySS (Impact du Changement Climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme (Ducharne *et al.*, 2009)) et ICC-HydroQual (Impact du Changement Climatique sur l'hydrosystème Loire : HYDRologie, Régime thermique, QUALité des eaux (Moatar *et al.*, 2010)) s'attachent à l'étude des extrêmes hydrologiques.

Pour étudier l'impact du changement climatique sur les étiages, les méthodes d'études mises en place sont lourdes et constituées de plusieurs étapes pour aller des scénarios d'émission de gaz à effet de serre à la quantification des étiages. Chaque étape induit des incertitudes plus ou moins importantes que nous cherchons à quantifier pour pouvoir communiquer les résultats des différentes projections.

## 1.4 Les spécificités du projet HydroQual

L'objet de la section est d'énumérer les différentes données utilisées pour le projet HydroQual. Cette section permettra de définir les informations initialement à disposition pour mener à bien le projet. Initialement, trois types de données étaient à disposition du projet. Les chroniques de débits observés pour un certain nombre de stations seront décrites en section 1.4.1. Les données atmosphériques d'une période de référence sont présentés en section 1.4.3. Enfin, les données des projections climatiques utilisées pour étudier l'impact du changement climatique sur l'hydrosystème sont introduites en section 1.4.4.

### 1.4.1 Domaine d'étude

Le domaine d'étude considéré est le bassin versant de la Loire à Montjean (entre Angers et Nantes). La surface du bassin est d'environ 110 000 km<sup>2</sup>. Pour le projet HydroQual, le bassin a été divisé en 68 sous bassins versants. Cette discrétisation spatiale permet le fonctionnement des deux modèles hydrologiques semi-distribués (cf section 1.4.5). Les 68 bassins sont les fruits d'un découpage en 11 entités hydrographiques qui elles-mêmes sont découpées en bassins plus petits afin d'être in fine dans une gamme de surfaces allant de 120 à 3700 km<sup>2</sup>. Ce découpage a été effectué par Vincent Bustillo (Université de Tours) en préambule du projet. Sur les 68 bassins versants retenus, 60 disposent d'une station hydrométrique servant de station de contrôle à l'exutoire ou à sa proximité. Le découpage a été réalisé de manière à ce que les sous-bassins soient homogènes pour ce qui est des paramètres régissant l'hydrologie (peu de disparités météorologiques, occupation du sol et géologie relativement homogènes au sein d'un bassin)

Chaque sous bassin dispose d'un point exutoire représenté sur la figure 1.5. Les modèles hydrologiques produisent des chroniques en ces points. En ces mêmes localisations, nous disposons d'un certain nombre de stations de contrôle du réseau Banque Hydro. Ces stations

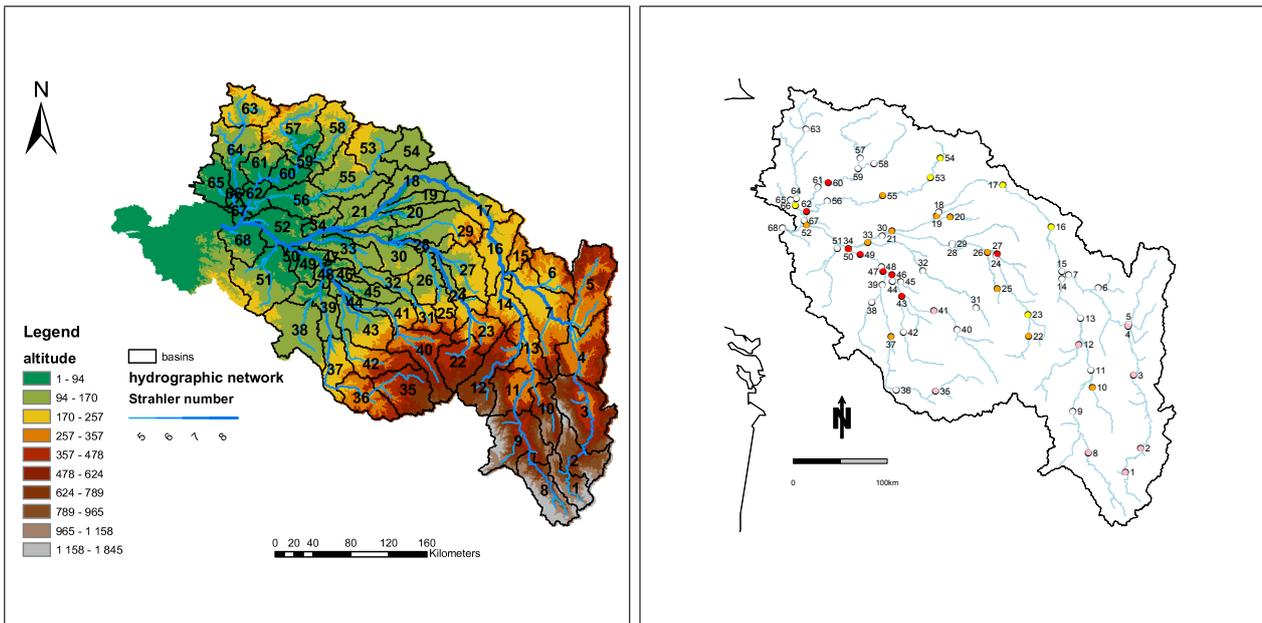


FIGURE 1.5 – A gauche : Représentation du bassin de la Loire découpé en 68 sous bassins (Bourgin, 2009). A droite : Position des 68 stations situées aux exutoires. En rouge, les points exutoires sans station de contrôle. En orange, les stations dont les observations sont insuffisantes. En rose, les stations dont le débit est fortement influencé.

servent à caler les modèles hydrologiques et à confronter les résultats des modèles aux observations. Une synthèse sur la qualité des données fournies par le réseau d’observation et sur l’adéquation entre le réseau existant et les points exutoires (découlant de la discrétisation spatiale) est figuré dans le tableau 1.6.

### 1.4.2 Données hydrologiques

Les chroniques des débits ont une couverture temporelle variable. Nous retiendrons ici seulement les stations disposant de 15 années d’enregistrement sur la période de référence (du 1<sup>er</sup> août 1974 au 31 juillet 1999). Ce choix est issu de tests de sensibilité effectué par Eric Sauquet (Cemagref) en préambule du projet. En dessous de 15 années, nous considérons que la variabilité climatique n’est pas entièrement prise en compte, induisant un biais. Les autres stations sont utilisées pour le calage des modèles hydrologiques mais ne pourront servir à l’évaluation. En résumé, sur les 68 points exutoires retenus, 8 ne possèdent pas de stations de contrôle et 13 ne disposent pas de chroniques d’observations assez longues. Par conséquent, 47 points exutoires sont retenus pour l’évaluation. Parmi ces 47 points, 8 disposent d’une station dont les débits sont notablement influencés le plus souvent par des retenues d’eau (cf. figure 1.6).

Numéro	Rivière	Localisation	Surface totale depuis la source (km <sup>2</sup> )
1	Loire	Chadrac	1327
2	Loire	Bas-en-Basset	3259
3	Loire	Villerest	6611
4	Loire	Digoin	9332
5	Arroux	Digoin	3166
6	Aron	Verneuil	1468
7	Loire	Nevers	17628
8	Allier	Vieille-Brioude	2263
9	Allier	Vic-le-Comte	5380
10	Dore	Dorat	1522
11	Allier	Saint-Yorre	8924
12	Sioule	St Pourcin	2399
13	Allier	Moulins	12998
14	Allier	Cuffy	14344
15	Loire	Cours-les-Barres	32679
16	Loire	Cosne-sur-Loire	34742
17	Loire	Gien	36505
18	Loire	Blois	38352
19	Cousson	Chailles	744
20	Beuvron	Tour-en-Sologne	1073
21	Loire	Tours	42171
22	Cher	Saint-Victor	1837
23	Cher	Entre St-Victor et Foecy	3227
24	Cher	Foecy	4530
25	Arnon	Méreau	827
26	Arnon	Foecy	2174
27	Yèvre	Foecy	1973
28	Cher	Selles-sur-Cher	9296
29	Sauldre	Selles-sur-Cher	2284
30	Cher	Savonnières	13701
31	Indre	amont	644
32	Indre	Saint-Cyrans	1709
33	Indre	Brethemont	3332
34	Loire	Conf. Vienne	60025
35	Vienne	Palais	2297
36	Vienne	Etagnac	4101
37	Vienne	Entre Etagnac et Ingrandes	5514
38	Clain	Dissay	2864
39	Vienne	Ingrandes	10040
40	Creuse	Eguzon	2428
41	Creuse	Ciron	3341
42	Gartempe	Montmorillon	1870
43	Gartempe	exutoire	3907
44	Creuse	Leugny	8013
45	Claise	exutoire	890
46	Creuse	Descartes	9266
47	Creuse	exutoire	9563
48	Vienne	Nouatre	19900
49	Vienne	Chinon	20828
50	Vienne	exutoire	21112
51	Thouet	Chace	3280
52	Loire	Ponts-de-Ce	86155
53	Loir	Moree	2108
54	Cosnie	exutoire	1479
55	Loir	Flée	5922
56	Loir	Durtal	7921
57	Sarthe	Neuville	2711
58	Huisne	Montfort	1915
59	Sarthe	Après Confl Huisne	5295
60	Sarthe	Entre Neuville et St D	6263
61	Sarthe	Saint-Denis	7493
62	Sarthe	Après Confl Loir	16255
63	Mayenne	St Fraimbault	1857
64	Mayenne	Chambellay	4164
65	Oudon	Andigne	1414
66	Mayenne	Après Confl Oudon	5702
67	Maine	Angers	22169
68	Loire	Montjean	110043

FIGURE 1.6 – Descriptif des stations utilisées. En rouge, les points exutoires sans station de contrôle. En orange, les stations dont les observations sont insuffisantes. En rose, les stations dont le débit est fortement influencé.

### 1.4.3 Données météorologiques observées

Afin de caler les modèles (c'est à dire établir les relations entre pluies et débit), il faut disposer d'observations météorologiques ayant une couverture géographique haute-résolution et une couverture temporelle au pas de temps horaire (ou journalier selon le modèle). Pour le projet HydroQual, les données météorologiques issues de la réanalyse atmosphérique SAFRAN sont utilisées. La base de données fournit les informations des années 1958 à 2008 au pas de temps horaire pour les sept variables suivantes : le module du vent à 10 m, l'humidité spécifique, la température à 2 m, les rayonnements solaire et infrarouge descendants et les précipitations liquides et solides. La France et donc la zone d'étude est intégralement couverte par une grille dont les mailles font 8km de côté. Une description complète et une analyse de Safran sont présentées par Quintana-Seguí *et al.* (2008) et Vidal *et al.* (2010).

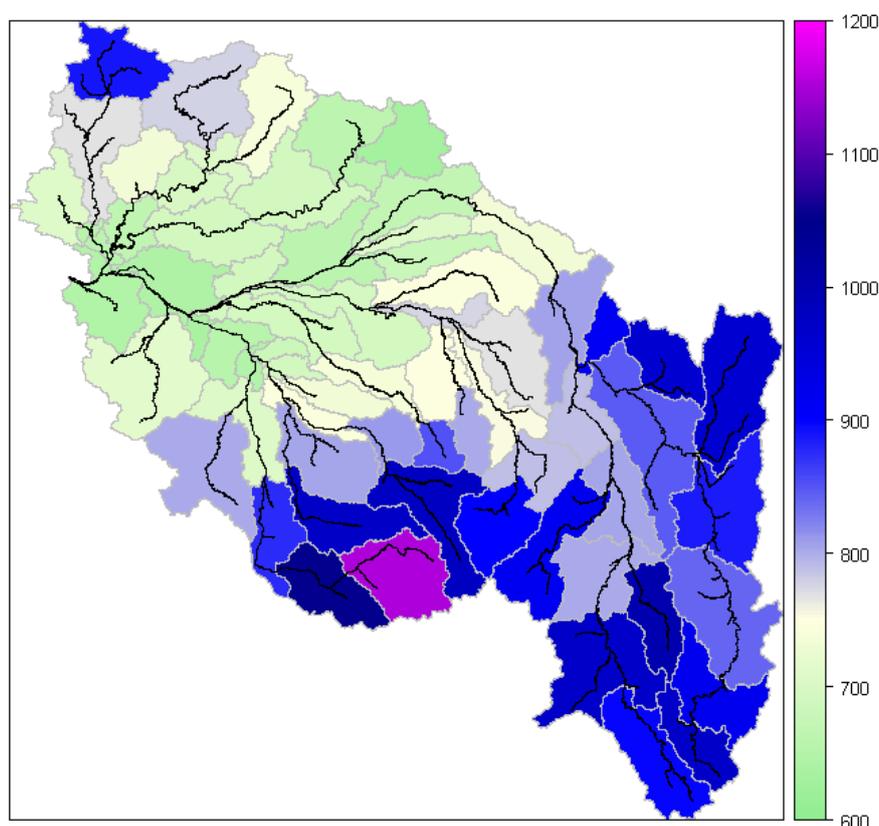


FIGURE 1.7 – Pluviométrie annuelle moyenne en millimètres sur la période 1971-2000. Les valeurs sont issues de la réanalyse Safran puis réaggrégées par sous bassin versant.

La figure 1.7 illustre l'hétérogénéité spatiale dans la répartition des précipitations. Les précipitations annuelles moyennes varient du simple au double selon le bassin étudié. L'effet orographique est visible avec des cumuls pluviométriques proches du mètre annuel sur le Massif Central. Le val de Loire est lui bien moins arrosé avec des précipitations oscillant entre 600 et 750 mm/an.

Les données issues de la réanalyse SAFRAN constituent le forçage atmosphérique des modèles hydrologiques. Ces données permettent le calage et le contrôle des modèles au pas de temps journalier.

#### 1.4.4 Les données climatiques utilisées

Il est à l'heure actuelle courant pour des études d'impact du changement climatique de mobiliser les résultats de plusieurs projections en tentant de couvrir l'incertitude liée à la modélisation par la dispersion des modèles<sup>1</sup>.

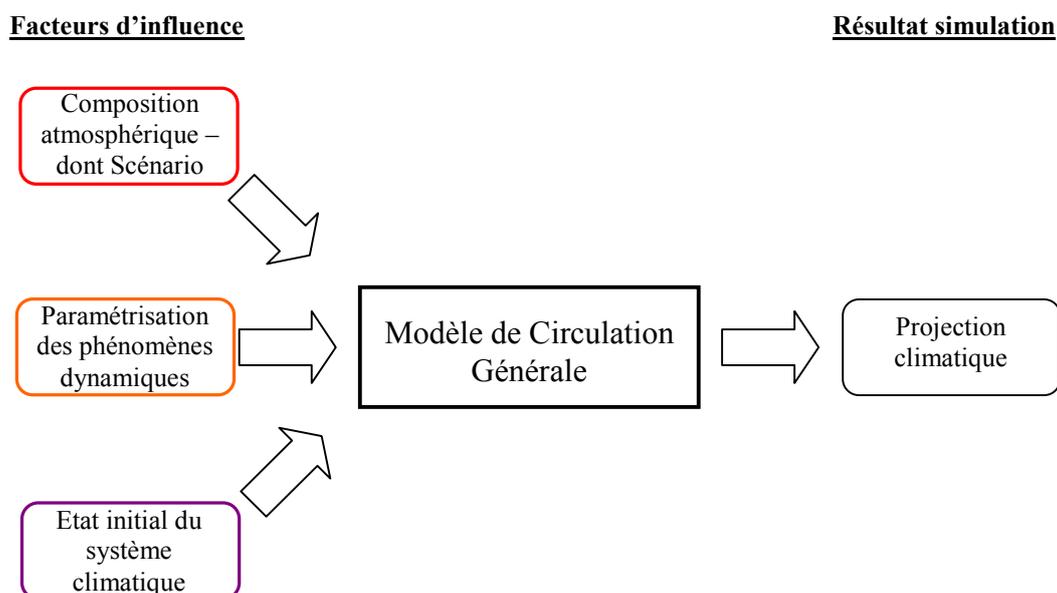


FIGURE 1.8 – Schéma de fonctionnement simplifié d'un MCG.

Sur la figure 1.8, nous mettons en évidence les trois principaux facteurs d'influence d'un MCG.

La composition atmosphérique est forcée par les différents scénarios d'émissions issus de l'AR4 du GIEC (cf section 1.2.1). Pour étudier la dispersion liée au choix d'un scénario d'émission, 3 scénarios (A1B, A2 et B1) ont été simulés avec le modèle Arpège.

Certaines équations de la physique utilisées par les modèles climatiques doivent être paramétrées. Certains phénomènes, à l'instar de la convection, peuvent être résolus numériquement mais nécessitent une résolution spatiale plus fine que celle permise par les MCG. Les phénomènes se produisant à une échelle inférieure à celle de la maille du MCG sont paramétrés, induisant des incertitudes supplémentaires. Chaque modèle fixe différemment ces paramètres

<sup>1</sup>Notons que l'incertitude et la dispersion sont deux notions différentes. L'incertitude peut très bien être plus grande ou plus faible que la dispersion inter-modèle mais le fait d'utiliser un grand nombre de modèle permet d'estimer l'incertitude.

selon sa façon de traiter les phénomènes. Pour étudier la dispersion inter-MCG nous utilisons le scénario d'émission A1B avec 14 MCG différents.

Le choix de l'état initial est important et des choix différents induisent des projections climatiques différentes avec un climat presque identique. Pour rendre compte de l'incertitude à propos de ces conditions initiales, un MCG (ARPEGE) a été testé avec 4 états initiaux différents correspondant à l'état du système atmosphérique au 1<sup>er</sup>, 2, 3 et 4 janvier 1950. Ces quatre simulations seront appelés par la suite « Runs ». Il s'avère que le MCG répond différemment à ces différentes conditions initiales malgré un forçage océanique commun (températures de la surface de la mer observées). Pour la première fois, le projet HydroQual s'est penché sur les incertitudes liées aux conditions initiales.

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)		

FIGURE 1.9 – Illustration des différentes « familles » de projections.

Le tableau de synthèse 1.9 représente les projections climatiques utilisées. Elles sont classées par « familles » au sein desquelles un seul aspect diffère.

Pour le projet HydroQual, traité en priorité pendant le stage, seule la descente d'échelle statistique a été utilisée pour produire les projections locales. La descente d'échelle entre les projections climatiques globales et les projections locales est réalisée sur la grille SAFRAN. D'autres méthodes de descente d'échelle ont été utilisées pour le projet RExHySS et les incertitudes liées au choix d'une méthode de descente d'échelle peuvent y être abordées.

