

RIWER 2030

Regional Climate, Water, Energy,
Resources and uncertainties from 1960 to 2030

RIWER2030

Climat Régionaux et Incertitudes,
Ressource en Eau et Gestion associée de 1860 à 2100.

<http://www.lthe.fr/RIWER2030/>

Projet ANR VMCS 2009-2012.

Rapport de fin de projet

Auteurs :

Hingray, B.⁽¹⁾, Hendrickx, F.^(2a), Bourqui M.^(2a), Creutin, J.D.⁽¹⁾, François, B.^(1,2a), Gailhard, J.^(2b), Lafaysse, M.⁽¹⁾, Lemoine, N.^(2a), Mathevet, T.^(2b), Mezghani, A.⁽¹⁾, Monteil, C.^(2a)

Partenaires

1 : CNRS, Lab. d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement, (LTHE), Grenoble

2 : EDF, a) Direction Technique Générale (DTG), Grenoble,

b) R&D - Lab. National Hydraulique et Environnement (LNHE), Chatou

L'affiliation mentionnée est celle de la période de participation au projet RIWER2030

Résumé

La possibilité d'estimer l'impact du changement climatique en cours sur le comportement hydrologique des hydro-systèmes, sur les risques hydrologiques et sur les ressources associées, est une nécessité pour anticiper les adaptations inévitables et nécessaires que doivent envisager nos sociétés. Les travaux de recherche effectués dans le cadre du projet RIWER2030 ont été réalisés sur le bassin versant supérieur de la Durance qui alimente la retenue artificielle de Serre-Ponçon gérée par EDF. L'estimation de l'impact du changement climatique sur le système de gestion correspondant a nécessité de développer une chaîne de simulation permettant 1) de générer des scénarios météorologiques multivariés adaptés aux échelles de ce système, 2) de simuler le comportement hydrologique des bassins versant l'alimentant, et permettant 3) de simuler la gestion de la retenue tenant compte du caractère multi-objectif de l'aménagement.

Pour la génération des scénarios météorologiques requis, nous avons exploré différentes stratégies de descente d'échelle statistique liant la génération à divers prédictors atmosphériques de grande échelle. Nous avons à cet effet développé et/ou adapté différentes versions de 3 Modèles de Descente d'Echelle Statistique (MDES analog, dsclim, d2gen). Pour leur comparaison, nous avons mis en place différentes évaluations. Ces évaluations sont directes, testant l'aptitude des MDES à reproduire certaines caractéristiques des chroniques météorologiques observées ou indirectes, orientées impact. Elles sont multi-réalisations, climatologiques, chronologiques et /ou visent par ailleurs à tester l'applicabilité des modèles en climat modifié.

Plusieurs versions de ces 3 MDES ont été utilisées pour produire ensuite sur la période 1860-2099 un ensemble de scénarios à pas de temps quotidien à partir des sorties d'une suite de Modèles Climatiques Globaux (GCM) du projet européen ENSEMBLES. Le scénario d'émission de gaz à effet de serre considéré pour le XXIème siècle est le scénario SRES-A1B. Les scénarios météorologiques obtenus sont utilisés en entrée de plusieurs modèles hydrologiques, Cequeau, Mordor, Isba-Durance, 3 modèles adaptés par ailleurs pour le projet, de façon à simuler sur la même période les scénarios hydrologiques correspondant.

Pour simuler la gestion de la retenue, nous avons développé un modèle de gestion pour reproduire – de façon réaliste du point de vue du gestionnaire actuel (EDF), mais simplifiée pour pouvoir être appliqué sous scénarios futurs - sa gestion actuelle. Nous avons développé à cet effet 1) des modèles permettant d'estimer les différentes demandes en eau sur le bassin et 2) un modèle d'optimisation de la gestion sous contraintes. Ces modèles permettent de simuler la gestion du système au pas de temps journalier sur plusieurs décennies du climat récent ou de climats futurs. La performance du système de gestion est estimée sur la base d'un ensemble d'indicateurs calculés à partir de ces simulations.

Les projections futures sont fortement incertaines, du fait des sources d'incertitudes liées aux différents types de modèles intervenant dans la chaîne de simulation. Classiquement, l'incertitude associée au choix du MDES est dite négligeable devant celle associée au choix du GCM. Les résultats obtenus pour le haut bassin de la Durance montrent que les incertitudes associées au choix du GCM ou au choix du MDES peuvent être, selon les variables météorologiques considérées, comparables. La dispersion des projections entre différents runs d'un même GCM est équivalente à la dispersion entre GCM. Les changements peuvent être aussi très différents pour différentes versions d'un même MDES. L'incertitude portée par le caractère stochastique des algorithmes de descente d'échelle est non négligeable, justifiant la génération de scénarios multiples. Les incertitudes liées au modèle hydrologique sont aussi non négligeables, en particulier sur les projections de débits annuels futurs, du fait d'une représentation différentes des pertes par évaporation dans les modèles.

Si les changements attendus sont significatifs pour diverses variables liées à l'augmentation des températures (augmentation des pertes évaporatoires, diminution de l'enneigement et de la saisonnalité des débits), ils ne le sont pas pour d'autres variables telles que les précipitations, du fait de la variabilité interne des GCM.

Enfin, la performance estimée dépend du modèle choisi pour la représentation du système de gestion actuel. La séquence de décisions optimale obtenue à l'aide du modèle de gestion dépend en particulier de la façon dont la stratégie utilisée pour l'optimisation de la gestion est élaborée. Trois types de stratégies, obtenues pour des degrés différents de prévisibilité des apports et sollicitations futurs à la retenue ont été considérées à cet effet. Nous avons montré que la façon dont la stratégie est élaborée peut modifier significativement pour certaines expériences climatiques futures les conclusions en termes d'impact sur la performance.

DEVELOPPEMENT DU RAPPORT

Date	Version	Prepared by	Institution	Note
20.12.2012	0.1a	FH	EDF	
15.02.2013	0.1b	BF+CM	CNRS/EDF	
26.02.2013	0.1c	BH	CNRS	
28.02.2013	0.1c	FH+PP	EDF	
03.02.2013	0.2	BH	CNRS	
05.03.2013	0.3a	ML+AM	CNRS	
14.03.2013	0.3b	FH	EDF	
21.03.2013	0.3c	JG	EDF	
21.03.2013	final	BH	CNRS	

Sommaire / Summary

RESUME	2
1. INTRODUCTION.....	6
2. MODELE DE GESTION : CAS DE LA RETENUE DE SERRE-PONÇON	8
2.1. INTRODUCTION.....	8
2.2. VISION SIMPLIFIEE DE LA GESTION DE LA RETENUE DE SERRE-PONÇON.....	8
2.3. DEMANDE EN EAU DES USAGES.....	11
2.4. INTERET ENERGETIQUE	14
2.5. OPTIMISATION / SIMULATION SOUS CONTRAINTE	15
2.6. MODELES AC / AIC / AIP	17
3. REGIONALISATION DU CLIMAT	21
3.1. MODÉLISATION DU LIEN D'ÉCHELLE : STRATÉGIES ET PRÉDICTEURS	21
<i>Quelques stratégies de descente d'échelle.....</i>	<i>21</i>
<i>MDES considérés dans le projet RIWER2030</i>	<i>22</i>
<i>Variables explicatives</i>	<i>23</i>
<i>Génération de scénarios multivariés</i>	<i>24</i>
3.2. EVALUATION DES MDES : CADRE MÉTHODOLOGIQUE ET QUELQUES RÉSULTATS	25
<i>Evaluation mono- vs multi-réalisations.....</i>	<i>26</i>
<i>Evaluation climatologique</i>	<i>27</i>
<i>Evaluation chronologique.....</i>	<i>30</i>
<i>Evaluation en transposabilité temporelle pour une utilisation en climat futur.....</i>	<i>31</i>
<i>Evaluation hydrologique ou pertinence de la chaîne MDES/MH.....</i>	<i>32</i>
<i>Pertinence de la chaîne GCM/MDES/MH.....</i>	<i>36</i>
4. ANALYSES D'IMPACT	38
4.1. SCENARIOS	38
<i>Chaîne de simulation et incertitudes.....</i>	<i>38</i>
<i>Données et plans d'expérience</i>	<i>39</i>
<i>Périodes simulées et changements considérés</i>	<i>40</i>
<i>Disponibilité des scénarios</i>	<i>40</i>
4.2. IMPACT SUR LE CLIMAT REGIONAL ET L'HYDROLOGIE DE LA DURANCE	40
<i>Impact sur le climat régional et incertitudes.....</i>	<i>40</i>
<i>Impact sur l'hydrologie de la Durance et incertitudes.....</i>	<i>44</i>
<i>Significativité des changements :</i>	<i>48</i>
4.3. IMPACT SUR LA PERFORMANCE DU SYSTEME DE GESTION DE SERRE-PONÇON	50
<i>Analyses effectuées et scénarios considérés.....</i>	<i>50</i>
<i>Incertitudes liées aux scénarios météorologiques : contributions des GCM / des MDES.....</i>	<i>51</i>
<i>Significativité des changements</i>	<i>54</i>
<i>Incertitudes liées aux modèles de gestion.....</i>	<i>55</i>
5. CONCLUSIONS / PERSPECTIVES	59
<i>Du GCM à l'analyse d'impact : une chaîne de simulation intégrée</i>	<i>59</i>
<i>La régionalisation du climat</i>	<i>59</i>
<i>La modélisation de la gestion du système de Serre-Ponçon</i>	<i>60</i>
<i>La correction des prédictors obtenus en sortie des GCM</i>	<i>61</i>
<i>Projections futures et incertitudes.....</i>	<i>62</i>
<i>Significativité des changements.</i>	<i>63</i>
<i>MDES / scénarios multiréalisations et sous-échantillonnage</i>	<i>63</i>
<i>L'après RIWER2030</i>	<i>63</i>
6. REMERCIEMENTS.....	64
7. REFERENCES.....	64

ANNEXES

- A1. Scénarios RIWER2030 – Convention**
- A2. MDES Analog : performance et distance d’analogie**
- A3. Evaluation hydrologique des MDES**
- A4. Modèles hydrologiques : Cequeau et Mordor**
- A5. Modèle de gestion : Stratégie d’échantillonnage des réalisations**
- A6. Correction des sorties de GCM**
- A7. Projections / Analyse qualitative des incertitudes**
- A8. Projections / Analyse quantitative des incertitudes**
- A9. Bilan de l’impact du projet : publications – communications**

1. Introduction

La possibilité d'estimer l'impact du changement climatique en cours sur le comportement hydrologique des hydro-systèmes, sur les risques hydrologiques et sur les ressources associées, est une nécessité pour anticiper les adaptations inévitables et nécessaires que doivent envisager nos sociétés.

Les activités de recherche réalisées durant le projet RIWER2030 ont eu pour objectif d'apporter des éléments de réponse à certaines des questions scientifiques clés liées à cette estimation, dont en particulier les suivantes :

- Comment produire, sur la base des sorties des modèles climatiques globaux ou régionaux, des scénarios de changement climatique pertinents adaptés aux échelles spatiales et temporelles des hydrosystèmes étudiés ?
- Comment estimer l'impact de ces changements climatiques régionaux sur la réponse hydrologique des hydrosystèmes, sur la ressource en eau, la ressource énergétique associée et leur gestion ?
- Comment estimer les incertitudes associées aux scénarios résultant de ces analyses et, finalement, comment mettre en évidence que les changements estimés sont ou non significativement différents des fluctuations résultant de la variabilité naturelle du climat ?

Les travaux de recherche ont été réalisés sur le bassin versant supérieur de la Durance qui alimente la retenue artificielle de Serre-Ponçon gérée par EDF. L'estimation de l'impact du changement climatique sur le système de gestion correspondant a nécessité de développer une chaîne de simulation permettant 1) de générer des scénarios météorologiques adaptés aux échelles de ce système, 2) de simuler le comportement hydrologique des bassins versant l'alimentant, et permettant 3) de simuler la gestion de la retenue tenant compte du caractère multi-objectif de l'aménagement. Le principe de cette chaîne de simulation est synthétisé sur la Figure 1.

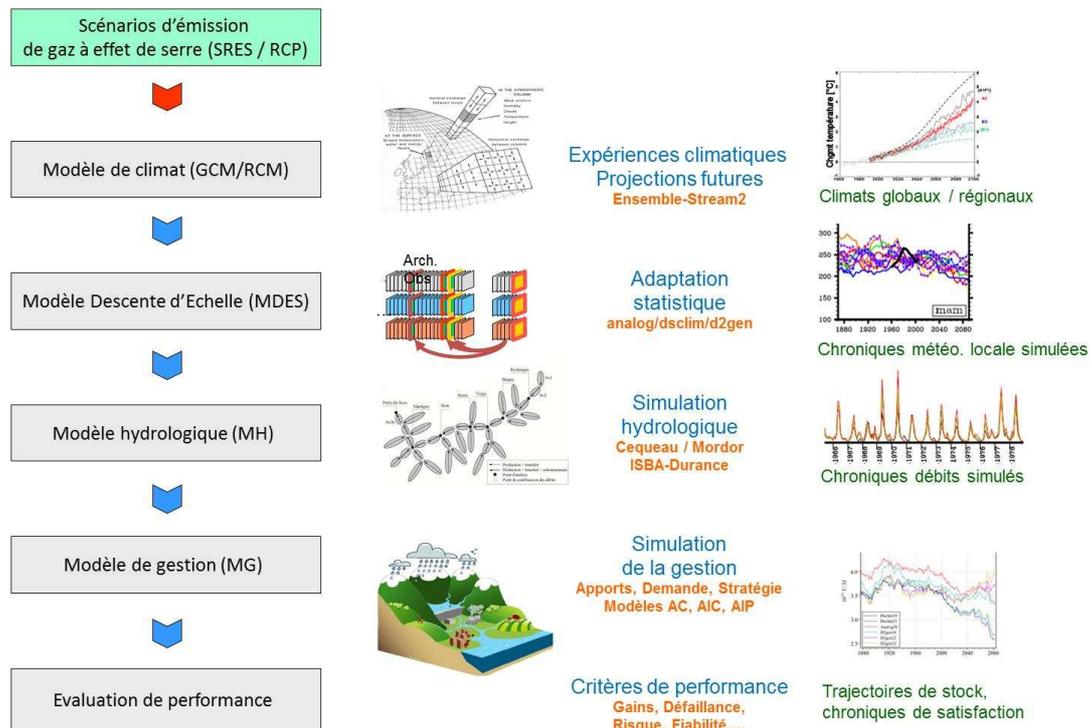


Figure 1. Schéma de la chaîne de simulation appliquée dans le cadre du projet RIWER2030. Les projections climatiques produites à l'aide de plusieurs Modèle de Circulation Générale (GCM) dans le cadre du projet européen ENSEMBLES ont été utilisées pour forcer plusieurs Modèles de Descente d'Echelle Statistique (MDES) afin de produire des scénarios météorologiques adaptés aux échelles du bassin de Serre Ponçon. Les scénarios hydrologiques obtenus à l'aide de plusieurs modèles hydrologiques (MH) sur la base de ces scénarios météorologiques ont été utilisés en entrée de différents modèles de gestion du système (MG) pour produire in fine une évaluation de l'impact du changement climatique régional sur la performance du système.

Ce rapport présente de façon synthétique les principaux résultats du projet.

- Dans une première section, nous rappelons dans les grandes lignes le système de gestion réel de Serre-Ponçon. Nous décrivons ensuite les modélisations qui ont été développées dans le cadre du projet pour en simuler la gestion.
- Nous présentons dans la section suivante les différents Modèles de Descente d'Echelle (MDES) développés pour la génération des scénarios météorologiques adaptés à ce système; nous détaillons en particulier le cadre méthodologique mis en place pour leur évaluation.
- Nous présentons dans une dernière section les résultats des simulations obtenus pour un ensemble de scénarios produits à l'aide de ces MDES à partir des sorties d'une suite d'expériences climatiques effectuées dans le cadre du projet européen ENSEMBLES. Nous analyserons l'effet des scénarios de changements climatiques considérés sur différentes variables météorologiques, hydrologiques, et d'intérêt pour la gestion du système de Serre-Ponçon (SP).

Pour une description détaillée et exhaustive des résultats produits dans le cadre du projet, le lecteur pourra se référer à la thèse de Matthieu LAFAYSSSE (2011) pour les parties « Régionalisation du climat » et « Projections futures et incertitudes », à la thèse de Baptiste FRANÇOIS (2013) pour les parties « Modélisation de la gestion de Serre Ponçon » et « Projections futures et incertitudes » ainsi qu'aux différentes publications indiquées dans la section « Publications » de ce rapport.

La thèse de Baptiste FRANÇOIS a été financée par le projet RIWER2030. La thèse de Matthieu LAFAYSSSE, financée par l'Ecole Nationale de la Météorologie, a été réalisée en complète synergie avec le projet RIWER2030.

NB : dans le programme initial du projet, il était aussi prévu de mettre en place une chaîne de simulation et d'analyse similaire pour estimer l'impact du changement climatique sur le bassin versant de la Loire à l'amont de Gien. Différents travaux ont été engagés sur ce deuxième cas d'étude. Ils ont conduit par exemple à la mise en place d'un modèle hydrologique distribué et à la génération de scénarios météorologiques pour ce bassin. Nous avons cependant choisi de ne pas aller plus loin dans le cadre de ce projet pour ce système. Les travaux réalisés pour le système de Serre-Ponçon ont en effet révélé différentes questions importantes que nous n'avions pas identifiées au moment de l'écriture du projet mais qui se sont avérées être déterminantes pour assurer la pertinence de la méthodologie et des simulations effectuées. Nous avons donc choisi de les traiter et de concentrer ainsi nos efforts et nos recherches sur le seul hydrosystème Durance. Nous avons en particulier mis en place pour ce système différentes versions de plusieurs méthodes de descente d'échelle statistiques, différents modèles hydrologiques, ainsi que différentes versions d'un modèle de gestion développé spécifiquement pour cette étude. Cette approche multi-modèle nous a ainsi permis de mettre en évidence la contribution non négligeable de ces différents maillons de la chaîne de simulation et d'analyse à l'incertitude totale sur les projections futures réalisées. Par ailleurs nous avons effectué les simulations sur l'ensemble de la période 1860-2100, une période étendue qui nous a permis de relativiser la significativité des changements au regard de la variabilité intrinsèque des modèles climatique sur les 140 ans passés. La méthodologie et les modèles développés pour la Durance Amont seraient aisément transposables au système Loire Amont. Cela nécessiterait cependant une adaptation des outils de simulation des réserves hydrauliques notamment pour prendre en compte les spécificités de la gestion de la ressource en eau sur ce bassin (enjeux conjoint sur les crues et les étiages).

2. Modèle de Gestion : Cas de la retenue de Serre-Ponçon

2.1. Introduction

La Durance constitue aujourd'hui la principale ressource en eau, avec le Verdon, de la région Provence Alpes Côte d'Azur pour satisfaire les besoins de l'agriculture, de l'industrie (hors énergie) et des populations.

Le bassin versant de la Durance en amont du lac de Serre-Ponçon représente une superficie de 3580 km² et contribue à alimenter de nombreux usages qui se sont développés au cours des siècles. Dès le 12^{ème} siècle, des concessions sont accordées aux agriculteurs pour dériver les eaux de la Durance afin d'arroser leurs cultures. Par la suite, d'autres autorisations et concessions ont autorisé des villes, comme Marseille ou Aix-en-Provence, à dériver les eaux pour l'alimentation des populations. L'arrivée de l'hydroélectricité dans le bassin est principalement marquée par la loi du 5 janvier 1955 qui déclare d'utilité publique la réalisation du barrage de Serre-Ponçon et qui marque le caractère « multi-objectifs » de l'aménagement (régulation des eaux, alimentation pour l'eau potable et l'agriculture, production d'électricité). La prise en compte des milieux aquatiques se concrétise par la suite à travers la loi Pêche de 1984 qui instaure l'obligation de laisser un débit minimum en rivière à l'aval de tous les ouvrages (cette loi n'étant pas spécifique au bassin).

La croissance démographique, la montée en puissance de préoccupations environnementales et le développement des activités touristiques liées à l'eau révèlent les limites du partage de l'eau en Durance comme le souligne le rapport (Balland et al., 2002) en consacrant la distinction entre usages établis (irrigation, hydroélectricité, et eau potable) et usages émergents (écologiques et touristiques). Dans ce contexte, on comprend que le changement climatique, aujourd'hui accepté par l'ensemble de la communauté scientifique (IPCC, 2007a, 2007b) et ses effets attendus sur la ressource en eau ne peuvent que renforcer les tensions existantes sur le bassin de la Durance.

Ainsi, la pression sur la ressource en eau, la fréquence et l'intensité des situations de pénuries devraient s'accroître. Par voie de conséquence, ce sont les défis associés à leur gestion qui s'en trouveraient exacerbés. Dans ce contexte, la gestion recouvre un champ relativement large depuis les politiques publiques (LEMA, DCE, ...), en passant par la gouvernance locale de l'eau (SAGE, Contrats de Rivière, ...) jusqu'à l'exploitation des aménagements (exploitation des réserves hydroélectriques, utilisation des tranches d'eau agricoles dans ces réserves, ...). Traiter l'ensemble de ces problématiques à l'échelle de ce projet aurait été irréaliste.

Le travail de représentation de la gestion a donc été limité à la fois du fait de l'extension spatiale du cas d'étude (bassin de la Durance à Serre-Ponçon) d'une part, et d'autre part de la difficulté à produire une vision prospective sur les usages de l'eau nécessairement en lien avec un contexte global, économique et sociétal. C'est dans ce sens qu'il a donc été proposé de s'intéresser à la problématique de la gestion du barrage réservoir de Serre-Ponçon dans un contexte de changement climatique tenant compte des apports naturels et des usages de l'eau ainsi que de leur sensibilité au seul contexte climatique.

2.2. Vision simplifiée de la gestion de la retenue de Serre-Ponçon

Le projet RIWER2030 a restreint l'ambition de modélisation de la gestion à :

- Une représentation de la gestion de l'eau limitée à la modélisation de la retenue de Serre-Ponçon.
- Un ensemble de composants, qui lorsqu'il y a lieu d'être, devront pouvoir rendre compte de leur sensibilité au climat ou à l'hydrologie.

La retenue de Serre-Ponçon constitue une interface entre une ressource naturelle (apport en amont de la retenue, apport sur les bassins versants en aval, précipitation), un besoin en eau exprimé par les usages (eau potable, agriculture, industrie, tourisme) et le système électrique. La réserve de Serre-Ponçon, au travers de sa gestion (stockage / déstockage), permet d'assurer l'exercice d'équilibre entre l'offre en eau (apports naturels) et la demande en eau (besoin quantitatif ou intérêt énergétique).

La construction et l'exploitation de la retenue de Serre-Ponçon ont été confiées à Electricité de France par la loi du 5 Janvier 1955. Les objectifs établis à cette époque pour l'aménagement étaient par ordre de priorité :

- Régulation des eaux du cours naturel
- Alimentation en potable et agricole de la basse Durance
- Production d'hydroélectricité

Cette réserve s'inscrit dans un aménagement d'ensemble de la Durance et du Verdon (la chaîne hydraulique Durance-Verdon) qui compte un ensemble de 32 usines hydroélectriques installées le long de canaux usiniers et qui permettent le transport d'eau dans le bassin vers les différents usagers (agriculture, eau potable, industrie).

Serre-Ponçon représente la plus grande réserve de cet aménagement avec un volume de 1230 Mm³ et une réserve utile de 1030 Mm³. L'ampleur de cette réserve, additionnée à celle de la retenue de Sainte Croix sur le Verdon, permet l'alimentation en eau des canaux et la satisfaction des besoins en eau des usages, y compris en période de basse eaux estivales. Concernant plus particulièrement Serre-Ponçon, une réserve de 200 Mm³ a été allouée pour satisfaire les besoins en eau excédant la ressource naturelle en aval du barrage de Cadarache et jusqu'à la confluence avec le Rhône. La répartition de cette ressource entre les différents usagers est confiée au Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance (SMAVD) depuis 1982.

Apparu plus tardivement, l'enjeu touristique sur le lac de Serre-Ponçon fait aujourd'hui partie des enjeux de la gestion de cette réserve bien que le cadre réglementaire des concessions ne le mentionne aucunement. Du fait d'une pression sociale évidente et de revenus économiques associés, cet aspect n'est pas ignoré par le gestionnaire de la retenue qui essaye, en lien avec le Syndicat Mixte d'Aménagement et de Développement de Serre-Ponçon (SMADESEP, créé en 1997), de maintenir un niveau satisfaisant en été dans la retenue pour permettre différentes activités récréatives (baignades, voile, ...).

La trajectoire moyenne que suit ainsi la réserve de Serre-Ponçon (Figure 2) traduit les grandes phases de gestion de la réserve avec :

- Un déstockage hivernal de la réserve pour l'intérêt énergétique de l'eau durant cette période
- Un remplissage printanier au moment de la fonte et qui permet de rejoindre au premier juillet un objectif de cote pour le tourisme sur la retenue
- Un déstockage estival pour satisfaire les besoins en eau des usages en période de basses eaux tout en respectant un niveau minimum pour le tourisme.

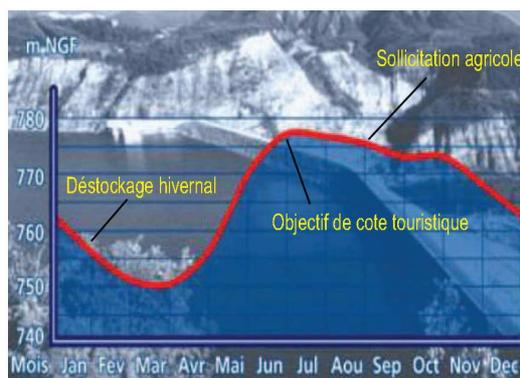


Figure 2 : Trajectoire inter annuelle de la retenue de Serre-Ponçon (m NGF)

Le modèle de la gestion de la retenue de Serre-Ponçon vise à proposer une représentation simplifiée des « processus » conduisant aux actes de stockage et déstockage qui caractérisent la gestion de la ressource hydraulique au travers d'un aménagement hydraulique. Par ailleurs, ce modèle de gestion de la retenue de Serre-Ponçon devra rendre compte des relations entre cette gestion et le climat qui est au cœur des travaux du projet RIWER2030.

La gestion d'une réserve hydraulique passe par la construction dans le temps d'une séquence de décisions sur les variables de contrôle (accroître le stock ou pas via des décisions de turbinages).

Modéliser la gestion d'une réserve hydraulique passe donc par l'identification de trois composantes que sont (i) les variables de contrôle de l'aménagement, (ii) les entrées (aléas d'apport) et (iii) les finalités (enjeux et objectifs de l'aménagement) puis à les modéliser. Il devient alors possible de simuler cet ensemble et d'en chercher une trajectoire optimale, c'est-à-dire satisfaisant au mieux les objectifs assignés de gestion tenant compte des contraintes et des aléas.

La gestion au jour le jour d'une réserve se fait par ailleurs dans un contexte d'avenir incertain: sur les apports futurs, mais aussi sur la demande des usages ou encore le besoin d'énergie sur le réseau d'électricité pour les semaines, mois à venir. Le gestionnaire dispose de quelques informations prévisionnelles à échéance saisonnière, mises à jour au fur et à mesure que le temps passe, ce qui le place entre un avenir complètement certain et un avenir complètement incertain. Produire un modèle de la gestion de la retenue de Serre-Ponçon nécessite donc aussi d'investiguer cette dimension séquentielle de la gestion qui se construit en avenir plus moins incertain.

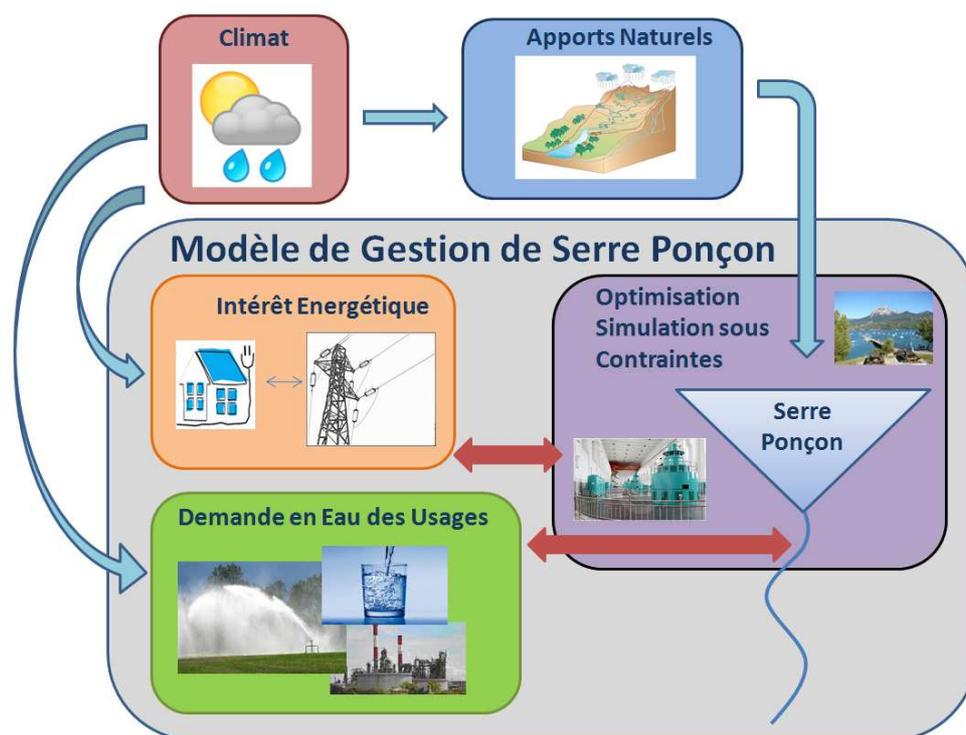


Figure 3 : Décomposition du modèle de gestion

La compréhension de la gestion de la retenue en lien avec le climat passe par la décomposition du système en trois composantes¹ (Figure 3):

- **Demande en eau des usages** : il s'agit là de la représentation dépendante du climat que l'on peut faire des attentes des usages aval vis-à-vis de la réserve de Serre-Ponçon (mise à disposition d'un débit suffisant dans les limites des droits d'eau). Sur le bassin de la Durance, il est apparu que la sensibilité au climat pour les décennies récentes étaient fortement portée par l'usage agricole. Les besoins pour l'eau potable et l'industrie (hors énergie) ont été considérés comme constants pour les différents scénarios de climat futurs considérés.
- **Intérêt énergétique** : le recours à l'hydroélectricité pour les besoins énergétiques se fait dans un contexte d'équilibre offre / demande au périmètre national, largement influencé par le niveau européen. Cette fonction d'intérêt permet au gestionnaire d'une retenue d'évaluer la valeur pour le système électrique du placement d'énergie hydraulique et donc, à terme, son optimisation.

¹ Le lecteur se reportera vers les autres chapitres de ce rapport pour accéder à la description des représentations des composantes climat et apports naturels qui participent à la dimension stochastique de la gestion de la réserve de Serre-Ponçon.

- Optimisation / Simulation sous contraintes : La question récurrente du gestionnaire est celle de l'arbitrage entre une utilisation immédiate d'un volume d'eau ou un usage ultérieur tout cela dans le souci de maximiser la valeur de l'aménagement vis-à-vis des objectifs assignés. La décision à un instant t passe donc par la prise en compte de l'état du système, d'une anticipation sur l'avenir des aléas et des objectifs assignés à l'aménagement. Classiquement, cette décision passe par l'estimation de gains futurs maximaux pour un horizon donné : cette estimation est usuellement appelée phase d'optimisation. Elle permet de définir une stratégie, c'est-à-dire une information aidant à la conduite de l'aménagement au fur et mesure du temps et de la réalisation des aléas.

Dans les paragraphes suivants, nous nous attacherons à décrire successivement ces différents composants développés dans le cadre du projet et qui constituent les travaux de la thèse de Baptiste FRANCOIS au sein de RIWER2030.

Trois versions d'utilisation de ce modèle de gestion seront aussi décrites. Ces trois versions correspondent à trois manières différentes de considérer l'avenir durant la phase de définition de la stratégie : avenir certain / avenir incertain / avenir partiellement prévu.