Sous projection climatique, la pluviométrie mensuelle est modifiée comme le présentent les figures 1.10 et 1.11. Ces projections sont les moyennes des 14 MCG désagrégés à l'échelle locale (maille Safran) puis réaggrégés par bassin versant. Les deux figures illustrent la baisse des cumuls pluviométriques une large partie de l'année (environ 8 mois sur 12) pour la

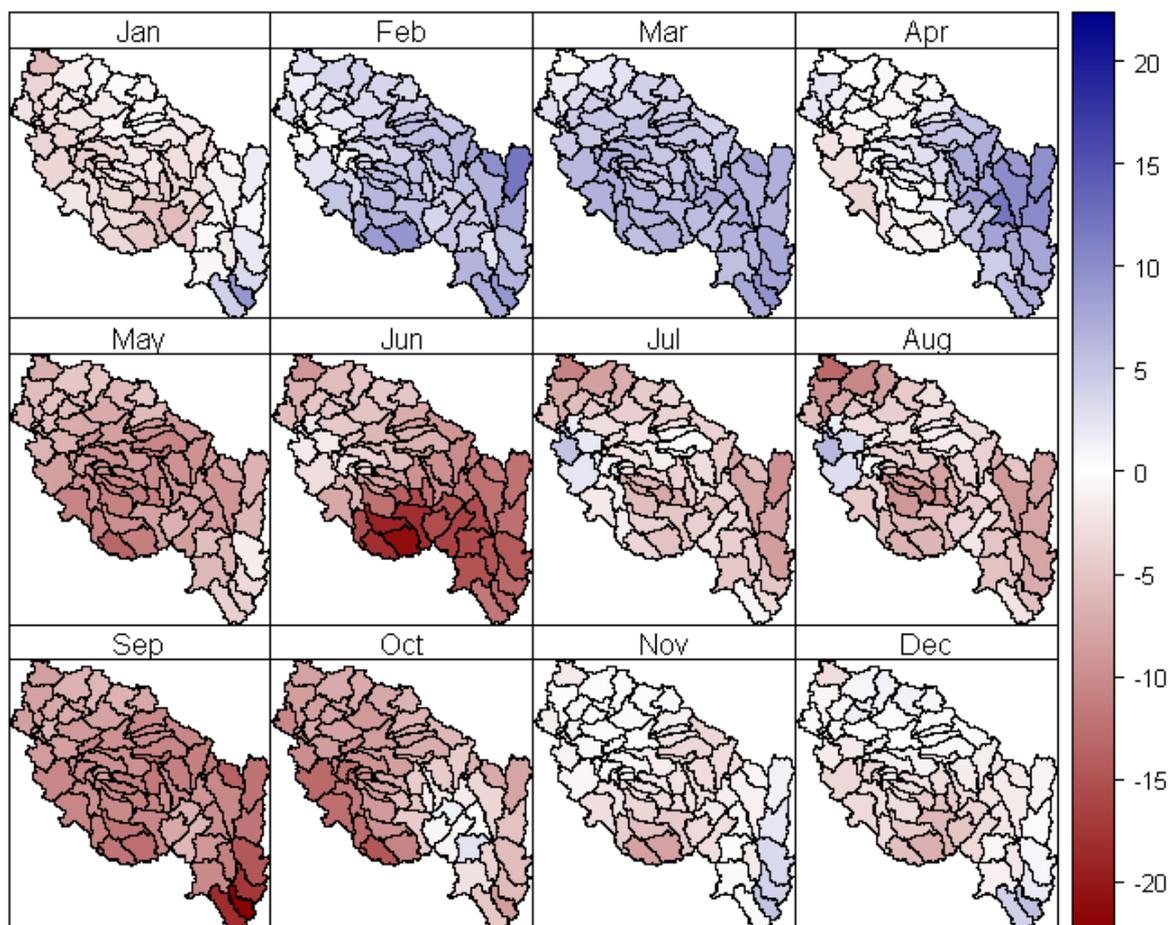


FIGURE 1.10 – Variation relative en % de la pluviométrie mensuelle en milieu de XXI<sup>e</sup> siècle (2046-2065) par rapport à la période 1971-2000 pour les 68 bassins. (Source JP. Vidal, communication personnelle)

plupart des bassins. C'est la réponse hydrologique à cette réduction des précipitations que nous étudions dans notre projet. La réponse hydrologique ne sera pas uniquement influencée par la baisse des cumuls pluviométriques mais aussi par l'augmentation des températures et en conséquence de l'évapotranspiration potentielle.

### 1.4.5 La modélisation hydrologique

Pour étudier les impacts hydrologiques des différentes simulations (préalablement désagrégées en scénarios locaux), plusieurs modèles hydrologiques ont été utilisés. Pour déterminer la réponse hydrologique à un forçage atmosphérique, différentes classes de modèles existent. Les modèles globaux sont fondés sur le calcul du débit à l'exutoire d'un bassin versant. Il s'agit souvent de modèles à réservoirs où les phénomènes physiques ne sont pas explicites. À l'inverse, les modèles semi-distribués et distribués utilisent les équations physiques régissant le phénomène de transformation des pluies en débit.

Après avoir fait la distinction entre modèles globaux et modèles distribués, une autre forme

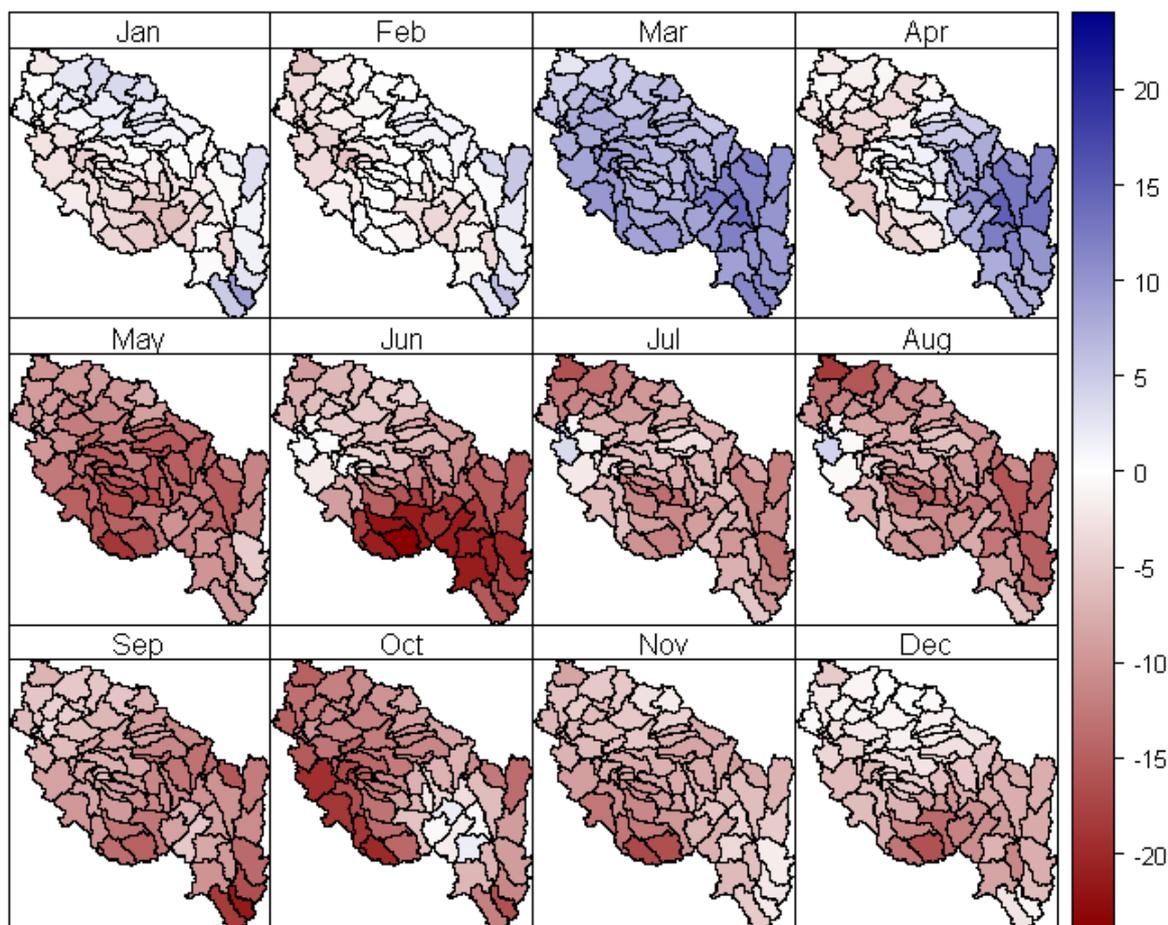


FIGURE 1.11 – Variation relative en % de la pluviométrie mensuelle en fin de siècle (2081-2100) par rapport à la période 1971-2000. (Source JP. Vidal, communication personnelle)

de distinction est possible. Elle est fondée sur la façon dont les pluies sont transformées en débit. Les modèles physiques sont régis par les équations décrivant les phénomènes physiques à l'échelle de la maille retenue. Les sorties en chaque point sont ensuite agrégées pour modéliser le fonctionnement du bassin versant entier. La plupart des modèles distribués sont des modèles à base physique. A l'opposé, les modèles conceptuels décrivent le fonctionnement d'un ensemble (le bassin versant) sans s'attacher au fonctionnement de chaque constituant.

Dans la réalité, la classification n'est pas toujours si nette, surtout dans le cas des modèles semi-distribués.

Dans le projet HydroQual, seulement deux modèles hydrologiques sont utilisés. Il s'agit du modèle Eros (Ensemble de Rivières Organisées en Sous-bassins) développé par le BRGM (Thiéry, 1995) et du modèle CLSM (Catchment Land Surface Model) développé par l'UMR Sisyphe (Ducharne *et al.* (2000); Gascoin *et al.*(2009)). Eros est un modèle semi-distribué qui utilise la discrétisation en 68 bassins versants décrite au 1.4.1. Il s'agit d'un modèle « en grappe » où chaque sous bassin utilise le modèle conceptuel global GARDENIA (Thiéry 2003, Thiéry 2004) à base hydrogéologique. Le modèle CLSM 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.

Les modèles hydrologiques retenus sont validés en temps présent pour ne pas ajouter d'incertitudes importantes par la modélisation. Un plus grand nombre de modèles hydrologiques ont été utilisés pour le projet RExHySS pour pouvoir étudier la dispersion liée aux modèles hydrologiques. Au cours de ce projet, le modèle CLSM avait été identifié comme étant un horsain présentant des défauts de robustesse. Il a été repris dans le projet HydroQual avec un nombre significatif de modifications.

Pour la plupart d'entre eux, les modèles hydrologiques sont calés en utilisant des chroniques de débits observés. Le modèle utilise en entrée les réanalyses haute définition issues de SAFRAN. La procédure de calage est basée sur l'optimisation du critère de Nash sur les débits journaliers<sup>2</sup>. La robustesse des modèles est testée en utilisant des forçages atmosphériques différents sous climat similaire. Ainsi, le bon calage et la robustesse d'un modèle hydrologique n'est cependant pas gage du réalisme de ce même modèle sous climat futur.

Les modélisations hydrologiques sous forçage atmosphérique ont été réalisées par Agnès Ducharme (UMR Sisyphe) et Vincent Bustillo (Université de Tours) pour CLSM et Dominique Thiery (BRGM) pour le modèle Eros. Ce sont les sorties de ces modèles qui sont exploitées pour notre étude. Dans l'absolu, il faudrait disposer de jeux de données distincts pour la procédure de calage d'une part et pour la procédure de contrôle d'autre part. Dans la réalité, devant la faible quantité de données disponibles, il faut souvent avoir recours à des procédures de calage-validation. Dans ce cas, il faut utiliser une partie de la chronique pour le calage et l'autre partie pour la validation puis inverser le rôle de deux chroniques. Le modèle est bon si les critères d'efficience comme par exemple le critère de Nash ne s'effondrent pas entre le calage et le contrôle. Le contrôle des modèles hydrologique a été réalisé par les modélisateurs eux mêmes.

Nous nous intéresseront pour notre étude à l'évaluation des modèles sur les étiages en particulier. L'évaluation sera réalisée en étudiant l'adéquation entre les observations et les chroniques modélisées sous forçage Safran. Nous regarderons en détail d'une part les bas débits et d'autre part la dynamique des étiages.

## 1.5 Synthèse

Les études d'impact telles celles dont nous disposons actuellement utilisent un découpage d'un bassin fluvial en sous bassins versants. Dans le cadre du projet HydroQual sur le bassin de la Loire, un découpage en 68 bassins a été effectué. Ceci permet de disposer d'une spatialisation des résultats mais alourdit considérablement le volume de données à traiter. Pour exemple, sur ce même projet, nous traitons les données issues de 14 MCG (sous un seul scénario), 1 MCG

---

<sup>2</sup>Le Nash sur le logarithme des débits permettrait d'avoir un critère d'efficience plus spécifique aux bas débits.

avec 3 scénarios d'émission et 1 MCG avec 4 conditions initiales soit au total 21 projections climatiques. Ces 21 projections seront traitées avec 2 modèles hydrologiques différents sur les 68 sous bassins versants. Pour chaque projection hydrologique obtenue, nous retenons une période de référence, une période en milieu de XXI<sup>e</sup> siècle et une période en fin de siècle. Au total, nous devons donc traiter 8568 projections hydrologiques durant en moyenne 20 ans au pas de temps journalier soit plus de 60 millions de valeurs. Il faut aussi ajouter les chroniques observées et les couples SAFRAN-modèles hydrologiques. Devant un tel volume de données, il faudra donc trouver des techniques pour exploiter de façon synthétique les données. Les scénarios ont été classés en ensembles homogènes pour faciliter le traitement des données. Ainsi, une famille sera caractérisée par une valeur moyenne et une dispersion.

Nous avons vu qu'à chaque étape de notre méthode un nombre important de possibilités se dégagent. Il est impossible pour chaque projet d'exploiter toutes les combinaisons possibles. Par conséquent, nous nous proposons d'étudier la dispersion liée à chaque étape de la méthode (choix du scénario, choix du MCG, choix d'une méthode de descente d'échelle ou choix d'un modèle hydrologique). Le but est à terme de disposer d'informations sur les points à traiter de façon prioritaire (choix de plusieurs méthodes pour l'étape prioritaire). Il faut cependant être conscient que la dispersion inter-scénario ou inter-MCG dépend du choix du modèle hydrologique en fin de chaîne. La robustesse du modèle hydrologique influera sur la dispersion inter-MCG.

Le chapitre suivant s'intéresse aux moyens mis en oeuvre pour exploiter les données. Les outils permettent d'étudier les bas débits et les étiages sur l'ensemble des données hydrologiques disponibles.

# Chapitre 2

## Outils et méthodes

L'objet du chapitre présent est de présenter les outils utilisés et les méthodes mises en place pour entreprendre l'étude d'impact. Nous utiliserons par la suite les méthodes décrites dans ce chapitre pour caractériser les étiages. Dans un premier temps, nous décrirons les méthodes utilisées pour caractériser les bas débits et les étiages. Nous développerons ensuite les outils concrets utilisés pour analyser les chroniques des débits. Enfin, nous introduirons les incertitudes induites par les différentes étapes de la démarche.

### 2.1 Caractérisation des étiages

#### 2.1.1 Analyse des bas débits

Pour analyser une chronique hydrologique, une première étape peut être l'analyse des bas débits. D'une façon simple, on extrait différents quantiles d'une courbe des débits classés. Le quantile  $Q_x$  d'une chronique des débits journaliers est la valeur de débit qui est dépassée par  $x\%$  des valeurs. Pour un projet visant à étudier l'impact du changement climatique sur les étiages, il est d'abord important de se concentrer sur les indicateurs simples que constituent les quantiles de bas débits  $Q_{90}$  ou  $Q_{95}$ . Cependant, il existe différentes possibilités concernant l'échantillonnage des valeurs. On peut calculer le  $Q_{90}$  sur l'ensemble d'une chronique mais aussi sur une année, une saison ou sur une fenêtre glissante de 30 jours centrée sur un jour  $j$  de l'année. Du choix de l'échantillon considéré dépendra le type de bas débits caractérisé. Dans notre cas nous nous concentrons sur le cas de figure le plus simple. C'est le  $Q_{90}$  de toute la chronique qui est évalué. Il permet ensuite d'être un critère d'évaluation de la capacité des chaînes de modélisation à reproduire les bas débits. Il sera aussi utilisé pour présenter les résultats des différentes simulations climato-hydrologiques concernant les bas débits.

Dans la suite de notre démarche, le  $Q_{90}$  de la chronique sera utilisé comme seuil en deçà duquel une rivière sera en épisode d'étiage. Le choix du quantile 90 procède d'un compromis entre discrimination des valeurs extrêmes et nombre d'étiages sévères identifiés.

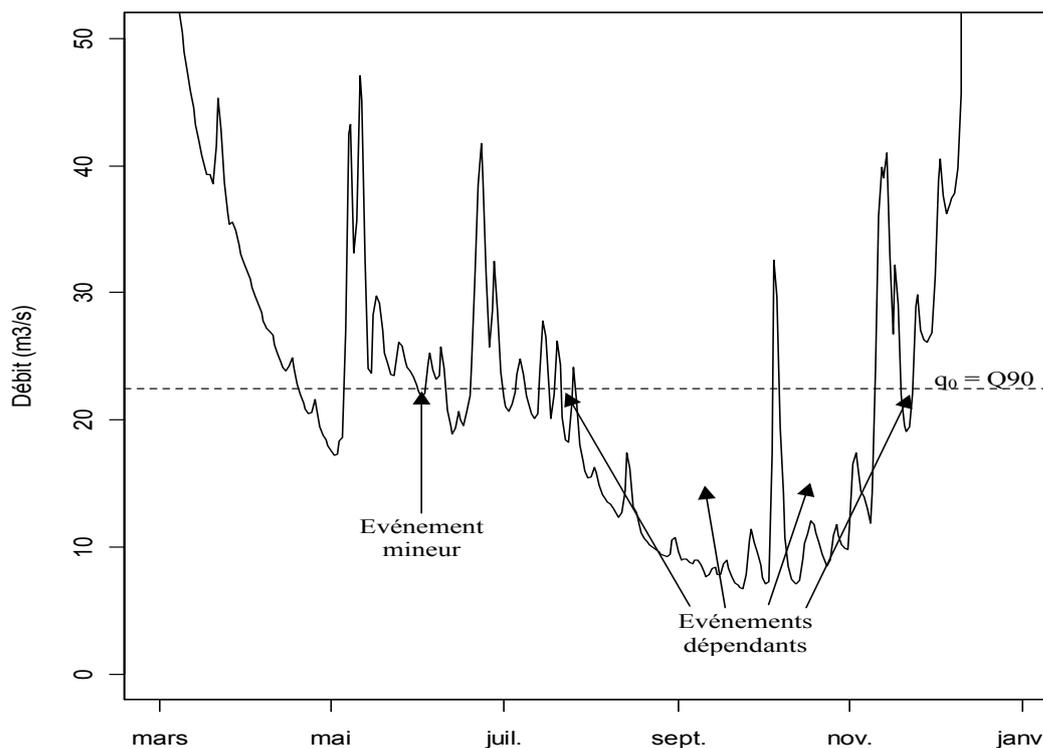


FIGURE 2.1 – Chronique de débits journaliers illustrant les problèmes d’interdépendance et des événements mineurs.

### 2.1.2 Caractérisation des épisodes d’étiages

Les chroniques générées par les chaînes de modélisation peuvent être exploitées plus en profondeur. Il est plus pertinent de caractériser les épisodes d’étiage par des caractéristiques qui leur sont propres. La caractérisation des événements peut ensuite servir de support à l’étude de la dynamique des étiages.

Pour caractériser les étiages, de nombreuses méthodes ont été développées. Dans notre cas, nous nous focalisons sur les débits. Il est à noter que les épisodes de sécheresse sont très dépendants de la définition qu’on en donne. Ici, on utilise les chroniques de débits pour extraire un quantile (dans notre cas  $Q90$ ) comme le seuil en deçà duquel la rivière est en épisode d’étiage. Cette approche appelée « threshold level method » a été introduite par Yevjevich (1967) cité dans Tallaksen et van Lanen (2004) et permet ainsi de quantifier l’étiage par : une durée, un déficit, une période d’occurrence et un débit minimum. Cependant, si l’on applique strictement cette procédure, deux problèmes illustrés dans la figure 2.1 peuvent apparaître : la présence d’épisodes mineurs et l’interdépendance de deux événements.