2.3. Demande en eau des usages

La demande en eau des usages (agriculture, eau potable, eau « industrielle » hors énergie, débits satisfaisant les besoins du milieu naturel (débits réservés, débits objectifs en certains points du bassin) vis-à-vis de la retenue de Serre-Ponçon correspond au bilan entre un besoin de prélèvement (et, in fine, une consommation) et une ressource disponible indépendamment des lâchers d'eau depuis l'ouvrage (i.e. la ressource des bassins versants intermédiaires en aval de la retenue).

Les demandes en prélèvement ont été estimées par EDF dans le cadre de la gestion de la chaîne Durance-Verdon (Figure 4 - a). Ces estimations sont disponibles sur la période 1990-2002. Construites à partir des données d'exploitation des aménagements, ces estimations restent sujettes à critiques car elles comportent de nombreuses hypothèses et incertitudes. Dans le cadre du projet RIWER2030, ces données ont été considérées comme la meilleure estimation disponible. Le projet R²D²2050, accepté dans le cadre du programme Gestion des Impacts du Changement Climatique du ministère en charge de l'écologie, devrait préciser ces estimations.

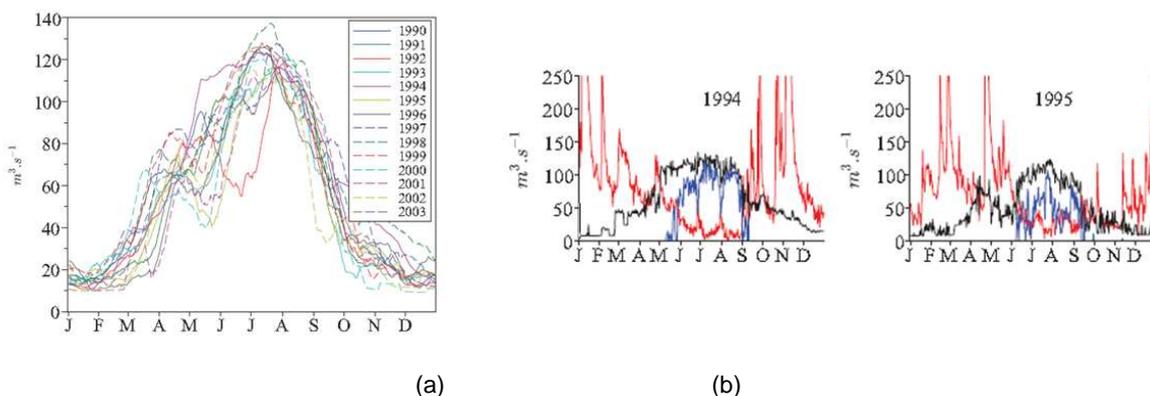


Figure 4 : (a) Estimations des prélèvements des usages sur la période 1990-2003 (b) Illustration du débit de dotation (bleu) comme bilan entre ressource naturelle (rouge) et prélèvement (noir) sur les années 1994 et 1995

A partir de ces données, il a été recherché la construction d'une fonction permettant de mettre en relation la demande de débit à Serre-Ponçon par les usages (appelé « débit de dotation », voir Figure 4 - b) avec le climat. Ce débit de dotation est donc la quantité d'eau appelée par les usages dans la retenue de Serre-Ponçon lorsque la ressource naturelle en aval n'est pas suffisante pour satisfaire les prélèvements des usages. Une série de référence de ces débits de dotation a pu être construite sur la période 1990-2003 ($Q_{dot,Ref}$).

La ressource en eau des bassins versants en aval de la retenue peut être modélisée par extrapolation du modèle hydrologique CEQUEAU à Serre-Ponçon (même jeux de paramètres) dans les contextes hydro climatiques de ces bassins (Figure 5).

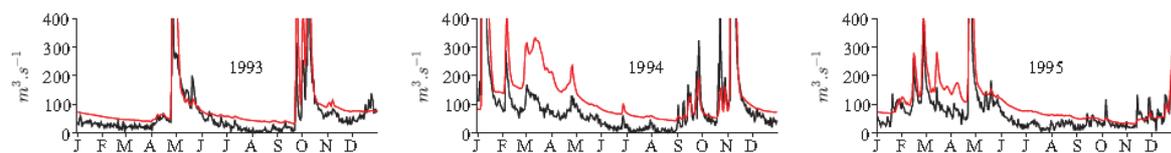


Figure 5 : Estimation de la ressource naturelle en aval de Serre-Ponçon sur les années 1993 à 1995 (observé en noir, modélisé en rouge)

Cette approche est perfectible (estimation supérieure aux reconstitutions EDF disponibles) mais reste la seule approche envisageable en l'absence d'un chantier de modélisation hydrologique spécifique dans le cadre du projet RIWER2030 (sur ce sujet également, le projet R²D²2050 apportera des éléments complémentaires).

Compte-tenu de la forte prégnance de l'irrigation parmi les usages préleveurs, le besoin de prélèvements contient une composante saisonnière marquée. Les autres usages (non agricoles) ont été considérés comme constants : ces prélèvements étant bien moins importants que ceux liés à l'agriculture, il n'est pas apparu utile de chercher à raffiner cette représentation en tenant compte par exemple de la saisonnalité qu'apporte l'activité économique sur le bassin.

Concernant la composante agricole, il a été recherché une relation avec des indicateurs de type humidité des sols et une demande évaporatoire des cultures. La demande évaporatoire est reconstruite à partir de l'évapotranspiration potentielle (ETP) de référence de Hargreaves (Hargreaves et al., 1985) recommandée par la Food and Alimentation Organization (FAO). Cette formulation présente l'intérêt de n'exploiter que la température de l'air (et le rayonnement extraterrestre) qui fait l'objet d'investigation par le projet RIWER2030.

Le besoin en eau des plantes est alors estimé à l'échelle régionale à partir de la définition d'un coefficient régional de culture (K_c). Pour tenir compte de la multiplicité des cultures et des choix d'exploitation des agriculteurs (les itinéraires techniques) du bassin de la Durance, ce coefficient cultural est défini comme une fonction du jour de l'année au travers d'une gaussienne (μ_e , σ_e) et d'un facteur d'échelle K_e .

Le stress hydrique des cultures est identifié à partir des modélisations CEQUEAU déployés sur les bassins versants en aval de Serre-Ponçon et de leur variable interne représentant l'eau dans le réservoir conceptuel à dynamique rapide (dit « réservoir sol »).

Pour cela, il a été défini une hauteur seuil au-dessus de laquelle le besoin en eau de la plante est optimal et en dessous de laquelle la plante s'en écarte. Cette fonction de stress hydrique (SH) est comprise entre 0 (pas de stress) et 1 (aucune évaporation) et varie en opposition avec le ratio entre la hauteur d'eau dans le sol et la hauteur seuil définie.

Le besoin en eau des autres usages est vu comme constant ($Prelev_{min}$). Les droits d'eau limitant la capacité de prélèvement, il convient aussi de définir une limite supérieure aux prélèvements ($Prelev_{max}$).

Le prélèvement à la date t_i s'écrit alors comme suit :

$$Prelev_i = \min (Cste * SH(t) * K_c(Jour) * ETP_{Ref}(t) + Prelev_{min}, Prelev_{max})$$

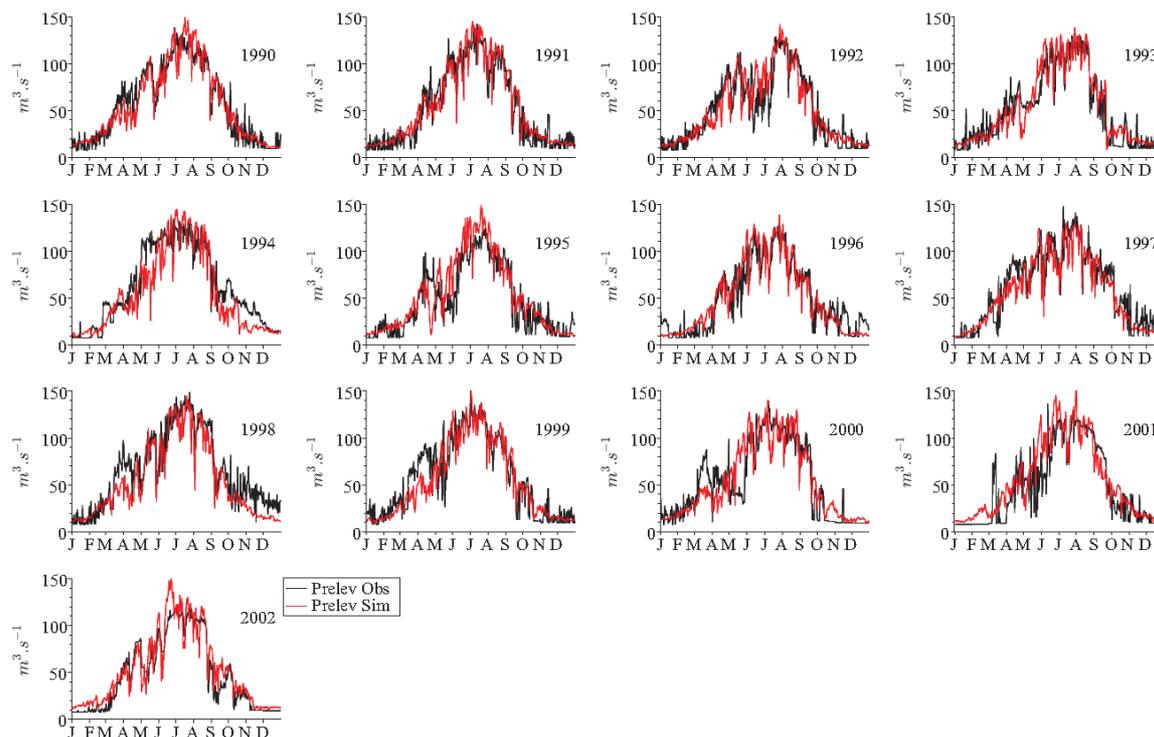


Figure 6 : Prélèvements estimés par EDF (noir) et modélisés (rouge) sur la période 1990-2002

Le débit de dotation ($Qdot_{ti}$) est alors estimé par bilan entre la demande de prélèvement ($Prelev_{ti}$) et la ressource disponible en aval de Serre-Ponçon ($QBVI_{ti}$). Pour corriger le biais d'estimation de la ressource en aval de Serre-Ponçon, il est introduit un coefficient k qui sera optimisé pour minimiser l'erreur avec le $Qdot_{Ref}$ estimé par ailleurs.

Le débit de dotation peut alors s'écrire comme suit :

$$Qdot_{ti} = \max(Prelev_{ti} - k * QBVI_{ti}, 0)$$

Au final, il est possible d'obtenir des chroniques de débit de dotation (Figure 7) qui semblent assez cohérentes avec celles estimées à partir des données EDF (prélèvement et apports des bassins versants intermédiaires).

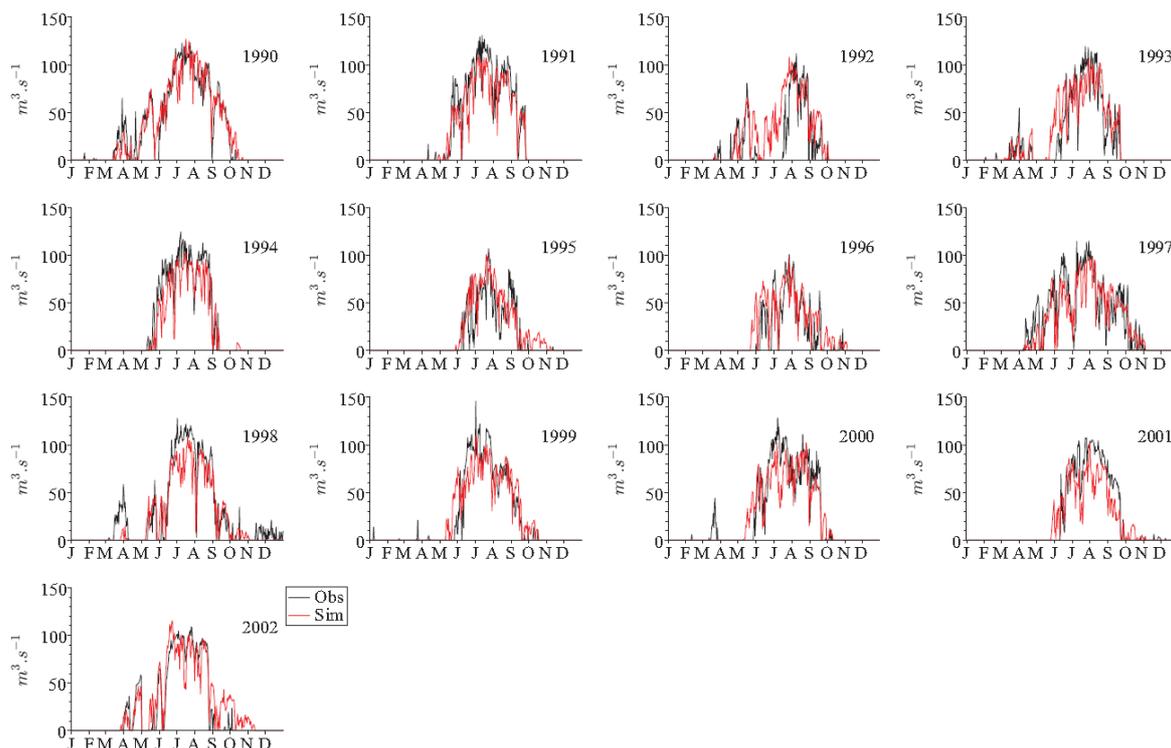


Figure 7 : Débits de dotation estimés à partir des données EDF (noir) et modélisés (rouge) sur la période 1990 à 2002

2.4. Intérêt énergétique

L'exercice d'équilibre offre/demande sur le réseau d'électricité est un exercice complexe puisqu'il consiste à tenir compte des consommations et de leur dynamique pour proposer des programmes de production d'électricité à partir d'un parc de centrales par nature très diversifiées que ce soit par leur manœuvrabilité mais aussi par le coût unitaire du MW produit.

En effet, l'organisation du système de production électrique repose sur plusieurs types de moyens de production (le mix énergétique) qui ont chacun des caractéristiques techniques et économiques propres amenant leur gestionnaire à les utiliser de façon spécifique (en termes de durée de fonctionnement, de capacité à répondre rapidement à une demande et du coût d'utilisation). Le gestionnaire « empile » donc les moyens de production à sa disposition pour répondre à la demande, en commençant par ceux dont le coût d'utilisation est le plus bas : le coût d'utilisation du dernier moyen sollicité (ou encore coût de production d'un MW supplémentaire) est le coût marginal de production. Au premier ordre, ce coût marginal peut être considéré comme une fonction monotone de la consommation.

Dans le mix de production d'électricité, l'hydraulique tient une place particulière : elle est à la fois peu chère (ressource « gratuite ») et très souple d'utilisation (la chaîne Durance peut mettre à disposition sur le réseau l'équivalent d'une tranche nucléaire en quelques minutes). Elle présente par contre une limite en termes de capacité puisque dépendante de l'hydrométéorologie et donc des volumes d'eau mobilisables.

Le recours à l'énergie hydroélectrique est le fruit de l'optimisation entre la capacité immédiate à fournir un besoin (mais en quantité limitée) et son utilisation aux moments économiquement les plus opportuns pour le gestionnaire. Ces moments correspondent aux périodes où le prix de l'électricité sur le marché est plus élevé mais aussi ceux où l'on souhaite pouvoir éviter de recourir à des moyens de production plus « chers » et plus contraints au plan environnemental (ceux recourant aux ressources fossiles notamment).

Les données publiques de la consommation France (source RTE) de la période 1996-2003 permettent d'illustrer la relation de la consommation journalière à la température de l'air moyenne de la France. Elles permettent notamment d'identifier un gradient de consommation quand la température passe sous le seuil de 15°C (thermo sensibilité de la consommation qui s'explique par le cas particulier de la

situation française en termes d'utilisation de l'électricité pour le besoin de chauffage). Par ailleurs, on constate que la consommation est aussi dépendante du jour de la semaine et plus précisément de l'activité économique. Enfin, la courbe de charge à l'intérieur d'une journée présente un caractère cyclique marquant à la fois la dimension économique mais aussi des habitudes de consommations domestiques. L'intérêt à recourir à l'énergie hydroélectrique est donc le fruit de ces différents composants :

- Un niveau journalier dépendant de la température de l'air et du jour calendaire (trois classes > semaine / samedi / dimanche & jour férié)
- Une discrétisation en postes dit horaires de la consommation en infra journalier. Trois postes horaires sont apparus suffisant (blocs de 8 heures). Les anomalies par rapport au niveau moyen journalier de consommation sont générées à partir des données historiques tenant compte du jour calendaire considéré.

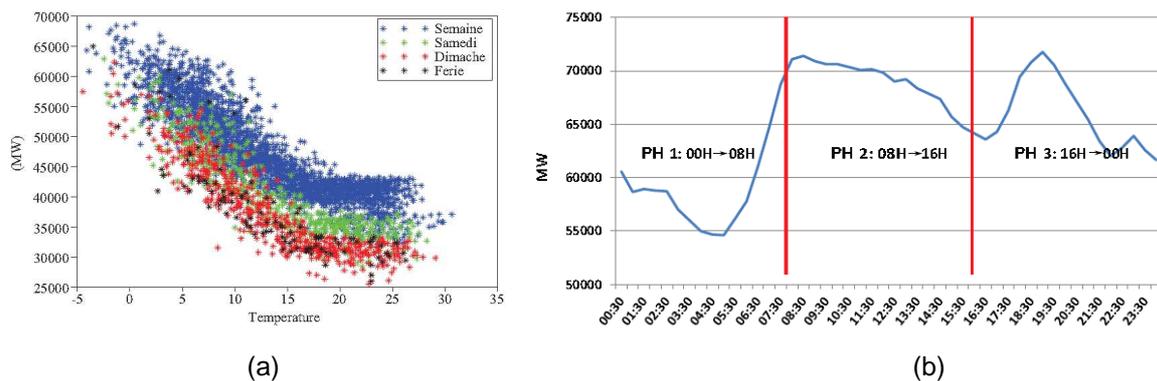


Figure 8 : Dépendance de la consommation à la température de l'air (a) et illustration d'une courbe de charge infra-journalière (b).

En complément, il faut avoir à l'esprit la situation électrique particulière de la région PACA. Véritable péninsule électrique, elle consomme plus d'électricité qu'elle n'en produit et dispose d'un réseau d'alimentation assez fragile qui peut rendre difficile l'exercice d'équilibre via les échanges avec le réseau national. De ce fait, la chaîne Durance-Verdon peut être amenée à jouer localement ce rôle d'équilibre. Cette participation spécifique de la chaîne Durance-Verdon, très complexe à modéliser, n'est pas prise en compte dans notre exercice.

Au final (Figure 9), sur la période 1996-2003, le modèle proposé permet d'avoir une représentation assez bonne de la consommation (Nash de 0.87 en journalier). C'est cette modélisation qui sera utilisée pour produire un vecteur d'intérêt pour l'optimisation du placement de l'énergie hydraulique. Cette hypothèse est sans doute très simpliste mais permet (Dupeyrat et al., 2008; Hendrickx and Sauquet, 2012), avec l'usage de la programmation dynamique, un placement de l'eau dans le temps assez réaliste.

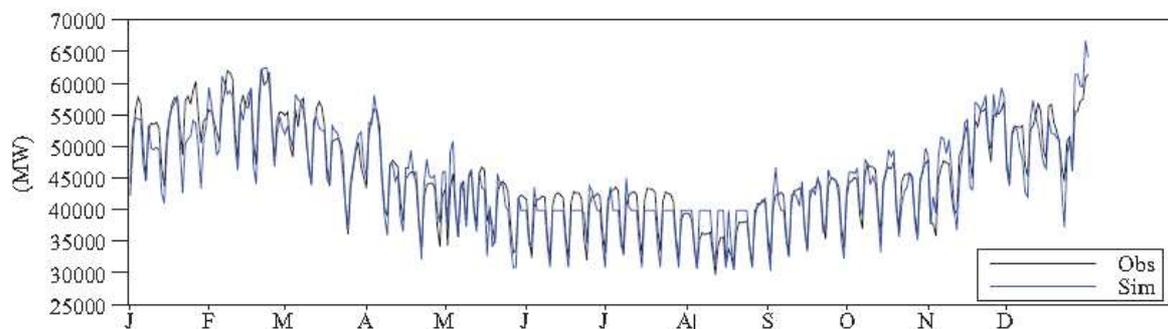


Figure 9 : Consommation journalière observée (noir) et simulée (bleu)

2.5. Optimisation / Simulation sous contrainte

La gestion d'une retenue consiste à dériver et restituer de l'eau à différentes périodes de l'année de

façon à satisfaire au mieux - donc optimiser - différents usages comme l'irrigation, l'hydroélectricité, la fourniture d'eau domestique ou industrielle, la sauvegarde des milieux aquatiques. Pour réaliser cela, il est mis à profit la possibilité de stocker ou déstocker de l'eau dans la retenue en agissant sur le débit sortant (turbiné, déversé). Cette gestion s'effectue sous différentes contraintes et règlements. Le résultat de cette gestion est au final la trajectoire temporelle suivie par la réserve.

La gestion de la retenue de Serre-Ponçon consiste donc à définir une séquence de décisions sur le débit sortant visant, en respectant les contraintes, à satisfaire les objectifs par ordre de priorité que sont la fourniture du débit de dotation, et la valorisation énergétique de l'eau. Avec le temps, on note que la question de la cote de la retenue en période estivale est apparue, pour le gestionnaire, comme une nouvelle contrainte de gestion. L'objectif que se donne le gestionnaire depuis 1999 est celui de l'atteinte de la cote de 778 m NGF (soit 972.9 Mm³), au premier juillet, ceci 9 années sur 10. En complément, durant la période estivale (juillet-août), il cherche à ne pas descendre au-dessous de 774 m NGF (soit 866.4 Mm³).

Le manque de « visibilité hydrologique » sur les apports entrants, mais aussi sur la demande, oblige le gestionnaire à se confronter à la prise de décision dans un contexte fortement incertain. Aussi la séquence de décisions doit se construire face à plusieurs avenir possibles.

En avenir certain, c'est-à-dire dans le cas irréaliste où l'ensemble des aléas pesant sur la gestion future du système seraient parfaitement connues, la programmation dynamique (Bellman, 1957) constitue un algorithme performant pour résoudre la question de la gestion. Elle suppose toutefois de respecter l'hypothèse de Bellman, à savoir que les décisions optimales pour le futur ne dépendent pas des décisions passées ce qui, dans le cas de notre modélisation de la gestion de Serre-Ponçon, peut être considéré comme vrai. La programmation dynamique en avenir certain peut se décomposer en une phase d'optimisation qui permet de définir une stratégie et une phase de simulation qui réalise la gestion. L'optimisation se construit pour un horizon donné (en général 2 ans pour des gestions annuelles des réservoirs), et en remontant le temps depuis cet horizon. La stratégie est alors résumée par la grille des valeurs de Bellman sur une discrétisation choisie du stock d'eau dans la réserve et une discrétisation temporelle (journalière pour être en phase avec la donnée hydrologique). Les valeurs de Bellman correspondent aux gains maximaux que l'on peut espérer jusqu'à l'horizon que l'on s'est donné. Leurs dérivées par rapport au stock donnent la valeur de l'eau (gain futur que procure 1m³ d'eau si on le garde). Dans la phase de simulation, cette grille permet un arbitrage entre le gain immédiat (satisfaction des objectifs à l'instant t) et le gain futur porté par la grille des valeurs de l'eau. Elle permet donc de définir dans le temps l'ensemble de la séquence de décisions optimale vis-à-vis des objectifs assignés à l'aménagement.

En avenir incertain, il est possible d'étendre simplement les notions exposées en avenir certain : la stratégie doit permettre une maximisation de l'espérance de gain sur l'ensemble des futurs possibles. Dans le cas de Serre-Ponçon, l'aléa est porté par les apports à la retenue, par la demande de débit de dotation et par l'intérêt énergétique. Les chaînes de modélisation mise en place dans le projet RIWER2030 permettent à partir des modèles de circulations générales (GCM) de produire de nombreux scénarios continus et cohérents (même forçage climatique) sur ces trois dimensions. A partir de N scénarios, (Goussebaille et al., 1986) ont proposé d'estimer la stratégie à partir de la moyenne de N stratégies (i.e. grille des valeurs de Bellman), chacune étant obtenues par optimisation en avenir certain sur chacun des scénarios. Cette solution ne donne pas exactement les décisions et les trajectoires optimales. Néanmoins, les comparaisons de cette approche par scénario vis-à-vis d'une programmation dynamique complète en avenir incertain ne mettent pas en évidence de différences significatives.

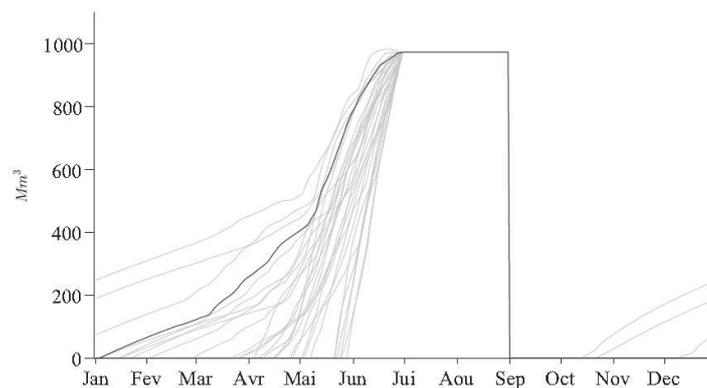


Figure 10 : Courbe de remontée avec une probabilité d'atteinte de 9 années sur 10 (trait gras) et courbe de remontée pour chaque scénario (traits fin)

Pour tenir compte de l'objectif d'EDF de tenir une cote touristique, il est introduit une contrainte de remontée de cote avant la période estivale. Cette contrainte est évaluée à partir des N scénarios d'apport qui permettent de définir N courbes de remontée. L'objectif de tenue de cette cote au premier juillet est fixé aujourd'hui à 9 années sur 10 : la courbe de remontée finale est alors définie par la courbe enveloppe des valeurs de stock journalier qui ne sont pas dépassées chaque jour par $9 \times N/10$ des scénarios de remontée (Figure 10). Cette contrainte sera introduite dans les phases d'optimisation et de simulation.

2.6. Modèles AC / AIC / AIP

Le modèle de gestion a pour vocation de pouvoir simuler une gestion sur P années consécutives.

La simulation d'une trajectoire de réserve dans un contexte hydro-climatique donné nécessite la définition d'une stratégie. Cette stratégie peut se construire par un algorithme de programmation dynamique mais nécessite une modélisation de l'aléa sur trois dimensions : apports à la retenue, débit de dotation et intérêt énergétique.

Trois approches ont été retenues :

- AC : Avenir Certain > cas d'un gestionnaire qui connaîtrait parfaitement l'avenir
- AIC : Avenir Incertain Climatologique > cas d'un gestionnaire qui connaîtrait une climatologie de l'aléa pesant sur sa gestion
- AIP : Avenir Incertain Prévu > cas d'un gestionnaire qui dispose d'un service de prévision saisonnière des apports et donc de la possibilité de réduire la dispersion de l'aléa vis-à-vis de l'aléa climatologique.

Ces trois approches correspondent à trois manières différentes de déterminer la stratégie selon trois capacités différentes du gestionnaire à se projeter sur l'horizon de calcul de sa stratégie (>2 ans).

L'approche AC correspond à une situation utopique. Elle présente l'intérêt de définir la trajectoire optimale tenant compte des objectifs, des contraintes et des limites physiques de la retenue dans un contexte hydro-climatique donné. Dans cette approche, l'aléa est en fait parfaitement connu et déterminé. Il est la seule succession des P années consécutives et l'horizon est de P années. L'optimisation et la simulation sont alors réalisées sur cette seule chronologie.

L'approche AIC correspond à la situation d'un gestionnaire qui valorise une connaissance historique des différents aléas. Cette connaissance peut alors être définie par un ensemble de N scénarios d'aléa. La cohérence entre apport, débit de dotation et intérêt énergétique est assuré par le forçage climatique commun que produit le couple GCM / MDES. L'optimisation est alors réalisée sur ces N scénarios et pour un horizon de 2 ans. La stratégie de l'année 1 de cette optimisation définit alors une stratégie utilisable en simulation pour les P années à simuler.

L'approche AIP correspond à une situation intermédiaire. Le gestionnaire dispose de nouveau d'une connaissance historique des différents aléas météorologiques sur le bassin (précipitation, température). En revanche, le système hydrologique comporte des composantes qui informent sur l'écoulement à moyen terme (quelques mois). Ainsi, une connaissance du stock neigeux est

aujourd'hui valorisée pour anticiper l'amplitude de l'onde de fonte quelques mois en avance. Cette anticipation permet notamment au gestionnaire EDF sur la retenue de Serre-Ponçon de mieux piloter le déstockage hivernal ainsi que la remontée pour tenir la cote estivale. Dans l'approche AIP, il est donc proposé de construire N scénarios pour l'optimisation (à l'instar de l'approche AIC), ces scénarios étant le fruit d'une prévision hydrologique qui tient compte de l'état initial du bassin, la météorologie à venir étant elle incertaine. La procédure de l'approche AIP est renouvelée chaque début de mois : on définit N prévisions hydrologiques tenant compte de l'état initial du bassin qui viennent nourrir les scénarios d'aléa de l'optimisation (Figure 11). L'optimisation est réalisée sur un horizon de 2 ans puis la simulation sur un mois. Au mois suivant, on réitère la mise à jour de la prévision et de la stratégie pour le mois suivant tenant compte du nouvel état initial du bassin, et ainsi de suite. Cette approche est celle qui est la plus proche de la gestion opérationnelle actuelle de la retenue de Serre-Ponçon.

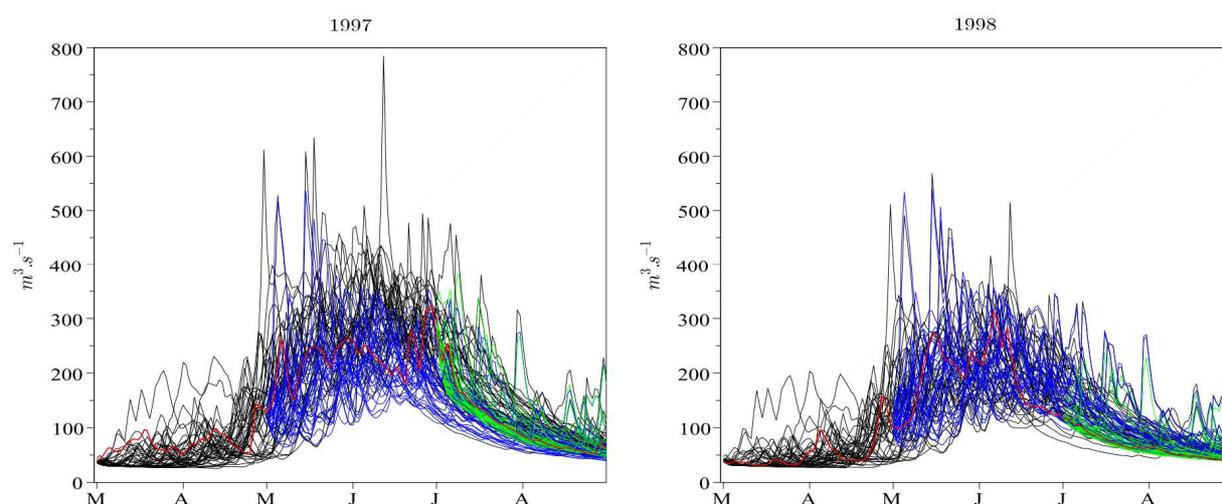


Figure 11 : Illustration de la prévision hydrologique à moyen terme initiée au premier des mois de mars (trajectoires noires), mai (trajectoires bleues) et juin (trajectoires vertes) des années 1997 et 1998

Les trajectoires de réserve obtenues avec ces différentes approches peuvent être comparées aux trajectoires observées de la retenue de Serre-Ponçon. Le graphique suivant (Figure 12) illustre ainsi cette comparaison sur la période 1996-2003. Les trois approches produisent des simulations assez semblables notamment sur la période printemps été. Les trajectoires suivies par contre en hiver se distinguent assez nettement : l'approche AC conduit aux plus grands déstockages hivernaux lorsque l'onde de fonte à venir est importante (1999, 2003). A l'inverse, le déstockage est moindre les années où le volume de fonte est faible (2002). L'approche AIC conduit par opposition à des déstockages plus stables entre les années. Aussi les années avec beaucoup de fonte, l'approche AIC déstocke moins que l'approche AC. Lors des années avec faible fonte, l'approche AIC peut conduire à un déstockage plus grand que l'approche AC. L'approche AIP est dans l'ensemble intermédiaire aux deux approches précédentes. Toutefois, on note un comportement particulier de l'approche AIP sur les années 1999 et 2002, où les trajectoires de réserves sont nettement au-dessus des deux autres approches.