En premier lieu, la fin d’un épisode d’étiage se produit dès lors que le débit redevient supérieur au seuil retenu (ici  $Q90$ ). Par conséquent un épisode long de sécheresse peut être découpé en épisodes plus courts et interdépendants par des pics ponctuels de débits comme l’illustre la figure 2.1. Pour remédier à ce problème, Tallaksen *et al.* (1997) ont repris la méthode du Sequent Peak Algorithm (SPA) en tant que méthode de sélection des étiages. Le SPA

a été initialement créé par Vogel et Stedinger (1987) pour le dimensionnement des bassins réservoirs. Le concept de la méthode est de démarrer un épisode d'étiage quand le débit passe sous le seuil et d'arrêter cette séquence quand le volume écoulé redevient supérieur au volume qui aurait du s'écouler si le débit était resté constant égal au seuil. De cette manière, deux épisodes interdépendants seront fusionnés si le réservoir n'a pas récupéré son volume initial avant le début du second épisode. En termes mathématiques, la méthode se traduit de la façon suivante.

$$Déficit_{(t)} = \begin{cases} Déficit_{(t-1)} + q_0 - q(t) & \text{si positif} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{avec } q_0 \text{ le seuil et } q(t) \text{ le débit à l'instant } t$$

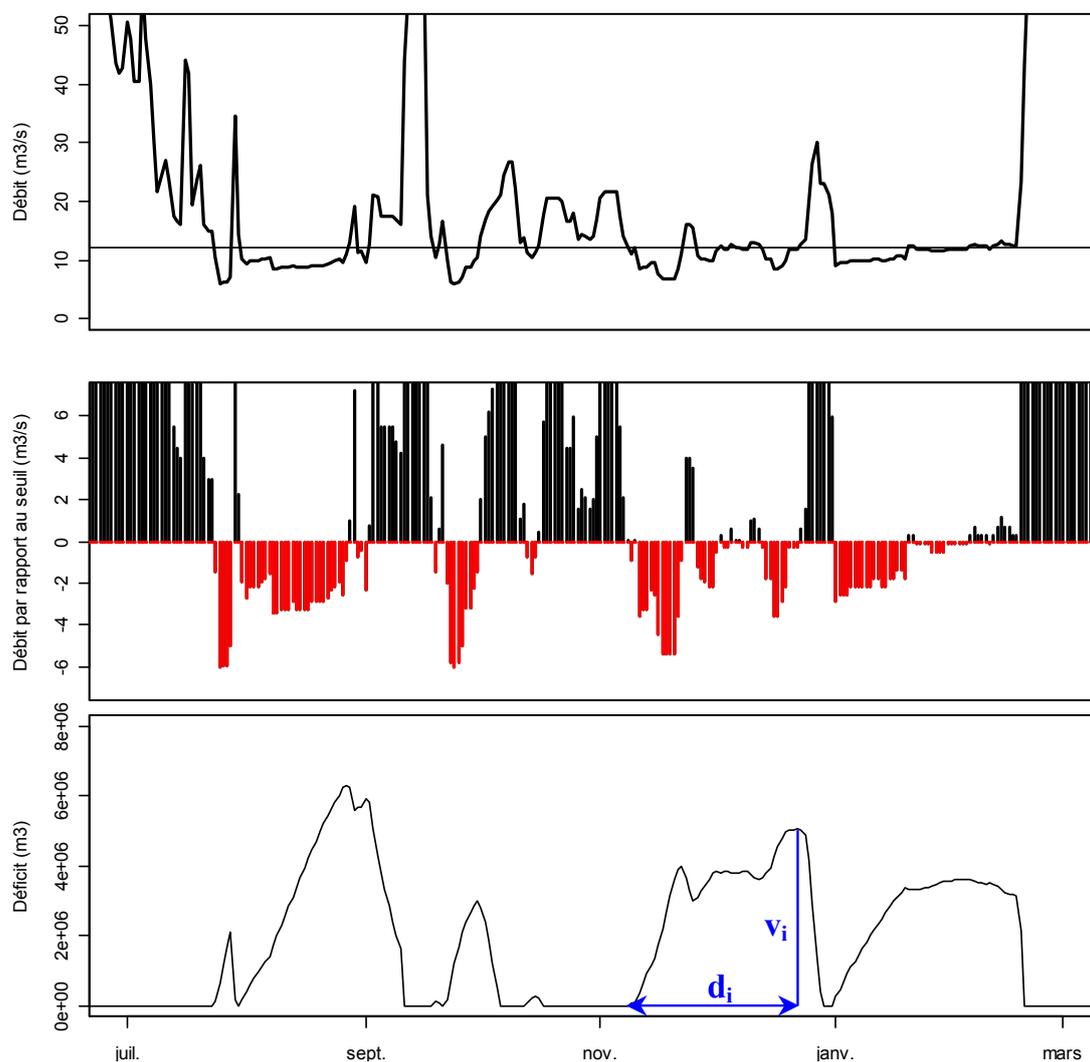


FIGURE 2.2 – Définition d'un épisode d'étiage par la méthode du Sequent Peak Algorithm (d'après Tallaksen *et al.*, 1997). En haut, est figurée la chronique des débits avec le Q90 (seuil). Au milieu, les débits journaliers par rapport au seuil sont représentés (en rouge pour les débits inférieurs au seuil). Le déficit cumulé est représenté (en bas) illustrant le fait que le déficit augmente quand le débit est inférieur au seuil. Le  $d_i$  ou durée de l'épisode correspond au temps écoulé entre le début d'un étiage et la date à laquelle le déficit est maximum. Le  $v_i$  est le déficit maximum de l'épisode caractérisé.

Le maximum d'une séquence positive sera le déficit maximum  $v_i$ . La durée  $d_i$  correspond au nombre de jours entre la date à laquelle le déficit maximum est atteint et la date du début de la séquence comme l'illustre la figure 2.2.

La figure met en évidence l'importance d'utiliser la technique du SPA par rapport à une simple analyse des débits sous seuil qui ne prend pas en compte l'interdépendance des événements. Le SPA n'est pas la seule méthode développée visant à résoudre les deux problèmes cités au paragraphe précédent. Une autre technique consiste à appliquer une moyenne glissante sur la chronique des débits. Le problème de cette méthode est que le choix de la fenêtre sur laquelle est calculée la moyenne dépend de la chronique à analyser. Enfin, une troisième méthode consiste à fusionner deux épisodes s'ils sont distants d'une durée inférieure à une durée critique ou si le volume excédentaire écoulé entre les deux événements est inférieur à une fraction du volume déficitaire. Tallaksen *et al.* (1997), Tallaksen et van Lanen (2004) et Fleig *et al.* (2006) ont comparé ces trois méthodes de sélection d'étiage. Il s'avère que chaque méthode donne des résultats différents.

Pour notre étude, nous avons choisi la méthode du SPA pour deux raisons :

- La méthode ne nécessite pas de choix arbitraire de paramètres (contrairement aux deux autres méthodes) ;
- Le raisonnement de la méthode SPA est intéressant pour un gestionnaire de réservoir (réponse aux questions de difficulté de remplissage de fin de saison).

Le choix du seuil retenu pour définir l'étiage est sujet de discussion. La caractérisation des étiages est marquée par la multiplication des méthodes d'étude différant seulement par le type de seuil et la méthode utilisée pour s'affranchir des problèmes d'interdépendance et d'événements mineurs. Le choix du Q90 comme seuil utilisé pour la méthode SPA pose le problème du nombre d'événements extraits. En effet, avec ce seuil issu de la courbe des débits classés, selon la station considérée, on peut extraire de nombreux événements de durée et sévérité limitées pour une station située en tête de bassin aussi bien que des événements plus rares et longs pour une station où le débit varie plus lentement. Une des principales critiques liées au choix du Q90 comme seuil de la méthode SPA est que les épisodes extraits ne peuvent être comparés entre stations. Le choix du seuil fait l'objet de nombreuses recherches visant à améliorer la comparabilité entre stations.

Pour notre étude, nous retenons un unique seuil : le Q90. Ce choix est d'autant plus adapté que parmi les impacts éventuels du changement climatique, le régime hydrologique sera très probablement modifié. Devant la complexité du choix d'un seuil en temps présent et de l'importance des incertitudes développées au cours de la méthode, nous utiliserons le Q90 par souci de simplicité et de lisibilité des résultats. Il faudra cependant bien étudier les étiages en fréquence et sur le couple durée-sévérité car une baisse des débits peut laisser augurer des étiages plus nombreux et/ou plus longs.

## 2.2 Traitement des données avec le logiciel R

Pour traiter les chroniques hydrologiques, nous avons utilisé l'environnement R (lien vers le site R-project) : <http://www.r-project.org/>. Cet environnement est adapté pour le traitement statistique. À partir des données brutes issues des modèles hydrologiques (format txt), les chroniques ont été transformées en objet zoo. Les objets zoo sont des séries temporelles facilement traitées par le package du même nom (lien vers le package zoo en cliquant ici).

### 2.2.1 Pour l'étude des bas débits

À partir d'un objet zoo, le Q90 est extrait de la chronique. À partir de ces Q90, il a été possible de diagnostiquer la qualité des simulations de la période de référence.

Des routines permettant de tracer les débits classés de la chronique ont aussi été créées. Ces routines permettent de visualiser simultanément la distribution des débits observés, des débits obtenus par les couples « Safran - modèles hydrologiques » et par les couples « modèles climatiques rejouant le climat de la période de référence - modèles hydrologiques ». Ainsi, sur la même figure les changements projetés seront représentés avec la dispersion inter-modèle et le biais mis en évidence sur la période de référence.

### 2.2.2 Pour l'étude des épisodes d'étiages

À partir des chroniques zoo générées, les événements d'étiage sont extraits en utilisant l'implémentation du Sequent Peak Algorithm (cf. 2.1.2). Une fois les épisodes d'étiage extraits, ceux-ci sont caractérisés par les indices SPA. Ainsi pour chaque station, on dispose d'une chronique des débits, d'une chronique des déficits, d'un fichier calendrier contenant les caractéristiques de chaque événement. Dans ce calendrier, pour un événement, nous retenons la date de début, la date de fin (quand le déficit s'annule), le déficit maximum et la date à laquelle le déficit maximum est atteint. À partir de ce calendrier, nous pouvons étudier la saisonnalité des indices datés.

### 2.2.3 Traitement de l'ensemble des chroniques

Les chroniques des observations ont parfois des lacunes dues aux problèmes d'enregistrement des stations. Ces lacunes sont gérées par les routines développées pour l'ensemble des chroniques observées. Lorsqu'une séquence d'enregistrement est interrompue, les valeurs indisponibles ne sont pas prises en compte dans les calculs (Q90, SPA). Nous n'avons pas exclu l'année hydrologique entière lorsque celle-ci est affectée par une lacune pour ne pas réduire l'information disponible. Nous émetons l'hypothèse que si une chronique incomplète dispose d'au moins quinze ans de données en cumulant les jours d'enregistrement, l'échantillon n'est

pas biaisé. Notons que parmi les chroniques des observations, aucune ne dispose de lacune systématique pendant les périodes de basses eaux.

Distinguons maintenant l'analyse en temps présent des projections pour le temps futur.

En temps présent, des routines d'évaluation ont été créées pour les 47 stations contrôlées. Pour ces stations, on compare les résultats issus des chroniques d'observation, des chroniques issues des modèles hydrologiques forcés par Safran et des chroniques issues des modèles hydrologiques forcés par les simulations climatiques (du temps présent) locales.

Pour les projections en temps futur, on applique le même traitement sur l'ensemble des chroniques des débits (à savoir les 21 projections hydrologiques). Pour une projection  $x$ , on calcule les Q90 de la période de référence, de la chronique du milieu de siècle et de fin de siècle. Par ailleurs, à partir du Q90 de la période de référence, on extrait les séquences SPA pour les trois périodes. Enfin, pour chaque période, les séquences SPA sont extraites en utilisant le Q90 de la même période comme seuil.

Nous pouvons ensuite, grâce aux fichiers créés, représenter spatialement les résultats des différentes projections. Nous avons utilisé pour la représentation spatiale le package `sp` (lien vers le package `sp` en cliquant ici). La représentation spatiale permet de comparer les projections par station et de mettre en évidence les hétérogénéités spatiales.

## 2.3 Les notions de biais et d'incertitude

Nous avons vu dans les sections précédentes les méthodes mises en place pour notre projet. Un point de synthèse sur les termes que nous emploierons dans la suite du projet s'impose. Il faut tout d'abord distinguer la notion de biais des incertitudes.

### 2.3.1 Définition des périodes

La figure 2.3 permet de synthétiser l'ensemble des chroniques disponibles. À partir de ce schéma de synthèse, nous avons pu définir trois périodes qui sont utilisées dans toute notre démarche. Les périodes ont été définies par recouvrement maximal des chroniques devant être comparées. Ainsi, pour la période de référence nous retiendrons les données couvrant l'intervalle de temps allant du 1<sup>er</sup> août 1974 au 31 juillet 1999. C'est sur cette période qu'on trouvera notée PST (pour présent) qu'est réalisée l'évaluation.

Deux périodes en milieu de siècle (MS) et fin de siècle (FS) couvrent respectivement les intervalles allant du 1<sup>er</sup> août 2049 au 31 juillet 2065 et du 1<sup>er</sup> août 2084 au 31 juillet 2100. C'est sur ces périodes et en comparaison avec le temps présent que les projections seront analysées.



### 2.3.3 Les différentes sources d'incertitudes

Les études d'impact du changement climatique d'origine anthropique impliquent un nombre important d'hypothèses. Par définition, pour les projections en temps futur, nous ne disposons pas d'observations permettant de valider ou d'invalider ces hypothèses. Les hypothèses ainsi émises induisent des incertitudes sur la réponse au changement climatique. Les climatologues abordent les incertitudes en simulant plusieurs scénarios en modifiant les facteurs d'influence des modèles. Deux écoles permettent de simuler plusieurs scénarios.

- Des projections appartenant à ce qui est appelé « ensemble of opportunity » sont créées en utilisant plusieurs MCG. C'est l'approche multi-modèle (MME pour Multi-Model Ensemble). C'est l'approche utilisée dans notre projet.
- L'autre approche consiste à utiliser un seul MCG et à simuler un nombre important de cas avec des paramètres différents. Cette méthode est appelée PPE pour Perturbed Physics Ensembles.

À ce jour, l'approche probabiliste PPE reproduit difficilement la dispersion de l'approche MME. Ceci tient au fait que la structure interne et la méthode de résolution numérique diffèrent selon les MCG. L'utilisation d'un seul MCG et donc d'un unique mode de calcul numérique ne permet pas d'inclure, dans l'échantillon final de simulation, l'incertitude liée aux méthodes de résolution numérique (Tebaldi et Knutti, 2007). Par contre, l'approche PPE permet de disposer d'ensembles statistiques contrairement à l'autre approche.

Qu'importe la façon de créer cet échantillon de projections, les climatologues essaient de couvrir le scénario du futur tout en couvrant l'incertitude par la dispersion de l'échantillon. Cette notion est représentée par la multiplicité des projections et donc des segments sur la figure 2.3.

#### 2.3.3.1 Incertitudes sur les données

**Incertaines sur les données hydrologiques** Les données hydrologiques issues des stations du réseau banque Hydro comportent un certains nombres d'incertitudes. Certaines stations ont enregistré des chroniques incomplètes (cf. 2.2.3). Il existe aussi des incertitudes hydrométriques. La mesure des débits d'étiage est parfois entachée d'erreurs liés au tarage des stations. Les bas débits se situant à l'extrémité de la courbe de tarage, ils ne sont pas toujours correctement estimés. Par ailleurs, la plupart des débits d'étiage sont influencés. En absence de données sur l'influence des prélèvements et du soutien d'étiage, il n'est pas possible de naturaliser les débits. Ces incertitudes sur les débits observés nuisent d'une part au calage des modèles hydrologiques et d'autre part à l'évaluation des méthodes.

**Incertitudes sur les projections climatiques** Une classification des incertitudes sur les projections climatiques est donnée par Pagé *et al.* (2008). Nous distinguerons ainsi l'incertitude réflexive (lié au choix d'un scénario d'émission) de l'incertitude épistémique (lié à la représentation approximative de certains phénomènes qui peuvent être insuffisamment connus ou avoir lieu à une échelle inférieure à la maille du modèle (ces phénomènes sont alors paramétrés)) et de l'incertitude stochastique (liée entre autres à l'incertitude sur la variabilité du climat et des conditions initiales). Enfin, l'incertitude liés à la descente d'échelle dépend de la méthode considérée. Pour le projet HydroQual, seule la technique dite des régimes de temps a été utilisée (Boé, 2007). La principale source d'incertitudes concernant cette méthode est liée à l'extrapolation des fonctions de transfert entre prédicteurs et prédicants sous climat modifié (cf. 1.2.3.2).

**Sur la modélisation hydrologique** Les modèles hydrologiques répondent différemment à un même forçage atmosphérique. Cette diversité des réponses au même forçage reflète l'incertitude liée aux modèles. Si les simulations sur une période de référence montrent que les modèles simulent des écoulements différents, les modèles sous scénarios futurs donnent des réponses encore plus variées. En effet, il faut forcément émettre des hypothèses a priori non vérifiables sur les processus mis en jeu sous forçages atmosphériques déduits des projections climatiques. Ainsi, deux modèles réagiront de manières différentes selon leur façon de modéliser des processus comme l'évapotranspiration. Il n'est pas possible d'évaluer les modèles hydrologiques sous climats anthropiquement perturbés à cause de l'absence d'observations sous ces climats. Par exemple, pour évaluer les modèles sous forçage constitué par les projections climatiques, nous ne pouvons pas comparer avec les performances des modèles sur l'année 2003 (événement trop bref) ni avec les performances des modèles sur un bassin plus aride car le calage de ceux-ci est intrinsèque (dans le cas du modèle Eros) au bassin considéré.

Il est à noter que les modèles hydrologiques en temps futur utilisent le calage établi sur la période de référence. Les différentes méthodes donnent ainsi une réponse théorique en émettant l'hypothèse que l'occupation des sols et l'impact anthropique sur les régimes hydrologiques resteront les mêmes en temps futur<sup>1</sup>. Cette hypothèse n'est évidemment pas vérifiable et les incertitudes induites sont très fortes. Aussi, cette hypothèse de stationnarité est importante dans la mesure où à l'heure actuelle, l'influence anthropique est forte sur les débits d'étiages (prélèvements agricoles et soutien d'étiage...). Il est donc important pour un gestionnaire de savoir qu'à la vue des incertitudes développées, la réponse hydrologique peut être dans un panel de réponses théoriques. Il faudra aussi retenir que l'impact anthropique sur les étiages est déjà fort en temps présent et qu'en temps futur les pressions anthropiques conditionneront fortement l'occurrence et la sévérité des étiages.

---

<sup>1</sup>Cette hypothèse sera parfois appelée "business as usual".

### 2.3.3.2 Incertitudes sur les méthodes et outils

**Sur la caractérisation des étiages** La façon de définir et de caractériser les étiages influence très fortement les résultats obtenus. Selon l'utilisation de telle ou telle méthode d'échantillonnage et de seuillage, nous pouvons obtenir des résultats différents. Il n'y a pas à ce jour de seuil recommandé pour l'implémentation du SPA. Nous nous sommes efforcé en utilisant le Q90 de choisir une méthode simple et reproductible en temps futur.

Pour étudier l'ensemble constitué par les résultats des 14 MCG ou des 4 Runs, les indices de bas débits ou d'étiage doivent être agrégés pour présenter la moyenne et la dispersion de l'ensemble. Deux possibilités ont été envisagées :

- Les épisodes d'étiages des différentes projections peuvent être agrégés dans un tableau puis les caractéristiques moyennes de cet ensemble sont déduites.
- Les caractéristiques moyennes peuvent être calculées pour chaque MCG (ou Run) puis la moyenne et l'écart type de cette ensemble est déduite. Ceci permet d'étudier la dispersion inter-MCG (ou inter-Run).

Les résultats seront différents selon la méthode appliquée et les deux approches seront utilisées selon la nécessité ou non d'étudier la dispersion.

# Chapitre 3

## Évaluation de la capacité à reproduire les étiages en temps présent

Pour étudier l'impact du changement climatique sur les étiages, la démarche citée dans la partie précédente est mise en place. Pour pouvoir donner les conclusions des exercices réalisés, il faut aussi étudier les biais induits au cours de la démarche. La capacité de la chaîne de modélisation à reproduire les étiages sur une période de référence doit être évaluée avant de se lancer sous scénarios climatiques. Les biais induits par la modélisation seront mis en évidence. Nous nous appuyerons dans cette partie sur les bas débits et sur les indices d'étiage pour évaluer les méthodes.

### 3.1 Biais liés à la modélisation hydrologique

Les modèles hydrologiques ont été forcés dans un premier temps par la réanalyse SAFRAN sur la période de référence allant d'août 1974 à Juillet 1999. La réanalyse SAFRAN constituant la base de données des observations atmosphériques, nous pouvons étudier la performance des modèles hydrologiques.

#### 3.1.1 Sur les Q90

La figure 3.1 est une comparaison des Q90 obtenus par la chaîne réanalyse SAFRAN - modèle hydrologique avec les Q90 observés pour les 47 stations à propos desquelles nous avons suffisamment d'observations. Cette figure souligne l'attention particulière à porter à l'analyse des résultats qui semblent relativement bons en débit et logarithme du débit. En s'intéressant à ces mêmes Q90 en débit spécifique<sup>1</sup> il s'avère que le biais n'est pas si faible. Ces aspects illustrent le fait que les modèles hydrologiques sont calés à partir d'une optimisation du critère

---

<sup>1</sup>Le débit spécifique est le débit en un point divisé par la surface du bassin versant correspondant. Il correspond à l'écoulement moyen par seconde et par km<sup>2</sup> du bassin versant.

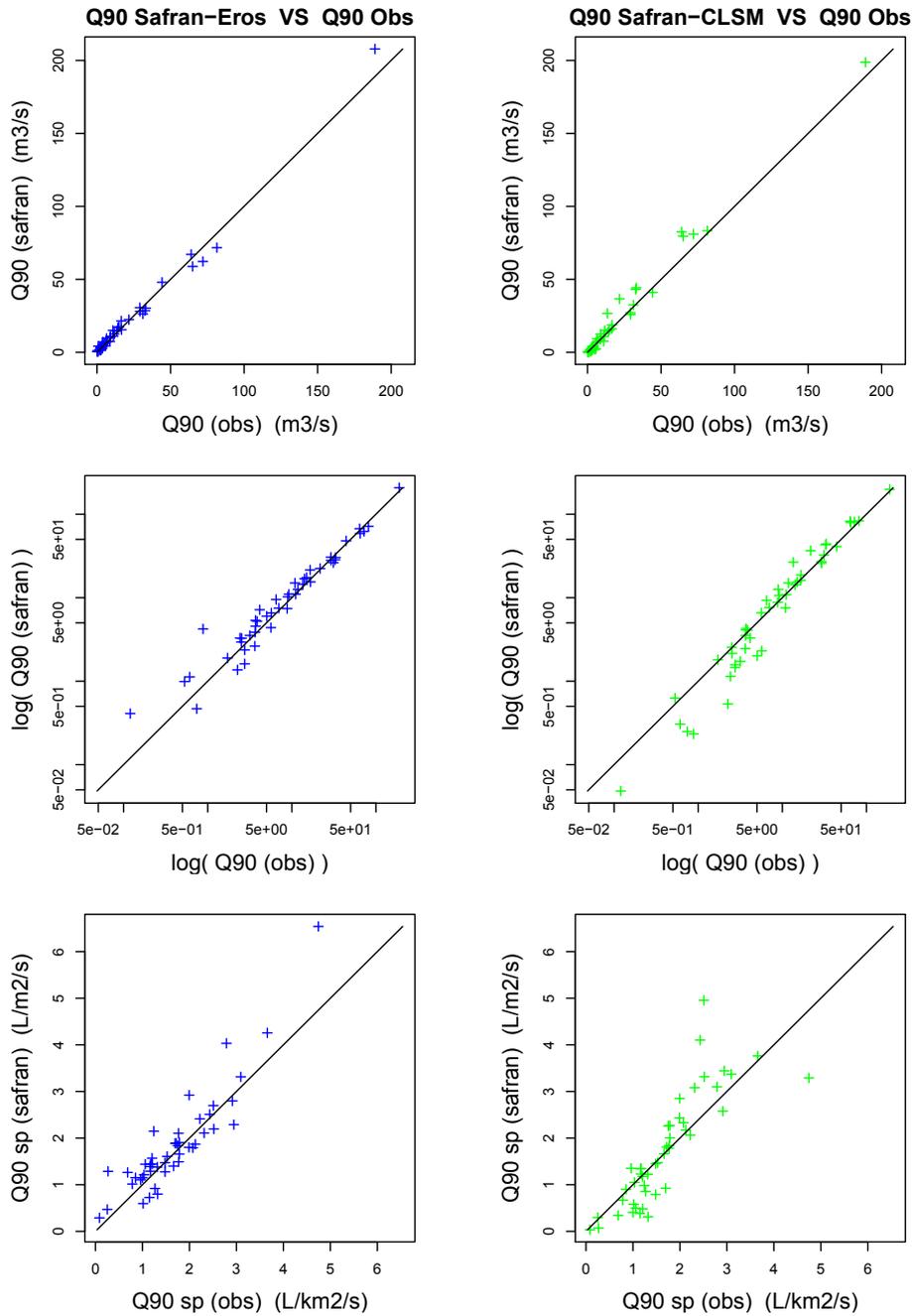


FIGURE 3.1 – Comparaison des Q90 simulés par le couple Safran-Modèle hydrologique avec les Q90 observés. Le modèle Eros est représenté en bleu, CLSM en vert. Les Q90 sont présentés en débit (en haut), en logarithme des débits pour mieux distinguer les faibles valeurs (au milieu) et en débit spécifique (en bas). La droite noire symbolise la modélisation idéale.

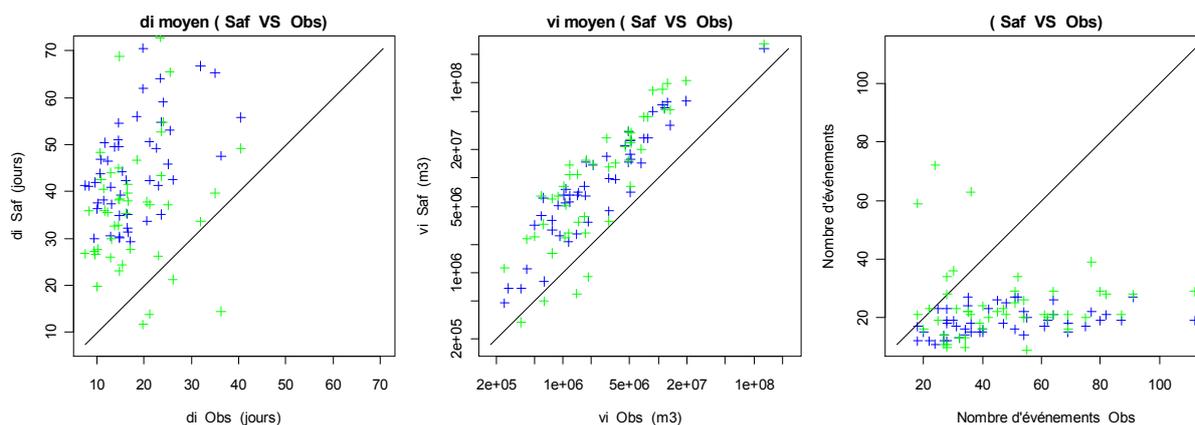


FIGURE 3.2 – Biais liés à la modélisation hydrologique traduits par les indices SPA : la durée moyenne d'un événement (à gauche), le déficit maximum moyen (au milieu) et le nombre d'événements (à droite). (Eros en vert - CLSM en bleu)

de Nash. Il n'y a pas de calage utilisant la courbe des débits classés. *In fine* les sorties des modèles devraient avoir la même distribution que les observations mais il s'avère que pour certains bassins versants, les extrémités des distributions statistiques sont moins bien simulées. Par ailleurs, la figure présente une comparaison des modèles hydrologiques. Le modèle Eros est légèrement plus performant que le modèle CLSM.

### 3.1.2 Sur les indices extraits du SPA

Après avoir étudié la capacité des chaînes de modélisation à reproduire les bas débits, intéressons-nous à la capacité à reproduire les épisodes d'étiages. En s'intéressant aux indices définis au 2.1.2 en temps présent, nous obtenons des résultats médiocres, et pour lesquels nous donnons un éclaircissement dans la section 3.1.2.2.

#### 3.1.2.1 Résultats

Nous avons tracé les caractéristiques moyennes des événements : durée moyenne, volume moyen et nombre d'événements pour les 47 stations retenues au 1.4.2.

La figure 3.2 illustre le fait que les deux modèles hydrologiques retournent des épisodes d'étiage plus longs, plus sévères et moins nombreux que les observations. Il est hasardeux de dire que les résultats des modèles hydrologiques sous forçage Safran correspondent aux débits naturels. Pour arriver à cette conclusion, il faudrait disposer d'enregistrements de stations totalement désinfluencées validant les modèles, ce dont nous ne disposons pas sur le bassin versant de la Loire.

### 3.1.2.2 La notion d'influence anthropique sur les bas débits

La station n°3 (Loire à Villerest) se situe en amont à l'échelle du bassin versant de la Loire. Après application de la méthode SPA aux différentes chroniques nous obtenons les résultats visibles à la figure 3.3.

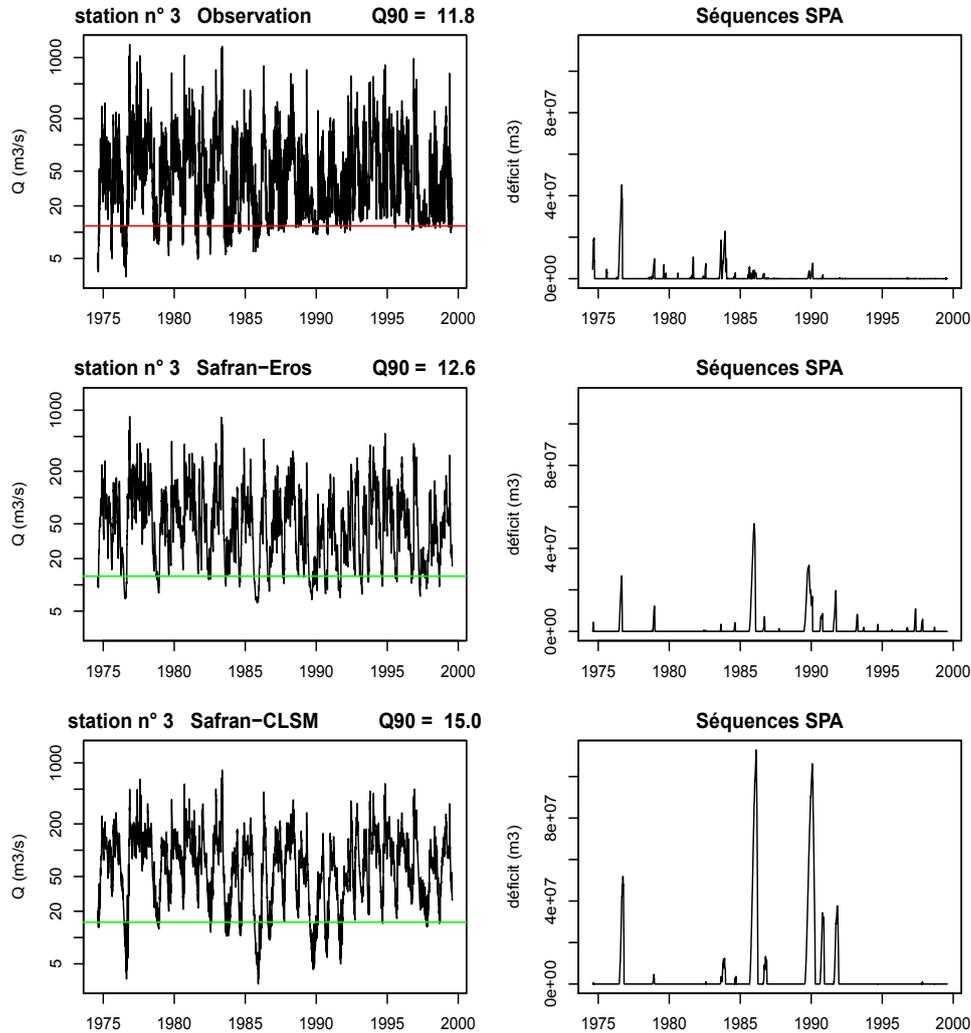


FIGURE 3.3 – La station 3 (Loire à Villerest) est un exemple où la modélisation hydrologique rend difficilement compte des bas débits. Attention l'échelle des débits est logarithmique pour bien observer les bas débits (à gauche). Les seuils ( $Q_{90}$ ) sont figurés par les droites horizontales. La valeur du seuil est notée en haut à droite des chroniques des débits. Les déficits sont représentés à droite. Chaque pic correspond à un épisode d'étiage. Les débits observés (en haut) sont comparés avec les débits sortis des modèles Eros (au milieu) et CLSM (en bas).

La figure 3.3 représente la chronique observée ainsi que la séquence SPA extraite (en haut) et les chroniques et séquences SPA issues des modèles Eros (milieu) et CLSM (en bas) utilisant la réanalyse Safran comme forçage atmosphérique. 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. On peut voir sur la chronique une rupture 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 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 Q90 issus des modélisations hydrologiques ne sont pas très différents du Q90 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 3.4), on note d'importantes différences entre les chroniques observées et les couples SAFRAN-modèle hydro.

Pour ce bassin versant situé en amont, la différence entre les observations et la modélisation est importante. Sur la chronique des observations, on relève 7 épisodes d'étiages alors qu'il y en a un seul avec la chaîne SAFRAN-CLSM. La chronique des observations est sous influence anthropique. 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 Q90. 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 (par soutien d'étiage et prélèvement) 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 au QMNA5<sup>2</sup>). Il est clair pour ce type de bassin versant que les débits d'étiages 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 compense l'irrigation (ou tout du moins, l'un ne prend pas le pas sur l'autre comme à l'aval immédiat d'une station de pompage ou d'un barrage de soutien d'étiage). Il s'avère en fait que l'année 1985 n'est pas correctement modélisée 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 décidés.

La chaîne SAFRAN-modèle hydrologique rencontre des difficultés à reproduire les différentes caractéristiques des étiages (fréquence, durée, déficit, saisonnalité).

Pour les stations situés plus en aval, les performances sont globalement meilleures (cf figure

---

<sup>2</sup>Débit mensuel minimal ayant une période de retour de 5 ans ou une probabilité d'être franchi vers les valeurs inférieures de 1/5 chaque année. Cette valeur est fréquemment retenue par les gestionnaires des cours d'eau comme seuil en deçà duquel les prélèvements et rejets sont interdits.

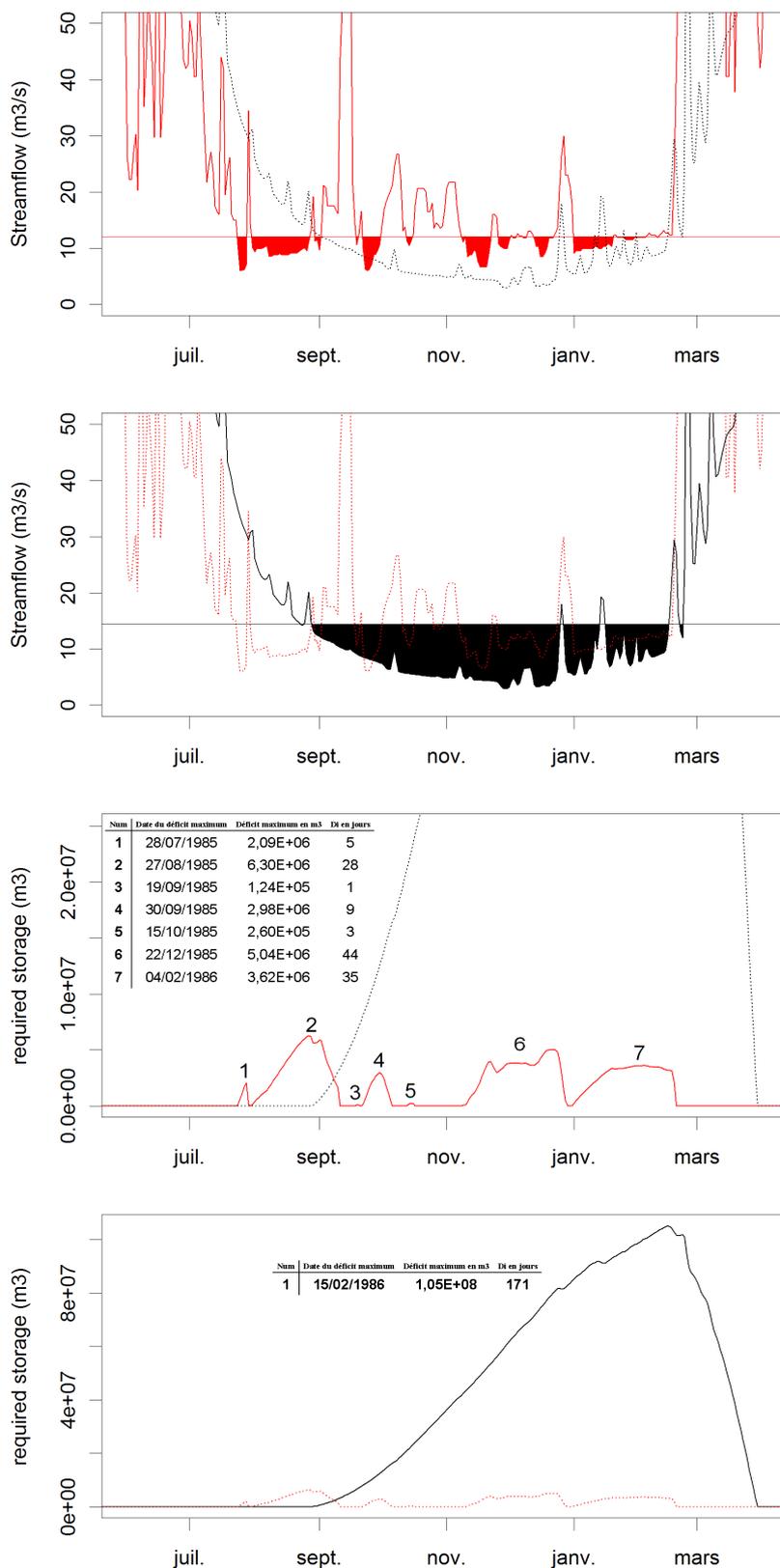


FIGURE 3.4 – Comparaison de la méthode SPA entre les observations (en rouge) et le couple SAFRAN-CLSM (en noir). Les deux premiers graphiques représentent les chroniques et leur Q90 respectifs (les observations tout en haut et la sortie du modèle CLSM en bas). Les deux derniers représentent les épisodes d'étiages obtenus par la méthode SPA (les événements issus des observations en haut et du modèle CLSM en bas).

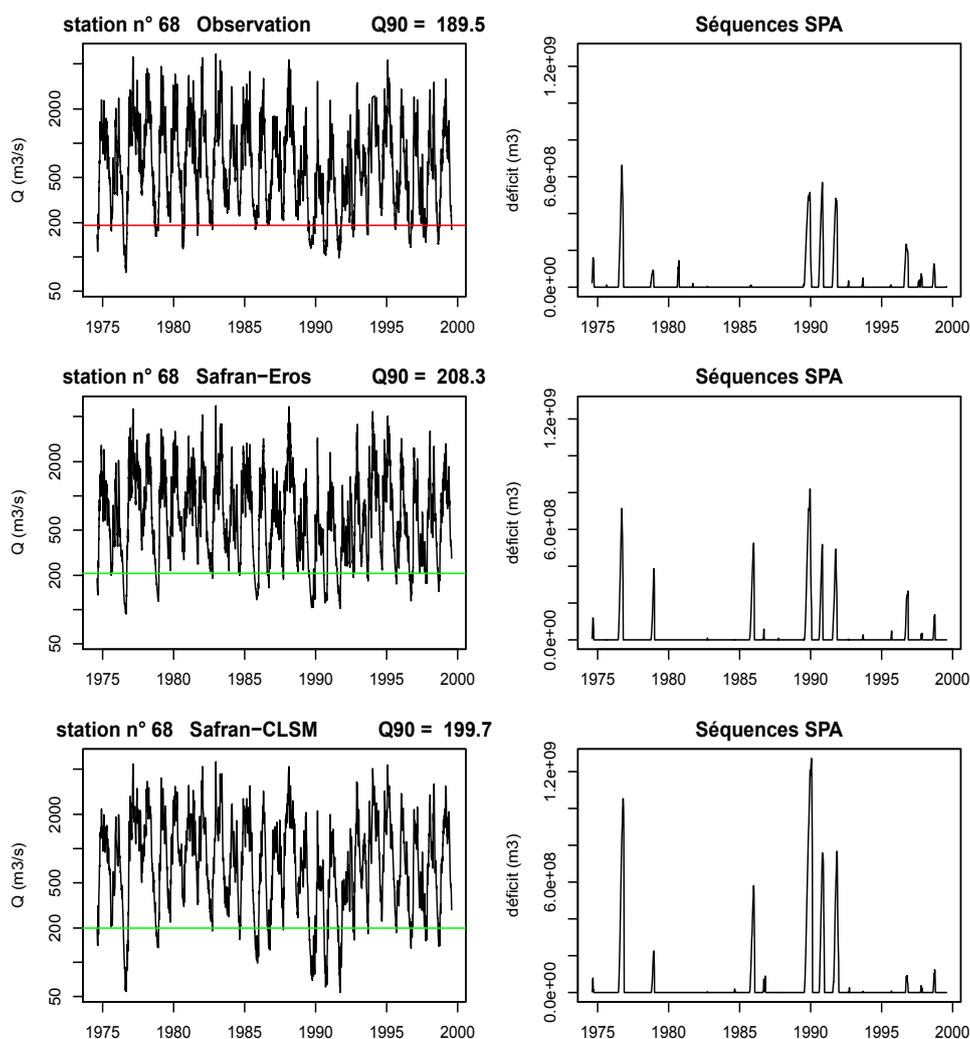


FIGURE 3.5 – Même figure que la figure 3.3 avec un bassin versant plus en aval (Loire à Montjean).