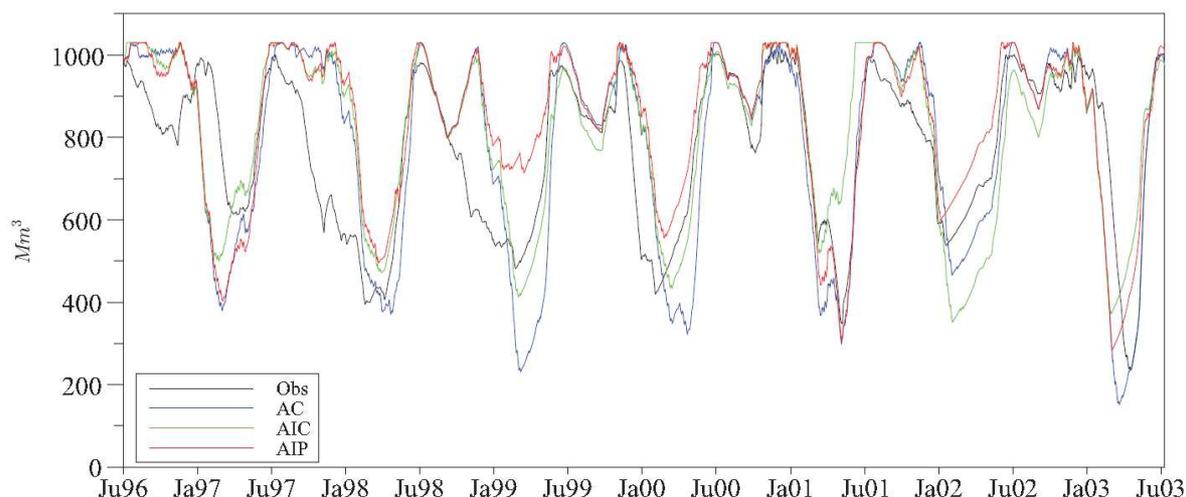


Figure 12 : Trajectoire observée (noir) et simulée (bleu / vert / rouge) de la retenue de Serre-Ponçon

Vis-à-vis de la trajectoire observée de la retenue de Serre-Ponçon, il faut tout d'abord noter que l'objectif de tenue d'une cote minimale en période estivale n'est conventionné avec le SMADESEP que depuis 1999 (ceci explique sans doute pour partie les grands écarts des étés 1997 et 1998). Si on concentre la comparaison sur les années 1999-2003 (ce qui est peu ... mais ce sont les seules années où les règles de gestion sont comparables), les approches AIC et AIP apparaissent assez cohérentes avec les observations, l'approche AIP étant sans doute meilleure que l'approche AIC.

Vu l'ensemble des simplifications pour arriver à ce modèle de gestion,

- Apports à la retenue modélisés et non observés
- Périmètre de gestion très réduit dans lequel on ignore la complémentarité de l'axe Verdon dans la gestion de la chaîne Durance-Verdon
- Représentation très grossière de la ressource naturelle en aval de Serre-Ponçon vis-à-vis des usages
- Représentation très macroscopique des usages avec une focalisation sur l'usage agricole
- Intérêt énergétique exprimé uniquement par une modélisation de la consommation nationale. On ignore ainsi les contraintes réseaux spécifiques à la région PACA (capacité d'échange limitée avec le réseau national) et qui confèrent à la chaîne Durance-Verdon un rôle d'équilibre à l'échelle locale.

le résultat final de simulation apparaît honorable et en tout cas suffisant pour mener à bien les objectifs du projet RIWER2030.

Dans une utilisation sur le siècle à venir cette représentation du complexe ressource-usage-gestion n'est sensible qu'aux facteurs climatiques. Aucune évolution sur les utilisations de l'eau, sur l'utilisation de l'électricité, sur les règles du partage sous l'égide de nouvelle loi ou directive n'est considérée, ce qui représente sans doute la plus grosse limite de ce modèle. On peut toutefois noter que le projet R²D²2050 devrait compléter le projet RIWER2030 sur tous ces points non traités ici.

L'utilisation de ce modèle de gestion en contexte de climat modifié ouvre la question de la mesure de l'impact. Pour ce faire, différents indicateurs sont apparus pertinents pour essayer de visualiser et quantifier les effets du climat sur la gestion de la ressource en eau et la tenue des objectifs assignés au système. Il est apparu important de disposer à la fois d'indicateur qualitatifs et d'indicateurs quantitatifs.

Les indicateurs qualitatifs sont essentiellement graphiques. La trajectoire de la réserve journalière en moyenne interannuelle (ou signature de stock) permet par exemple de traduire le cycle annuel (stockage/déstockage) de la gestion (Figure 13). Les valeurs marginales de l'eau stockée (valeurs issues de la phase de détermination de la stratégie du gestionnaire) permettent d'identifier l'adéquation temporelle entre la demande en eau des usages (y compris énergétique) et la disponibilité de la ressource en eau naturelle : plus la demande est décalée de la période

d'abondance des écoulements, plus les valeurs marginales tendront à prendre des valeurs fortes (Figure 14).

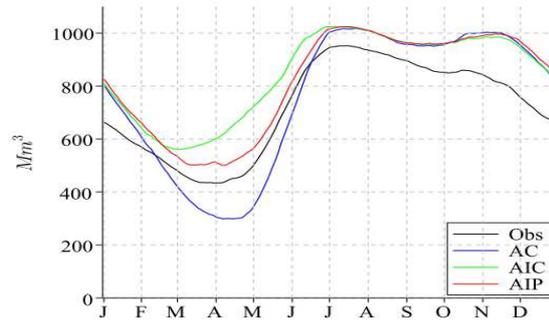


Figure 13 : Signature de stock selon les trois approches de modélisation

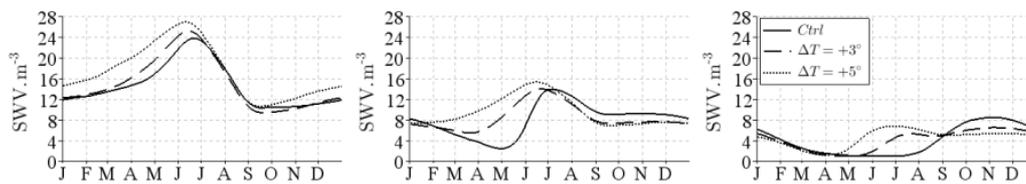


Figure 14 : Sensibilité des moyennes interannuelles des valeurs de l'eau au réchauffement du climat pour trois niveaux de remplissage (10% à gauche, 50% au milieu, 90% à droite)

Pour compléter cette vision qualitative, des indicateurs quantifiés ont été définis. La simulation du système de gestion permet d'avoir accès à un équivalent du revenu du gestionnaire pour la production énergétique. Ce « revenu » est obtenu par le produit entre les turbinés par l'ouvrage de Serre Ponçon et l'intérêt énergétique. Un autre élément qui peut intéresser le gestionnaire est la quantité d'eau déversée par l'ouvrage, car il traduit un volume non valorisé pour le système électrique, mais aussi pour les usages dans le sens où ce déversement n'est pas en lien avec une demande en eau. Enfin, des critères de fiabilité, de résilience et de vulnérabilité ont été mis en place vis à vis des objectifs assignés à l'ouvrage de servir une demande en eau et une cote touristique en période estivale. Ces critères sont basés sur une analyse statistique des défaillances de la gestion vis-à-vis de l'un ou l'autre des objectifs. La fiabilité est définie au sens de (Hashimoto et al., 1982). La résilience et la vulnérabilité ont été définies à la fois au sens de Hashimoto et al. (1982) mais aussi au sens de (Moy et al., 1986). Chacune de ces estimations présente en effet des avantages et des défauts : l'estimation au sens d'Hashimoto est plus robuste à la question de l'échantillonnage, tandis que l'estimation au sens de Moy semble moins sensible aux petits épisodes de défaillance.

Tableau 1 : Estimations des critères de performance des modèles AC, AIC et AIP (dans l'ordre : « revenu énergétique » / Volume déversé (Mm3) / Fiabilité (%) / Vulnérabilité Hashimoto (%) / Vulnérabilité Moy (%) / Résilience Hashimoto (%) / Résilience Moy (%) / Moyenne des valeurs de l'eau)

Modèles	G_{HEP}	V_{Dev}	Fia	Vul_H	Vul_M	Res_H	Res_M	\mathcal{M}_{SWV}
AC	3.64	137	84.7	71.3	191.6	0.057	0.025	123893
AIP	3.55	578	83.6	75.3	193.8	0.052	0.021	134455
AIC	3.53	1757	83.4	80.7	222.9	0.052	0.017	225079

Pour plus de détail sur cette modélisation de la gestion et ces indicateurs de performances, on pourra se reporter au mémoire de thèse de Baptiste François (François, 2013).

3. Régionalisation du climat

Estimer l'impact hydrologique du changement climatique nécessite des scénarios météorologiques adaptés aux échelles d'espace et de temps des régions, des bassins versants et des systèmes hydrologiques que l'on souhaite considérer.

Les Modèles Climatiques Régionaux (MCR ou RCM en anglais) sont des outils prometteurs pour dériver de tels scénarios sur la base des sorties des Modèles de Climat Globaux (MCG, ou GCM en anglais). Ils sont cependant des représentations imparfaites de la réalité. Les erreurs systématiques obtenues pour la période de contrôle entre les champs observés et les champs simulés de différentes variables atmosphériques peuvent par suite être importantes, ce qui empêche l'utilisation directe de leur sorties pour les climats futurs (e.g. (Maraun et al., 2010)).

Les techniques d'adaptation des sorties des modèles climatiques, qui ont conduit à toute une variété de Modèles de Descente d'Echelle Statistique (MDES), se basent sur les relations d'échelle existant entre situation atmosphérique aux échelles synoptiques et variables météorologiques locales. Elles permettent de régionaliser les scénarios climatiques futurs, en produisant des scénarios météorologiques non biaisés, adaptés de surcroît aux échelles spatiales et temporelles des hydrosystèmes étudiés (e.g. hydrologiques, glacio-hydrologiques...). Elles offrent une alternative intéressante aux MCRs (e.g. (Hingray et al., 2013, 2009; Maraun et al., 2010)).

Malgré l'intérêt toujours plus grand qui leur est porté, l'exploration de leur potentiel et de leurs limites en est encore à ses débuts. Les activités de recherche que nous avons développées pendant RIWER2030 visent à répondre à certaines des questions associées à ces méthodes et à identifier les bases d'un MDES permettant de répondre aux principales exigences des modèles d'impact et des modèles hydrologiques en particulier.

Les travaux que nous avons menés dans le cadre du projet RIWER2030 ont en particulier contribué à explorer les questions suivantes :

- Existe-t-il une **stratégie optimale** de descente d'échelle ?
- Est-il possible de trouver des **variables explicatives et des liens d'échelle** permettant de produire des scénarios pertinents pour les variables météorologiques considérées aux échelles requises par les hydrosystèmes visés ?
- Quelle est la **transférabilité temporelle** des MDES ou, en d'autres termes, quelle est la possibilité d'utiliser une relation d'échelle identifiée pour le climat actuel dans un contexte climatique différent ?

Dans la suite, nous présentons d'abord les différents modèles développés et testés dans le cadre du projet pour la modélisation du lien d'échelle. Nous présentons ensuite le cadre d'évaluation multicritères que nous avons mis en place pour évaluer et comparer ces différentes stratégies de descente d'échelle.

3.1. Modélisation du lien d'échelle : stratégies et prédicteurs

Quelques stratégies de descente d'échelle

Différentes stratégies de descente d'échelle ont été développées au cours des décennies récentes. Pour une description de celles-ci, on pourra consulter les nombreuses revues récentes à ce sujet (Fowler et al., 2007; Hingray et al., 2013; Maraun et al., 2010) et pour une revue en Français (Hingray et al., 2009, chap. 12). Parmi les stratégies qui nous semblent particulièrement intéressantes, on peut distinguer **3 types d'approches**. Elles permettent toutes la génération de chroniques de différentes variables météorologiques de surface pour la région visée. La génération est généralement effectuée au pas de temps journalier. Pour chaque jour de l'expérience climatique produite avec un modèle climatique donné, le MDES propose un scénario météorologique local sur la base des valeurs obtenues en sortie du modèle climatique par différentes variables atmosphériques de grande échelle pour ce jour particulier. Les 3 types d'approches se distinguent par la façon dont ce scénario météorologique local est produit. On distingue :

- approches **analogiques**, où la génération d'un scénario météorologique pour le jour futur considéré se base sur l'identification - dans une archive observée - de plusieurs situations

atmosphériques analogues. La méthode dite des analogues consiste à retenir pour scénario l'analogue le plus proche ; la méthode des k-plus proches voisins consiste à choisir de façon aléatoire ou dirigée l'un des k- plus proches analogues à la situation atmosphérique cible (dans la pratique les deux méthodes sont en fait appelées « méthodes des analogues »)

- approches **conditionnées au type de temps** : la génération d'un scénario nécessite l'identification du type de temps auquel le jour futur appartient. Un nombre discret de types de temps a à cet effet été préalablement identifié sur la base d'une classification des différentes journées de l'historique vis-à-vis des valeurs prises par certaines variables de grande échelle. Le scénario est choisi de façon aléatoire ou dirigée parmi les différentes journées appartenant à ce type de temps.
- approches de type **fonction de transfert** : la génération d'un scénario est réalisée à l'aide de fonctions de transfert liant les variables locales à un jeu d'indices synthétiques permettant de caractériser la situation atmosphérique du jour (e.g. composantes du vent géostrophique à certains niveaux de pression, flux d'humidité). Pour les fonctions de transfert de type régressions multiples, il est possible d'obtenir un scénario de la variable d'intérêt en tirant au hasard un résidu dans la distribution statistique des résidus correspondant à la fonction de transfert considérée pour le jour courant.

MDES considérés dans le projet RIWER2030

Nous avons considéré ici différentes versions de 3 MDES (analog, dsclim, d2gen). Ces MDES ont été développés ou adaptés dans le cadre du projet ainsi que de la thèse de Matthieu Lafaysse réalisée en synergie avec le projet (Lafaysse, 2011). Ces MDES ont été développés pour la génération de scénarios de précipitations en premier lieu. Elles ont toute une composante de ré-échantillonnage analogique pour identifier dans l'historique une journée analogue qui sera utilisée comme scénario. Deux de ces MDES incluent en plus certains principes de 2 autres approches mentionnées ci-dessus. Les principes des différents MDES sont les suivants :

- **analog**, MDES analogique développé par EDF sur la base de collaborations antérieures avec d'autres chercheurs du LTHE (Obled et al. 2004). Les méthodes de type analogue se différencient par les variables de grande échelle retenues pour l'analogie (domaine spatial, niveaux, type de variable) et par la distance utilisée pour mesurer l'analogie entre 2 journées. Différentes distances d'analogie ainsi que différents jeux de prédicteurs ont été considérés dans ce projet. L'analogie est recherchée sur les variables dynamiques de circulation de l'atmosphère à différents niveaux de pression (1000hPa, 700hPa) pour 2 échéances temporelles (0 et 24h00). La journée analogue retenue comme scénario pour un jour cible donné résulte du tirage aléatoire d'un jour de l'historique parmi les jours analogues les plus proches du jour cible (50 ici).
- **dsclim**, MDES analogique développé au CERFACS en particulier lors de la thèse de J. Boé (2007) et adapté pour le projet RIWER2030 par Matthieu Lafaysse (2011). La méthode est basée sur une classification préalable des circulations atmosphériques en types de temps. La sélection de l'analogue dans l'historique est conditionné à (1) l'appartenance à un même type de temps du jour cible et du jour analogue et (2) à la proximité du jour analogue au jour cible en terme d'indices de précipitations et éventuellement d'autres variables, les premiers étant dérivés, pour chaque jour de la période considérée, sur la base des distances (e.g. en terme de circulation atmosphérique, pression de surface) entre le jour en question et les centroïdes des différents types de temps. La journée analogue retenue comme scénario résulte du tirage aléatoire d'un jour parmi les analogues les plus proches appartenant au même type de temps.
- **d2gen**, MDES développé à l'EPFL lors de la thèse d'Abdelkader Mezghani (2009) puis au LTHE dans le cadre du projet RIWER2030. d2gen est aussi une méthode analogique dirigée. La sélection de l'analogue est conditionné à des indices régionaux de précipitations et températures, dérivés, pour chaque jour de la période considérée, sur la base d'indices atmosphériques (e.g. composantes méridiennes et zonales des vents géostrophiques, humidité de la masse d'air) à l'aide 1) de fonction de transferts (Modèles Linéaires Généralisés) et 2) d'un modèle stochastique permettant de générer un scénario de résidus pour chaque jour. La journée analogue retenue comme scénario est la journée analogue la plus proche sur la base de ces indices régionaux. Un facteur d'inflation est appliqué aux

valeurs de précipitation et de température observées pour le jour analogue de façon à ce que les valeurs moyennes régionales du scénario ainsi produit correspondent aux valeurs des indices générés à l'étape précédente avec les fonctions de transfert.

Pour les 3 méthodes, une contrainte calendaire est imposée sur les jours ré-échantillonnés : le jour analogue est choisi dans la même saison que le jour cible pour dsclim, dans une fenêtre calendaire glissante centrée sur le jour cible de +/-60 jours pour analog, +/-30 jours pour d2gen, +/- 10 jours pour DSCLIM. Cette contrainte est particulièrement nécessaire pour autoriser le rééchantillonnage d'autres variables atmosphériques que les précipitations, en particulier celles ayant une saisonnalité très marquée, par exemple la température ou les rayonnements solaire et atmosphérique incidents.

Variables explicatives

Diverses versions de ces 3 MDES, basées sur différents jeux de prédicteurs et/ou distance d'analogie, ont été testées et comparées au cours du projet RIWER2030. Ont été testées en particulier : la nature des prédicteurs (niveaux des prédicteurs dans analog ; prédicteurs dynamiques / thermodynamiques dans dsclim et d2gen), l'extension des domaines sur lesquels ces prédicteurs sont définis (e.g. fenêtre spatiale utilisée pour la classification en types de temps dans dsclim, domaine utilisé pour calculer les composantes méridiennes / zonales des vents géostrophiques dans d2gen) ; la distance d'analogie (e.g. euclidienne ou Teweless Wobus pour analog).

Pour d2gen par exemple, ces tests ont été effectués pour la prédiction de plusieurs variables météorologiques de surface (occurrence des précipitations, hauteurs précipitées, température de surface) à l'échelle locale (40*40km). Différentes analyses statistiques ont été réalisées pour estimer le pouvoir explicatif d'un panel d'indices de circulation atmosphérique (e.g. composantes zonales et méridiennes des flux géostrophiques, tourbillon potentiel, baroclinité, résultante du flux d'air, résultante du flux d'air projetée sur le relief) et de l'état de l'atmosphère (e.g. humidité relative ou spécifique, eau précipitable, flux d'humidité relative, spécifique). Une description détaillée de ces analyses fait l'objet d'une publication (Mezghani et al., submitted).

Il ressort en particulier de cette étude, réalisée pour l'ensemble du territoire français métropolitain, les conclusions suivantes :

- Le lien d'échelle est d'autant meilleur que les précipitations à estimer sont agrégées dans l'espace. Il présente une forte homogénéité spatiale, rassurant ainsi sur sa robustesse.
- La performance du lien d'échelle MDES et les variables explicatives optimales varient suivant la région. A titre d'exemple, les variables explicatives les plus importantes pour l'occurrence et la hauteur des précipitations sont, en tout point du territoire, d'abord l'humidité relative puis le vent zonal à 700hPa. Le vent méridien est une variable explicative déterminante pour le sud-Est de la France (Figure 15). Ceci illustre l'intérêt de développer un MDES de façon spécifique pour la région d'étude visée.

Le lecteur pourra se référer à la thèse de Matthieu Lafaysse pour une description détaillée d'analyses similaires faites avec dsclim.

Le lecteur pourra se référer à l'annexe A1 pour des compléments d'analyse sur la méthode analog.

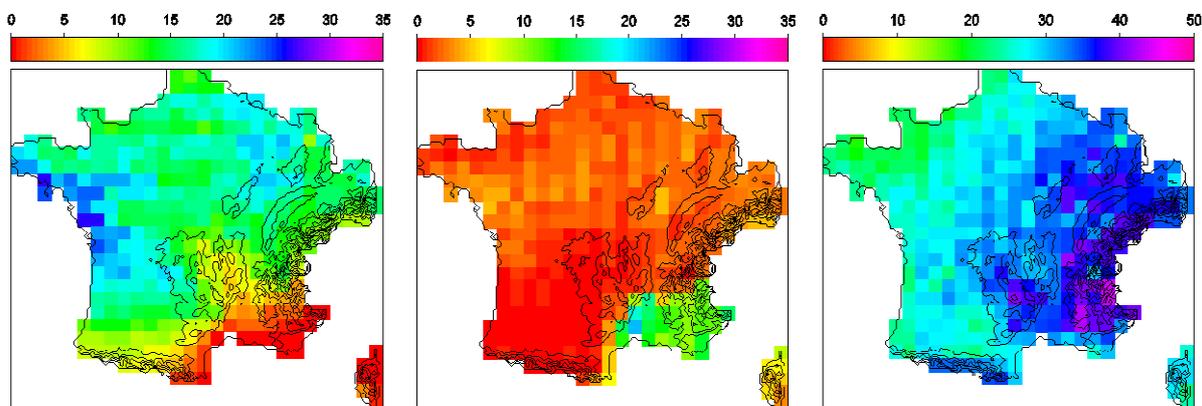


Figure 15. Pouvoir explicatif (Coefficient de détermination R^2 en %) de différents prédicteurs atmosphériques pour la prédiction de l'occurrence journalière des lames précipitées sur 40*40km

(France, période 1982 – 2001). Prédicteurs: gauche : vent zonal, centre : vent méridien ; droite : humidité relative de l'air à 700 hPa: (Mezghani et al., submitted).

Les résultats présentés par la suite ne concernent qu'une partie des MDES retenus in fine (cf. Tableau 2). Certains modèles sont basés uniquement sur des prédicteurs dynamiques (analog, dsclim10, d2gen10). Les autres incluent aussi des prédicteurs thermodynamiques comme la température ou les variables d'humidité (dsclim11, dsclim21, d2gen22, d2gen32). Les MDES retenus présentent des performances équivalentes (v. section 3.2).

Tableau 2. Différents MDES considérés dans le projet. (slp : pression réduite au niveau de la mer ; Z850 ; Z700 ; Z500 : altitude du géopotential à 850, 700 ; 500 hPa)

Modèle	Prédicteurs pour - fonction de transfert (d2gen) - classification (dsclim)	Variable d'analogie pour recherche analogue	Distance d'analogie
dsclim10	Classification slp (domaine Boé)	4 indices de précipitation régionale Durance	Euclidienne
dsclim11	Classification slp (domaine Boé)	4 indices de précipitation régionale Durance + indice de température régionale	Euclidienne
dsclim21	Classification Z850 (domaine Méditerranée)	4 indices de précipitation régionale Durance + covariance spatiale de Z500	Euclidienne
analog10		Z700 et Z1000 à 0 h et 24 h	Teweless Wobus
analog20		Z700 et Z1000 à 0 h et 24 h	Teweless Wobus modifié (cf. annexe A2)
d2gen10	MT: ($t_{a700}, t_{a-1,700}, t_{s-1}$) MO: (slp, u_{700}, v_{700}, oc) MA: (slp, u_{700}, v_{700})	Température + précipitation régionale	Euclidienne
d2gen22	MT: ($t_{a700}, t_{a-1,700}, t_{s-1}$) MO: (slp, $u_{700}, v_{700}, oc, r_{700}$) MA: (slp, $u_{700}, v_{700}, q_{700}$)	Température + précipitation régionale	Euclidienne
d2gen32	MT: ($t_{a700}, t_{a-1,700}, t_{s-1}$) MO: (slp, $u_{700}, v_{700}, oc, r_{700}$) MA: (slp, $u_{700}, v_{700}, fq_{700}$)	Température + précipitation régionale	Euclidienne

Pour d2gen : modèles : MT = température ; MO : occurrence des précipitations ; MA : hauteur précipitée ; variables : $t_{a700}, t_{a-1,700}$: température à 700hPa à J et J-1, t_{s-1} : température de surface à J-1; u_{700}, v_{700} : composantes zonales et méridienne du vent géostrophique à 700hPa ; $r_{700}, q_{700}, fq_{700}$; humidité relative, spécifique et flux d'humidité à 700hPa)

Génération de scénarios multivariés

Les MDES ont été développés et calibrés pour la génération de scénarios de précipitations à l'échelle globale du bassin supérieur de la Durance. Cependant, leur composante analogique permet la génération de scénarios multivariés à haute résolution spatiale et temporelle.

Le résultat de chaque MDES est, pour chaque jour de la période de simulation, un ensemble de dates analogues dont l'une d'entre elles est sélectionnée comme scénario pluviométrique pour le jour courant. Le jour analogue retenu est en fait aussi utilisé comme scénario météorologique pour l'ensemble des variables météorologiques disponibles sur le bassin versant. Deux bases de données météorologiques ont été utilisées ici :

- la réanalyse SPAZM d'EDF qui comporte au pas de temps journalier et sur une grille kilométrique des estimations de précipitation et température (Gottardi et al., 2012) ;
- la réanalyse SAFRAN de Météo-France qui comporte au pas de temps horaire des estimations pour les variables météorologiques suivantes : vent, humidité relative, rayonnement solaire incident, rayonnement infrarouge incident, précipitation, température de surface (Quintana-Segui et al., 2008; Vidal et al., 2010). Celles-ci sont analysées pour des

massifs considérés climatologiquement homogènes d'environ 200 km² chacun, à différents niveaux d'altitude (par tranches de 300 mètres).

La génération d'un scénario multivarié pour le jour courant est réalisée par le ré-échantillonnage de toutes les variables météorologiques disponibles pour le jour analogue retenu. La seule limitation de la méthode de génération retenue en termes de variables pouvant être générées et de résolutions spatiale et temporelle pouvant être obtenues pour ces variables est celle des données observées disponibles dans l'archive. Les scénarios générés sont donc au pas de temps horaire et sur des massifs homogènes à la résolution altitudinale de 300 mètres lorsque le ré-échantillonnage est fait dans SAFRAN.

Cette méthodologie de génération par analogues présente l'avantage d'obtenir des scénarios physiquement cohérents entre variables météorologiques, en termes de co-fluctuations temporelles et spatiales entre variables (au sein d'une même journée). Elle offre aussi l'avantage majeur de permettre une reproduction parfaite des hétérogénéités spatiales induites par la topographie par exemple. La cohérence temporelle entre jours successifs est quant à elle supposée portée par l'information contenue dans les prédictors de grande échelle.

Lors de l'application de ces méthodes pour la génération de scénarios futurs, la sélection de la journée analogue peut conduire à une journée pour laquelle la température régionale observée ne correspond pas à la température régionale du jour futur estimée par ailleurs. Dans cette configuration, les températures de surface du jour analogue sont corrigées par un coefficient additif constant (le coefficient est le même pour tous les pas de temps de la journée et toutes les grilles de la région) de façon à ce que la température régionale moyenne du scénario corrigé corresponde à la température régionale moyenne estimée par ailleurs pour le jour courant de génération (e.g. (Mezghani and Hingray, 2009))². Dans le cas où une correction de ce type est nécessaire, d'autres variables météorologiques sont aussi corrigées de façon à ce que le scénario multivarié résultant conserve une certaine cohérence physique. Les corrections sont similaires à celles proposées par (Etchevers, 2000). Ainsi, une correction des températures est accompagnée d'une correction du rayonnement infrarouge, d'une re-estimation du ratio pluie / neige (un modèle de séparation pluie / neige basé sur la température de l'air est utilisé à cet effet) et d'une correction de l'humidité spécifique (l'humidité relative est supposée inchangée) (Cf. détails in annexe A6).

3.2. Evaluation des MDES : cadre méthodologique et quelques résultats

Pour comparer la performance des différents MDES et des différentes versions de chaque MDES et ainsi pouvoir apporter des éléments de réponse aux différentes questions posées en introduction, nous avons développé un cadre d'évaluation multi-critères. Ce cadre d'évaluation, que nous continuons à consolider actuellement, comprend différentes méthodes d'évaluations, des évaluations dites « directes » testant l'aptitude des MDES à reproduire certaines caractéristiques statistiques issues des chroniques météorologiques de référence et, des évaluations dites « indirectes » orientées impact testant l'aptitude des MDES à fournir des scénarios météorologiques cohérents vis-à-vis de l'impact visé qui est dans ce cas hydrologique. Dans les deux cas, nous avons, en plus des évaluations climatologiques classiques, mis en place des évaluations chronologiques et des évaluations en transférabilité temporelle. Ces évaluations sont par ailleurs multi-réalisations. Le principe de ces différentes évaluations est décrit ci-dessous. Il est résumé sur la Figure 16.

² dTemp, le coefficient correction pour les températures journalières, est égal à l'écart entre la température à 2m observée pour le jour analogue (T2m,a) et pour le jour scénario (T2m,s). Pour dsclim, la température T2m est la moyenne spatiale de la température à 2m grande échelle, elle est extraite des réanalyses pour T2m,a et du scénario climatique futur pour T2m,s. Pour d2gen, T2m est la température à l'échelle du bassin versant ; T2m,a est la température moyenne observée ; T2m,s est estimé par régression à partir de la température à 700hPa (le prédictor). Pour analog, dTemp est estimé sur la base de l'épaisseur de la couche entre 2 niveaux de pression (1000hPa et 700hPa) : correction de 1°C pour 1 décamètre d'épaisseur en plus (ou en moins) entre le jour analogue et le jour scénario

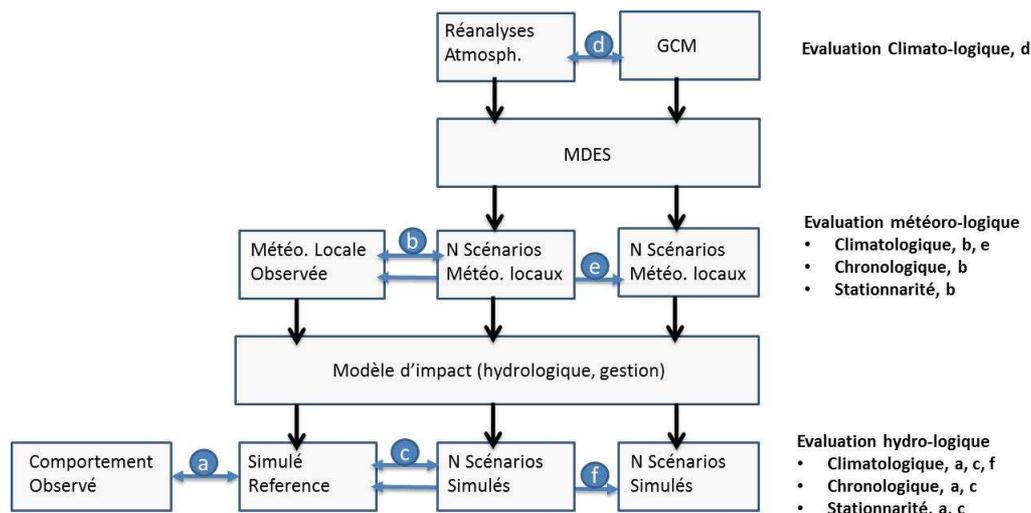


Figure 16 : Schéma de principe pour l'évaluation directe (météorologique) et indirecte (hydrologique) des MDES. L'évaluation directe (b) consiste à comparer les scénarios météorologiques générés avec un MDES forcé par les réanalyses atmosphériques (NCEP dans le cas présent) aux variables météorologiques observées correspondantes. L'évaluation indirecte (c) consiste à évaluer les scénarios hydrologiques obtenus par simulation à partir des scénarios météorologiques en les comparant à une référence hydrologique obtenue par simulation à l'aide de la météo observée. Les évaluations directes et indirectes peuvent être effectuées aussi lorsque le MDES est forcé par les prédicteurs extraits des GCM pour le climat récent (e) et (f).

En pratique, tous les MDES ont été construits sur la base d'une période d'apprentissage commune, 1981-2005 (nommée ultérieurement période a2). Ils ont été utilisés pour simuler des scénarios continus sur la période 1959-2005 (nommée ultérieurement a0). Leur évaluation a été ensuite réalisée sur deux sous-périodes de la période de simulation : la période a2 et la période antérieure non utilisée pour l'apprentissage (période 1959-1981, nommée ultérieurement a1). Les prédicteurs de grande échelle utilisés pour le développement des relations d'échelle ont été extraits des réanalyses NCEP (Kalnay et al., 1996). Pour l'évaluation, les prédicteurs sont respectivement issus des réanalyses météorologiques SAFRAN lorsque les scénarios météorologiques ont été utilisés en entrée du modèle hydrologique ISBA-Durance (Lafaysse et al., 2011) et issus des réanalyses SPAZM lorsque les scénarios ont été utilisés en entrée des modèles hydrologiques CEQUEAU et MORDOR (Garçon, 1996; Morin et al., 1995).

Evaluation mono- vs multi-réalisations.

Du fait de la nature incertaine de la relation d'échelle, la génération de scénarios météorologiques effectuée à l'aide d'un MDES donné est nécessairement basée sur un processus de génération stochastique. C'est le cas des MDES utilisés pour RIWER2030, comme mentionné dans la section précédente (ré-échantillonnage aléatoire dirigé d'un jour analogue (dsclim, analog), perturbation d'indices régionaux par l'ajout d'un résidu aléatoire pour d2gen).

Ce processus stochastique permet par suite la génération d'un ensemble de scénarios météorologiques (les réalisations) pour un unique forçage de grande échelle. Dans la plupart des travaux réalisés au cours des années récentes sur ces modèles, l'évaluation des MDES a été réalisée sur la base d'une seule de ces réalisations. Toutefois, nos travaux ont montré la **très grande sensibilité des critères d'évaluation à la réalisation retenue**. Par suite, **une évaluation robuste de la performance d'un MDES est nécessairement multi-réalisations**.

Nous avons systématiquement par la suite effectué l'évaluation des MDES sur 100 réalisations stochastiques de chaque modèle (nombre arbitraire jugé suffisamment grand). La variabilité inter-scénarios est illustrée par les deux graphiques de la Figure 17. La Figure 17 présente, pour le bassin de la Durance amont, 100 chroniques des cumuls annuels de précipitations hivernales (gauche) et estivales (droite) correspondant respectivement aux 100 réalisations obtenues avec le MDES dsclim sur la période 1959-2005. Le MDES est dans ce cas forcé par des prédicteurs de grande échelle extraits des réanalyses atmosphériques NCEP. La plupart des différentes figures présentées par la

suite (e.g. figures 18 à 21 ; 23 à 26) présentent la variabilité des critères d'évaluation résultant de ces 100 réalisations. Les autres (e.g. figures 22, 27, 29, 30) présentent le signal médian résultant de ces 100 réalisations.

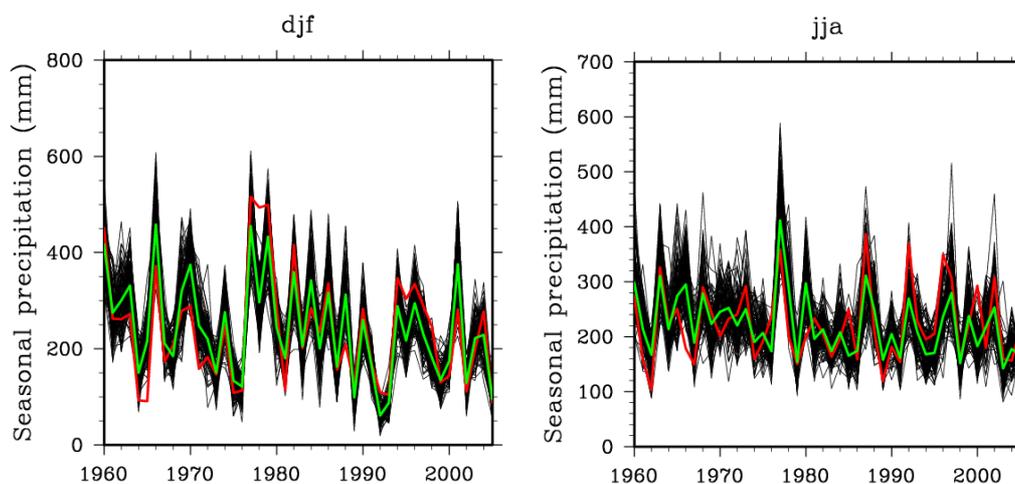


Figure 17 : Evaluation multi-réalisations en temps présent du MDES dsclim21 sur sa capacité à reproduire les variations interannuelles des cumuls annuels de précipitations hivernales (DJF) et estivales (JJA) sur le bassin de la Durance Amont (3500km²). Chroniques (période 1960-2005) de cumuls hivernaux simulées avec le MDES (trait noir : chaque trace correspond à 1 des 100 réalisations) et observée (trait rouge) (trait vert : scénario médian) (extrait de Lafaysse, 2011).

Evaluation climatologique

En général, l'évaluation des MDES est climatologique, consistant à évaluer la capacité du modèle à reproduire diverses caractéristiques statistiques des variables météorologiques et hydrologiques dont en particulier celles influençant la gestion de l'eau.

Pour le projet RIWER2030, nous avons évalué, en particulier, l'aptitude des MDES à reproduire la distribution statistique des cumuls pluviométriques sur différentes durées (journalière, mensuelle, saisonnière), les probabilités d'occurrence des précipitations, la durée moyenne des périodes de temps sec, la saisonnalité des précipitations,... La Figure 18 présente l'aptitude de 6 MDES à reproduire les hétérogénéités spatiales des précipitations (fonction de l'altitude, fonction du sous bassin). Les Figure 19 et Figure 20 présentent la capacité des MDES à reproduire les distributions statistiques des précipitations quotidiennes et mensuelles pour le bassin complet. L'évaluation a été aussi réalisée sur pour d'autres variables météorologiques de surface (e.g. vent et humidité spécifique de l'air de surface sur la Figure 21). Globalement, sur l'ensemble des critères considérés ci-dessus, les différents MDES présentent des performances relativement similaires. On notera toutefois quelques différences de performance pour certains critères, dépendant principalement de la méthode (e.g. sous-estimation des précipitations pour une bonne partie de la distribution pour dsclim ; sur-estimation des quantiles forts pour d2gen ; Figure 19 ; Figure 20).

Les variables pour lesquelles il est le plus difficile de reproduire les distributions sont globalement les précipitations et le vent, cette dernière ayant un impact cependant moindre que les premières sur la réponse hydrologique des bassins versants. La performance est généralement meilleure pour les variables quotidiennes (pas de temps sur lequel est effectué l'apprentissage des MDES) que pour les variables agrégées sur des pas de temps longs, illustrant une certaine difficulté des méthodes à simuler la persistance des événements météorologiques et par suite la variabilité des variables agrégées. C'est par exemple le cas de la distribution des précipitations mensuelles (Figure 20), de la distribution du vent mensuel moyen (Figure 21) ou des durées de temps sec (Figure 22).

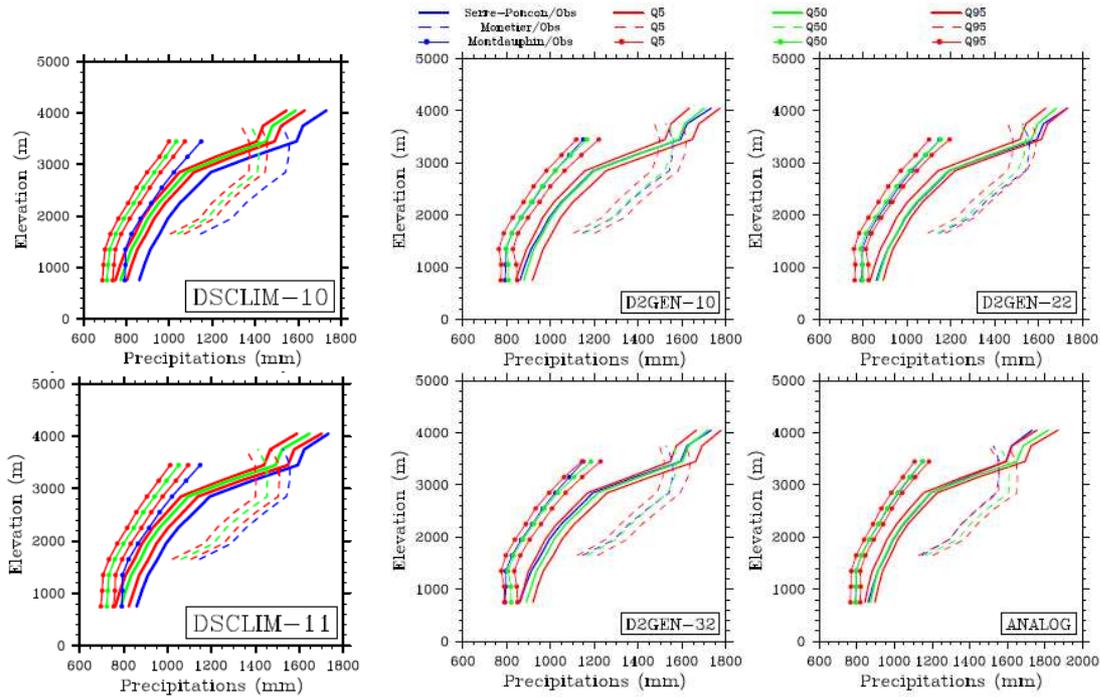


Figure 18. Aptitude de 6 MDES à reproduire les précipitations interannuelles moyennes (1981-2005) en fonction de l'altitude pour 3 bassins et sous bassins de UDR. Observation en bleu. Simulations : quantiles 5, 50 et 95th extraits d'un ensemble de 100 scénarios stochastiques (Lafaysse, 2011).

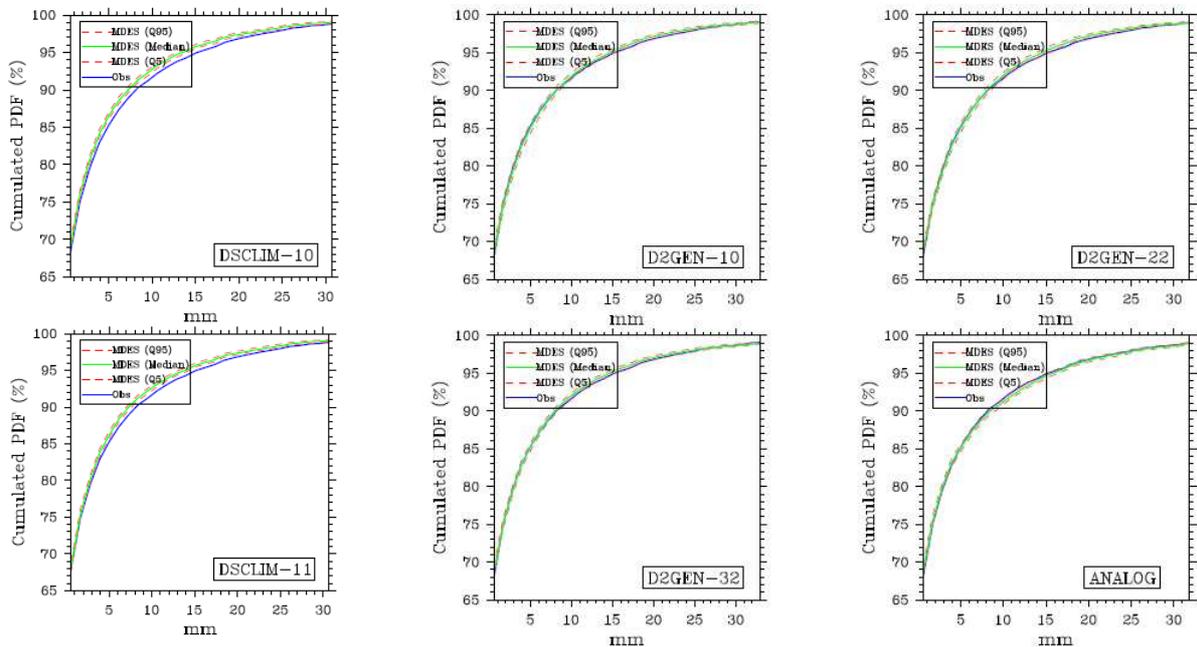


Figure 19. Distribution des précipitations de bassin quotidiennes observées et reconstruites. Période 1981-2005. Observation en bleu. Simulations : quantiles 5, 50 et 95th extraits d'un ensemble de 100 scénarios stochastiques (Lafaysse, 2011).

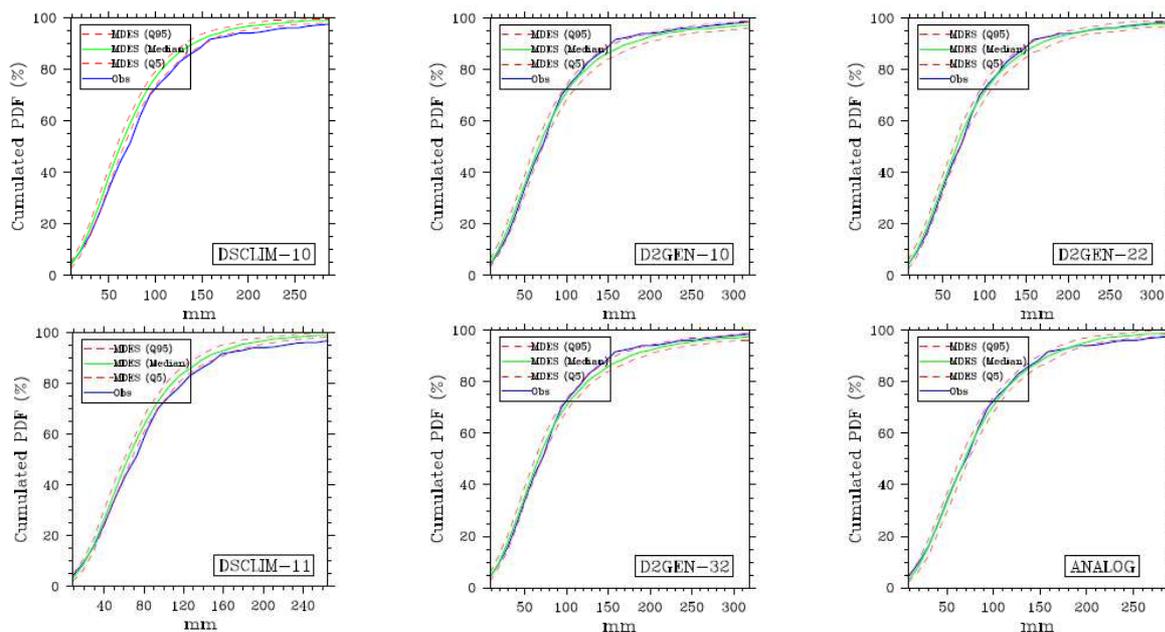


Figure 20. Distribution des précipitations de bassin mensuelles observées et reconstruites. Période 1981-2005. Observation en bleu. Simulations : quantiles 5, 50 et 95th extraits d'un ensemble de 100 scénarios stochastiques (Lafaysse, 2011).

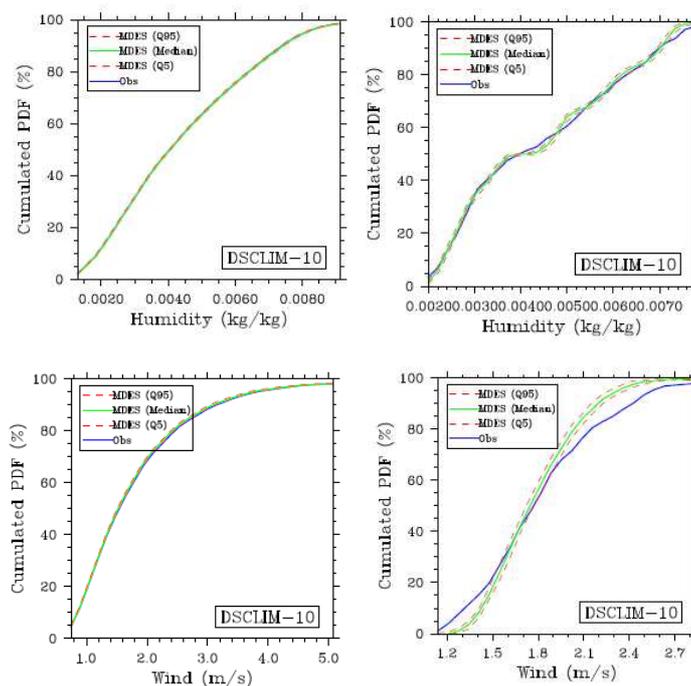


Figure 21. Performance de dsclim10 pour la reproduction des PDF (Probability Distribution Function) correspondant aux valeurs journalières moyennes (à gauche) et mensuelles moyennes (à droite) pour l'humidité spécifique (en haut) et le vent (en bas). Période 1981-2005. Observation en bleu. Simulations : quantiles 5, 50 et 95th extraits d'un ensemble de 100 scénarios stochastiques (Lafaysse, 2011).

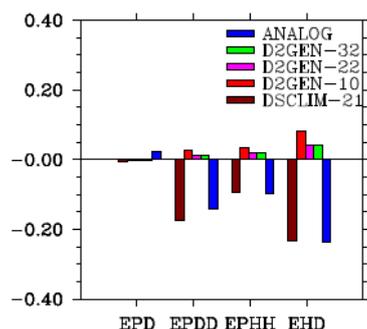


Figure 22. Statistiques sur le nombre et la persistance des événements secs ou pluvieux : erreur relative sur la probabilité d’avoir un jour sec (EPD), erreur relative sur la probabilité d’avoir un jour sec suivant un jour sec (EPDD), erreur relative sur la probabilité d’avoir un jour humide suivant un jour humide (EPHH), erreur relative sur la durée moyenne des périodes humides (EHD). Médiane des 100 scénarios. 1981-1985. La meilleure performance de d2gen pour la reproduction des durées de temps humide résulte du caractère auto-régressif du modèle d’occurrence de précipitations. Les erreurs sont plus faibles pour les versions de d2gen utilisant l’humidité relative, qui est un prédicteur puissant de l’occurrence des événements pluvieux (Lafaysse, 2011).

Evaluation chronologique

Une évaluation climatologique est cependant insuffisante pour évaluer la performance d’un MDES. En effet, un MDES simple consistant à ré-échantillonner de façon purement aléatoire dans l’historique des scénarios météorologiques journaliers présentera, par construction, une performance climatologique parfaite. Cependant, un modèle de ce type serait incapable d’expliquer les fluctuations observées des variables météorologiques – liée en particulier aux fluctuations atmosphériques - et serait donc incapable de fournir des scénarios météorologiques futurs pertinents au vu des changements attendus de la circulation atmosphériques aux échelles synoptiques.

Une **évaluation chronologique, beaucoup plus exigeante**, est de ce fait nécessaire. Elle consiste à évaluer, comme ce qui est fait classiquement pour les Modèles Hydrologiques (MH), la capacité du modèle à reproduire les variations d’un jour à l’autre des variables météorologiques observées comme par exemple les séquences de temps sec, les épisodes de pluies intenses ou de longue durée.

Dans le cadre du projet RIWER2030, nous avons mis en place des évaluations chronologiques **multi-échelles** couvrant une large gamme d’échelles temporelles – allant du pas de temps journalier (variations haute-fréquence) à des pas de temps pluriannuels (variations basse-fréquence) (Figure 23).

Pour l’ensemble des MDES, la performance varie de façon très similaire avec le niveau d’agrégation temporelle auquel les séries simulées et observées sont comparées :

- Elle augmente de façon significative jusqu’à un pas d’agrégation saisonnier
- Elle diminue ensuite plus ou moins fortement pour des pas de temps supérieurs, en présentant des minima locaux pour les échelles d’agrégation annuelles et pluri-annuelles.

Ce comportement résulte, pour les pas d’agrégation inférieurs à la saison, de la forte persistance sur les prédicteurs comme démontré dans un autre contexte par Buishand et al. (2004). Il illustre aussi une difficulté plus ou moins importante selon les MDES à reproduire les variations basses fréquences de la variable considérée. Une publication est en préparation avec R. Katz du Laboratoire IMAGEe à Boulder aux Etats Unis sur ces aspects (Hingray et al., en preparation).

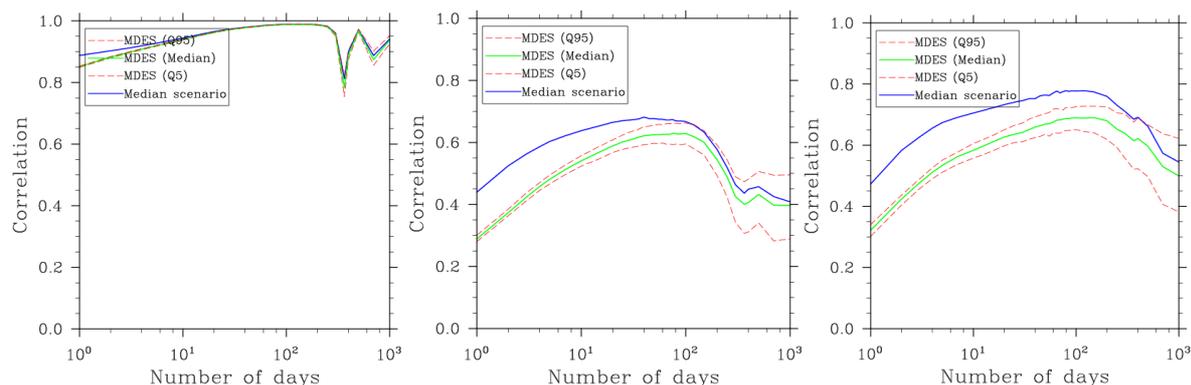


Figure 23 : Evaluation chronologique multi-échelles de la capacité du MDES dsclim21 à reproduire les variations temporelles des températures (gauche), du vent (milieu) et des précipitations moyennes de bassin (droite) pour la période 1960-2005. Le coefficient de corrélation entre les données simulées et observées est estimé pour différents niveaux d'agrégation temporelle de la variable considérée (de 1 jour à 3 ans). Les courbes rouges, vertes, rouges correspondent respectivement aux percentiles 5, 50 et 95th des valeurs obtenues pour les 100 réalisations stochastiques du MDES. La courbe bleue correspond au scénario médian (médiane pour chaque jour des 100 réalisations). Extrait de (Lafaysse, 2011).

A l'échelle saisonnière, la capacité des MDES à reproduire la variabilité interannuelle des cumuls saisonniers ainsi que les variations d'année en année dépend fortement de la saison. La performance est nettement meilleure pour la reconstitution des précipitations hivernales que pour les précipitations estivales à l'image de ce qui est classiquement trouvé pour ce genre d'étude sous nos latitudes (Figure 17 ; Figure 24). Ceci résulte du type de précipitations essentiellement frontales en hiver et donc fortement liées à la configuration synoptique à grande échelle, convectives en été donc essentiellement liées à des processus plus locaux.

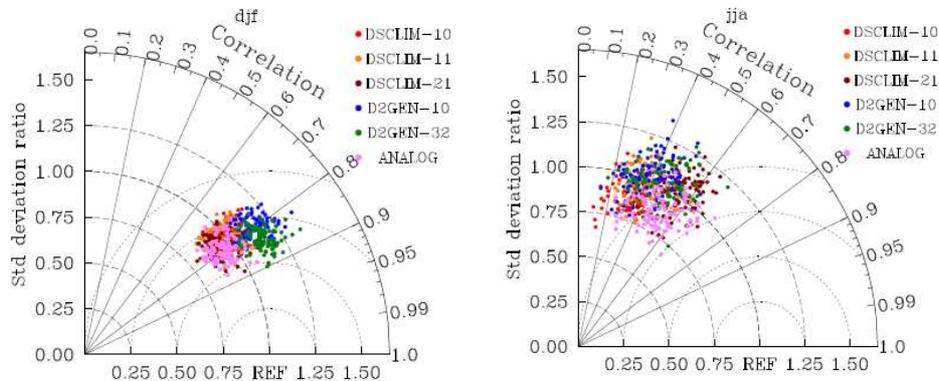


Figure 24. Performance de 6 MDES pour la reproduction des cumuls saisonniers de précipitations (hiver à gauche, été à droite). Diagrammes de Taylor. 100 chroniques sont évaluées pour chaque MDES. Pour chaque chronique simulée, la figure présente le coefficient de corrélation (valeur optimale : 1) entre la chronique simulée et la chronique observée et le ratio d'écart-type (valeur optimale : 1) entre précipitations saisonnières reconstruites et observées (hiver-djf, été-jja), pour 100 générations aléatoires (extrait de Lafaysse, 2011)

Evaluation en transposabilité temporelle pour une utilisation en climat futur.

Pour produire des scénarios climatiques futurs locaux sur la base des relations d'échelle identifiées entre variables locales et synoptiques pour la situation climatique actuelle, il est nécessaire de supposer que cette relation ne sera pas modifiée dans un climat perturbé. Cette hypothèse, quoique largement critiquée par les détracteurs des approches de descente d'échelle statistiques, n'est pour autant que rarement évaluée.

L'évaluation chronologique des modèles, notamment l'évaluation de leur capacité à simuler les variations basse-fréquence du climat passé comme une sorte de changement climatique "naturel", donne une première appréciation de cette capacité d'extrapolation temporelle. Le coefficient de

corrélation, présenté dans les diagrammes de Taylor, ou le coefficient de détermination sont une mesure intéressante de cette capacité (Figure 24).

L'évaluation en extrapolation peut aussi se faire en évaluant les modèles sur des périodes pour lesquelles on dispose de données historiques et pour lesquelles les conditions atmosphériques diffèrent de celles rencontrées sur la période de calibration du modèle.

Ces deux types de tests appliqués à différents MDES montrent des **capacités de transposabilité temporelle différentes selon les modèles**. Le MDES « analog » montre la transférabilité temporelle la meilleure (Figure 25).

Une mauvaise transférabilité temporelle peut suggérer une mauvaise performance du MDES. Il s'avère cependant aussi qu'elle **peut aussi résulter d'hétérogénéités temporelles dans les champs de forçage de grande échelle** (Sturaro, 2003; Sterl, 2004), **ou dans les observations météorologiques locales** (SAFRAN (Vidal et al., 2010)). En l'occurrence ici, une mauvaise performance en transposabilité temporelle est obtenue par le MDES d2gen lorsqu'il utilise les variables d'humidité comme prédicteur (d2gen22 et d2gen32) (Figure 25, 3eme colonne). Ce résultat est sans surprise du fait de la forte hétérogénéité des variables humidité dans les réanalyses résultant de l'assimilation de nouvelles données de télédétection dans les années 1980. Ces résultats mettent en évidence la nécessité de méthodes complémentaires de façon à pouvoir s'affranchir de cette limitation pour cette évaluation spécifique.

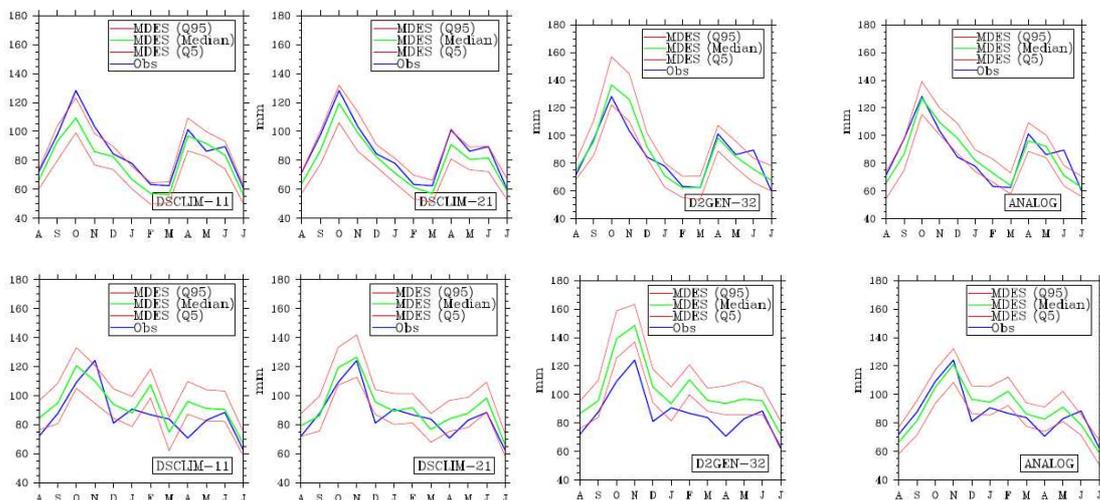


Figure 25 : Transposabilité temporelle de 4 MDES (dsclim11, dsclim21, d2gen32, analog). Cycle saisonnier des précipitations de bassin mensuelles observées et reconstruites. Apprentissage sur période P2 (1981-2005). Première ligne: Evaluation sur période a2 (1982-2005). Deuxième ligne : Evaluation sur période a1 (1959-1981).

Evaluation hydrologique ou pertinence de la chaîne MDES/MH.

L'évaluation d'un MDES consiste généralement à évaluer sa capacité à reproduire certaines caractéristiques observées des variables météorologiques locales. Une telle évaluation est évidemment nécessaire et de nombreuses publications récentes mettent en évidence diverses imperfections des MDES dans leur capacité à générer des scénarios météorologiques pertinents. Cependant, on connaît peu de chose de l'effet de ces imperfections lorsque les scénarios météorologiques sont utilisés pour alimenter des modèles d'impact par nature très non linéaires. L'évaluation doit donc aussi être orientée « impact ».

Dans le cas présent nous avons mis en place une évaluation hydrologique de façon à **évaluer la pertinence des scénarios hydrologiques obtenus par simulation à partir des scénarios météorologiques générés à l'aide des MDES**, c'est-à-dire de façon à évaluer leur capacité à reproduire les caractéristiques des variables hydrologiques « observées ». Pratiquement, l'évaluation hydrologique consiste à comparer les 100 scénarios hydrologiques obtenus à l'aide de la chaîne MDES/MH (MH=Modèle Hydrologique) à un scénario hydrologique de référence obtenu par simulation hydrologique à l'aide du même MH à partir des forçages météorologiques observés (Figure 25). La référence considérée n'est pas la chronique des variables hydrologiques observées, de façon à pouvoir s'affranchir des défauts propres au modèle hydrologique lors de l'évaluation. En principe,

comme les modèles hydrologiques opèrent des représentations différentes du système réel, ils pourraient mettre en évidence des défauts différents du MDES, dépendant par exemple des gammes de variabilité des variables météorologiques activées par le modèle.