3.5). La fréquence et les durées sont relativement bien représentées par les deux modèles. En termes de volume, on note un déficit plus grand avec le modèle CLSM traduisant un assèchement plus rapide. Les résultats en termes de volumes sont à prendre avec grande précaution car un effet de seuil accentue probablement les déficits. L'épisode de 1976 est bien modélisé par Eros. Par contre l'année 1985 n'est pas correctement modélisée (cf. explications plus haut sur l'année 1985). Pour les stations en aval l'influence anthropique sur les débits n'est pas nulle mais les prélèvements compensent le soutien d'étiage, ne compromettant pas la reproductibilité des étiages par les modèles hydrologiques.

Malheureusement, la correction ou "naturalisation" des débits n'a pas pu être réalisée dans le cadre du projet HydroQual. Cette étape pourrait s'avérer très utile mais aussi très compliquée. 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. Cette étape de "naturalisation" du débit constituerait une étape importante de la démarche. Elle devrait

être conduite sur les 68 sous bassins versants ayant tous leurs particularités. Cette étape permettrait d'évaluer le poids relatif des biais dus aux modèles hydrologiques par rapport aux influences humaines sur les débits observés.

### 3.1.3 Synthèse sur les biais liés à la modélisation hydrologique

Le fort biais entre les observations et les couples SARFAN-modèles hydrologiques a deux causes principales. D'une part, les débits sont calés en utilisant le critère de Nash appliqué au pas de temps journalier sans correction de biais. Par conséquent, la distribution des valeurs des deux chroniques est légèrement différente. En outre, les débits observés sont sous influence anthropique ce qui est difficilement appréhendé dans une relation pluie-débit. Il découle de ces constats les conclusions suivantes :

- Les débits “naturels” à la station ne sont pas donnés par la chronique des observations car celle-ci n'a pas été désinfluencée. Si le biais en temps présent est fort, il tient en partie à l'imperfection de la modélisation hydrologique mais aussi à l'influence anthropique sur les bas débits ;
- Il faut garder à l'esprit que le projet est un exercice théorique où l'on cherche à étudier l'impact des différents scénarios climatiques sur les étiages. Il faudra donc à la lecture des résultats regarder les valeurs avec grande précaution en regard des incertitudes déjà visibles en temps présent ;
- Malgré de forts biais en temps présent, rien n'indique que l'impact climatique seul n'est pas correctement simulé. Un modèle biaisé en temps présent peut être utilisé en temps futur en gardant le même biais si l'origine de celui-ci est identifié. La “naturalisation” des débits n'étant pas réalisable pour l'ensemble des 68 sous bassins versants, il convient de présenter le biais en temps présent à côté des scénarios simulés ;
- Le biais en temps présent étant en partie imputable à des causes anthropiques, il est important de garder à l'idée que la façon de gérer la ressource en eau dans le futur aura un impact déterminant sur les étiages.

Nous avons pris parti pour la suite de ne pas introduire de fonction de débiaisage. Nous ne savons pas si les différences entre les observations et les sorties des modèles sont dues aux biais des modèles ou à l'influence anthropique sur les bas débits. De façon globale, les modèles hydrologiques simulent des épisodes d'étiage plus longs et sévères que ceux observés. Ceci prouve que sur la période de référence, la gestion des débits a permis de répondre aux épisodes d'étiages en réduisant leur durée et sévérité.

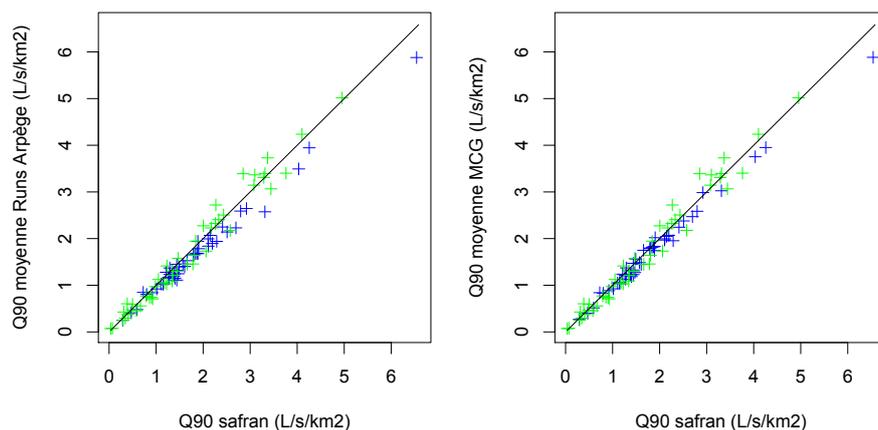


FIGURE 3.6 – Illustration du biais induit par la simulation climatique représenté comme un biais moyen par famille. Moyenne des 4 Runs (à gauche) et des 14 MCG (à droite). (Eros en bleu - CLSM en vert)

## 3.2 Biais liés aux simulations climatiques

Après avoir mis en évidence le biais liés à la modélisation hydrologique, nous pouvons maintenant étudier les couples simulations climatiques -modélisation hydrologique (en temps présent) en comparaison avec les couples SAFRAN-modélisation hydrologique. Cette étape permet d'étudier le biais induit par les simulations climatiques. Les MCG reproduisent, sur la période de référence, les caractéristiques statistiques du climat sans pour autant reproduire sa chronologie. En faisant tourner les modèles hydrologiques, nous devrions obtenir en sortie des chroniques ayant les mêmes caractéristiques moyennes que celles modélisées sous forçage Safran (Q90, indices SPA). Il s'agit ici de garder le biais induit par les modèles hydrologiques.

### 3.2.1 Sur les Q90

D'autres biais s'immiscent dans la chaîne de modélisation. Nous l'avons vu à la section 1.2.3, il existe des biais dès la création des scénarios régionaux. En effet, les MCG induisent des erreurs qui ne peuvent être corrigées par la descente d'échelle spatiale. Les scénarios produits par les différentes chaînes « Climat période de référence simulé par les MCG puis désagrégé » sont porteurs des biais présentés sur la figure 3.6.

Le biais induit par la création de simulations climatiques est figuré en représentant les Q90 utilisant comme forçage les simulations climatiques par rapport aux Q90 issus du forçage atmosphérique SAFRAN. Ceci a été fait pour les deux modèles hydrologiques. Nous notons que le biais liés à la simulation climatique est plus faible que celui induit par la modélisation hydrologique (cf 3.1). La figure 3.7 montre aussi que le modèle Eros est plus robuste que le modèle CLSM. En effet, pour des forçages atmosphériques différents mais un climat similaire, la dispersion des Q90 est plus grande avec le modèle CLSM. La chaîne utilisant les simulations

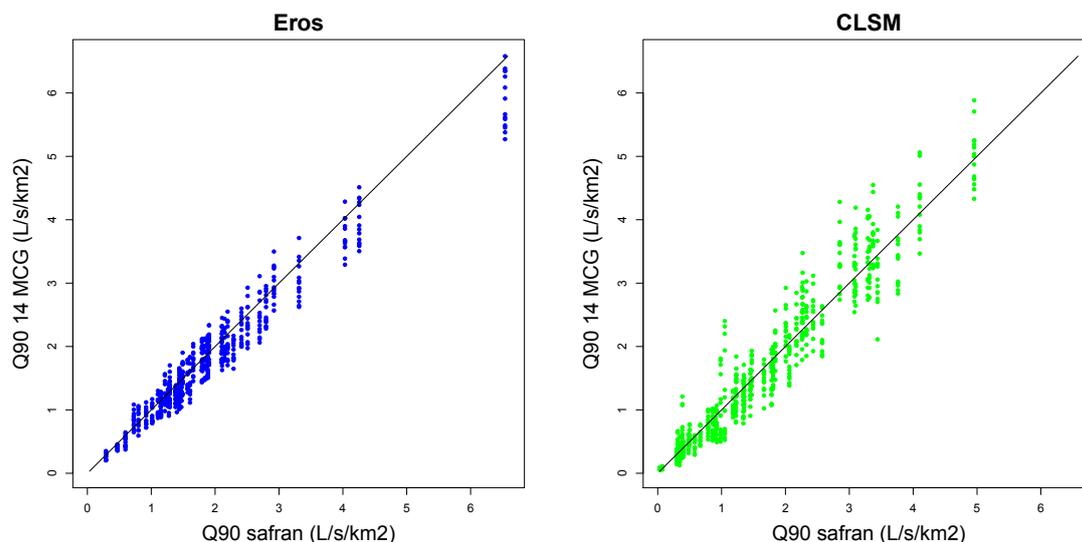


FIGURE 3.7 – Q90 des chroniques issues des 14 projections utilisant les différents MCG. Les Q90 des 14 MCG sont tracés pour chaque station en comparaison avec le Q90 issu du même modèle hydrologique sous forçage Safran.

climatique avec le modèle Eros a un léger biais sec par rapport au modèle Eros forcé par les données SAFRAN.

### 3.2.2 Sur les indices SPA

En comparant les indices SPA issus des couples simulations climatiques-modélisations hydrologiques avec les mêmes indices du couple SAFRAN-modélisations hydrologiques, nous étudions donc uniquement le biais lié aux simulations climatiques.

La figure 3.8 illustre le biais induit par la simulation climatique. La première bissectrice représente la droite de modélisation idéale (pour les paramètres étudiés<sup>3</sup>). On note que le déficit moyen est bien modélisé par le couple simulation climatique-modélisation hydrologique par rapport au débit observé théoriquement approximé par le couple SAFRAN-modèle hydrologique. Les bons résultats en apparence en ce qui concerne les volumes sont liés au choix de l'échelle logarithmique. Les résultats obtenus constituent un test de robustesse des modèles hydrologiques. En effet, les résultats illustrent l'influence du changement de forçage météorologique (à climat équivalent) sur la chaîne de modélisation.

Avec le modèle CLSM (en vert), les étiages sont plus nombreux, moins longs et sévères sous forçage constitué par les simulations climatiques qu'avec Safran (comportement moins marqué avec Eros). Ce biais vient légèrement compenser les biais liés à la modélisation hydrologique présentés à la section 3.1.2.1. Il faut donc regarder séparément les biais induits

<sup>3</sup>Rien n'indique que si l'épisode moyen d'étiage est modélisé correctement la distribution statistique des événements est bien modélisé.

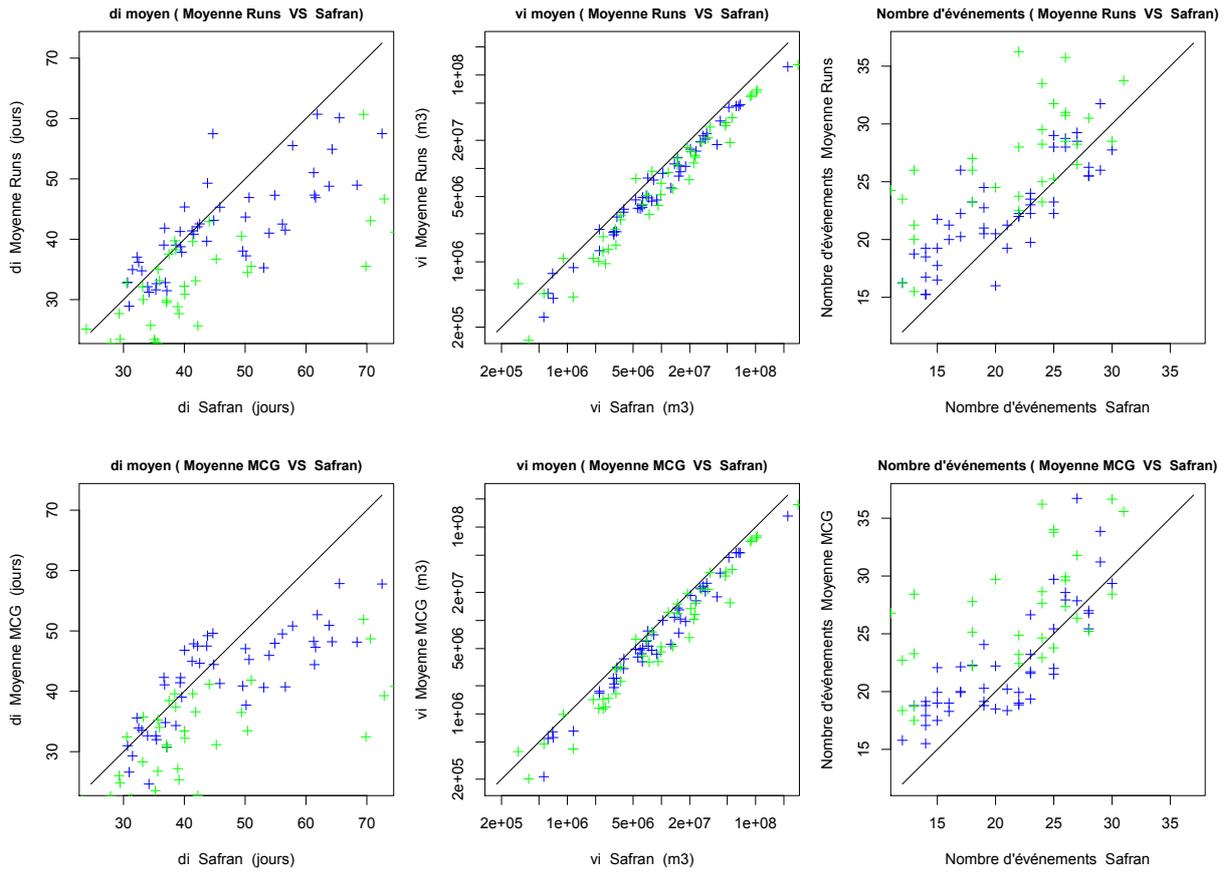


FIGURE 3.8 – Comparaison des indices SPA sur la période de référence. Le modèle Eros est représenté en bleu, CLSM en vert. La famille constituée des 4 Runs (en haut) et la famille des 14 MCG (en bas). Les indices représentés sont : la durée moyenne (à gauche), le déficit moyen (au milieu) et le nombre d'événement sur la période de référence (à droite)

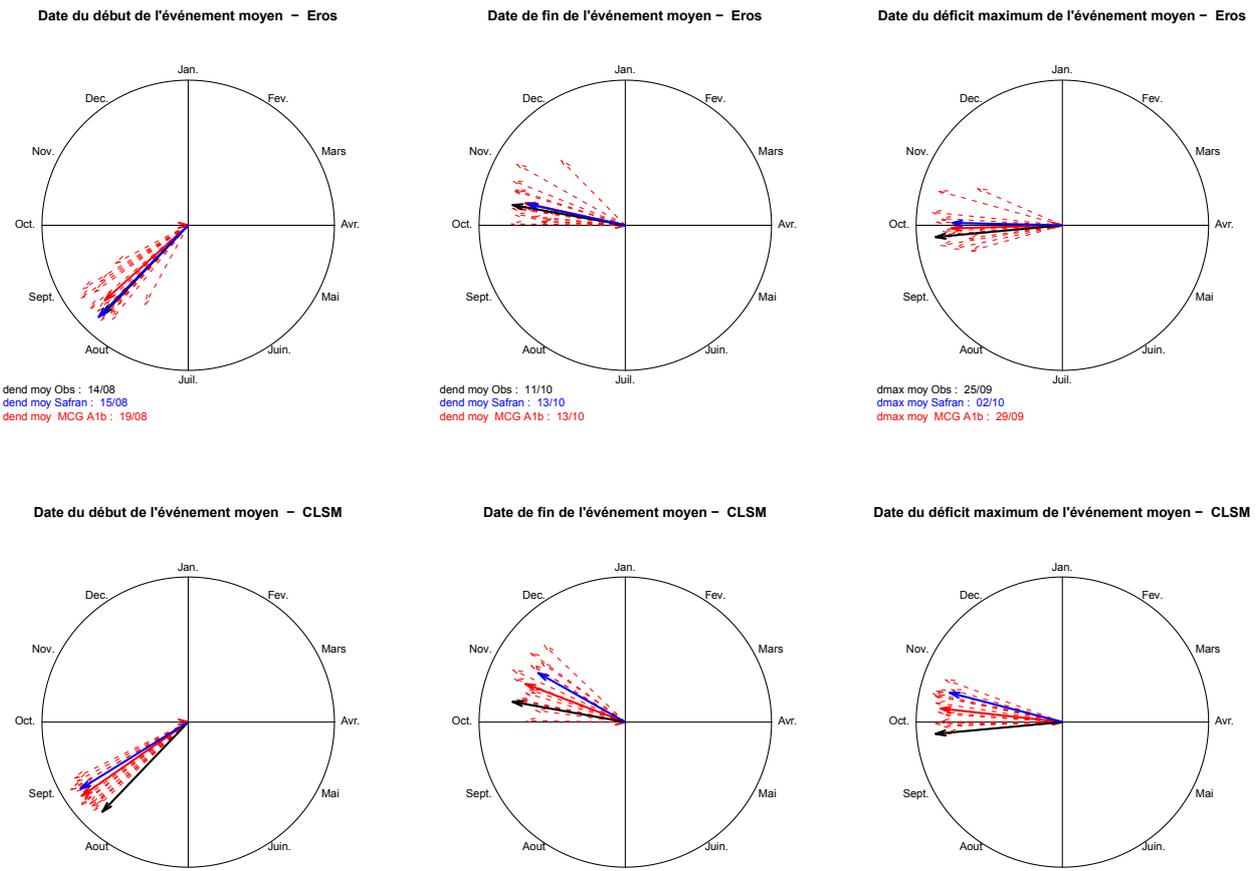


FIGURE 3.9 – Saisonnalité des début, fin et date du déficit maximum pour la station Loire à Montjean. Les événements moyens tirés des chroniques simulées par les 14 MCG - Eros (en haut) et CLSM (en bas) sont visibles en pointillés. Pour chaque MCG, les dates moyennes sont calculées et figurées en pointillés pour représenter la dispersion. La flèche bleue est tirée des modèles hydrologiques sous forçage Safran. Les observations sont figurées par la flèche noire. La norme des flèches est inversement proportionnelle à la dispersion des dates des différents événements. Plus la flèche est longue et plus la saisonnalité est marquée.

par la modélisation hydrologique et par la simulation climatique pour comprendre la meilleure performance en apparence avec le modèle CLSM.

### 3.3 Critères de saisonnalité

Nous avons aussi évalué la méthode sur sa capacité à reproduire les aspects temporels des étiages. Pour ceci, les dates moyennes d'occurrence du début, de la fin et du déficit maximum sont calculées sur la période de référence pour les observations, les couples Safran-modèles hydrologiques et les couples simulation MCG - modèles hydrologiques. Les événements n'ont pas été pondérés par leur durée ou sévérité. Chaque événement possède donc le même poids statistique pour calculer la date de début de l'événement moyen.