L'évaluation hydrologique peut aussi être climatologique, chronologique ou appliquée pour tester la transposabilité temporelle du MDES. Elle a été faite dans le cadre du projet RIWER2030 pour 3 modèles hydrologiques du bassin versant :

- le modèle hydrologique Isba-Durance (Lafaysse, 2011; Lafaysse et al., 2011) : une adaptation pour le bassin de la Durance supérieure du modèle hydrologique Safran-Isba-Modcou, modèle à bilan d'énergie développé et utilisé en opérationnel par Météo-France.
- Le modèle hydrologique MORDOR : un modèle hydrologique conceptuel global développé et utilisé en opérationnel par EDF-DTG (v. description in Annexe A4)
- Le modèle hydrologique CEQUEAU : un modèle hydrologique conceptuel semi-distribué, initialement développé par Girard et al. (1972), et adapté par EDF-LNHE pour différents bassins versant français dont le bassin de la Durance pour le projet RIWER2030 (v. description in Annexe A4).

La Figure 28 présente les débits quotidiens simulés à La Clapière avec le modèle CEQUEAU pour 6 années récentes. Malgré l'imperfection des scénarios météorologiques générés, et malgré la forte dispersion inter-réalisations des scénarios hydrologiques obtenus, la médiane des débits simulés reproduit plutôt bien les chroniques observées. Ceci est d'autant plus remarquable que le seul forçage utilisé dans la chaîne de simulation MDES/MH est celui des variables atmosphériques grande échelle extraites des réanalyses atmosphériques NCEP et utilisées en entrée des MDES.

La chaîne permet en particulier de bien reproduire le cycle saisonnier des débits (voir aussi Figure 27), la variabilité interannuelle de l'onde nivale et certains épisodes de crues d'automne. Les scores de Nash obtenus sur les débits journaliers, en prenant pour référence les débits simulés par le modèle hydrologique (SPAZM + CEQUEAU dans le cas présent), sont tout à fait satisfaisants (cf. Figure 26). Pour la chronique des débits médians, ils sont du même ordre de grandeur que les scores de Nash obtenus entre les débits journaliers simulés par le modèle hydrologique et les débits observés (non montré). L'incertitude apportée par la descente d'échelle est donc finalement comparable à l'erreur intrinsèque du modèle hydrologique (cf. tableau 11.6 de la thèse de ML pour ID et Annexe A4 pour Cequeau et Mordor).

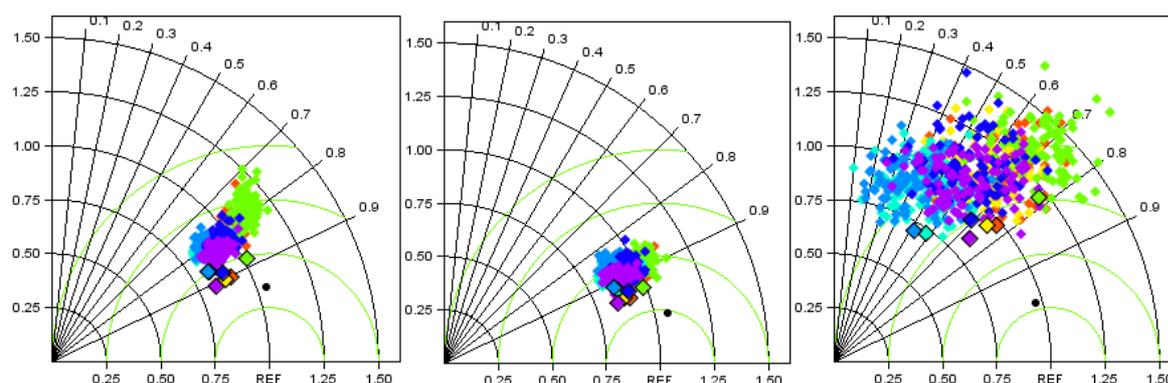


Figure 26. Diagrammes de Taylor sur les débits (100 tirages) obtenus sur la Durance à l'entrée de Serre Ponçon avec le modèle Cequeau sur la période 1981-2005. Evaluation sur les chroniques de débits journaliers (gauche), de débits mensuels (milieu), de débits annuels (droite). 100 chroniques de débits sont évaluées pour chaque MDES (une couleur pour chaque MDES). Les symboles graissés correspondent à la chronique des débits moyens obtenus chaque jour sur la base des 100 scénarios. Le point noir correspond aux scores obtenus entre la chronique de débits de référence et la chronique de débits observés. cf. **Figure 24** pour précisions sur les scores.

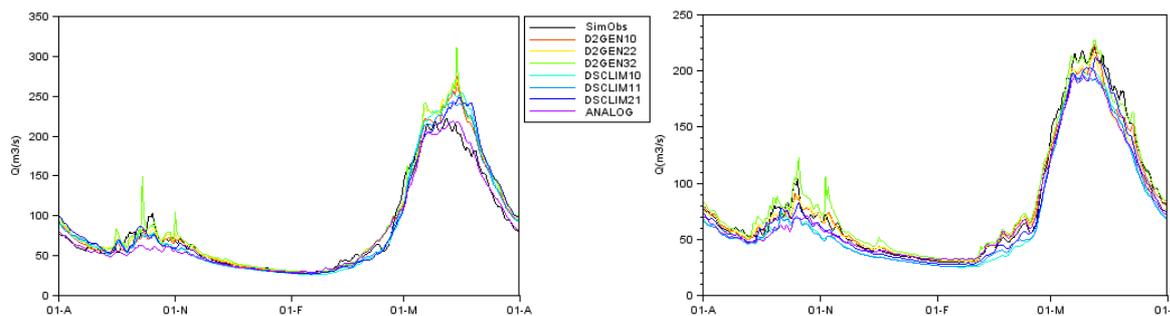


Figure 27. Evaluation hydrologique des MDES. Débits interannuels moyens simulés avec Cequeau à l'exutoire du lac de Serre-Ponçon. Gauche : évaluation sur la période d'apprentissage des MDES (période 1981/2005). Droite : évaluation en extrapolation temporelle (période 1960-1982). Les 100 chroniques météorologiques obtenues pour chaque MDES alimentent Cequeau. Le scénario hydrologique médian (courbes de couleur correspondant aux différents MDES) est comparé à un scénario de référence obtenu avec Cequeau sur la base de la météorologie observée (référence = courbe noire).

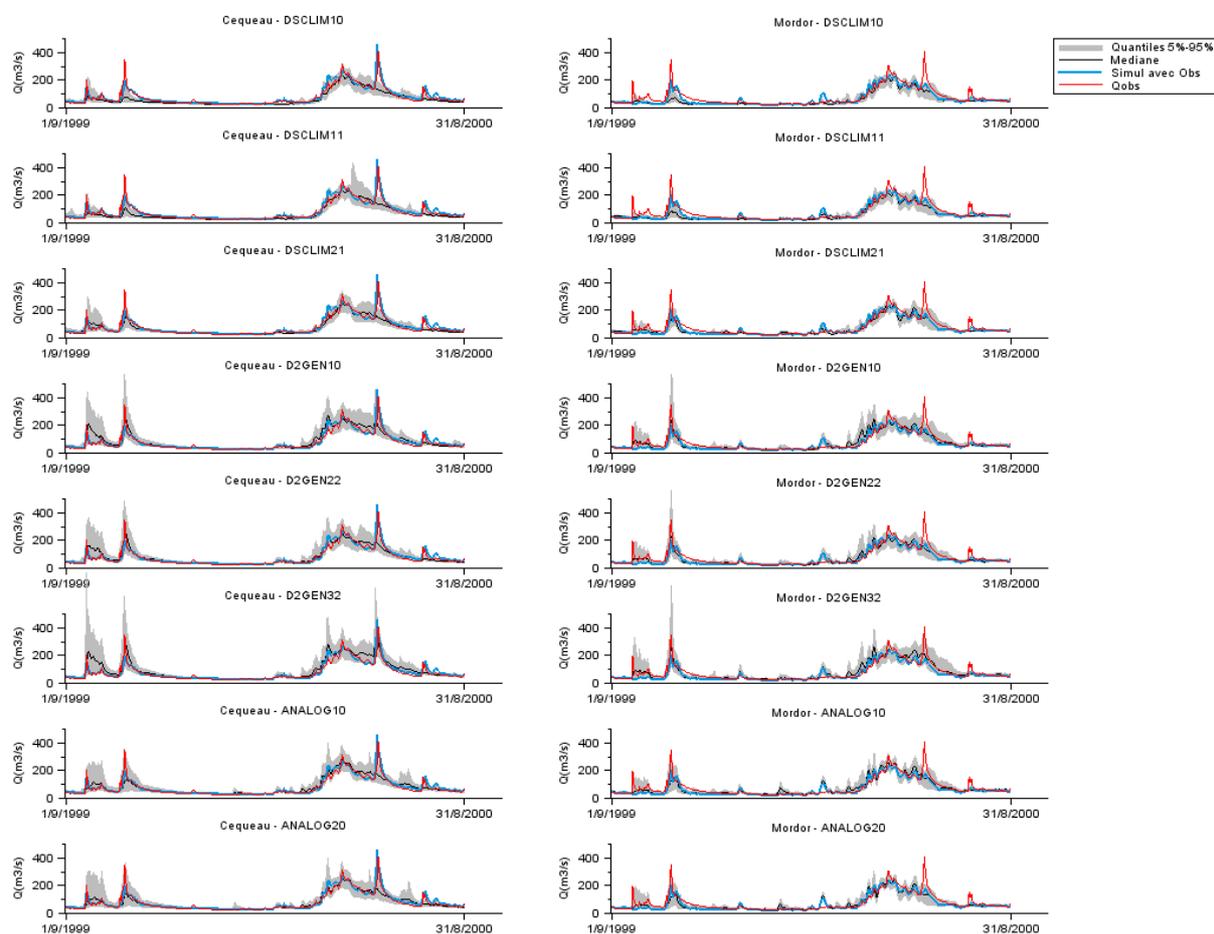


Figure 28. Débits journaliers simulés avec Cequeau (gauche) et Mordor (droite) sur la période du 01/09/1999 au 31/08/2000 avec 1) la météorologie observée (référence en rouge) et 2) les 100 scénarios météorologiques obtenus avec un MDES donné forcé avec les réanalyses NCEP (apprentissage des MDES sur période 1981/2005). Pour chaque jour sont tracés en grisé les quantiles 5% et 95% et la médiane des 100 réalisations en noir.

La bonne performance globale de la méthode illustre le respect de la cohérence multivariée des forçages météorologiques reconstruits. On notera enfin qu'il n'y a pas de dégradation de performance à l'échelle des différents sous-bassins, un résultat à rapprocher du bon respect de la structure spatiale des forçages météorologiques. Ces résultats résultent directement de la composante analogique des

différents MDES qui conduisent à ré-échantillonner des configurations météorologiques journalières observées.

La bonne performance hydrologique des MDES résulte évidemment beaucoup 1) du caractère intégrateur du bassin, qui fait que la variabilité quotidienne des débits est influencée par la variabilité des précipitations à des échelles temporelles plus grandes ; or, le pouvoir explicatif des différents MDES augmente sensiblement avec le pas de temps, de 2) la forte saisonnalité des débits, qui est par construction bien reproduite puisqu'une contrainte calendaire est imposée sur les jours ré-échantillonnés ; et 3) de la bonne performance des MDES pour la reproduction de la variabilité des précipitations hivernales qui conditionne directement la variabilité interannuelle de l'onde de fonte nivale. De ce fait les variations des débits mensuels moyens sont encore mieux reproduites que celles des débits journaliers (Figure 26 milieu). La variabilité des débits annuels est aussi assez bien captée mais la performance est nettement dégradée vis-à-vis de la performance aux échelles d'agrégation inférieures traduisant en partie la difficulté des MDES à capter la variabilité interannuelle des précipitations (Figure 26 droite ; Figure 29).

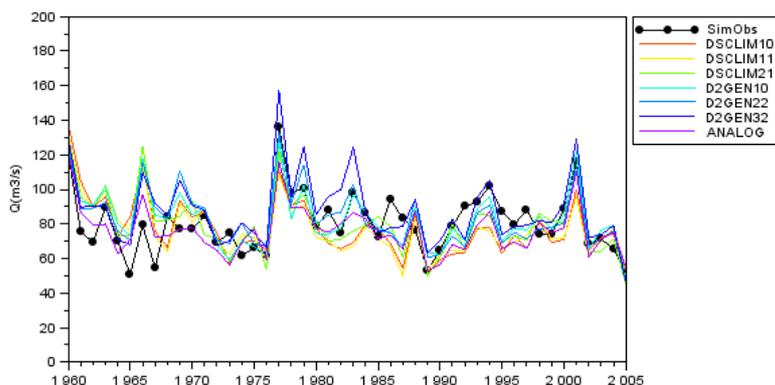


Figure 29. Variabilité inter-annuelle des débits moyens annuels (moyenne sur les 100 réalisations) simulés avec Cequeau en utilisant NCEP et différents MDES.

Du fait du régime fortement nival du bassin, le filtre hydrologique permet donc globalement d'atténuer diverses imperfections des scénarios météorologiques. Cependant, il peut aussi en amplifier certaines. Par exemple, les années avec sous-estimation des précipitations hivernales, la durée plus courte de l'enneigement simulé provoque avec le modèle Isba-Durance une évaporation plus forte ; résultant à son tour en une sous-estimation des débits plus importante que celle des précipitations. L'inverse est obtenu dans le cas contraire. Ces non linéarités hydrologiques conduisent donc à une augmentation artificielle de la variance des débits annuels et à une amplification des problèmes de biais, en particulier lorsque la méthode est évaluée sur une période autre que la période d'apprentissage (cf. Lafaysse, 2011).

L'évaluation hydrologique permet aussi de déceler, pour certains MDES, des défauts non identifiés comme déterminants lors des étapes d'évaluation directe. Par exemple, la sous-estimation par certains MDES de la durée des périodes de temps sec s'exprime de façon exacerbée par une surestimation des débits d'étiage et donc une sous-estimation des situations critiques d'étiage (e.g. Figure 30).

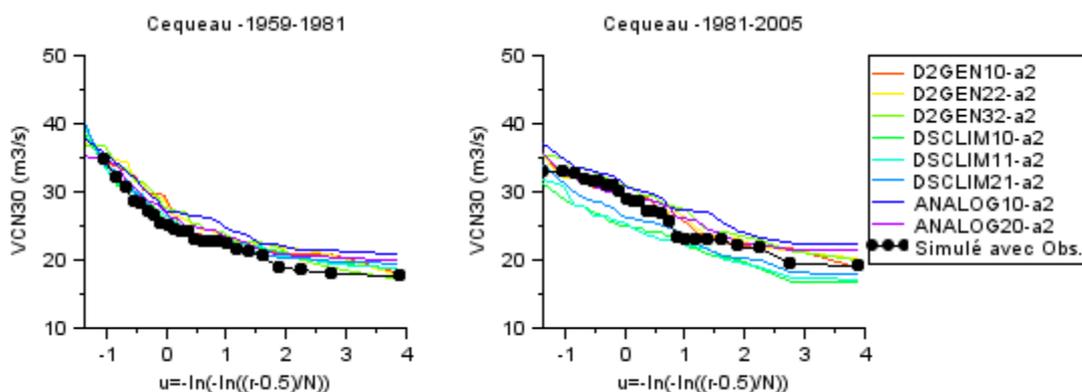


Figure 30. Distribution des VCN30 simulés par Cequeau (médiane des 100 tirages) en utilisant NCEP et les archives météo dans la période a2 (1982-2005).

Pertinence de la chaîne GCM/MDES/MH.

A l'image de ce que nous avons présenté pour la chaîne MDES/MH, il est aussi nécessaire d'évaluer l'ensemble de la chaîne GCM/MDES/MH utilisée in fine pour la génération de scénarios hydrologiques.

Pour les expériences climatiques effectuées dans le cadre du flux STREAM2 du projet européen ENSEMBLES, le seul forçage imposé aux GCM est celui des concentrations de gaz à effet de serre. Hormis cette contrainte, les GCM évoluent librement et développent leur propre variabilité naturelle. On peut donc attendre d'un GCM qu'il soit capable de reproduire la climatologie observée (moyenne et variabilité) des variables atmosphériques de grande échelle utilisées comme prédicteurs pour les MDES, mais on ne peut en aucun cas leur demander de reproduire les séquences chronologiques observées, quel que soit le pas de temps considéré. Dans RIWER2030, nous avons donc effectué une évaluation climatologique des différentes chaînes GCM/MDES et GCM/MDES/MH (e.g. (Lafaysse et al., 2013)).

Les GCM sont réputés pouvoir mieux simuler les variables de grande échelle que les variables de surface. Les sorties des GCM obtenues sur la période 1980-2000 se sont avérées très biaisées par rapport aux observations sur la même période et par suite impropres à une utilisation directe en entrée des MDES. Une étape supplémentaire de correction des biais (temporels et spatiaux) s'est révélée nécessaire (cf. annexe A6). L'incertitude liée au choix de la méthode de correction est potentiellement majeure, et probablement du même ordre de grandeur que celles liées au MDES et sans doute largement supérieure à l'incertitude liée au choix du MH.

A cette difficulté s'en ajoute une autre non négligeable. La climatologie d'un GCM pour une période donnée est influencée par une variabilité naturelle d'échelle décennale ou pluri-décennale. La présence de biais entre GCM et observations n'est donc pas nécessairement représentative d'un défaut du modèle. Par exemple, les fréquences d'occurrence des régimes de temps sur l'Europe de l'Ouest font preuve d'une variabilité basse fréquence très marquée entre 1860 et 2000, alors que les concentrations de gaz à effet de serre n'évoluent que faiblement dans les GCM sur cette période. De plus, une forte variabilité apparaît également entre différents runs du même GCM, qui ne diffèrent que par une faible perturbation des conditions initiales. Les différences entre les fréquences d'occurrence des régimes de temps dans un GCM donné et les fréquences estimées pour les réanalyses sont du même ordre de grandeur que la variabilité naturelle de cette variable, telle que simulée par les modèles. Il n'est donc en principe pas possible d'assimiler ces différences à des erreurs de modélisation (Lafaysse, 2011).

Pour le projet RIWER2030, nous avons corrigé les sorties des GCM sur la base d'une méthode quantile / quantile de façon à ce que les distributions observées d'une part et les distributions obtenues à partir des sorties de modèle corrigées d'autre part soient identiques sur une période de référence commune (1980-2000). La fonction de correction non paramétrique qui en résulte dépend de la variable et du GCM considérés. Le fait que la correction soit établie pour que les distributions soient les mêmes sur une période commune est évidemment une limitation de la méthode. Comme suggéré plus haut, n'importe quelle autre période de 20 ans dans l'expérience du CTL du GCM aurait

pu être utilisée pour établir la fonction de correction. Le choix de la période conditionne la fonction de correction et pourrait fortement influencer l'estimation des impacts régionaux qui résulte de l'application de l'ensemble de la chaîne de simulation. Nous n'avons pas fait cette analyse mais il est certain que ce point constitue une limitation importante de l'approche. C'est d'ailleurs le cas de toute analyse d'impact du changement climatique qui se base à un moment donné sur une correction de biais liés aux GCM sans tenir compte de la variabilité intrinsèque des modèles.

Evaluer la performance des GCM est donc un problème à part entière qui nécessite la mise en place de stratégies d'évaluations spécifiques à développer. De la même façon, le post-traitement des sorties de GCM, qui fait appel à différentes méthodes de correction, nécessiterait des analyses détaillées de façon à estimer la pertinence des approches utilisées.

4. Analyses d'impact

4.1. Scénarios

Chaîne de simulation et incertitudes

Les différents modèles précédemment décrits ont été assemblés en une chaîne de simulation (cf. Figure 1 p.6) utilisée pour produire successivement :

- A l'aide des Modèles de Descente d'Echelle Statistique (MDES), et sur la base des sorties de différents GCM, des scénarios météorologiques locaux pour le bassin versant de la Durance à l'amont de Serre-Ponçon,
- A l'aide des Modèles Hydrologiques (MH), les scénarios hydrologiques correspondant et en particulier les chroniques d'apports à la réserve de SP (bassin amont), et à la région aval (bassins intermédiaires),
- A l'aide des Modèles d'Usage, les scénarios de demande en eau pour l'irrigation, pour la production d'hydroélectricité,
- A l'aide des Modèles de Gestion (MG), une simulation de la gestion optimale de la réserve et l'évaluation de performance correspondante

De très nombreuses incertitudes sont évidemment attachées à cette chaîne de simulation et d'analyse. Elles sont liées en particulier aux modèles rappelés ci-dessus. Elles sont aussi liées aux évolutions possibles du milieu physique, des usages souhaités de la ressource (eau, énergie associée), des modalités de répartition entre usages, etc... Ces dernières dépassent largement le cadre d'analyse de notre étude et n'ont pas été considérées ici, certaines d'entre elles étant par ailleurs traitées dans le cadre du projet R²D² 2050, financé par le GICC (<https://r2d2-2050.cemagref.fr/> ; (Sauquet and Coll., 2010)).

La possibilité de quantifier au mieux les incertitudes associées aux projections est une problématique actuelle clé. Elle nécessite une approche probabiliste multi-modèles et multi-scénarios. Dans ce contexte, la question est d'estimer les pondérations qui doivent être appliquées aux différentes simulations résultant des différents modèles et scénarios possibles. Les recherches actuelles tentent de proposer des pondérations basées sur des métriques susceptibles de rendre compte de la qualité des modèles et de la probabilité d'occurrence des scénarios considérés. Le choix des métriques est une question en soi qui est loin de faire l'unanimité (Tebaldi et al., 2004).

Nous n'avons pas ici pour objectif d'estimer l'incertitude totale liée aux projections futures, ceci principalement pour 2 raisons. La première est que nous ne disposons que d'un nombre limité de modèles : modèles climatiques d'une part, MDES d'autre part, MH enfin. Seule une partie réduite de l'incertitude liée à ces modèles peut donc être appréhendée. La seconde est qu'il s'est avéré relativement difficile de discriminer les modèles selon leur qualité. Pour notre cas d'analyse par exemple, l'évaluation des MDES, nécessairement multi-réalisations et multi-critères comme évoqué dans la section 3.2, reste délicate, en particulier lorsque l'on cherche à estimer l'applicabilité des modèles en climat modifié. Les analyses effectuées lors du projet RIWER2030 n'ont ainsi pas permis de mettre en évidence de différences notables de performance entre les différents MDES évalués, ni même entre les différentes versions de ces MDES. De la même façon, l'évaluation nécessaire des GCM est difficile, du fait, en particulier, de la variabilité interne de chaque modèle (Lafaysse, 2011). De ce fait, pondérer les scénarios obtenus pour les différentes chaînes GCM/MDES s'avère difficile. Il en va de même pour les scénarios obtenus pour les différents modèles hydrologiques considérés ici.

Dans le cadre du projet RIWER2030, nous avons effectué une analyse de sensibilité des projections aux principales sources d'incertitudes associées à notre chaîne de simulation : celles liées aux GCM, aux MDES, aux MH et aux MG. Nous utilisons une approche multi-modèles (12 GCM, 7 MDES, 3 MH, 3 MG) et considérons les différents modèles équiprobables (à l'exception des modèles de gestion).

Nous n'avons pas appliqué la chaîne de simulation jusqu'aux modèles de gestion pour l'ensemble des combinaisons de modèles possibles. Ceci aurait nécessité des ressources en calcul considérables qu'il n'était pas possible de mobiliser dans le cadre du projet. Nous nous sommes limités à l'exploration conditionnelle de certaines parties de la chaîne. Cette section présente d'abord les

données et expériences réalisées. Elle présente ensuite quelques-uns des principaux résultats obtenus sur la base des scénarios obtenus à l'aide de la chaîne de simulation.

Données et plans d'expérience

Pour l'analyse d'impact sur le climat régional, les différentes versions des MDES présentées dans la section 3.1 de ce rapport ont été utilisées pour descendre en échelle les sorties grande échelle d'une suite de 12 expériences climatiques obtenues avec différents modèles climatiques globaux dans le cadre du projet européen ENSEMBLES³ (<http://ensembles-eu.metoffice.com/>). Tous les GCM disponibles au 31.08.2011 ont été utilisés dès lors que les données grande échelle requises pour le forçage des différentes versions des 3 MDES étaient disponibles⁴. Pour certains GCM, plusieurs runs étaient disponibles. Toutes les simulations GCM ont été réalisées pour le climat récent sous le scénario 20C3M (période contrôle (CTL) = 1860-1999) et pour le climat futur sous le scénario d'émission de Gaz à Effet de Serre SRES-A1B (période future (FUT) = 2000-2099).

Pour l'analyse d'impact sur l'hydrologie du bassin de la Durance, les différents forçages météorologiques résultant des chaînes GCM/MDES déployées dans l'étape précédente ont été utilisés en entrée des 3 modèles hydrologiques Cequeau, Mordor et Isba-Durance. Ce jeu de simulations nous a permis de considérer les incertitudes liées aux GCM, aux MDES et aux MH.

Pour l'analyse d'impact sur la performance du système de gestion, nous avons considéré les trois modèles de gestion présentés dans la section 2.6, qui sont pour mémoire, les modèles AC, AIP, AIC, basés sur différents degrés de prévisibilité des variables d'intérêt à la gestion. Les Modèles de Gestion utilisés pour simuler la gestion de Serre-Ponçon sont très coûteux en temps de calcul. Pour cette analyse, nous avons considéré un sous-ensemble des scénarios hydrologiques obtenus dans l'étape précédente afin d'explorer l'effet sur l'analyse d'impact des deux catégories d'incertitudes suivantes:

- Les incertitudes liées à la génération des scénarios de forçages météorologiques
- Les incertitudes liées à la représentation de la stratégie de gestion du système de Serre-Ponçon

Ces sous-ensembles sont précisés dans la section correspondante. Les différentes expériences effectuées dans le cadre du projet sont résumées dans le Tableau 4.

Tableau 3 : Expériences climatiques considérées.

Institut	Modèle	Acronyme	Run	Référence
CNRM (France)	CNRM-CM3.3	CNCM33	1	(Salas et al., 2005)
DMI (Danemark)	ECHAM5-C	DMIEH5C	1	(May, 2008)
			2	
			3	
FUB (Allemagne)	EGMAM2	EGMAM2	3	(Huebener et al., 2007)
IPSL (France)	IPSL-CM4v2	IPCM4v2	1	(Dufresne et al., 2005)
			2	
			3	
METO-HC (Roy.Uni)	HadGem2-A0	HADGEM2	1	(Johns et al., 2006)
MPI (Allemagne)	ECHAM5-C	MPIEH5C	1	(Brasseur and Roeckner, 2005)
			2	
			3	

³ Toutes les expériences font partie du groupe d'expérience STREAM2 du projet Ensemble.

- Les données sont disponibles sur le site : <https://cera-www.dkrz.de/WDCC/ui/Login.jsp>
- Les données de forçages des GCMs sont décrits sur le site: <http://www.cnrm.meteo.fr/ensembles/public/data/introduction.html>
- les fichiers chargés font référence au scénario : 20C3M+SRA1B-S1 (même scénario que STREAM1 pour 2000-2099, forçages anthropiques sur 1860-1999, mais pas de forçages naturels solaires / volcaniques).

⁴ Certains GCM n'ont pas été retenus du fait de contraintes trop lourdes pour l'extraction des prédicteurs requis (téléchargement des champs requis (fichiers trop gros lorsque disponibles au pas de temps 6h00 uniquement), extraction du sous domaine Europe, regrillage, débiaisage, calcul d'indices).

Tableau 4 : Chaînes de simulation GCM/MDES utilisées et jeux de simulations réalisées. Pour chaque chaîne GCM/MDES mentionnée (C,M,I), 100 scénarios météorologiques sur 240 ans ont été générés. Les simulations hydrologiques correspondantes ont été effectuées avec Cequeau (C), Mordor (M), Isba-Durance (I). Les chaînes de simulation considérées pour l'analyse d'impact sur la gestion sont indiquées en grisé (chaînes utilisées pour la simuler la gestion de SP avec le modèle AC seul (ligne DMIEH5C-1), avec modèle AC, AIP et AIC (colonne analog20)).

Acronym	dsclim10	dsclim11	dsclim21	d2gen10	d2gen22	d2gen32	analog20
CNCM33_1	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I
DMIEH5C_1	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I
DMIEH5C_2	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I
DMIEH5C_3	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I
EGMAM2_3	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I
MPEH5C_1	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I
MPEH5C_2	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I
MPEH5C_3	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I
IPCM4v2_1	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	-
IPCM4v2_2	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	-
IPCM4v2_3	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	C, M, I	-
HADGEM2_1	C, M, I	C, M, I	-	-	-	-	-

Périodes simulées et changements considérés

Les scénarios météorologiques et hydrologiques ont été simulés au pas de temps journalier (infra-journalier pour le modèle Isba-Durance) sur l'ensemble de la période couverte par les GCM à savoir la période 1860-2099 (période CTL+période FUT). La gestion de SP a aussi été simulée avec le modèle de gestion en avenir certain (modèle AC) sur l'ensemble de cette période pour le sous-ensemble de chaînes GCM/MDES/Cequeau précisées dans le tableau 1 et à la section 4.3.

Pour les différentes variables d'intérêt, l'analyse des changements a été réalisée en considérant les 3 fenêtres temporelles suivantes :

- la période 1970-1999 (Période P_0), utilisée ici comme référence,
- 2 périodes futures, la période 2036-2065 (Période P_1) et la période 2070-2099 (Période P_2).

L'évolution des variables d'intérêt sur les 240 années disponibles a aussi été analysée pour estimer la significativité des changements estimés.

Disponibilité des scénarios

L'ensemble de ces scénarios a été mis à disposition de la communauté scientifique et des impacteurs sur le site ftp du projet. La façon de les utiliser pour les études d'impact est décrite dans l'annexe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

4.2. Impact sur le climat régional et l'hydrologie de la Durance

Impact sur le climat régional et incertitudes

L'application des MDES pour chacun des GCM a permis de fournir des projections de différentes variables météorologiques à l'échelle du bassin de la Durance supérieure et de ses sous-bassins. Une description détaillée des résultats obtenus est donnée dans (Lafaysse, 2011; Lafaysse et al., 2013). Seuls quelques résultats emblématiques sont présentés ici. Ils concernent les deux variables principales pour l'impact sur l'hydrologie régionale, les précipitations et les températures.

Le Tableau 5 synthétise les changements de température obtenus pour les différentes chaînes DMIEH5C-1/MDES et les différentes chaînes GCM/analog20 considérées dans le projet. La Figure 31 présente l'évolution des températures simulée sur la période 1860-2099 pour ces chaînes. Chaque courbe représente la médiane des 100 réalisations stochastiques obtenue pour la chaîne GCM/MDES

considérée. Les changements de températures attendus pour une période future donnée sont relativement variables d'une chaîne de simulation à l'autre. Les incertitudes sur les projections futures sont essentiellement portées par les GCM. Les incertitudes liées aux MDES ne sont toutefois pas négligeables du fait des prédictors différents utilisés par les MDES pour faire les estimations futures associées. La dispersion inter-scenarios des changements estimés entre P0 et P2 est de 2°C lorsque le MDES est fixé, il est de 1°C lorsque le GCM est fixé.

Le Tableau 6 synthétise les changements de précipitation obtenus pour les différentes chaînes DMIEH5C-1/MDES, respectivement GCM/analog20. La Figure 32 présente les changements de précipitations hivernales simulés pour le haut bassin de la Durance entre les périodes 2080-2099 et 1980-1999. Les résultats sont ceux obtenus pour les 12 GCM et les différentes versions des 3 MDES considérés ici. Chaque courbe correspond à la distribution des changements de précipitation obtenus pour 100 scénarios météorologiques (les réalisations) produits avec une combinaison GCM/MDES particulière. Chaque graphe correspond aux résultats obtenus avec un MDES donné. Les différentes courbes d'un même graphe correspondent aux résultats obtenus lorsqu'un MDES est forcé par différents GCM. Cette figure montre que les **changements de précipitations hivernales** simulés pour ce bassin sont **particulièrement dispersés** : de -40% à +60% selon les scénarios et modèles. Il en est de même pour les autres saisons.

Pour les précipitations, la dispersion inter-GCM à MDES fixé est très importante. Elle est en partie liée à la dispersion inter-GCM des modifications de la fréquence d'occurrence de certains types de temps (Lafaysse, 2011). L'incertitude dans l'évolution de ces circulations atmosphériques est fortement influencée par la variabilité naturelle et chaotique du climat. En effet, la dispersion entre les différents runs d'un même GCM est du même ordre de grandeur que la dispersion entre les différents GCM. Le choix de la méthode de descente d'échelle s'avère être aussi un facteur très significatif des changements simulés. L'inclusion de prédictors thermodynamiques par exemple (température ou humidité) conduit à simuler des précipitations plus élevées dans le futur que si ces prédictors sont exclus. Une telle sensibilité est évidemment problématique et plaide pour une meilleure compréhension des processus responsables de la variabilité des variables météorologiques d'intérêt. Par ailleurs, une incertitude non négligeable dans les changements simulés est également portée par le caractère stochastique des algorithmes de descente d'échelle. Elle justifie la génération multiple de scénarios météorologiques et hydrologiques, même si cette source d'incertitude est moins forte que celle associée au modèle de descente d'échelle lui-même ou aux variables explicatives choisies.

Tableau 5. Changements de températures saisonnières pour le bassin de la Durance à SP. Changements estimés pour les différentes chaînes GCM/Analog20 et pour les différentes chaînes DMIEH5C-1/MDES entre les périodes P0-P1, et les périodes P0-P2 (extrait de (François, 2013)).

	1970-1990					2036-2065					2070-2099				
	DJF	MAM	JJA	SON	AN	DJF	MAM	JJA	SON	AN	DJF	MAM	JJA	SON	AN
Obs	-3	2.3	11.6	4.9	4										
CNCM33-1	-2.7	2.7	11.9	5.1	4.3	+0.9	+1.4	+2.9	+1.9	+1.7	+1.5	+2.2	+4.2	+2.7	+2.6
DMIEH5C-1	-3.1	2.5	11.7	4.8	4	+1.4	+1	+2.3	+2	+1.7	+3.3	+2.9	+4.9	+4	+3.8
DMIEH5C-2	-3	2.5	11.9	5	4.1	+0.9	+1.3	+2.2	+1.8	+1.6	+2.7	+2.7	+4.4	+3.7	+3.4
DMIEH5C-3	-2.8	2.6	11.8	5	4.2	+1.1	+1.4	+2.3	+1.4	+1.5	+2.5	+2.3	+4.2	+3.8	+3.2
MPEH5C-1	-3	2.4	11.9	5	4.1	+1.8	+1.4	+2.3	+2	+1.9	+3.1	+2.5	+4.6	+3.5	+3.4
EGMAM2-3	-2.7	2.8	12	5.2	4.3	+1.1	+1.1	+1.6	+1.6	+1.4	+2.2	+1.5	+2.3	+2.3	+2.1
ΔT_{GCMs}	0.4	0.4	0.3	0.4	0.3	0.9	0.4	1.3	0.6	0.5	1.8	1.4	2.6	1.7	1.7

Moyennes saisonnières et annuelles des températures observées et simulées par les chaînes GCM/Analog20 durant la période 1970-1999 et variation absolue des températures saisonnières et annuelles simulées sur les périodes 2036-2065 et 2070-2099 ($^{\circ}C$). Les températures et les dispersions saisonnières et annuelles, inter-GCMs (ΔT_{GCMs}) sont données en $^{\circ}C$

	1970-1990					2036-2065					2070-2099				
	DJF	MAM	JJA	SON	AN	DJF	MAM	JJA	SON	AN	DJF	MAM	JJA	SON	AN
Obs	-3	2.3	11.6	4.9	4										
Dsclim10	-3.1	2.7	11.7	4.9	4	+1	+1	+2.1	+1.7	+1.5	+2.9	+2.8	+4.6	+3.8	+3.5
Dsclim21	-2.9	2.7	11.7	4.7	4	+1.5	+1.5	+2.7	+2.5	+2	+3.7	+3.6	+5.3	+4.9	+4.4
Analog20	-3.1	2.5	11.7	4.8	4	+1.4	+1	+2.3	+2	+1.7	+3.3	+2.9	+4.9	+4	+3.8
D2gen10	-2.8	2.6	11.7	5	4.3	+1.1	+0.8	+2.2	+1.8	+1.5	+2.9	+2.8	+4.5	+3.8	+3.5
D2gen22	-2.8	2.6	12	5	4.3	+1.1	+0.8	+2.1	+1.8	+1.5	+2.9	+2.7	+4.5	+3.8	+3.5
D2gen32	-2.8	2.6	12	5	4.3	+1.1	+0.8	+2.1	+1.8	+1.5	+2.9	+2.7	+4.5	+3.8	+3.5
ΔT_{MDES}	0.3	0.1	0.3	0.3	0.3	0.4	0.7	0.6	0.8	0.5	0.8	0.9	0.8	1.1	0.9

Moyennes saisonnières et annuelles des températures observées et simulées par les chaînes DMIEH5C-1/MDES durant la période 1970-1999 et variation absolue des températures saisonnières et annuelles simulées sur les périodes 2036-2065 et 2070-2099 ($^{\circ}C$). Les températures et les dispersions saisonnières et annuelles, inter-MDES (ΔT_{MDES}) sont données en $^{\circ}C$

Tableau 6. Changements de précipitations saisonnières pour le bassin de la Durance à SP. Changements estimés pour les différentes chaînes GCM/Analog20 et pour les différentes chaînes DMIEH5C-1/MDES entre les périodes P0-P1, et les périodes P0-P2 (extrait de (François, 2013)).

	1970-1990					2036-2065					2070-2099				
	DJF	MAM	JJA	SON	AN	DJF	MAM	JJA	SON	AN	DJF	MAM	JJA	SON	AN
Obs	3.6	3.3	2.9	3.8	3.4										
CNCM33-1	3.6	3.3	2.7	3.7	3.3	+5.3%	-8.4%	-11.7%	-19.5%	-8%	+9.1%	-16.7%	-11.2%	-8.9%	-7%
DMIEH5C-1	3.6	3.6	2.8	3.9	3.5	+6.2%	0%	-8.1%	-7.6%	-2%	+16.3%	-13.3%	-11.1%	-2.7%	-2%
DMIEH5C-2	3.3	3.4	2.7	4	3.4	+4.1%	-3.5%	+0.3%	-18.3%	-5%	+10.7%	-5.4%	-5.2%	-26.4%	-8%
DMIEH5C-3	3.7	3.5	2.8	3.8	3.5	-10.1%	-3.2%	-6.3%	+1.4%	-4%	+5%	-5.4%	-10.8%	-4.8%	-4%
MPEH5C-1	3.6	3.5	2.8	4	3.5	-2.8%	-4.7%	-7.7%	-9.5%	-6%	+3.8%	-4.6%	-13.2%	-9.7%	-6%
EGMAM2-3	4	3.5	2.9	4.3	3.7	+2.8%	-0.7%	-8.9%	-6.4%	-3	+1.5%	+2.3%	-14.4%	-13%	-6%

7.4 – Moyennes saisonnières et annuelles des précipitations de bassin sur la Durance amont (Surface BV = 3584km²) observées et simulées par les chaînes GCM/Analog20 durant la période 1970-1999 et variation relative des précipitations de bassin saisonnières et annuelles simulées sur les périodes 2036-2065 et 2070-2099. Les précipitations de bassin sont données en mm.j⁻¹.

	1970-1990					2036-2065					2070-2099				
	DJF	MAM	JJA	SON	AN	DJF	MAM	JJA	SON	AN	DJF	MAM	JJA	SON	AN
Obs	3.6	3.3	2.9	3.8	3.4										
bsclim10	3.1	3.1	3	4	3.3	-0.5%	-8%	-0.4%	-4.4%	-3%	+6.7%	-24.1%	+5%	-2.8%	-4%
bsclim21	3.3	3	3	3.8	3.2	+8.2%	+3.4%	-15.9%	-6%	-3%	+14.3%	-11.1%	-12.1%	-2.1%	-3%
analog20	3.6	3.6	2.8	3.9	3.5	+6.2%	0%	-8.1%	-7.6%	-2%	+16.3%	-13.3%	-11.1%	-2.7%	-2%
2gen10	3.3	3.2	2.8	4.2	3.4	+4.5%	0%	+6%	-5%	+1%	+16.9%	-13.3%	+16.8%	+7.7%	+7%
2gen22	3.2	3.1	2.6	4	3.3	+12.3%	+3.8%	+4%	+0.2%	+5%	+42%	-9.8%	+13%	+12.2%	+15%
2gen32	3.5	3	2.5	3.8	3.2	+12.1%	+6%	+1.5%	-2.4%	+4%	+48.7%	-8.7%	+5%	+17%	+17%

7.5 – Moyennes saisonnières et annuelles des précipitations de bassin sur la Durance amont (Surface BV = 3584km²) observées et simulées par les chaînes DMIEH5C-1/MDES durant la période 1970-1999 et variation relative des précipitations de bassin saisonnières et annuelles simulées sur les périodes 2036-2065 et 2070-2099. Les précipitations de bassin sont données en mm.j⁻¹.

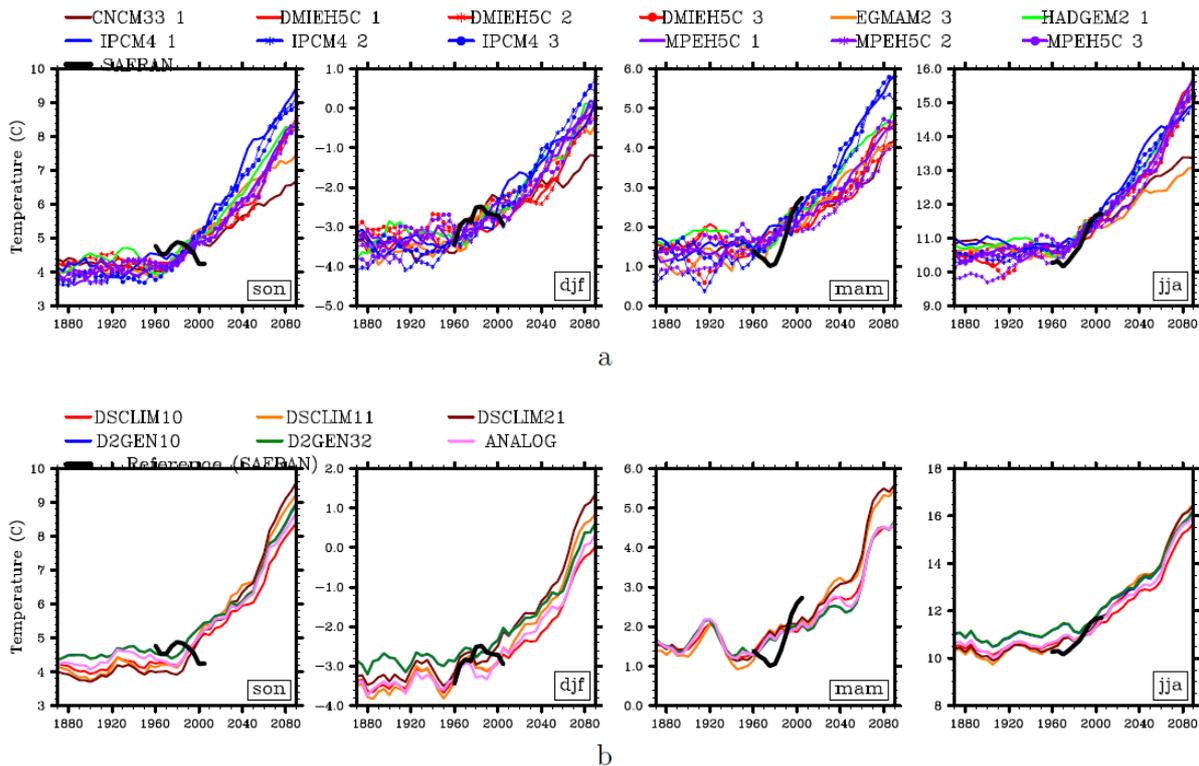


Figure 31 : Evolution temporelle sur la période 1860-2100 des températures interannuelles moyennes sur une fenêtre mobile de 20 ans pour a : scénarios médian des 100 réalisations du MDES dsclim10 pour les 12 GCM du projet ENSEMBLES, b : scénarios médians des 6 MDES forcés avec le GCM DMIEH5C-1 GCM ; 4 saisons : son, djf, mam, jja. Scénario d'émission A1B. Publication : Lafaysse et al. 2012.

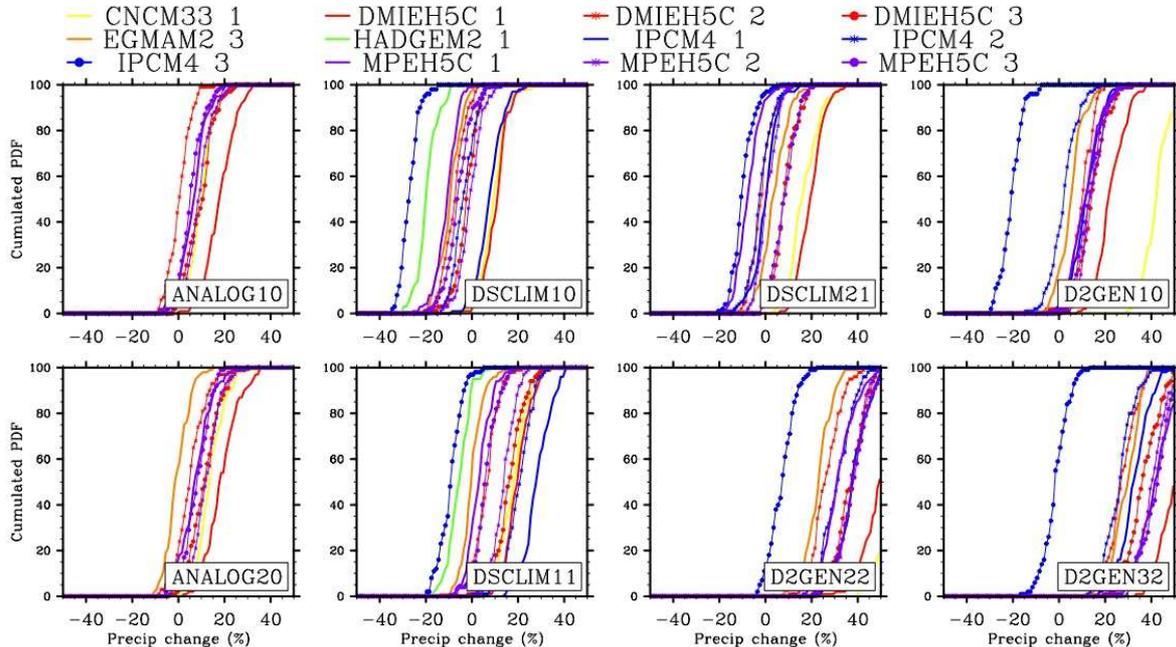


Figure 32 : Changement de précipitations hivernales (%) entre la période de contrôle (1980-1999) et la période future (2080-2099) pour 12 GCM du projet ENSEMBLES et plusieurs versions de 3 MDES (scénario de GES A1B). (in Lafaysse et al. 2012).

Une quantification plus précise de la part d'incertitude propre aux GCM et de la part propre aux MDES peut être appréhendée par une analyse de variance. Toutefois, les conclusions sont fortement influencées par la sélection du groupe de GCM et de MDES considérés. Dans notre cas, les incertitudes associées aux choix du GCM ou au choix du MDES semblent être, pour les précipitations, du même ordre de grandeur.

Classiquement, l'incertitude associée au choix du MDES est dite négligeable devant celle associée au choix du GCM. Les résultats obtenus pour le haut bassin de la Durance montrent qu'en réalité les incertitudes associées au choix du GCM, au choix d'un run particulier d'un GCM, ou au choix du MDES peuvent être, selon les variables météorologiques considérées, comparables. Les changements peuvent être aussi très différents pour différentes versions d'un même MDES. Ce travail met donc en évidence que les études d'impact du changement climatique basées sur un seul run d'un seul GCM, et/ou sur un seul MDES ou sur une seule réalisation d'une même chaîne GCM/MDES peuvent fortement sous-échantillonner l'incertitude sur les projections réalisées. L'approche multi-modèles et multi-réalisations est donc à recommander. Toutefois, l'utilisation de nombreux scénarios peut vite devenir rédhibitoire (temps de calcul) lors de leur exploitation dans des modèles d'impacts, comme les modèles de gestion développés dans le cadre de ce projet. Des stratégies de réduction du nombre de scénarios peuvent s'avérer nécessaires comme présenté plus loin dans la section (4.3) et détaillé dans l'annexe A5.

Impact sur l'hydrologie de la Durance et incertitudes

En cohérence avec les résultats de diverses autres études effectuées sur divers autres bassins alpins (e.g. (Etchevers et al., 2002; Zierl and Bugmann, 2005; Horton et al., 2006)), les impacts attendus sur le régime hydrologique de la Durance devraient d'abord se manifester par une diminution importante de la saisonnalité des débits avec notamment un avancement du début de la période de fonte de neige, une arrivée précoce de l'onde de fusion, une atténuation de son amplitude et une augmentation des débits d'étiage en hiver. Ceci résulte principalement d'une diminution de la part des précipitations tombant sous forme solide (Figure 32) et d'une modification de la dynamique des stockages saisonniers sur les bassins (manteau neigeux) avec notamment un raccourcissement de la période d'accumulation et une diminution de la quantité de neige accumulée chaque hiver (Lafaysse et al., 2013).

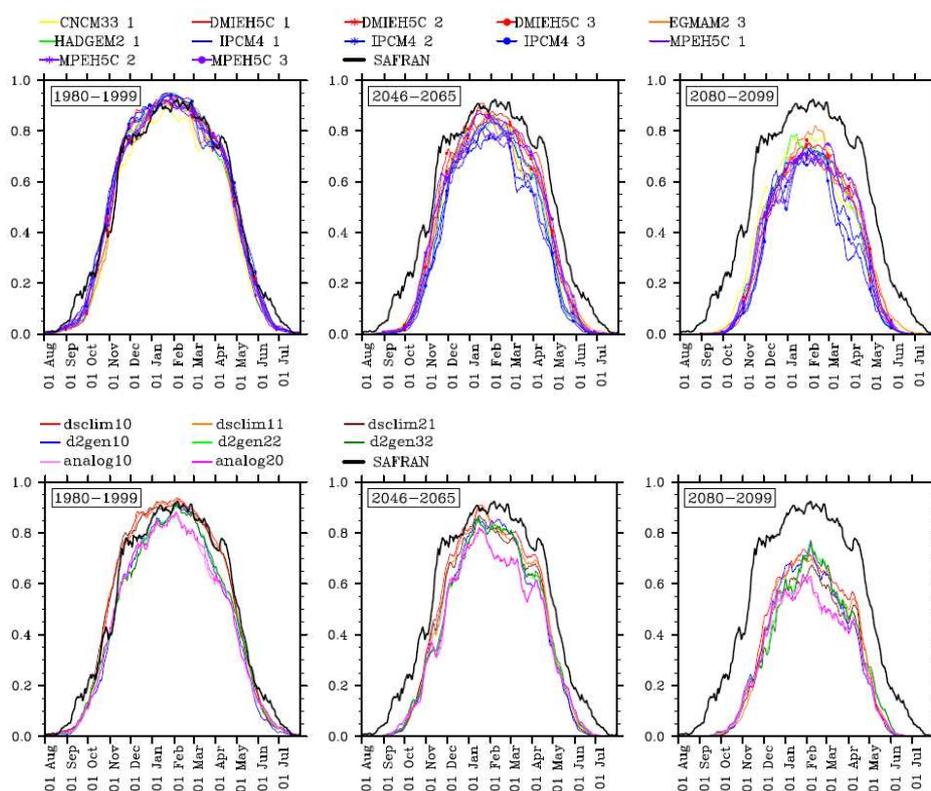


Figure 33 : Cycle saisonnier des ratios neige/précipitations simulés à Serre-Ponçon par Isba-Durance pour les 3 périodes 1980-1999, 2046-2065, 2080-2099. En haut : tous les MDES (différentes courbes), forcés par le GCM DMIEH5C-1. En bas : dsclim10 forcé par chacun des GCM. Courbe noire : référence = cycle simulé avec la météo observées sur la période 1980-1999.

L'amplitude des changements est cependant très incertaine comme l'illustre la variabilité des régimes hydrologiques futurs présentés sur la Figure 34 pour les différents modèles hydrologiques et les différentes chaînes DMIEH5C-1/MDES et GCM/dsclim10.

La dispersion des changements attendus sur les pertes par évaporation est très forte (de -10 à +40%) (Figure 35). Elle est principalement influencée par celle relative aux changements de température induits par les GCM. Les augmentations les plus fortes sont obtenues pour les modèles présentant le réchauffement le plus important (e.g. IPCMv4). La dispersion sur les projections est aussi très dépendante du modèle hydrologique par le fait qu'ils représentent ces pertes de façons très différentes. Pour les modèles Cequeau et Mordor, les pertes par évaporation sont obtenues sur la base d'une évapotranspiration potentielle estimée par ailleurs à partir des températures. Pour Isba-Durance, elles sont estimées par bilan d'énergie pour différents types de surface. Les différences les plus flagrantes sont obtenues lorsque les MDES sont forcés avec CNCM33 qui réchauffe clairement moins que les autres GCM (et qui combine la baisse de précipitations la plus forte) : Les changements sont très modérés avec le modèle Isba-Durance ; une baisse des pertes est obtenue avec les 2 autres modèles hydrologiques.

Les débits annuels résultent du bilan entre précipitations et pertes par évaporation annuelles. Leur dispersion est de fait plus importante que celle associée aux seules précipitations ou aux seules pertes par évaporation. Le signe même du changement des débits interannuels moyens est incertain même si la majorité des projections suggèrent une diminution de ces derniers (Figure 36). Le signe du changement dépend principalement de la chaîne GCM/MDES considérée. Pour une même chaîne GCM/MDES, il peut être différent selon le run GCM considéré (e.g. runs MPEH5C-1 / 2 / 3). Pour certaines chaînes GCM/MDES/MH, il peut être aussi soit positif, soit négatif suivant la réalisation stochastique considérée.

Les incertitudes liées aux GCM et aux MDES sont évidemment à l'image de celles obtenues pour les variables météorologiques de forçage. Celles liées au modèle hydrologique semblent être plus modérées que celles liées aux GCM et aux MDES. Elles sont cependant non négligeables comme l'illustrent les graphiques de la Figure 34.

La dispersion inter-MDES ou inter-MH peut s'avérer particulièrement importante pour certaines variables hydrométéorologiques. C'est par exemple le cas pour la distribution statistique du débit d'étiage caractéristique VCN30 tel qu'illustré pour la période P2 sur la Figure 30. C'est aussi le cas de la dispersion inter-MDES pour les débits obtenus pendant la période automnale, résultant principalement de crues pluviales (Figure 34) ou de la dispersion inter-MH pour les débits saisonniers obtenus à l'automne et au printemps en particulier (Figure 41).

Différents autres résultats obtenus pour les projections futures des variables météorologiques et hydrologiques sont présentés dans l'annexe A7. Une analyse quantitative de la contribution des différentes sources d'incertitude à l'incertitude globale est présentée dans l'annexe A8.

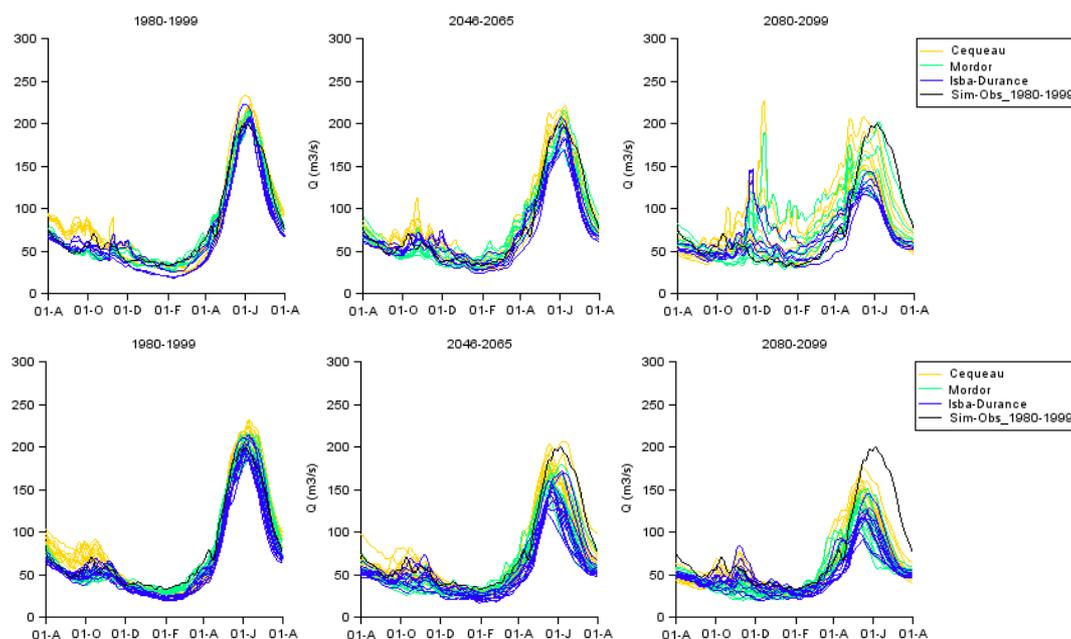


Figure 34. Cycle annuel des débits quotidiens à Serre-Ponçon obtenus avec les modèles hydrologiques Cequeau, Mordor et Isba-Durance pour les périodes 1980-1999, 2046-2065 et 2080-2099. En haut : le modèle hydrologique est forcé par les sorties des différents MDES (différentes courbes), eux-mêmes forcés par le GCM DMIEH5C-1. En bas : les différentes courbes correspondent aux scénarios générés avec le MDES

dsclim10 lui-même forcé par chacun des GCM (les différentes courbes). En noir : cycle simulé avec MORDOR sur la base de la météorologie observée sur la période 1980-1999.

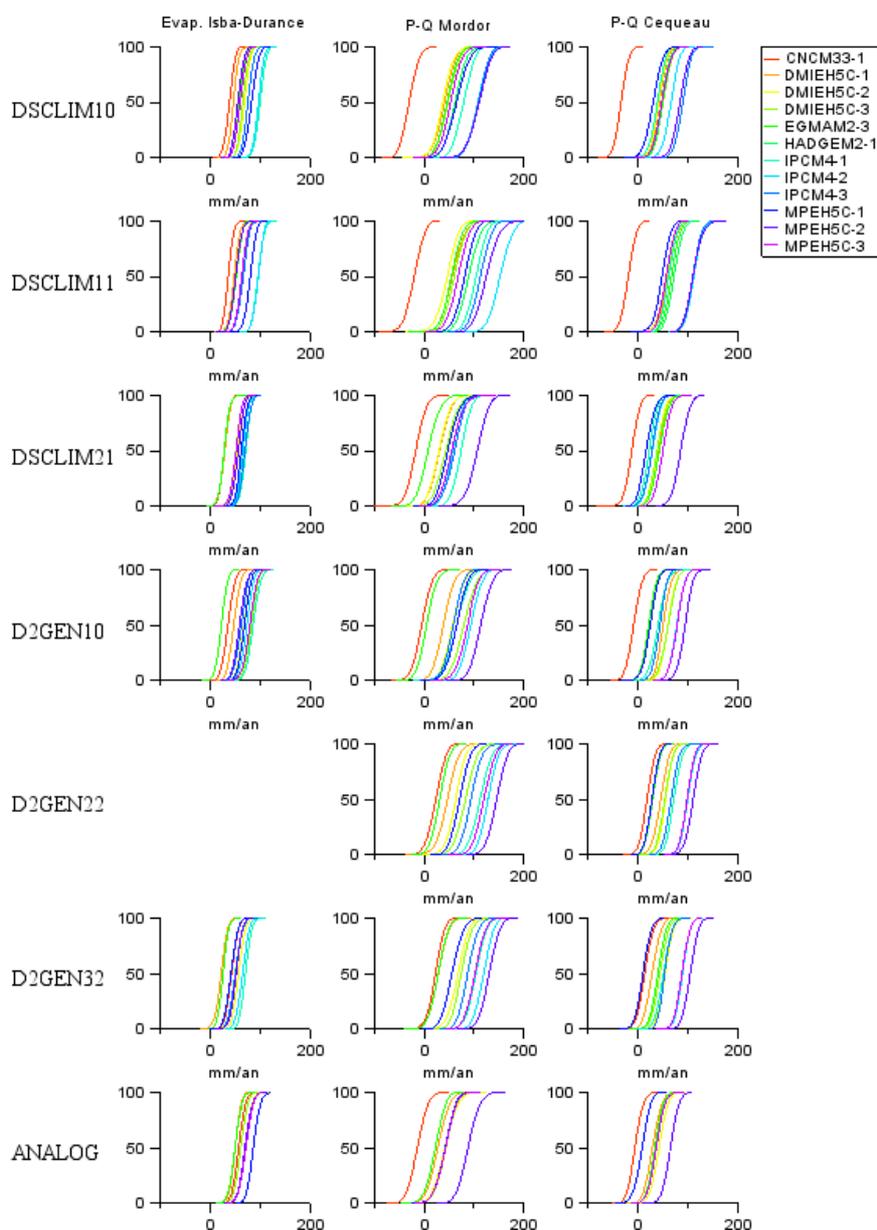


Figure 35. Changements entre 1980-1999 et 2046-2065 pour les pertes évaporatives. Pertes estimées par la variable Evap dans le modèle Isba-Durance et par la différence entre les précipitations moyennes et la lame d'eau à l'exutoire pour les modèle Mordor et Cequeau.