La figure 3.9 illustre à nouveau la meilleure capacité du modèle Eros à reproduire les étiages.

C'est cette fois un critère de saisonnalité qui permet ce constat. La station « Loire à Montjean » est une station pour laquelle la saisonnalité est particulièrement bien reproduite. Nous trouvons plusieurs explications à cela. Cette station dispose d'une chronique des débits observés complète sur la période de référence. Ceci a permis un bon calage des modèles hydrologiques et nous permet de disposer d'une période strictement commune pour la comparaison. Certaines stations ont des lacunes de quelques années ce qui empêche de prendre en compte les événements omis. D'autres stations disposent de chroniques complètes mais les débits sont trop fortement influencés pour disposer d'une évaluation fiable. Nous pourrions présenter en temps futur les modifications de saisonnalité pour la Loire à Montjean.

### 3.4 Conclusion sur l'évaluation en temps présent

Nous avons vu dans ce chapitre que les biais liés à la modélisation hydrologique sont importants lorsqu'il s'agit des bas débits. Cependant, nous nous intéressons ici à l'influence du changement climatique toutes choses égales par ailleurs. Par conséquent, les débits retenus pour la suite de notre projet pour présenter les projections sont issus des couples MCG simulant le climat de la période de référence - modèles hydrologiques. Nous ne pourrions pas comparer les projections hydrologiques des différents MCG avec les chroniques observés à cause des biais cités plus haut.

Les biais liés aux simulations climatiques sont plus faibles que les biais de nature hydrologique sans toutefois être négligeables. Les biais ont plusieurs origines. D'une part, les MCG incluent un maximum de phénomènes physiques limitant leur résolution. Les phénomènes se déroulant à une échelle spatiale inférieure à la maille des MCG sont paramétrés, induisant des biais potentiels. Aussi, l'étape de descente d'échelle est elle aussi porteuse d'autres biais surtout visibles sur les événements extrêmes.

La hiérarchisation des biais présentée ci-dessus est valable pour les bas débits. Le biais hydrologique est bien moins important sur les débits moyens du fait d'une influence anthropique relative moins grande qu'en étiage.

# Chapitre 4

## Projections et incertitudes pour le XXI<sup>e</sup> siècle

L'étude du changement climatique et de ses conséquences sur les étiages telle qu'elle est réalisée actuellement utilise une approche multi-projections. Pour ne pas perdre le lecteur dans un volume de données trop important, les projections sont regroupés en « familles » selon le classement présenté sur la figure 1.9. Les changements seront présentés comme des changements moyens des différentes simulations d'une même famille.

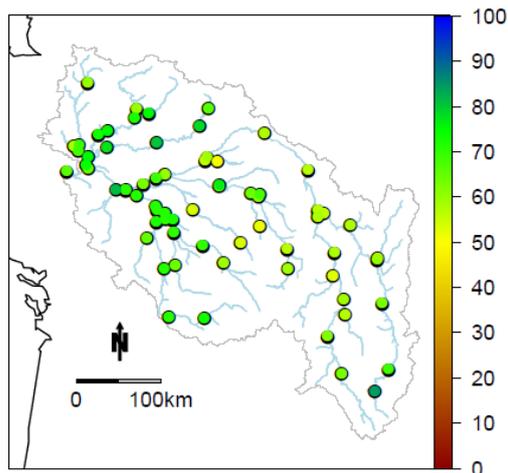
Nous présentons dans cette partie les projections pour les périodes 2049-2065 (nommée MS pour milieu du siècle) et 2084-2099 (FS). La plupart des scénarios présentés utilisent des changements relatifs à la période de référence 1974-1999 (PST). Nous présenterons ainsi la variation relative du Q90, les changements de caractéristiques des étiages en gardant pour seuil le Q90 issu de la période de référence. Nous étudierons aussi la saisonnalité des étiages en utilisant le Q90 de la période future.

La présentation des scénarios futurs est indissociable des incertitudes. Les incertitudes liées à chaque famille seront approchées par la dispersion inter-projections. La communication des résultats des projets visant à étudier l'impact du changement climatique est délicate. La façon d'évoquer les incertitudes est probablement le point le plus important des études. Aussi, pour communiquer habilement à propos de ces incertitudes, il convient de les identifier, les quantifier, les hiérarchiser et les communiquer. La hiérarchisation des incertitudes est une étape cruciale pour l'amélioration des études. En effet, elle permet de guider l'effort de recherche vers les étapes où les incertitudes sont les plus fortes (Pagé *et al.*, 2008).

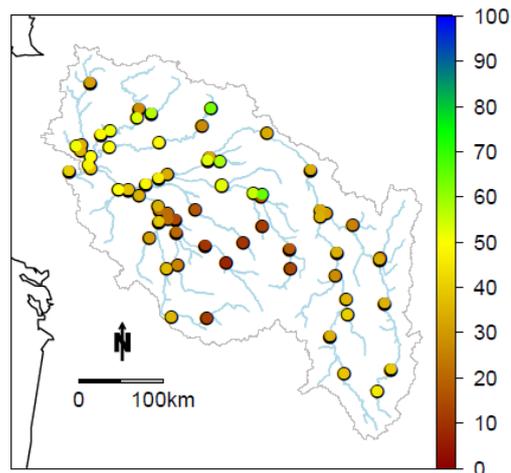
### 4.1 Étude des bas débits

Pour étudier d'éventuelles modifications dans le cycle hydrologique et notamment sur les bas débits, intéressons-nous à l'évolution des distributions des débits. Les différentes approches simulent une diminution des bas débits et ceci dès le milieu du siècle (cf. figure 4.1). L'approche

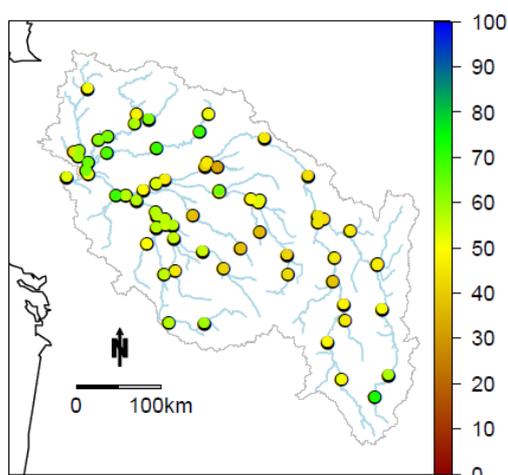
**moyenne 14 MCG – Eros – MS**



**moyenne 14 MCG – CLSM – MS**



**moyenne 14 MCG – Eros – FS**



**moyenne 14 MCG – CLSM – FS**

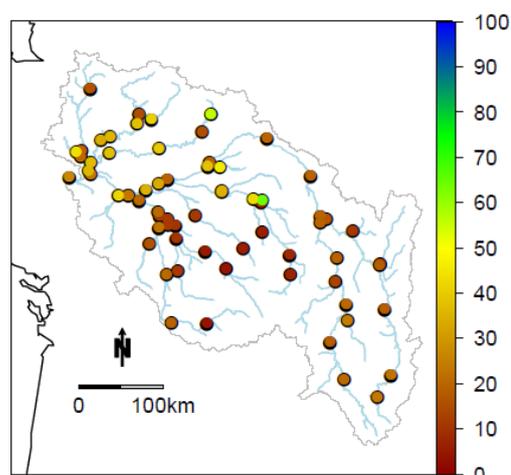


FIGURE 4.1 – Projections sur les Q90 aux horizons MS (en haut) et FS (en bas). Les scénarios présentés sont des moyennes multi-MCG (suivie de la modélisation hydrologique Eros (à gauche) et CLSM (à droite)). Les valeurs sont présentées pour chaque station comme le rapport du Q90 projeté sur le Q90 de la période de référence (issu des modèles climatiques simulant le climat de la période de référence suivie par les mêmes modèles hydrologiques)

multi-scénario présente un intérêt dans la mesure où elle permet de simuler une multitude de réponses au problème initial. Ainsi une façon synthétique de présenter les résultats est d'utiliser le scénario moyen d'une famille et de présenter la dispersion de celle-ci.

L'observation principale est la réduction importante du Q90 et ceci pour toutes les stations considérées. Pour les mêmes forçages atmosphérique, à savoir les scénarios désagrégés à partir des projections des 14 MCG, la réduction du Q90 est très différente selon le modèle hydrologique utilisé. Le modèle CLSM retourne des bas débits beaucoup plus faibles qu'avec le modèle Eros. Cette différence est très visible dès le milieu de siècle. Le modèle Eros projette des Q90 allant de 50% à 85% du Q90 de la période de référence. Pour le modèle CLSM certains Q90 peuvent descendre jusqu'à 7% du Q90 simulé sur la période de référence. Cette observation confirme le constat déjà fait dans le projet RExHySS : le modèle CLSM simule un

assèchement plus rapide qu'Eros sous projection climatique. Des éléments récents semblent prouver que le comportement de CLSM est incorrect 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).

La figure 4.2 illustre la dispersion inter-MCG. Celle-ci est plus grande avec le modèle CLSM qui est moins robuste. La dispersion est plus grande en tête de bassin. La variété des réponses y est plus grande.

## 4.2 Étude de la distribution des débits de la Loire à Montjean

L'étude de la station sur la Loire à Montjean permet de synthétiser les projections en se détachant de la variabilité spatiale. Là encore, utilisons dans un premier temps l'approche multi-MCG pour couvrir l'incertitude épistémique.

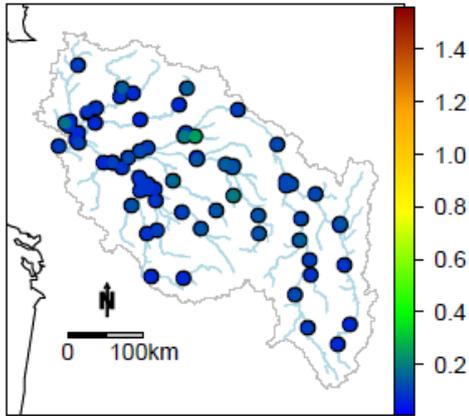
La figure 4.3 montre une baisse de l'ensemble des débits. Les bas débits n'échappent pas à ce constat. Cette figure confirme que le modèle CLSM simule un assèchement plus prononcé sous projection climatique. Les débits classés issus des scénarios désagrégés des 14 MCG suivis par la modélisation hydrologique sont représentés en temps présent pour rappeler au lecteur les biais liés à la démarche. Ceci permet aussi de comparer avec les deltas pour chaque projection et la dispersion des réponses attendues. L'annexe 2 présente les mêmes graphiques pour les 4 Runs (pour aborder l'incertitude liée à l'initialisation du système climatique) et pour 3 scénarios d'émission de GES. La figure 4.3 illustre aussi le léger biais sec en temps présent lié aux simulations climatiques (biais entre Safran en bleu et les simulations en orange). Ce biais est attribuable à un défaut de la descente d'échelle qui sous-estime les pluies fortes.

## 4.3 Caractérisation des étiages et comparaison au temps présent

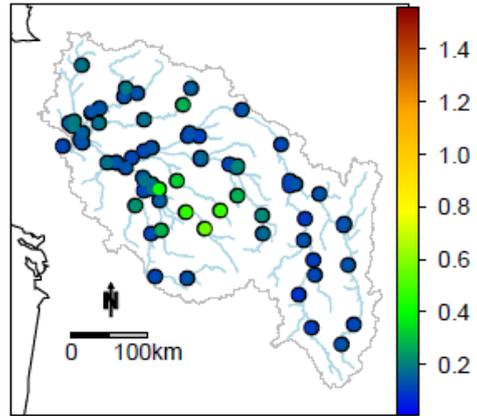
Dans un second temps, après avoir étudié l'évolution des bas débits, nous avons étudié les épisodes d'étiages en caractérisant :

- la durée des épisodes ;

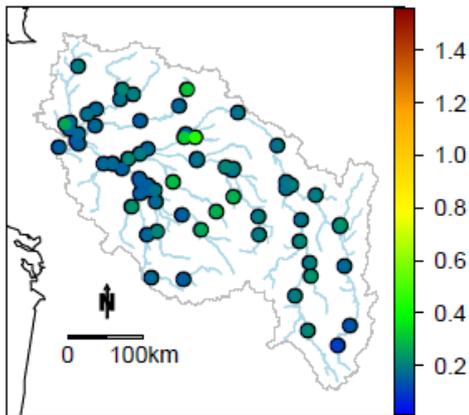
coeff de var - Eros - PST



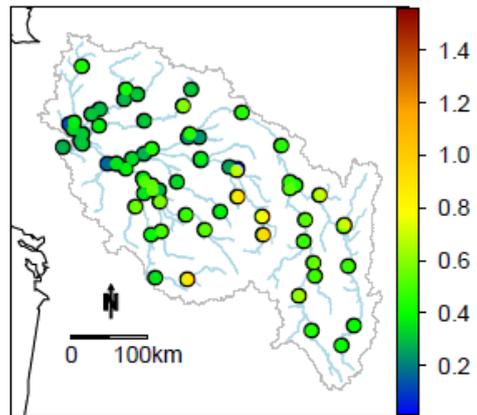
coeff de var - CLSM - PST



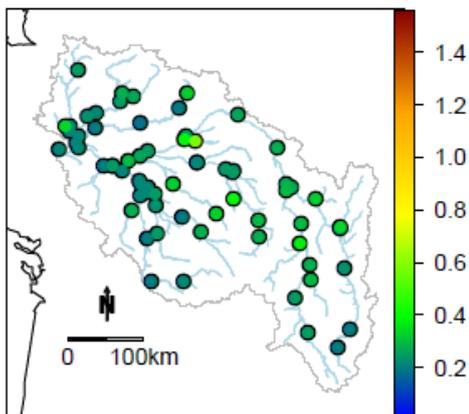
coeff de var - Eros - MS



coeff de var - CLSM - MS



coeff de var - Eros - FS



coeff de var - CLSM - FS

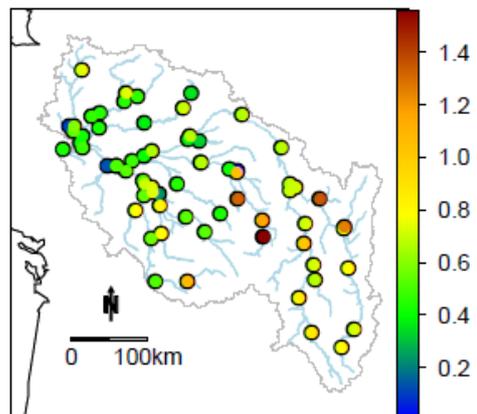


FIGURE 4.2 – Dispersion de la famille multi-MCG sur les Q90 projetés. La dispersion est figurée par l'écart type relatif ou coefficient de variation.

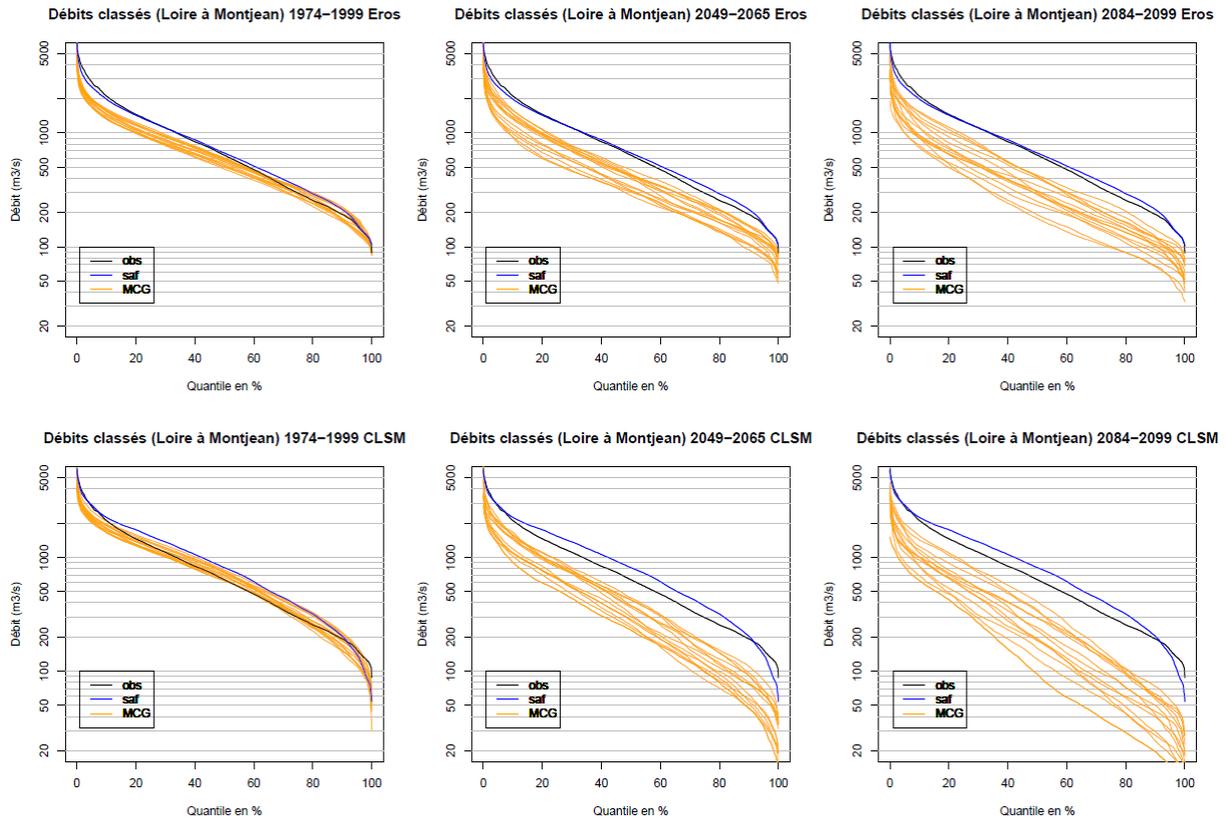


FIGURE 4.3 – Courbes des débits classés pour la station Loire à Montjean pour la période PST (à gauche), MS (au milieu) et FS (à droite). Les observations de la période de référence (courbe noire) sont reportées sur chaque graphique. En bleu sont tracées les courbes avec Eros (en haut) et CLSM (en bas) sous forçage Safran. Les 14 MCG sont tracés en orange.

- le déficit cumulé ;
- la fréquence des épisodes ;
- la saisonnalité.

Le Q90 utilisé pour étudier les étiages sur la période 2049-2065 peut être extrait de cette même période ou de la période de référence 1974-1999. Les deux approches donnent des résultats différents. La première méthode permet d'évaluer les caractéristiques des épisodes d'étiage futur en gardant la définition actuelle (utilisant le Q90 du temps présent). C'est ce qui a été retenu pour étudier les changements de durée, occurrence et déficit. La seconde s'intéresse à l'évolution du seuil et aux changements de la saisonnalité des périodes d'étiages. C'est cette méthode qui sera retenue dans la section 4.3.4.

### 4.3.1 Occurrence

Dans un premier temps, nous présentons les résultats des différentes projections en regardant la fréquence des étiages sur la figure 4.5. Notons dans un premier temps que le nombre d'événements est plus grand sur la Loire amont et l'Allier en temps présent comme en temps futur. Ceci traduit le fait que les variations de débits sont plus rapides en amont qu'en aval.

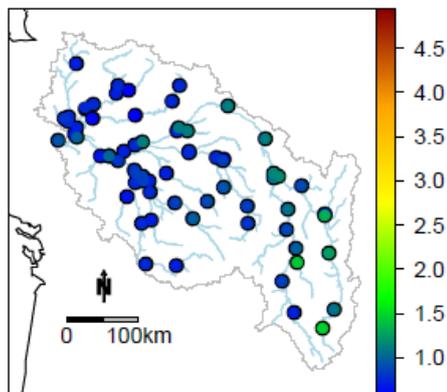
La moyenne des différentes projections montrent une légère augmentation de la fréquence des étiages. Cette augmentation est plus forte en milieu de siècle qu'en fin de siècle. Le modèle CLSM donne des résultats moins cohérents spatialement avec des bassins ayant des étiages très fréquents. Ceci est dû au biais hydrologique.

### 4.3.2 Durée

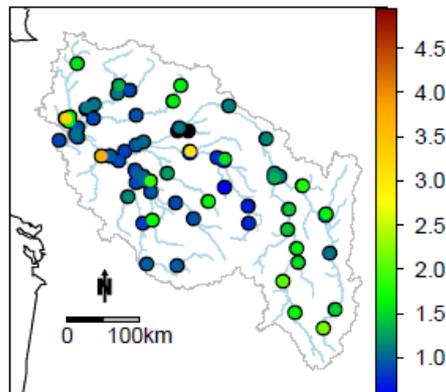
La figure 4.5 illustre l'allongement des épisodes d'étiages et ceci dès le milieu du siècle. Le nombre de jours moyen en étiage par an est calculé en divisant le nombre de jours en étiage sur la période considérée et en divisant par le nombre d'année. Notons qu'en temps présent, les valeurs sont proches de 40 jours. Il y a, quel que soit le bassin considéré en moyenne, 36.5 jours sous le seuil (jours pendant lesquels le déficit ne peut que s'accroître). Selon le bassin considéré, un nombre différent de jours sera nécessaire pour que le déficit cumulé s'annule. Avec la baisse des débits sous projections climatiques, on observe logiquement un nombre de jours sous seuil plus grand en temps futur<sup>1</sup>, les déficits cumulés sont plus importants et il faut donc plus de temps pour que le déficit cumulé s'annule. L'allongement des épisodes d'étiage est donc une conséquence logique des constats faits aux sections précédentes. En termes de saisonnalité, on observe logiquement une date de début des événements plus précoce et une date de fin plus tardive.

<sup>1</sup>Le Q90 du temps présent correspond à un quantile inférieur en temps futur illustrant la baisse des débits.

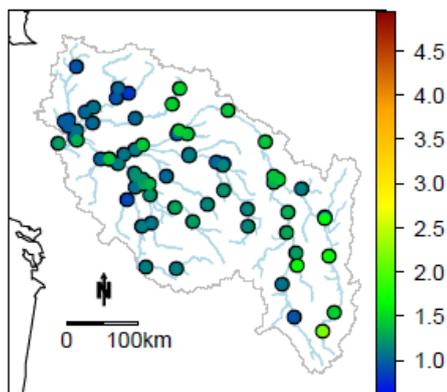
nbre d'étiages / an - Eros - PST



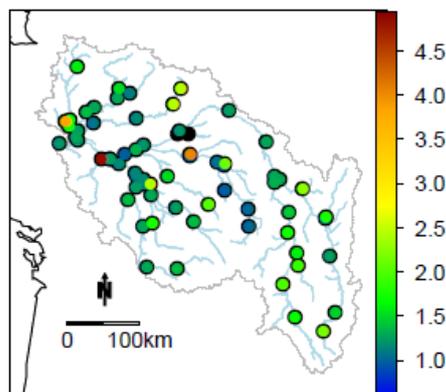
nbre d'étiages / an - CLSM - PST



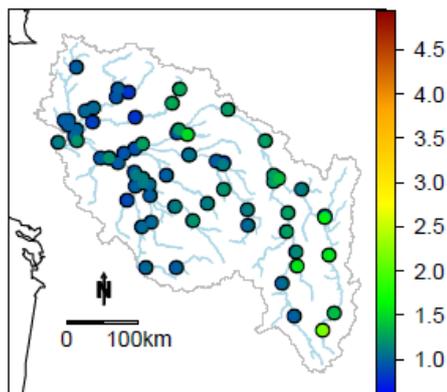
nbre d'étiages / an - Eros - MS



nbre d'étiages / an - CLSM - MS



nbre d'étiages / an - Eros - FS



nbre d'étiages / an - CLSM - FS

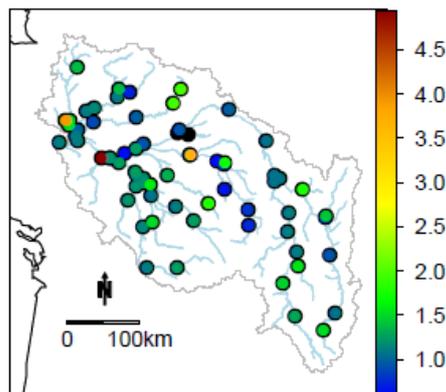
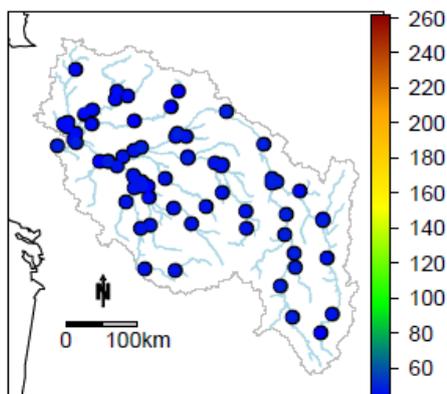
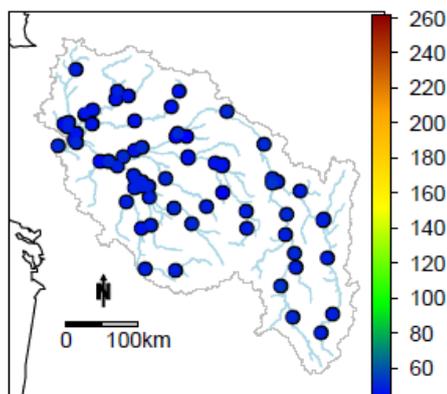


FIGURE 4.4 – Nombre moyen d'événements par an. Moyenne multi-MCG. Modèle hydrologique Eros (à gauche) et CLSM (à droite). PST (en haut), MS (milieu) et FS (en bas).

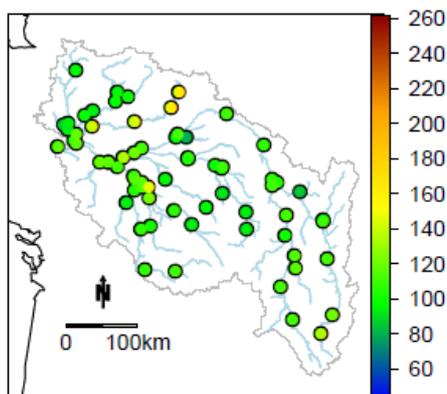
nombre de j par an - Eros - PST



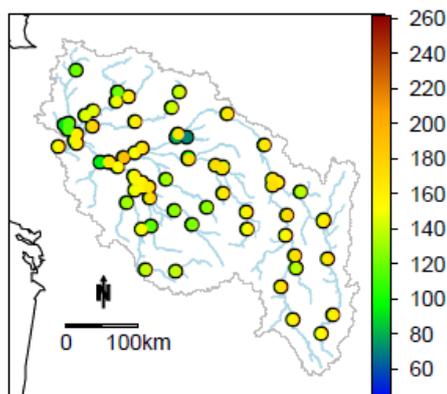
nombre de j par an - CLSM - PST



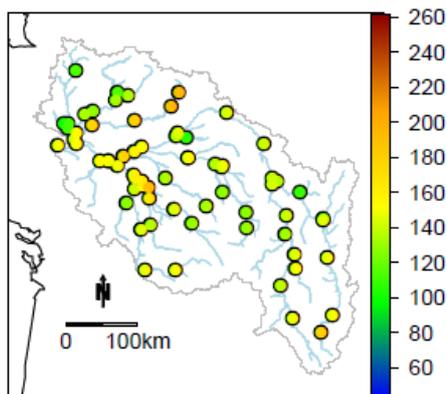
nombre de j par an - Eros - MS



nombre de j par an - CLSM - MS



nombre de j par an - Eros - FS



nombre de j par an - CLSM - FS

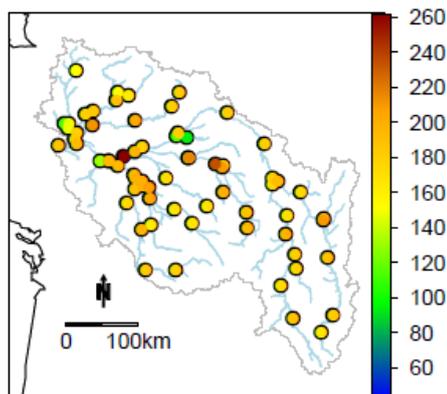
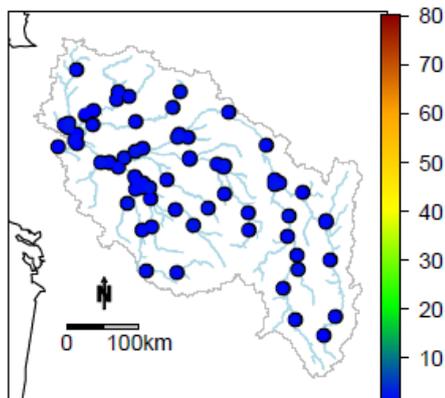
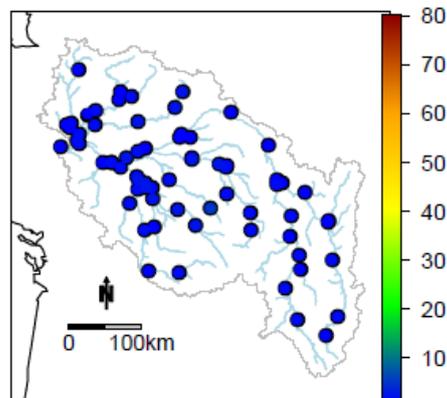


FIGURE 4.5 – Nombre moyen de jours par an appartenant à une séquence d'étiage. Moyenne des projections hydrologiques des 14 MCG avec le modèle Eros à gauche et CLSM à droite.

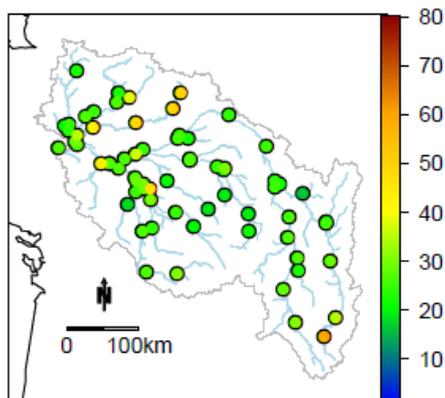
nombre de j par an – Eros – PST



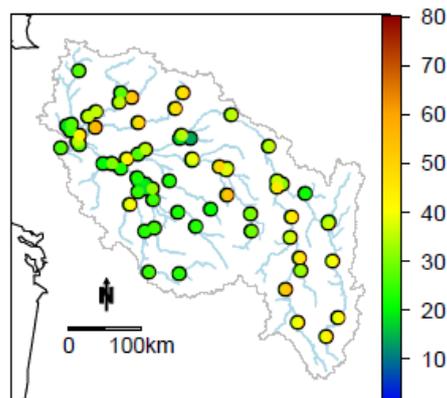
nombre de j par an – CLSM – PST



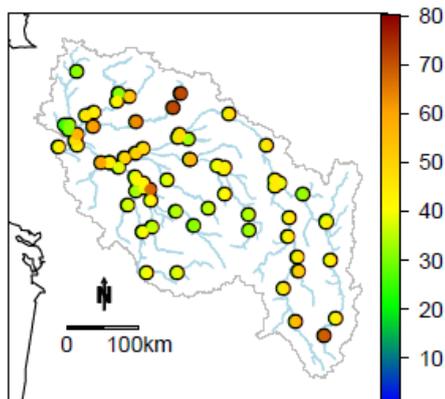
nombre de j par an – Eros – MS



nombre de j par an – CLSM – MS



nombre de j par an – Eros – FS



nombre de j par an – CLSM – FS

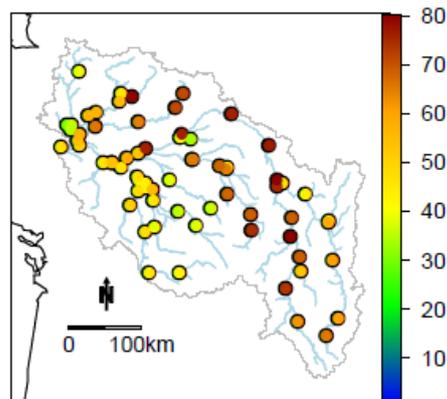


FIGURE 4.6 – Dispersion inter-MCG représentée à l'aide de l'écart type en jours de la série des 14 projections hydrologiques multi-MCG.

En plus de la représentation des changements sur le nombre de jours par an appartenant à un étiage, la figure 4.6 représente la dispersion inter-MCG. Il faut noter que pour obtenir une dispersion inter-MCG, nous avons dû moyenner les étiages pour chaque MCG puis présenter la moyenne et l'écart type de ces moyennes.

### 4.3.3 Sévérité

La sévérité d'un étiage est caractérisée par le volume déficitaire maximum ( $v_i$ ). Le déficit moyen est calculé pour les périodes de référence, 2049-2064 et 2084-2099. Les projections en termes de durée montrent que les étiages sont beaucoup plus longs. Il en découle que les déficits volumiques seront beaucoup plus importants. En terme volumique, les résultats sont écrasants en raison du côté intégrateur du déficit.

### 4.3.4 Saisonnalité

Pour étudier la saisonnalité des étiages en comparant les épisodes du temps futur à ceux du temps présent, il faut que ceux-ci soient comparables sur les autres caractéristiques. Si on étudie la saisonnalité des étiages du temps futur en gardant comme seuil le Q90 de la chronique en temps présent, avec l'allongement des épisodes d'étiage constaté au 4.3.2, on observe un début d'épisode plus précoce et une fin plus tardive. Pour étudier d'éventuels changements sur la saisonnalité des étiages, il faut que ceux-ci aient la même durée. Par conséquent, dans cette partie, le seuil utilisé dans la méthode SPA sera le Q90 de la chronique future traitée.

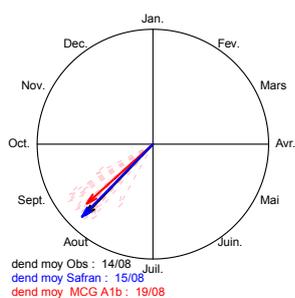
La figure 4.7 illustre le décalage des épisodes d'étiages sous projections climatiques. La dynamique des étiages est légèrement différente en temps futur avec un léger décalage de l'étiage moyen environ 15 à 20 jours plus tard. Sur chaque calendrier sont tracés pour rappel les dates issues des observations et de la réanalyse Safran utilisée comme forçage du modèle Eros. Ceci permet d'étudier les changements projetés en regard de la fiabilité de la méthode. Les événements moyens des 14 MCG sont tracés en rose pour illustrer la dispersion des réponses avec les différents MCG. Cette dispersion n'augmente pas significativement avec le temps.

Notons que la saisonnalité est assez robuste dans le temps car la dispersion reste globalement la même et que la norme des flèches n'est pas réduite.

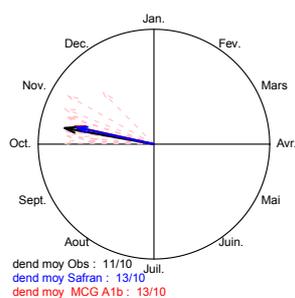
## 4.4 Conclusion sur les projections

L'approche multi-projections laisse présager des étiages un peu plus fréquents mais surtout plus longs et plus sévères. Ceci traduit les constats faits sur la baisse générale des débits. Les changements projetés sont déjà très forts dès le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle et s'accroissent en

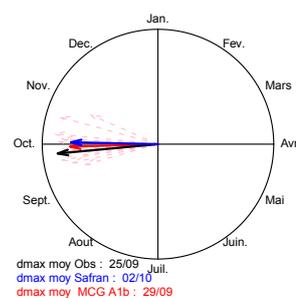
**Début de l'événement moyen – Eros – PST**



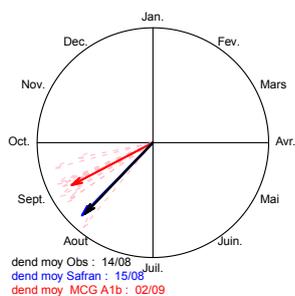
**Fin de l'événement moyen – Eros – PST**



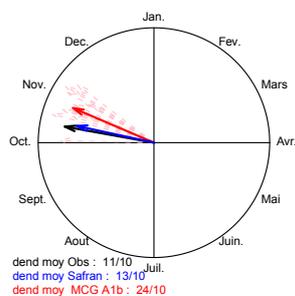
**Date du déficit maximum – Eros – PST**



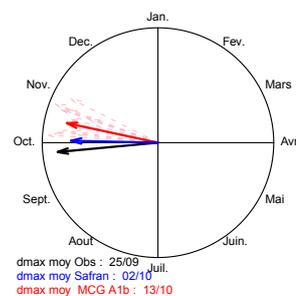
**Début de l'événement moyen – Eros – MS**



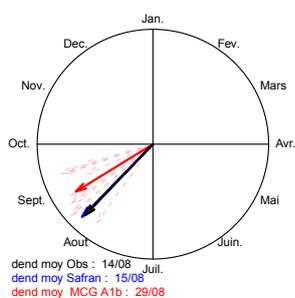
**Fin de l'événement moyen – Eros – MS**



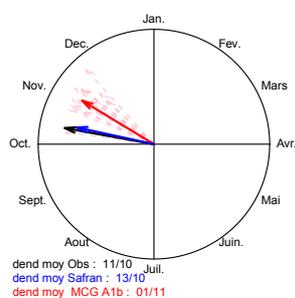
**Date du déficit maximum – Eros – MS**



**Début de l'événement moyen – Eros – FS**



**Fin de l'événement moyen – Eros – FS**



**Date du déficit maximum – Eros – FS**

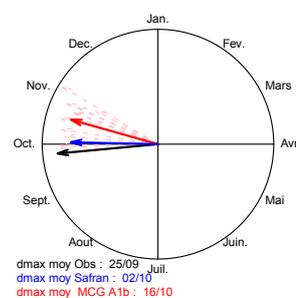


FIGURE 4.7 – Changement de saisonnalité des étiages pour la Loire à Montjean avec le modèle Eros. Les saisonnalités du début, de la fin et de la date du déficit maximum sont représentés en temps présent (en haut), en milieu de siècle (milieu) et en fin de siècle (bas). Les observations (en noir) et Safran (en bleu) sont reportés pour chaque période.

fin de siècle. La dispersion des projections est forte devant les changements attendus. Si les projections diffèrent par l'ampleur des changements attendus, elles s'accordent toutes sur la baisse des bas débits et l'allongement des étiages.

Du point de vue de la dynamique des étiages, les projections montrent de façon assez robuste un retardement des épisodes d'une vingtaine de jours.

# Conclusion

## Synthèse

Le premier objectif de mon travail de fin d'étude était de faire le point sur la capacité d'une chaîne de modélisation à reproduire les étiages. Nous avons vu que ce point était très délicat et qu'il est difficile en temps présent de reproduire les extrêmes hydrologiques. Mes travaux ont permis de mettre en évidence le biais de nature hydrologique qui ne permet pas de reproduire fidèlement les étiages. Ceci tient au fait que la relation entre les pluies arrosant un bassin versant et le débit à son exutoire est complexe et difficilement modélisable. Cette relation est d'autant plus complexe que, pour les étiages, des influences anthropiques viennent perturber la logique naturelle. Par conséquent, nous avons vu qu'en période d'étiage il est très difficile de modéliser des débits fidèles aux débits observés car ces derniers sont anthropiquement influencés. De ce constat sur la qualité des données observées découle le mauvais calage des modèles hydrologiques. En effet, les hydrologues ne disposent pas toujours de suffisamment de données de qualité pour identifier la relation entre pluies et débit à l'exutoire.

Nous avons aussi testé en temps présent la capacité des modèles climatiques simulant le climat présent à reproduire les caractéristiques atmosphériques observées. Nous n'avons pas étudié cette adéquation directement sur les variables atmosphériques mais sur la réponse hydrologique à ces forçages des modèles hydrologiques utilisés. Il s'avère que le biais lié aux simulations climatiques et à leur descente d'échelle en scénarios locaux est plus faible que le biais de nature hydrologique.