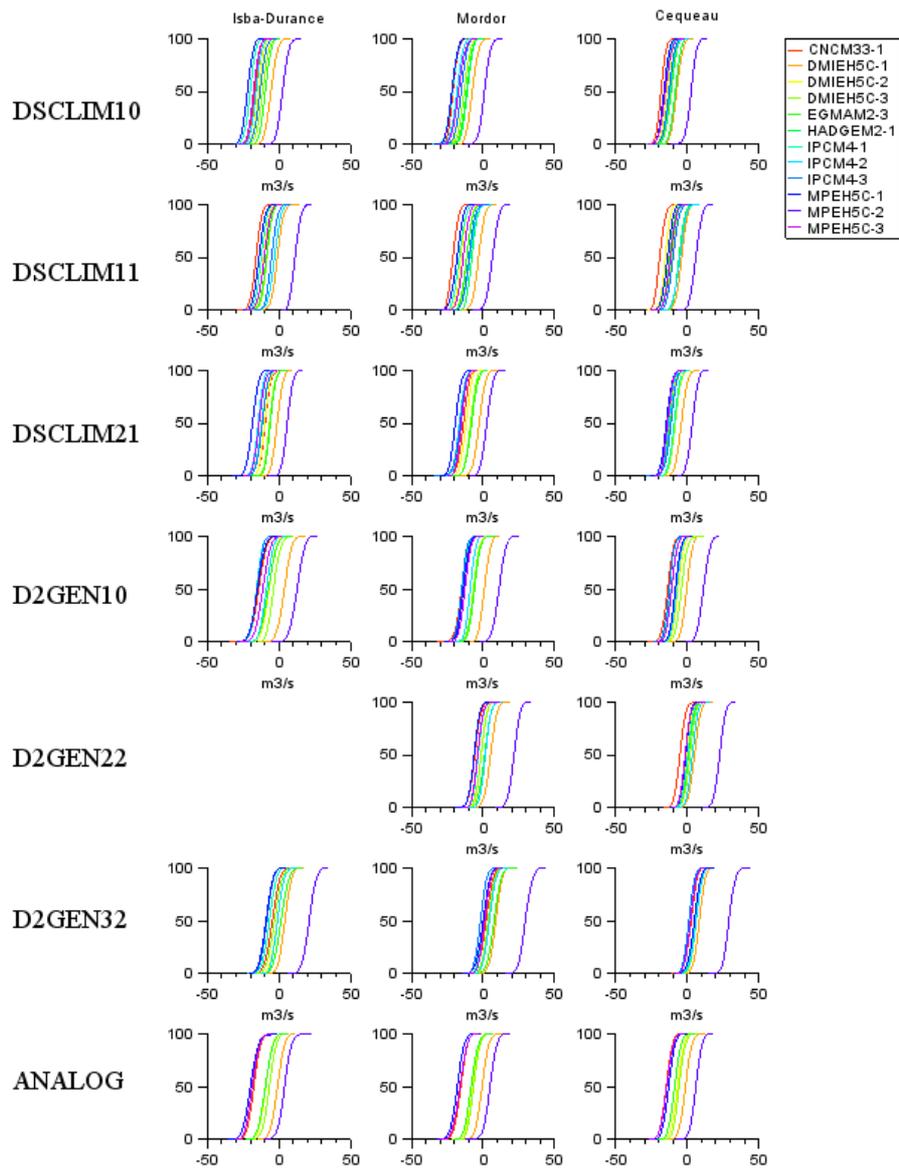


Figure 36. Changements entre 1980-1999 et 2046-2065 pour les débits interannuels moyens (modèles Isba-Durance, Mordor, Cequeau)

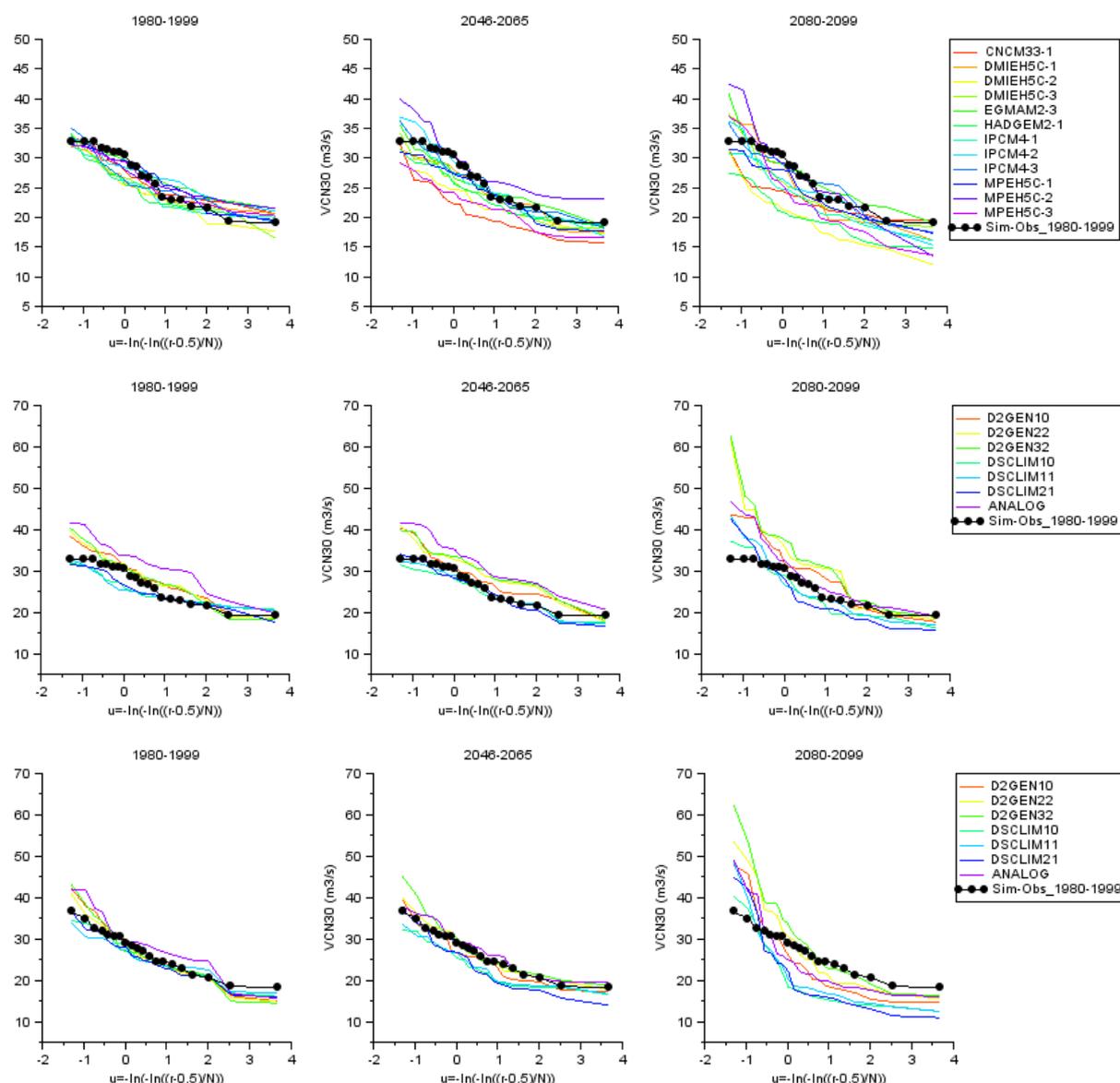


Figure 37. Distribution de la variable VCN30 annuelle sur les périodes 1980-1999, 2046-2065 et 2080-2099 en considérant les chaînes GCM/dsclim10/Cequeau (haut) ; DMIEH5C-1/MDES/Cequeau (milieu) ; DMIEH5C-1/MDES/Mordor (bas).

Significativité des changements :

La **significativité des changements** a été évaluée, pour différentes variables météorologiques et hydrologiques, au regard de la variabilité interne des modèles climatiques.

Nous avons évalué la variabilité interne de chacun des 12 GCM sur la base, d'une part, des sorties de modèles obtenues sur une longue période de contrôle (ici, les 140 ans couvrant la période 1860-1999) et, d'autre part, de plusieurs runs d'un même GCM lorsque plusieurs runs étaient disponibles. La variabilité intrinsèque liée aux GCM peut s'avérer particulièrement importante selon les variables météorologiques considérées, oblitérant du même coup la significativité des changements obtenus par ailleurs entre la période usuelle de référence (1960-1990) et la période future considérée.

A titre d'exemple, on obtient, pour le bassin versant de la haute Durance, une significativité faible voire nulle pour les changements de précipitation à l'horizon 2050 ou 2100. C'est ce qui est illustré sur les graphiques de la Figure 38. La significativité des changements de débits moyens annuels est très variable suivant la chaîne GCM/MDES/MH considérée comme l'illustrent les graphiques des Figure 39 et Figure 40.

En revanche, les changements projetés d'enneigement et de saisonnalité des débits, associés à la diminution du ratio neige/pluie, sont significatifs pour toutes les combinaisons de GCM/MDES/MH, malgré les fortes incertitudes sur les changements de précipitations totales et les différences marquées obtenues sur l'intensité de ces changements qui dépendent fortement du modèle hydrologique. Ceci est illustré sur les graphiques de la Figure 41.

Une analyse quantitative de la significativité des changements a été proposée chaîne par chaîne par (Lafaysse, 2011). Evaluer la significativité des changements au regard des projections obtenues pour l'ensemble des chaînes de simulation aurait été évidemment idéal. Le cadre d'analyse nécessaire pour cette évaluation fait cependant actuellement défaut, notamment pour la prise en compte de la variabilité intrinsèque des projections liées aux GCM. Une telle analyse dépassait par ailleurs le cadre du projet.

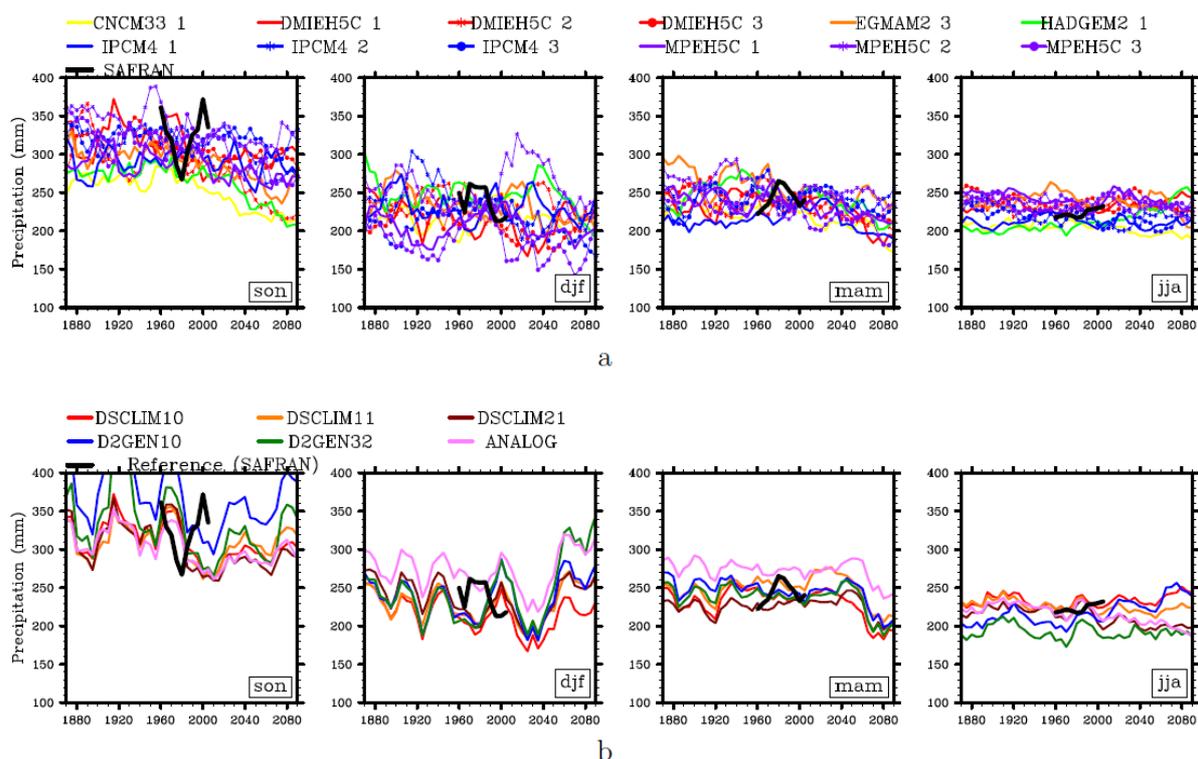


Figure 38 : Evolution temporelle sur la période 1860-2100 des précipitations interannuelles moyennes sur une fenêtre mobile de 20 ans pour a: scénarios médians des 100 réalisations du MDES dsclim10 pour les 12 GCM du projet ENSEMBLES, b : scénarios médians des 6 MDES forcés avec le GCM DMIEH5C-1 GCM ; 4 saisons : son, djf, mam, jja. Scénario d'émission A1B. Publication : Lafaysse et al. 2012.

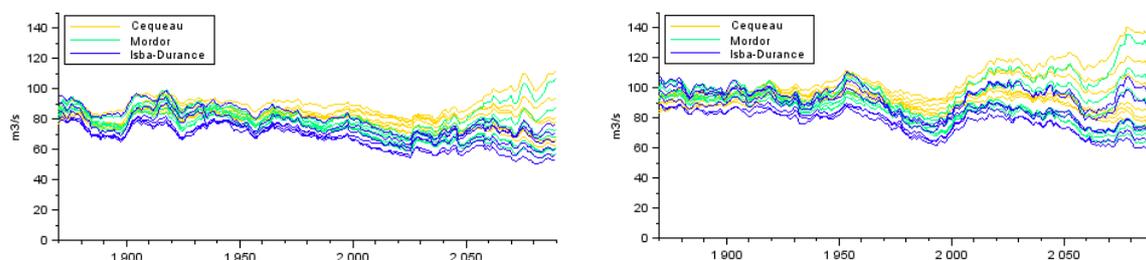


Figure 39. Evolution temporelle des débits moyens annuels en fenêtre mobile de 20 ans en considérant le GCM DMIEH5C-1 (gauche) et le GCM MPEH5C-2 (droite), toutes les descentes d'échelle et les modèles hydrologiques Cequeau, Mordor, ou Isba-Durance.

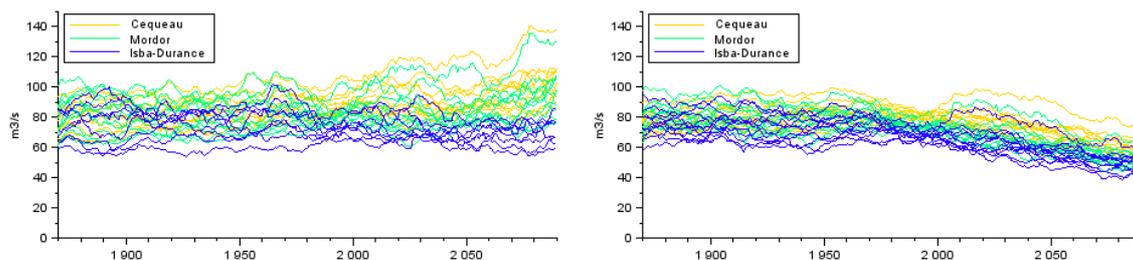


Figure 40. Evolution temporelle des débits moyens annuels en fenêtre mobile de 20 ans en considérant tous les GCM, la descente d'échelle D2GEN32 (gauche) et DSCLIM10 (droite) et les modèles hydrologiques Cequeau, Mordor ou Isba-Durance.

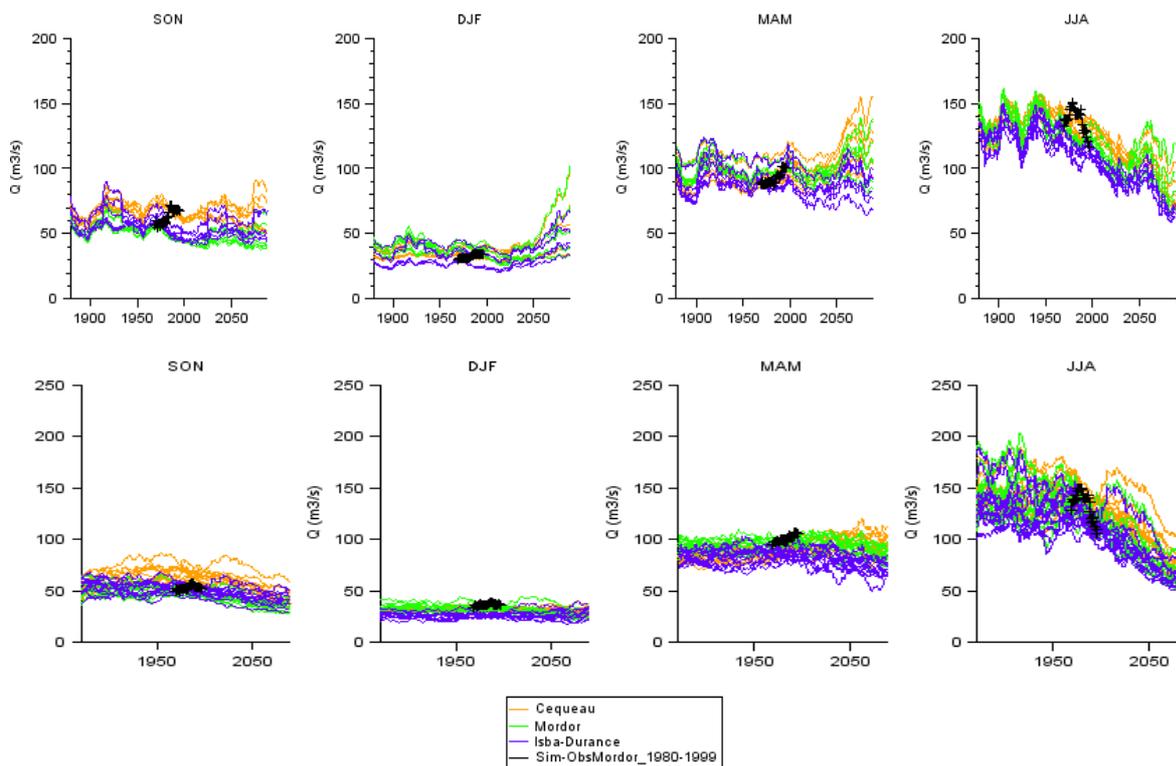


Figure 41. Evolution temporelle des débits saisonniers interannuels moyens sur les périodes 1980-1999, 2046-2065 et 2080-2099 en considérant en haut : le GCM DMIEH5C-1, toutes les descentes d'échelle ; en bas : le MDES dsclim10 forcé par tous les GCM pour les modèles hydrologiques Cequeau, Mordor et Isba-Durance.

Les résultats présentés montrent que l'approche multi-modèles / multi-runs et multi-réalisations est incontournable afin de pouvoir prendre en compte les incertitudes associées, d'une part, aux erreurs de modélisation (GCM et descente d'échelle et modélisation hydrologique) et, d'autre part, à la variabilité naturelle et chaotique du climat. La dispersion résultant de l'ensemble des scénarios hydrologiques simulés sur le bassin de la Durance est dans le cas présent particulièrement importante. L'évolution des débits globaux est par conséquent très incertaine. Cependant, la forte réduction de l'enneigement associée au réchauffement simulé par tous les GCM pris en compte permet dans le cas particulier de ce bassin à forte composante nivale d'obtenir un signal robuste d'évolution de la saisonnalité des débits.

4.3. Impact sur la performance du système de gestion de Serre-Ponçon

Analyses effectuées et scénarios considérés

Les Modèles de Gestion utilisés pour simuler la gestion de SP sont très coûteux en temps de calcul. Pour l'analyse d'impact sur la performance du système de gestion de SP, nous avons considéré un sous-ensemble des scénarios hydrologiques obtenus dans l'étape précédente afin d'explorer les deux

catégories d'incertitudes suivantes:

- Les incertitudes liées à la génération des scénarios de forçages météorologiques
- Les incertitudes liées à la représentation de la stratégie de gestion du système de Serre-Ponçon

Pour les premières, seuls les scénarios hydrologiques obtenus avec le modèle Cequeau ont été considérés. Par ailleurs, la gestion a été simulée avec le seul modèle de gestion en avenir certain, beaucoup moins coûteux en temps de calcul que les autres MG. Les chaînes GCM/MDES retenues pour cette analyse se décomposent en deux sous-ensembles permettant d'évaluer de façon séparée 1) l'incertitude liée au GCM (tous les GCMs ont été descendus en échelle par le MDES Analog20 (chaînes de simulation GCM/Analog20)) et 2) l'incertitude liée aux MDES, (tous les MDES ont été utilisés pour descendre en échelle la simulation GCM DMIEH5C-1 (chaînes de simulation DMIEH5C-1/MDES)).

Pour l'analyse des incertitudes liées à la représentation de la stratégie de gestion de Serre-Ponçon, nous avons considéré les trois modèles de gestion présentés dans la section 2.6 (p.17), qui sont pour mémoire, les modèles AC, AIP, AIC, basés sur différents degrés de prévisibilité des variables d'intérêt à la gestion. L'analyse de cette source d'incertitude a été réalisée en ne considérant que les scénarios de forçages météorologiques issus de l'expérience 1.

Toujours dans le souci d'avoir des temps de calcul réduits, seule une partie des 100 réalisations stochastiques disponibles pour chaque chaîne de simulation GCM/MDES a été considérée. Une analyse préliminaire, basée sur la stabilisation des signatures de gestion et des critères de performance considérés, nous a montré qu'un sous-échantillonnage de 30 réalisations permettait d'avoir une évaluation à la fois robuste de l'impact cherché et représentative de l'évaluation qui aurait pu être réalisée sur la base des 100 réalisations initiales (voir annexe A5). Les résultats présentés et discutés par la suite ont été établis sur la base de 30 réalisations MDES pour chaque période.

Incertainces liées aux scénarios météorologiques : contributions des GCM / des MDES

Les incertitudes sur les projections de changements de températures et surtout des précipitations sont importantes. Celles liées en particulier au MDES ne peuvent en particulier pas être négligées devant celles liées aux GCM. Ces incertitudes se propagent par la suite en aval des MDES, sur les sorties des modèles de contraintes et d'usages. Ceci a été illustré dans la section précédente pour les projections d'apports à la retenue de Serre-Ponçon. Ceci est illustré aussi sur la Figure 42 pour les cycles saisonniers des débits de dotation simulés à fournir en aval de Serre-Ponçon et sur la Figure 43 pour les cycles saisonniers de demande électrique. De nouveau, la dispersion inter-MDES pour ces différentes variables est non négligeable et du même ordre de grandeur que la dispersion inter-GCM.

En climat futur, quelle que soit la chaîne de simulation considérée, le débit de dotation est amené à augmenter (Figure 42). Cette augmentation résulte à la fois de l'augmentation de la demande en eau des cultures (du fait de l'augmentation de la demande évaporative), et de la diminution des apports en provenance des bassins versants situés entre la retenue de Serre-Ponçon et Cadarache.

Egalement, l'indicateur d'intérêt à produire de l'hydroélectricité, exprimé ici via des sorties du modèle de consommation électriques (Figure 43), diminue en climat futur. Cette baisse de l'intérêt à produire de l'hydroélectricité résulte de l'augmentation des températures. En particulier, la durée de la période durant laquelle l'intérêt à produire de l'énergie est constant (i.e. indépendant de la température) augmente fortement.

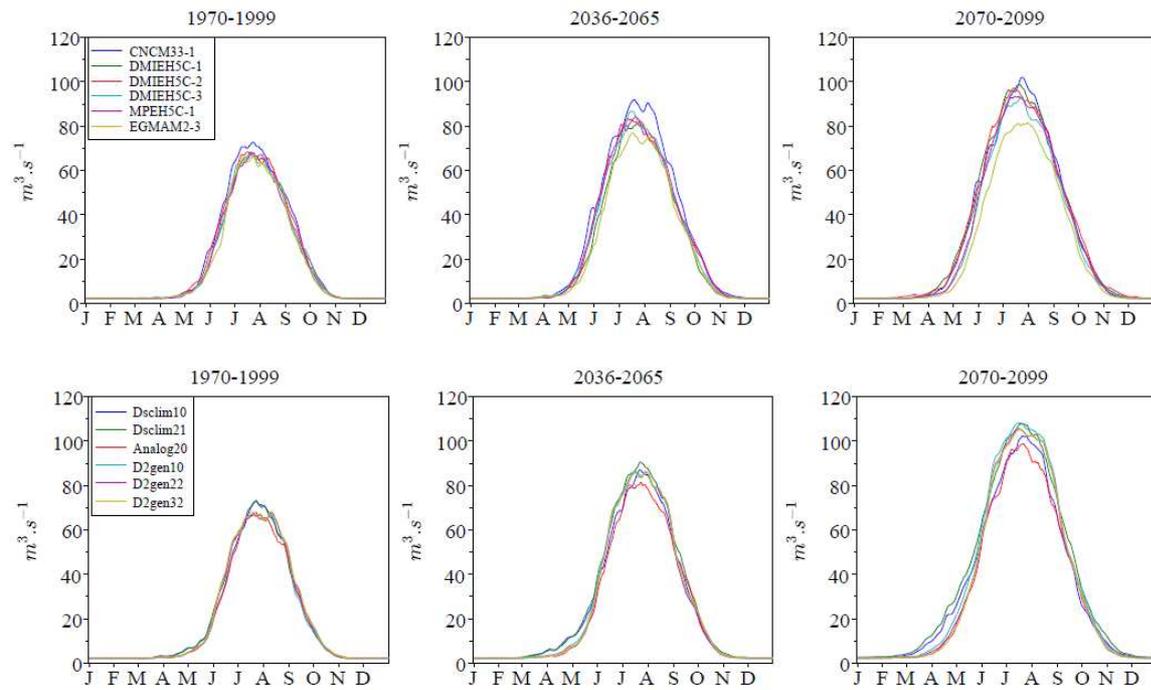


Figure 42 : Cycles saisonniers des débits de dotation simulés à fournir en aval de Serre-Ponçon sur les périodes P₀, P₁ et P₂, obtenus pour les chaînes haut : GCM/Analog20 ; bas : DMIEH5C-1/MDES. Les cycles ont été lissés sur 7 jours (extrait de (François, 2013)).

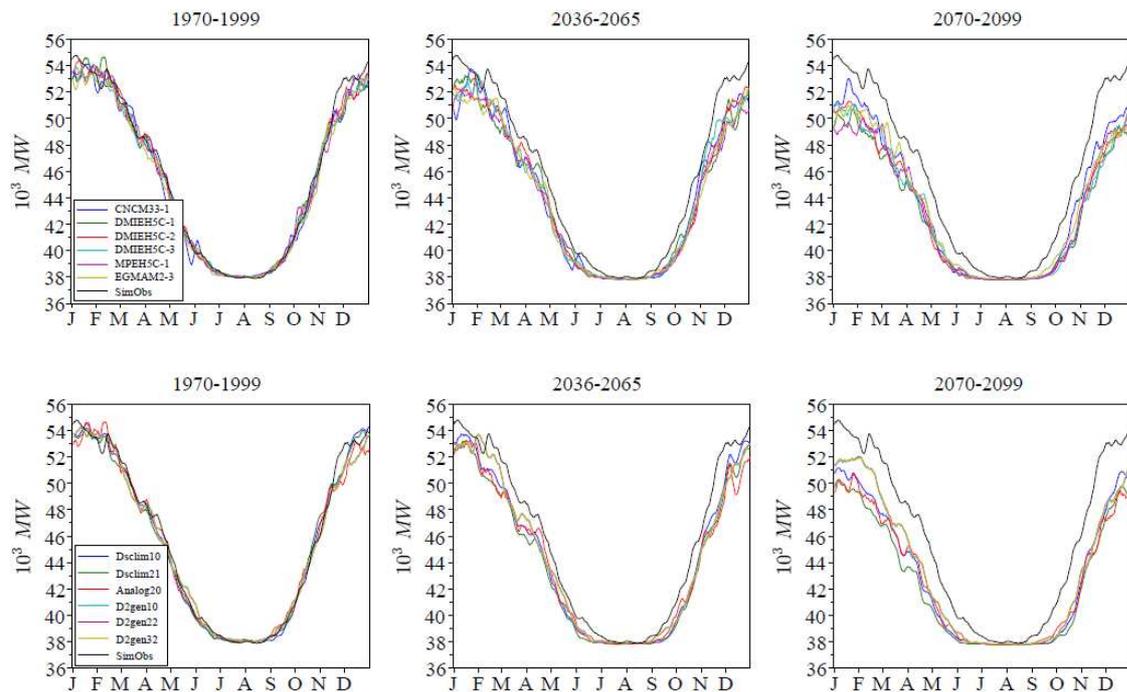


Figure 43 : Cycles saisonniers des consommations électriques simulées sur les périodes P₀, P₁ et P₂, obtenus pour les chaînes haut : GCM/Analog20 ; bas : DMIEH5C-1/MDES. Les cycles ont été lissés sur 7 jours (extrait de (François, 2013)).

Ceci se traduit sans surprise aussi sur les estimations de performance faites pour le système modélisé de Serre-Ponçon : le choix du MDES est un facteur significatif sur l'estimation de performance réalisée en climat modifié, tout comme peut l'être celui d'un GCM particulier (cf. chapitre 7 (François, 2013) pour une analyse détaillée des résultats).

Les Tableau 7 et Tableau 8 présentent la valeur moyenne de différents critères de performance considérés pour estimer la performance de la gestion et son évolution entre le temps présent et les périodes futures considérées. Les estimations concernent respectivement les chaînes de simulation GCM/Analog20 et DMIEH5C-1/MDES. Les changements estimés sont en résumé les suivants :

- La fourniture du débit de dotation est prioritaire sur le maintien de la cote touristique. Du fait de l'augmentation du débit de dotation sur les périodes P1 et P2 (Figure 42), la fiabilité vis-à-vis du respect de la cote touristique diminue pour l'ensemble des chaînes de simulation. Pour les mêmes raisons, les estimations de vulnérabilité augmentent fortement sur ces périodes. Cela traduit des non satisfactions plus fréquentes et plus sévères de l'objectif de cote.
- Pour une grande majorité des chaînes de simulation, le critère de revenus G_{HEP} diminue sur les périodes P1 et P2 (il augmente pour les chaînes de simulation DMIEH5C-1/D2gen22 et DMIEH5C-2/D2gen32). Une diminution de l'indicateur traduit une diminution du volume d'apports nets annuels à la retenue (et inversement pour une augmentation).
- Les volumes d'apports à la retenue durant le printemps diminuent sur les périodes P1 et P2. Il en résulte, pour l'ensemble des chaînes de simulation, une diminution importante des déversements subis.
- Pour l'ensemble des critères de performance, les différences obtenues entre différentes simulations d'un même GCM (DMIEH5C-1, DMIEH5C-2, DMIEH5C-3) sont similaires à celles obtenues entre différents GCM. De mêmes, les dispersions inter-MDES sont du même ordre de grandeur que les dispersions inter-GCM. Pour la majorité des critères de performances, elles restent cependant inférieures aux modifications de performance obtenues, pour une chaîne de simulation donnée, entre deux périodes observées.

Par suite, la prise en compte des incertitudes liées à la génération des scénarios météorologiques pour estimer la modification de la performance d'un système de gestion nécessite de considérer plusieurs GCMs, plusieurs runs d'un même GCM, ainsi que plusieurs MDES.

Tableau 7 : Valeur moyenne des critères de performance sur les périodes P0, P1 et P2 à partir des chaînes de simulation GCM/Analog20 : Fia (%), Vul_M (Mm³), Vul_H (Mm³), G_{HEP} (10¹⁵U.M), V_{Dev} (Mm3). Pour chaque critère de performance et pour chaque période, les meilleurs scores sont colorés en vert, les moins bons en bleu (extrait de (François, 2013)).

	Fia			Vul_M			Vul_H			G_{HEP}			V_{Dev}		
	P ₀	P ₁	P ₂	P ₀	P ₁	P ₂	P ₀	P ₁	P ₂	P ₀	P ₁	P ₂	P ₀	P ₁	P ₂
CNCM33-1	96	51	30	56	325	434	23	85	118	3.8	3.1	2.9	50	1	0
DMIEH5C-1	97	77	36	92	221	527	40	63	138	4	3.6	3.2	92	12	1
DMIEH5C-2	92	75	39	119	281	789	43	74	159	3.9	3.3	2.8	77	5	0
DMIEH5C-3	95	76	47	193	253	530	78	61	111	4	3.5	3.2	82	2	0
MPEH5C-1	95	75	41	95	201	382	39	55	88	4	3.4	3.2	102	1	0
EGMAM2-3	99	93	76	16	111	170	9	37	48	4.4	4	3.7	140	5	1

Tableau 8 : Idem Tableau 7 pour les chaînes de simulation DMIEH5C-1/MDES.

	Fia			Vul_M			Vul_H			G_{HEP}			V_{Dev}		
	P ₀	P ₁	P ₂	P ₀	P ₁	P ₂	P ₀	P ₁	P ₂	P ₀	P ₁	P ₂	P ₀	P ₁	P ₂
Dsclim10	96	73	33	200	359	898	89	89	209	3.6	3.1	2.5	69	54	1
Dsclim21	96	61	25	148	339	971	65	93	281	3.6	3.2	2.6	107	32	0
Analog20	97	77	36	92	221	527	40	63	138	4	3.6	3.2	92	12	1
D2gen10	95	73	28	186	293	809	85	86	178	3.7	3.4	3.2	76	12	3
D2gen22	94	73	35	186	347	650	69	94	157	3.6	3.6	3.6	58	17	56
D2gen32	94	72	38	185	337	675	64	96	148	3.6	3.6	3.9	72	46	88

Un autre résultat est que la variabilité inter-réalisations stochastiques (correspondant sur la figure 4 à l'étendue de chaque cdf), est, pour une chaîne de simulation donnée, limitée mais non négligeable devant la variabilité inter-GCM et devant la variabilité inter-MDES. A titre d'exemple, la Figure 44 présente la distribution de probabilité cumulée (cdf) des 30 estimations du critère de revenu correspondant, pour chaque chaîne GCM/MDES considérée, aux 30 réalisations stochastiques de la

chaîne en question. Ceci est généralement vrai pour l'ensemble des critères de performance considérés.