Nous sommes ensuite partis de l'idée que malgré le biais hydrologique fort en temps présent, rien ne nous empêchait de continuer notre exercice théorique consistant à étudier l'impact du changement climatique sur les étiages toutes choses égales par ailleurs. Nous avons donc utilisé une approche multi-projections pour tester plusieurs hypothèses incertaines en temps futur. Les changements projetés pour le siècle à venir sont importants en comparaison des biais visibles en temps présent. Les projections indiquent une baisse sévère des bas débits et en conséquence des épisodes d'étiages plus longs et plus sévères sur l'ensemble des bassins versants étudiés. Les incertitudes d'origine multiple sont grandes en comparaison des changements projetés. Une approche multi-projections a été utilisée pour couvrir certaines incertitudes par la dispersion des différentes projections simulées. De façon qualitative, l'incer-

titude liée au choix d'un MCG est plus grande que celle liée au choix d'un scénario d'émission ou à l'état initial du système climatique.

Le modèle CLSM donne des réponses plus sévères sous changement climatique que le modèle Eros. Avec seulement deux modèles hydrologiques, il n'est pas possible de tirer de conclusion en faveur de l'un ou l'autre des modèles. Le projet RExHySS qui avait utilisé 6 modèles hydrologiques avait souligné le fait que le modèle CLSM était un horsain.

L'ampleur des changements projetés est de nature à mettre en doute la capacité des ouvrages à soutenir les étiages futurs et par conséquent, à refroidir les centrales nucléaires et à recourir à l'irrigation. Ces scénarios sont d'autant plus plausibles que sous changement climatique, la demande en eau pour refroidir les centrales et l'irrigation serait plus grande.

## Limites

La première limite du projet est l'aspect théorique de l'exercice. Des hypothèses dont on sait d'ores et déjà qu'elles ne seront pas vérifiées en temps futur sont émises. En effet, on sait pertinemment que, par exemple, l'occupation des sols sera différente en temps futur et la relation entre les pluies et les débits sera donc différente de celle utilisée pour notre projet.

Pour notre projet, seulement deux modèles hydrologiques ont été testés dont le modèle CLSM retournant des résultats douteux. Il serait judicieux d'utiliser un ou deux modèles de plus dont un modèle distribué à base physique pour s'affranchir du problème de calage. Il restera cependant difficile de comparer les réponses des modèles qui utilisent des procédures de calage différentes.

Une autre limite est l'impossibilité de couvrir l'ensemble des simulations possibles. Pour ce projet, 14 modèles climatiques ont été testés mais avec un seul scénario d'émission de gaz à effet de serre. Par ailleurs 3 scénarios d'émission ont été testés mais avec seulement un MCG. Il en est de même pour 4 conditions initiales qui ont été testées avec un seul MCG. Le temps de calcul étant parfois long, il est impossible de couvrir tous les cas. Il existe des techniques permettant de remplir les valeurs manquantes de la matrice à partir des quelques valeurs initiales (Déqué *et al.* 2007, Vidal et Wade, 2008). Ces techniques permettraient une hiérarchisation des incertitudes plus rigoureuse dans la mesure où l'on dispose d'un ensemble statistique complet.

## Perspectives

Nous avons souligné l'importance pour les prochains projets d'inclure une étape permettant de désinfluencer les débits. Nous sommes conscients que cette étape est extrêmement complexe (surtout si elle doit être menée sur plusieurs bassins simultanément) mais la qualité

des résultats serait considérablement améliorée. La naturalisation des débits nécessiterait de connaître l'historique des lâchures de barrage et des prélèvements pour pouvoir corriger les chroniques des observations. Si de telles données sont trop difficilement accessibles, il faudrait alors se contenter de caler les modèles hydrologiques sur des périodes non influencées (avant la construction d'un barrage par exemple).

Des travaux de recherche, en France comme à l'international, sont en cours pour réduire les incertitudes. Une classification des incertitudes pourrait être la suivante. La mauvaise incertitude (liée à l'absence de connaissance sur les phénomènes) doit être réduite. À l'inverse, il existe une « bonne » incertitude qui est elle irréductible. C'est le cas par exemple de l'incertitude sur l'état initial du système climatique. L'incertitude hydrologique est par ailleurs grande puisque les modèles ont des réponses différentes à un même forçage atmosphérique.

Comme mentionné plus haut, l'exercice réalisé est un exercice théorique cherchant à étudier l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur les bas débits. Cet exercice ne prend pas en compte les changements de mode de gestion des cours d'eau par exemple. Dans une logique d'adaptation au changement climatique, il faudrait prendre en compte les mesures mises en place pour mitiger l'effet du changement climatique. Ces aspects nécessitent de gros progrès pour être inclus dans les prochains projets de recherche. Sur ce point, des hypothèses majeures devront être émises devant la complexité des interactions entre la société et la ressource en eau.

# 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
- BOÉ, J. (2007), *Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France*. Thèse de doctorat, Université Toulouse 3. 1.2.3.2, 2.3.3.1
- BOURGIN, F. (2009), *Calibration of a catchment-based land surface model in the Loire River basin (France) to assess hydrological impacts of climate change*. Master thesis, Technische Universität München (TUM). 1.5
- DÉQUÉ, M. (2003), Température et précipitations extrêmes sur la france dans un scénario de changement climatique. Dans : *Actes du Colloque de l'Association Internationale de Climatologie.*, p. 76–80, Polska Akademia Nauk. 1.2.3.1
- DÉQUÉ, M. (2007), Frequency of precipitation and temperature extremes over france in an anthropogenic scenario : Model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, vol. 57, p. 16–26. 1.2.3.1
- DÉQUÉ, M., ROWELL, D. P., LÜTHI, D., GIORGI, F., CHRISTENSEN, J. H., ROCKEL, B., JACOB, D., KJELLSTRÖM, E., DE CASTRO, M. et VAN DEN HURK, B. J. J. M. (2007), An intercomparison of regional climate simulations for europe : assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, vol. 81, Supplement 1, p. 53–70. 4.4
- DUCHARNE, A., HABETS, F., DÉQUÉ, M., EVAUX, L., HACHOUR, A., LEPAILLIER, A., LEPELLETIER, T., MARTIN, E., OUDIN, L., C., P., RIBSTEIN, P., SAUQUET, E., THIÉRY, D., TERRAY, L., VIENNOT, P., BOÉ, J., BOURQUI, M., CRESPI, O., GASCOIN, S. et 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 de la somme. *Rapport de fin de contrat*. 1.3, 4.1
- DUCHARNE, A., KOSTER, R. D., SUAREZ, M. J., STIEGLITZ, M. et 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*, vol. 105, n° D20, p. 24 823–24 838. 1.4.5

- DUCHARNE, A., THÉRY, S., BILLEN, G., BENOÎT, M., BRISSON, N., GARNIER, J., KIEKEN, H., LEDOUX, E., MARY, B., MIGNOLET, C., MERMET, L., POUX, X., SAUBOUA, E., SCHOTT, C., VIENNOT, P., ABU ALKHAIR, A., BAUBION, C., CURIE, F., DUCOS, G., GOMEZ, E., LEBONVALLET, S., OLIVE, G. et SICART, F. (2004), Projet gicc-seine – influence du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique et biogéochimique du bassin de la seine. *Rapport final (Corrigé en janvier 2005)*, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. 1.3
- FLEIG, A. K., TALLAKSEN, L. M., HISDAL, H. et DEMUTH, S. (2006), A global evaluation of stream-flow drought characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 10, n° 4, p. 525–552. 2.1.2
- GASCOIN, A. . R. P. . C. M. . H. F., S.; Ducharne (2009), Adaptation of a catchment-based land surface model to the hydrogeological setting of the somme river basin (france). *J. Hydrol.*, vol. 368, p. 105–116. 1.4.5
- GIBELIN, A.-L. et DÉQUÉ, M. (2003), Anthropogenic climate change over the mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, vol. 20, p. 327–339. 1.2.3.1
- GIORGI, F. (1990), Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *Journal of Climate*, vol. 3, n° 9, p. 941–963. 1.2.3.1
- 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*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1.2
- LEBLOIS, t. (2003), Gicc-rhône. *Rapport final*, Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. 1.3
- NAKICENOVIC, 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., ROEHL, A., ROGNER, H.-H., SANKOVSKI, A., SCHLESINGER, M., SHUKLA, P., SMITH, S., SWART, R., VAN ROOIJEN, S., VICTOR, N. et DADI, Z. (2000), *Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University Press. 1.2.1
- NOILHAN, J., BOONE, A. et ETCHEVERS, P. (2000), Application of climate change scenarios to the Rhône basin. Dans : *Applying Climate Scenarios for Regional Studies : with particular reference to the Mediterranean – ECLAT-2 Toulouse Workshop Report No. 4* (S. Planton, C. Hanson, D. Viner et M. Hoepffner, édés.), p. 58–74. 1.3
- PAGÉ, C., TERRAY, L. et BOÉ, J. (2008), Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii scratch08. *Technical note, Climate Modelling and Global Change TR/CMGC/08/64*, CERFACS, Toulouse, France. 1.2.3.2, 2.3.3.1, 4
- QUINTANA-SEGUÍ, P., LE MOIGNE, P., DURAND, Y., MARTIN, E., HABETS, F., BAILLON, M., CANELLAS, C., FRANCHISTÉGUY, L. et MOREL, S. (2008), Analysis of near-surface atmospheric variables : Validation of the safran analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 47, n° 1, p. 92–107. 1.4.3

- TALLAKSEN, L. M., MADSEN, H. et CLAUSEN, B. (1997), On the definition and modelling of stream-flow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*, vol. 42, n° 1, p. 15–33. 2.1.2, 2.1.2
- TALLAKSEN, L. M. et VAN LANEN, H. A. J., éd. (2004), *Hydrological drought – Processes and estimation methods for streamflow and groundwater*, vol. 48 de *Developments in Water Science*. Elsevier. 2.1.2, 2.1.2
- TEBALDI, C. et KNUZZI, R. (2007), The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society Series A*, vol. 365, n° 1857, p. 2053–2075. 2.3.3
- THIÉRY, C., D. et Moutzopoulos (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* (S. E. Le Barbé Luc, éd.), Journées Hydrologiques de l'ORSTOM, 8., Montpellier (FRA), 1992/09/22-23, p. 285–295, Fonds IRD [F A42643] ; Bondy ; Montpellier (Centre IRD) ; Montpellier (Maison des Sciences de l'Eau). 1.4.5
- THIÉRY, D. (2003), *Logiciel GARDENIA, version 6.0. Guide d'utilisation*. BRGM. 1.4.5
- VIDAL, J.-P., MARTIN, E., FRANCHISTÉGUY, L., HABETS, F., SOUBEYROUX, J.-M., BLANCHARD, M. et BAILLON, M. (2010), Multilevel and multiscale drought reanalysis over france with the safran-isba-modcou hydrometeorological suite. *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 14, n° 3, p. 459–478. 1.4.3
- VIDAL, J.-P. et WADE, S. D. (2008), Multimodel projections of catchment-scale precipitation regime. *Journal of Hydrology*, vol. 353, n° 1-2, p. 143–158. 4.4
- VOGEL, R. M. et STEDINGER, J. R. (1987), generalized storage-reliability-yield relationships. *Journal of Hydrology*, vol. 89, p. 303–327. 2.1.2

# Acronymes

ARPEGE : Action de Recherche Petite Échelle Grande Échelle - modèle de circulation générale développé par Meteo France

CC : Changement Climatique

CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

CLSM : Catchment Land Surface Model

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

ETR : EvapoTranspiration Réelle

FS : Fin de Siècle

GES : Gaz à Effet de Serre

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

ICC-RExHySS : Impact du Changement Climatique sur les Ressources en eau et les EXtrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme

MCG : Modèle de Circulation Générale

MCGOA : Modèle de Circulation Générale couplé Océan-Atmosphère

MCR : Modèle Climatique Régional

MME : Multi-Model Ensemble

MS : Milieu de Siècle

PPE : Perturbed Physics Ensemble

PST : Présent

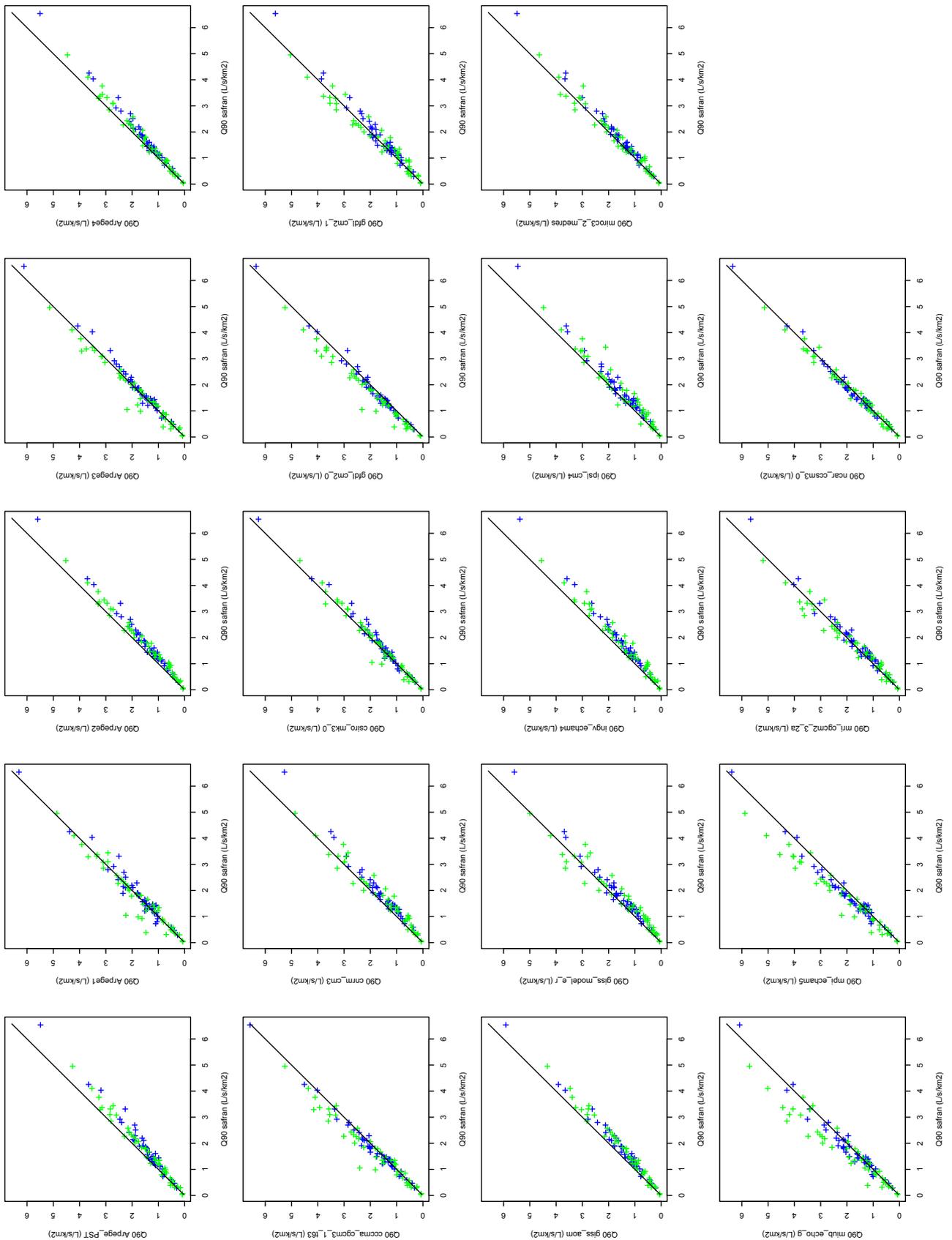
SAFRAN : Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Atmosphériques à la Neige

SPA : Sequent Peak Algorithm

SRES : Special Report on Emission Scenario

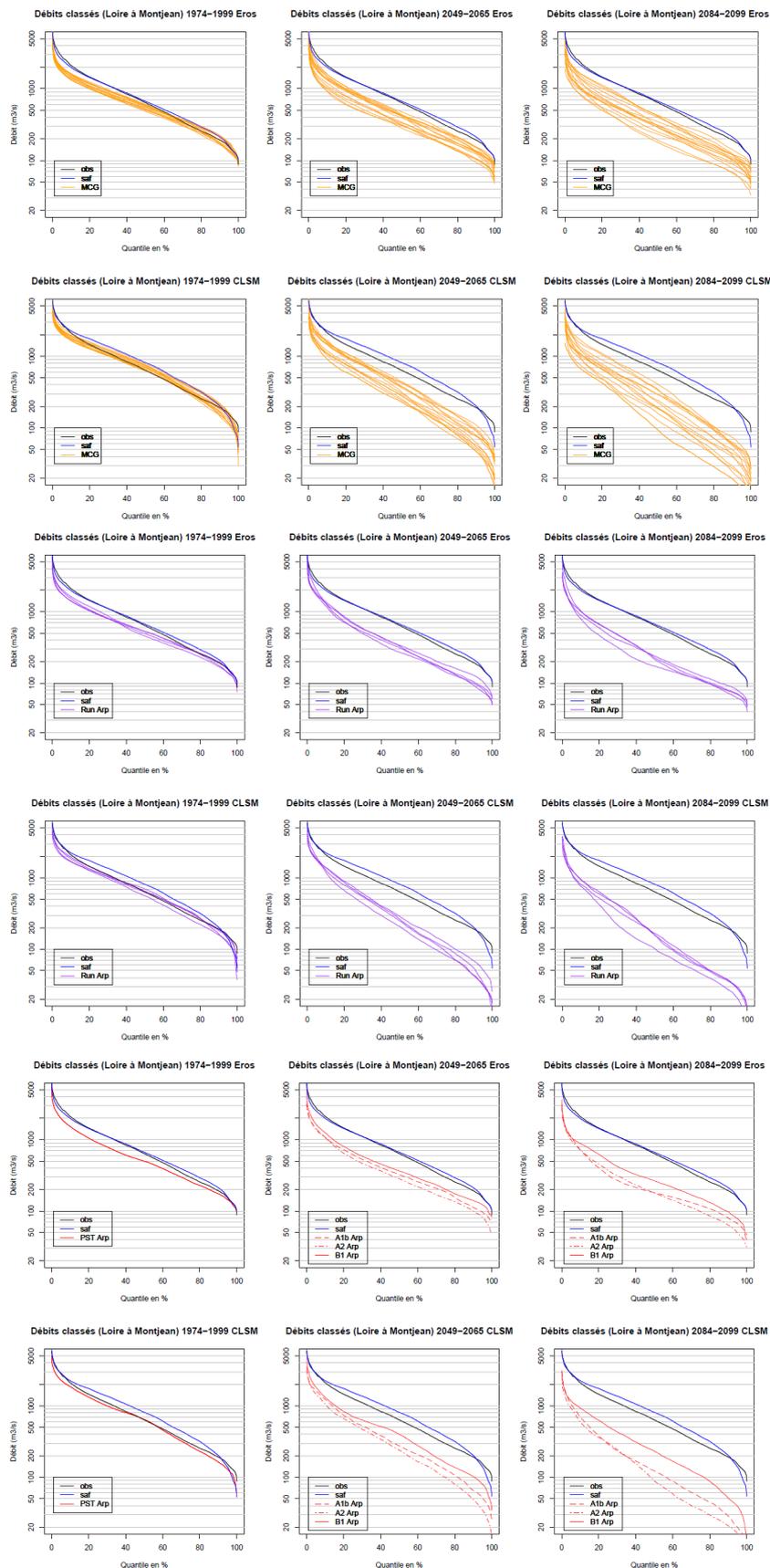
# Annexes

# Annexe 1



Biais sur les Q90 liés aux simulations climatiques présenté modèle par MCG. La variable de contrôle est issu des modèles hydrologiques forcés par Safran.

## Annexe 2



Courbes des débits classés de la Loire à Montjean. La famille multi-MCG est représentée (en haut), la famille multi-Runs (au milieu) et la famille multi-scénarios (en bas).