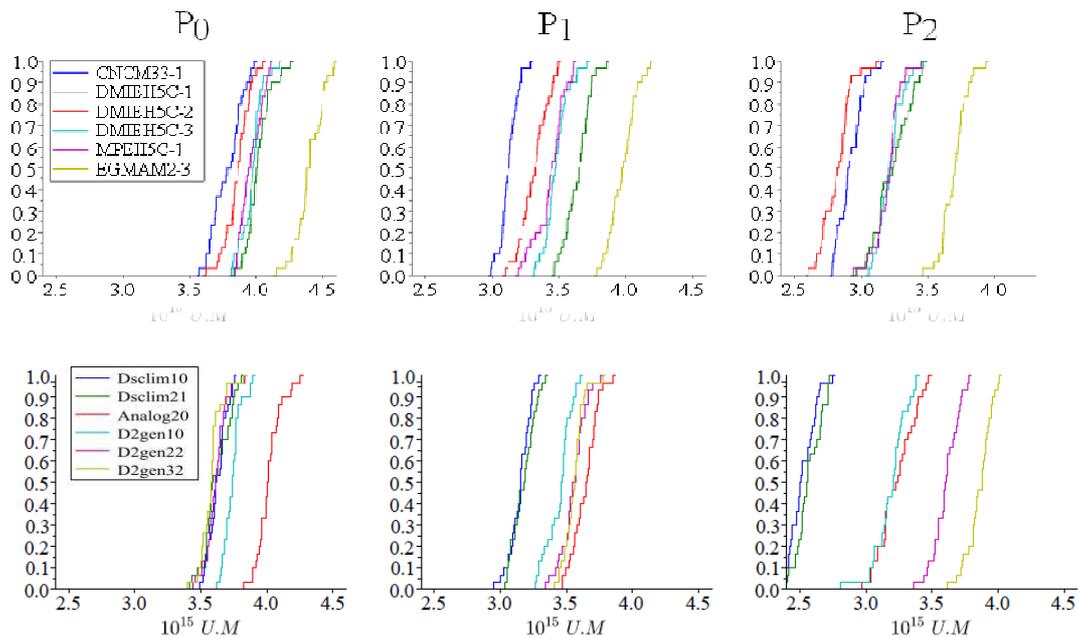


Figure 44 : Fonction de distribution du critère de performance G_{HEP} sur les périodes P_0 , P_1 et P_2 pour les chaînes de simulation haut : GCM/Analog20 ; bas : DMIEH5C-1/MDES. Chaque distribution est obtenue sur la base de 30 réalisations pour la période considérée obtenues avec le MDES Analog20 (François, 2013).

Significativité des changements

Pour évaluer la significativité des changements estimés entre les périodes P_0/P_1 et P_0/P_2 , nous avons aussi effectué la simulation de la gestion sur l'ensemble de la période 1860-2000 et, par suite, estimé l'évolution temporelle de chaque critère de performance sur 1860-2099. La significativité des changements est estimée ensuite de façon qualitative en comparant la modification de performance entre la période P_0 et P_1 avec les fluctuations de la performance obtenues sur la période 1860-2099.

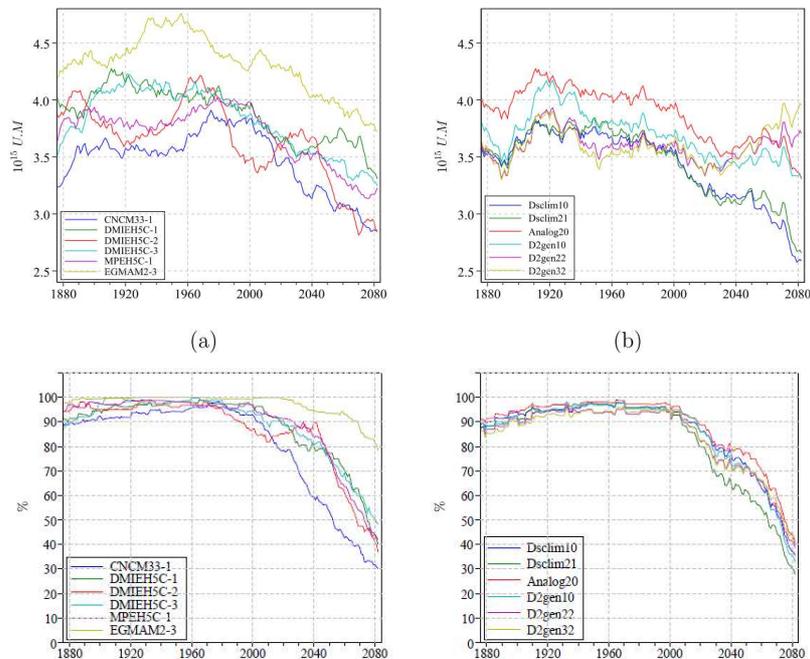


Figure 45 : Evolution de l'indicateur de revenus cumulés sur 30 ans (haut) et de la fiabilité vis-à-vis de la cote touristique (bas) de 1860 à 2099. (a) Chaînes de simulation GCM/Analog20. (b) Chaînes de simulation DMIEH5C-1/MDES (François, 2013).

La significativité des changements de performance dépend du critère considéré et de la chaîne de simulation. Pour le critère de fiabilité vis-à-vis du respect de la contrainte touristique estivale, toutes les chaînes de simulation proposent une diminution très significative du critère sur le XXIème siècle comparativement à sa variabilité interannuelle sur la période 1860-1980 (Figure 45-bas). Pour l'indicateur de revenus, les modifications attendues se situent en revanche dans la gamme de variabilité constatée sur la période 1860-1980 pour certaines chaînes de simulation (Figure 45-haut ; e.g. Chaines DMIEH5C-1/d2gen10+d2gen22).

Incertitudes liées aux modèles de gestion

La simulation de la gestion a été effectuée à l'aide des 3 modèles de gestion pour chacune des 3 périodes P0, P1, P2 avec des stratégies de gestion estimées respectivement pour chaque modèle pour chacune de ces périodes⁵.

Pour mémoire, le modèle AIP est le plus réaliste au vu de la gestion effectuée en mode opérationnel. (Il utilise une prévision hydrologique des apports basée sur une connaissance de l'état des stocks naturels sur le bassin versant). En comparaison, le modèle AC, qui bénéficie d'une prévision parfaite, surestime la performance du système. Le modèle AIC, qui n'a aucune prévisibilité sur le futur, autre que la climatologie des différentes variables d'intérêt à la gestion, sous-estime la performance du système.

Quelle que soit la période considérée, la gestion simulée de la retenue du barrage de Serre-Ponçon diffère selon le modèle de gestion considéré (cf. Figure 46). Comme déjà discuté, ces différences résultent du degré de prévisibilité des apports propre à chacun des modèles de gestion. Tout en garantissant l'objectif de cote, le modèle AC conduit à un déstockage hivernal plus important que le modèle AIP. A l'inverse, le modèle AIC conduit en moyenne à un déstockage hivernal moins important que le modèle AIP.

⁵ La construction des stratégies de gestion des modèles AIC et AIP⁵ est normalement effectuée sur la base d'une archive d'apports et de sollicitations pour une période historique récente, c'est-à-dire pour une période antérieure mais proche de la période pour laquelle cette stratégie est requise. Le choix de la période historique et la mise à jour de cette période historique au fur et à mesure que les années passent est une question à part entière qui dépassait le cadre de notre analyse. Dans le cas présent, l'historique retenu pour l'élaboration des stratégies de gestion est exactement la période utilisée pour la simulation de la gestion. Cela revient à considérer que le climat sur une période d'analyse donnée est stationnaire et que la stratégie de gestion qui aurait été estimée sur la base des années récentes aurait été la même que celle qui peut être estimée sur la période courante. Ce cadre d'analyse implique évidemment une surestimation des performances obtenues avec les modèles AIC et AIP vis-à-vis de la configuration où seule une période passée est connue pour établir les stratégies. Cependant, ce choix permet de calculer les stratégies de gestion des modèles AIC et AIP sur la même période que la période sur laquelle est calculée la stratégie de gestion pour le modèle en avenir certain (AC).

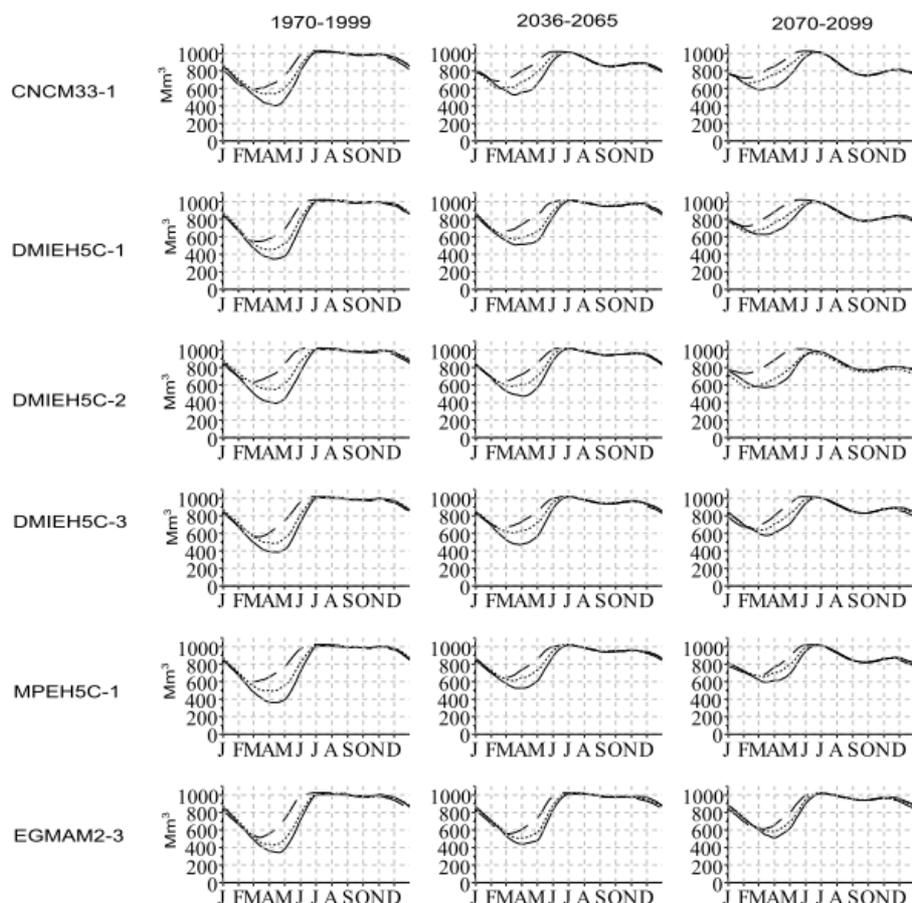


Figure 46 : Signatures de stock moyennes obtenues sur les périodes P0, P1 et P2 pour les modèles AC (trait plein), AIP (pointillés) et AIC (tirets). Le MDES utilisé pour descendre en échelle les différents scénarios GCM est Analog20. Les signatures de stock moyennes sont établies sur la base de 30 réalisations de 30 années (François, 2013).

Cette différence de trajectoire de stock entre modèle, obtenue et déjà commentée précédemment sur la période observée récente est conservée sur les périodes P1 et P2. De façon générale, les déstockages hivernaux diminueraient et les déstockages estivaux augmenteraient pour ces périodes.

Les modifications de performance entre les différentes périodes sont variables selon les modèles de gestion, les critères et les chaînes de simulation considérées.

L'augmentation des déstockages estivaux conduit globalement à une diminution de la fiabilité vis-à-vis de la cote touristique. Cette diminution est fortement liée à la diminution des apports nets sur la période de Juillet / Aout. Par ailleurs, la surestimation de la performance du modèle AC et la sous-estimation du modèle AIC, obtenues pour ce critère sur la période P0, sont plus ou moins conservées sur des périodes futures (cf. Figure 47). Les écarts de performance inter-modèles sont très largement inférieurs aux variations de performance obtenues entre les différentes périodes. Dans ce cas, et pour ce critère de performance, le choix du modèle de gestion influe donc peu l'estimation de modification de performance et le modèle AC, nettement moins coûteux en temps de calcul et mise en œuvre que les autres serait donc tout à fait suffisant pour une telle évaluation.

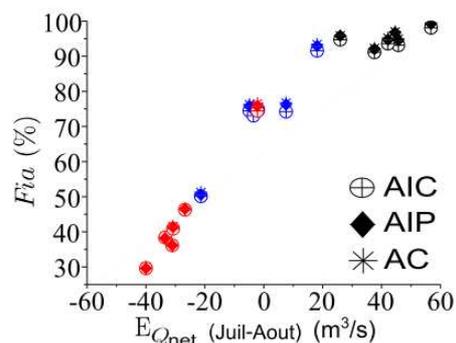


Figure 47 : Fiabilité moyenne vis-à-vis de la contrainte de cote touristique sur les périodes P0 (noir), P1 (bleu) et P2 (rouge) en fonction de l'espérance des apports nets entrant dans la retenue durant les mois de juillet et août. Pour chaque période, les six chaînes de simulation GCM/Analog20 sont représentées. Pour chaque période et chaque chaîne de simulation, la fiabilité obtenue par AIC et représentée par un cercle barré, par le modèle AIP par un losange et pour le modèle AC par une étoile (François, 2013).

Le critère de revenus liés à la production d'hydroélectricité diminue aussi entre les périodes P0 et P1 et entre les périodes P1 et P2. Ceci est lié en premier lieu à la diminution des apports nets annuels à la retenue, résultant d'une part de la diminution des apports hydrologiques à la retenue, et d'autre part de l'augmentation de la demande en eau des parties aval du bassin qui, en contraignant plus la gestion, limite l'optimisation pour le besoin énergétique. De nouveau, la perte de performance sur ce critère entre les différentes périodes est globalement beaucoup plus importante que les écarts de performance obtenus entre les différents modèles de gestion. Cependant, pour le critère de revenu, les modifications de performance entre P0 et les périodes futures peuvent fortement dépendre du modèle de gestion retenu. C'est en fait le cas avec les deux chaînes de simulation DMIEH5C-1/Analog20 et DMIEH5C-2/Analog20 pour la période P2 (cf. graphiques sur la deuxième ligne Figure 49). La raison de ce comportement tient, pour ces scénarios, à une modification importante des caractéristiques statistiques des apports nets à la réserve et notamment d'une très forte augmentation de la variabilité inter-annuelle des apports nets pour la période P2 en particulier. Or seul le modèle AIC est sensible à cette modification du contexte hydrométéorologique (par le biais de la courbe de remplissage qui est définie sur la base du quantile 10% des apports nets à la réserve ; cf. chapitre 8 de la thèse (François, 2013)). Cela se traduit en particulier par une courbe de remontée très haute, qui met en fait le système aux limites de ce qui est physiquement et rationnellement tenable : en l'absence de prévision sur l'avenir (hypothèse de l'avenir incertain climatologique), la meilleure stratégie pour essayer de tenir un objectif de cote touristique avec une probabilité de 9/10 est celle de rester au maximum de niveau quitte à déverser (cette eau n'est alors plus valorisée au travers des turbines pour le besoin énergétique). On est ici aux limites de ce que représente notre modélisation AIC : dans un tel contexte, on imagine bien que le gestionnaire et les usagers de la réserve (agriculture notamment) n'accepteraient pas ces déversements et que la réflexion porterait sans doute à revoir l'objectif de cote. Ce point est d'autant plus vrai que l'objectif de cote – pour l'usage touristique, ne constitue pas une des raisons initiales de la construction de la réserve de Serre-Ponçon.

Pour le critère de revenus liés à la production d'hydroélectricité, les 3 modèles de gestion ne donnent donc pas une image équivalente des modifications de performance à attendre entre les différentes périodes P0 / P1 / P2. Des résultats similaires sont pour les mêmes raisons obtenus sur d'autres critères de performance comme le critère de déversement qui indique les volumes non valorisés pour l'hydroélectricité (voir aussi le chapitre 8 de la thèse (François, 2013)).

Ainsi, s'il n'y avait ce comportement singulier obtenu pour ces 3 chaînes de simulation avec le modèle AIC sur la période P2, on pourrait conclure que la perte de performance est essentiellement portée par l'évolution du climat, bien plus que par le choix de la représentation de la gestion. Ceci n'est pas toujours le cas et les 3 représentations de la gestion peuvent donc ne pas donner une image équivalente des modifications de performance à attendre entre les différentes périodes P0 / P1 / P2. Sur la période P2, on serait cependant en droit d'attendre que le choix de la représentation AIC conduise à adapter l'objectif de cote de manière à respecter les vocations initiales de l'aménagement du barrage de Serre-Ponçon relatives à la régulation des crues.

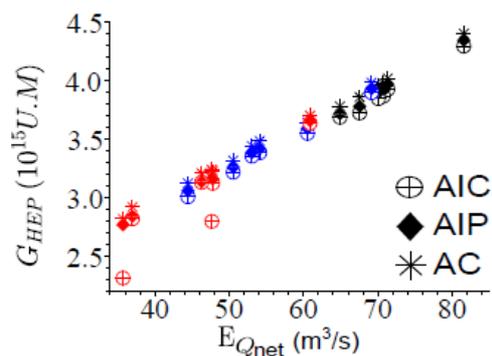


Figure 48 : Indicateur de revenus moyen sur les périodes P0 (noir), P1 (bleu) et P2 (rouge) en fonction de l'espérance des apports nets annuels à la retenue. Pour chaque période, les six chaînes de simulation GCM/Analog20 sont représentées (François, 2013).

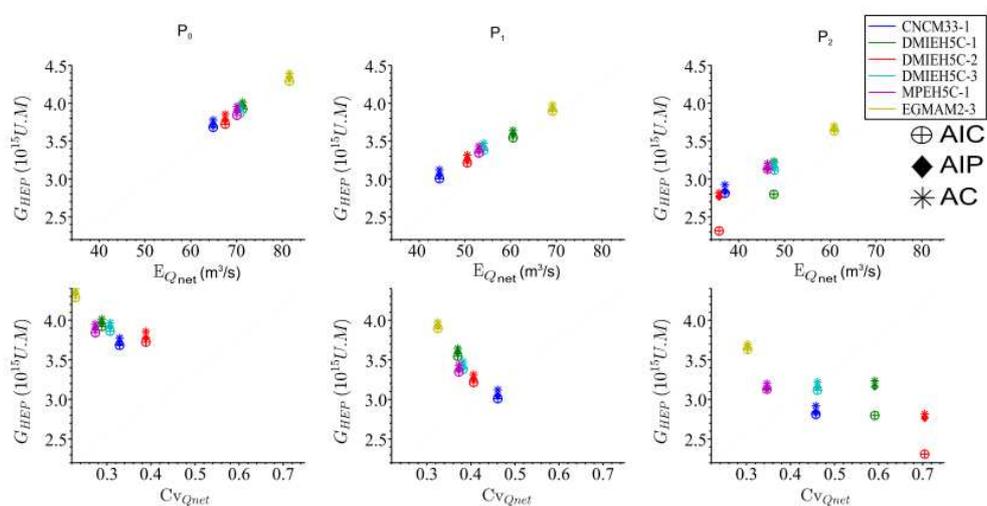


Figure 49 : Indicateur de revenus moyen sur les périodes P0 (gauche), P1 (milieu) et P2 (droite) en fonction 1) de l'espérance des apports nets à la retenue de Serre-Ponçon (ligne du haut) et 2) du coefficient de variation des apports nets annuels (ligne du bas) (François, 2013).

5. Conclusions / Perspectives

Du GCM à l'analyse d'impact : une chaîne de simulation intégrée

Estimer l'impact du changement climatique sur un système de gestion de la ressource en eau nécessite de développer une chaîne de simulation permettant sur la base d'expériences climatiques futures 1) d'estimer à l'échelle régionale l'évolution possible de la ressource et de sa variabilité, 2) de simuler le comportement des systèmes utilisés pour leur gestion pour 3) en estimer les éventuelles modifications de performance.

Dans le cadre du projet RIWER2030, nous avons testé la possibilité de mettre en place une chaîne de simulation de ce type pour un système de gestion réel, le système de Serre-Ponçon. Les différents maillons de cette chaîne impliquent a minima un Modèle de Descente d'Echelle Statistique (MDES) pour la génération, sur la base des sorties de modèles climatiques globaux (GCM), de scénarios météorologiques adaptés aux échelles du système, un modèle hydrologique (MH) pour la simulation des scénarios hydrologiques correspondant et, pour simuler la gestion de la ressource, un modèle de gestion (MG), constitué de différents sous modèles d'usage et de contrainte.

Dans ce contexte, nous avons en particulier cherché à apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- Quelles méthodes de descente d'échelle sont possibles ? Quelle est l'influence du choix de la méthode et de sa paramétrisation sur les projections météorologiques correspondantes ?
- Quelles représentations peut-on faire d'un système de gestion opérationnel pour une application en climat modifié ?
- Quels éléments d'évaluation peuvent permettre d'estimer l'impact du changement climatique sur ce système de gestion ?
- Quelles sont les sources d'incertitudes influençant cette évaluation ? Quelles sont les contributions respectives à l'incertitude totale des différentes méthodes et modèles utilisés ?

Parmi les principaux résultats de nos recherches, on rappellera les points suivants.

La régionalisation du climat

La possibilité de générer des scénarios météorologiques adaptés à l'étude d'impact souhaitée est une question de recherche en soi. Nous avons développé et/ou adapté pour cette étude différentes versions de 3 MDES: dsclim, analog, d2gen.

Nous avons en parallèle concentré une partie de nos recherches sur la mise en place d'un cadre commun d'évaluation de ces différents MDES. De façon générale, l'évaluation des MDES peut (doit) être plus poussée que ce qui est souvent pratiqué.

- Les évaluations climatologiques classiques sont insuffisantes car trop peu sévères. Les évaluations chronologiques sont beaucoup plus exigeantes. Elles permettent en particulier d'évaluer la capacité des MDES à simuler la variabilité basse fréquence des variables météorologiques.
- Evaluer la transférabilité temporelle des MDES pour une application en climat modifié est difficile du fait des données disponibles pour cela (durée réduite de disponibilité des observations, hétérogénéité temporelle des données). Le développement de méthodologies adaptées à ce contexte doit être une priorité des recherches à venir. L'intérêt d'une évaluation dans le monde des modèles de climat devrait être précisé à cet effet.
- Une évaluation indirecte des MDES, orientée impact, permet de tester la pertinence des scénarios météorologiques générés au regard de l'application visée. Elle est particulièrement souhaitée dès lors que les scénarios météorologiques générés sont multivariés, ce qui est généralement le cas pour les études d'impact hydrologique ou les études dérivées.
- La grande majorité des MDES comprennent un générateur stochastique adjoint. Dans ce cas, l'évaluation doit être multi-réalisations. Les évaluations basées sur une réalisation unique du processus de génération peuvent fortement mes-estimer la performance du MDES. La

possibilité d'appliquer des évaluations probabiliste devrait être explorée dans ce contexte.

Globalement, les différentes versions des 3 MDES considérés présentent des performances raisonnables. Les scénarios météorologiques, reconstruits pour les décennies récentes à partir la seule chronologie des variables atmosphériques grande échelle extraites des réanalyses atmosphériques NCEP, permettent de simuler de façon très satisfaisante la chronologie des débits observée à l'exutoire du bassin de Serre-Ponçon. Ces résultats mettent en évidence le potentiel important de ces méthodes, suggérant en particulier différentes autres applications possibles que celles explorées ici, dont celles liées à la reconstitution de chroniques hydrométéorologiques (cf. à ce sujet la thèse d'Anna Kuentz, réalisée en parallèle du projet Riwer2030 ; (Kuentz, 2013; Kuentz et al., 2012)).

Les 3 MDES considérés ne sont pas forcément équivalentes selon les critères d'évaluation considérés. Pour l'heure, il est difficile d'attribuer ces différences à la méthode ou aux prédicteurs utilisés par chacune d'entre elles. Un complément intéressant à la présente étude consisterait à appliquer les différentes méthodes avec des jeux de prédicteurs identiques. De même, l'influence du choix des prédicteurs sur leur performance devrait être explorée de façon plus systématique. Les résultats obtenus avec les différentes versions de d2gen suggèrent que l'intégration de variables d'humidité comme prédicteurs serait intéressante aussi pour dsclim et analog.

Les résultats obtenus dans le projet suggèrent finalement de tester une stratégie de MDES hybride combinant certaines composantes des MDES évalués ici. Une telle stratégie sera explorée dans le cadre de la thèse en cours de Jérémy Chardon (LTHE, financement MESR), réalisée dans la continuité du projet RIWER2030.

L'ensemble des scénarios descendus en échelle dans le cadre du projet RIWER2030 (MDES forcés par les réanalyses NCEP ou forcés sur 1860-2099 par les 11 GCM du projet ENSEMBLES) est à disposition de la communauté scientifique et des impacteurs sur le site ftp du projet. Les modalités d'accès au site et la façon d'utiliser les scénarios pour les études d'impact sont décrites dans l'annexe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** Ils sont actuellement utilisés comme scénarios de référence dans le cadre du projet R2D2, financé par le GICC.

La modélisation de la gestion du système de Serre-Ponçon

Proposer un modèle de gestion qui soit à la fois le plus réaliste possible au vu de la gestion opérationnelle des systèmes réels et le plus pertinent possible au vu des modifications possibles de la ressource, des usages et des contraintes de gestion futurs n'est évidemment pas réalisable. La gestion opérationnelle d'un système doit souvent prendre en compte un nombre important de contraintes et d'éléments d'appréciation dont la représentation, quand bien même elle serait possible n'aurait pas forcément grand sens dans un contexte de changement global. Le contexte futur de la gestion sera par ailleurs fortement modifié du fait de la nature même des usages futurs, difficiles à anticiper pour l'heure. Une étude d'impact telle que celle proposée dans ce projet ne peut donc avoir qu'un caractère exploratoire, relevant plus d'une analyse de sensibilité ciblée que d'une étude d'impact exhaustive.

La façon dont on peut représenter un système de gestion opérationnel pour une application en climat modifié et l'influence de cette représentation sur l'estimation de la performance future du système est donc une question d'intérêt.

- En mode opérationnel, la gestion de nombreux réservoirs est optimisée en utilisant une stratégie de gestion mise à jour au fur et à mesure que le temps s'écoule sur la base de l'état courant du système et de diverses prévisions à court ou moyen terme sur les différentes variables d'intérêt pour la gestion.
- Pour des questions de commodité évidente, de nombreuses études d'impact du changement de climat sur la performance des systèmes de gestion de la ressource sont menées en considérant une prévisibilité parfaite des variables d'intérêt futures. Le modèle AC considéré ici correspond à cette approche. L'utilisation de ce type de représentation conduit à une sur-estimation de la performance du système de gestion, pour les climats futurs considérés autant que pour le climat récent.
- Différents auteurs affirment qu'une évaluation pertinente nécessite de considérer la nature incertaine des variables d'intérêt dans le processus de gestion. Les méthodes suggérées dans ce cas sont similaires à la méthode en avenir incertain climatologique proposée ici. Pour

notre cas d'étude, nous pouvons constater que ce type d'approche peut aussi donner une vision très biaisée de la performance du système en climat futur. Cette approche ne semble donc pas beaucoup plus recommandable que l'approche AC.

- Le modèle AIP considéré ici offre, du point de vue de la prévisibilité des apports, une représentation plus réaliste de la gestion opérationnelle. Néanmoins, cette approche est beaucoup plus lourde à mettre en œuvre que les 2 autres rendant son utilisation difficile pour les études d'impact. Elle nécessite donc de limiter la longueur des périodes de simulation et le nombre de scénarios futurs à considérer. Elle ne permet donc pas une analyse exhaustive des sources d'incertitudes, ni d'estimer la significativité des changements au regard de la variabilité intrinsèque des modèles climatiques par exemple.

Les résultats sont certainement très contextuels au cas d'étude de Serre-Ponçon, et en particulier à l'expression de certaines contraintes comme la courbe guide de remplissage 90 % qui conduit la série des quantiles 10 des apports nets à fortement influencer les stratégies de gestion du modèle AIC et dans une moindre mesure celle du modèle AIP. Par ailleurs, la différence entre le modèle AIC et le modèle AIP résulte principalement de la plus grande prévisibilité possible avec AIP. Cette prévisibilité est aussi fortement liée au comportement hydrologique du bassin considéré. Elle résulte ici du fort cycle saisonnier des apports induit par la dynamique du manteau neigeux. Cette prévisibilité est très variable suivant les bassins et il est probable que les modèles AIC et AIP conduisent à des résultats très similaires sur des bassins présentant une inertie hydrologique moindre (bassins pluviaux).

Les résultats de cette étude suggèrent malgré tout qu'une analyse similaire mériterait d'être systématiquement effectuée dès lors que l'on souhaite estimer l'impact sur la performance d'un système de gestion résultant des changements globaux attendus.

La possibilité de décrire de façon plus réaliste l'ensemble du système de gestion des eaux de la Durance est aussi une nécessité pour permettre des projections futures plus pertinentes. Il en va de même pour l'identification de scénarios d'usage futurs plus pertinents. D'importants travaux sont actuellement réalisés à cet effet par différents partenaires du projet de recherche en cours R2D2-2050 (Sauquet and Coll., 2010). Ces travaux visent en particulier à améliorer le modèle de gestion développé dans le cadre de RIWER2030 par une représentation plus réaliste des différents éléments de gestion de la chaîne de production Durance-Verdon (e.g. prise en compte de la retenue de Sainte Croix sur le Verdon par exemple, ...). Ils visent aussi à établir en concertation avec les acteurs locaux de la gestion de la ressource et les collectivités locales différents scénarios d'usage possibles pour l'horizon 2050.

La correction des prédicteurs obtenus en sortie des GCM

Les scénarios météorologiques requis pour cette analyse d'impact résultent de l'application de la chaîne de simulation GCM/MDES. L'évaluation de la pertinence de cette chaîne est aussi nécessaire. Les quelques analyses réalisées à ce sujet ont mis en évidence un certain nombre de difficultés.

Les GCM sont réputés pouvoir mieux simuler les variables de grande échelle que les variables de surface. Les sorties des GCM obtenues sur la période 1980-2000 se sont avérées très biaisées par rapport aux observations sur la même période et par suite impropres à une utilisation directe en entrée des MDES.

Une étape supplémentaire de correction des biais (temporels et spatiaux) s'est révélée nécessaire. Cette étape de correction est problématique à divers titres.

- Elle nécessite d'abord de choisir une période de référence pour la comparaison des variables simulées et observées (ou considérées comme telles). Ceci constitue une réelle difficulté du fait en particulier de la variabilité intrinsèque des GCM.
- La correction est classiquement faite sur chaque prédicteur de façon indépendante. L'application d'une correction monovariée à chacun des prédicteurs conduit a priori à une distorsion de la structure de covariance entre prédicteurs. Par suite, la cohérence multivariée des scénarios corrigés n'est donc absolument pas garantie ce qui constitue une limitation potentiellement majeure.
- Les méthodes de correction sont aussi soumises à une hypothèse forte de stationnarité selon laquelle la fonction de correction identifiée pour le climat présent reste valide pour des climats modifiés. La validité de cette hypothèse, aussi critique que pour le cas des MDES, n'a jamais été vérifiée ni explorée à notre connaissance.

- L'importance de la correction sur les projections futures est inconnue. L'incertitude sur les projections liée 1) au choix de la période de référence et 2) au choix de la méthode de correction est potentiellement majeure, et probablement du même ordre de grandeur que celles liées au MDES. Elle est sans doute largement supérieure à l'incertitude liée au choix du MH.

Différentes recherches et développements sont nécessaires dans ce contexte. Il est tout d'abord important de mettre au point une méthodologie d'évaluation pertinente des sorties de GCM en lien avec leur utilisation pour le forçage de modèles d'impact. Cette évaluation est évidemment non triviale du fait de la variabilité intrinsèque des modèles GCM. Ceci nécessite de développer un cadre d'analyse spécifique pour permettre que l'évaluation ne soit biaisée par cette variabilité.

Il est ensuite urgent d'évaluer la pertinence des méthodes de correction des sorties de modèle et d'identifier les bonnes pratiques à suivre pour cette étape. L'influence de la méthode de correction sur les projections futures est à préciser.

Le développement de méthodologies d'évaluation et de correction des sorties de modèles est donc aussi un point important à considérer pour les recherches à venir. Ce point doit être traité de façon conjointe par les modélisateurs du climat d'une part et les hydrométéorologues d'autre part.

Projections futures et incertitudes

Pour explorer la sensibilité des projections aux différentes sources d'incertitudes intervenant à chaque échelon de la chaîne de simulation, nous avons adopté une approche multi-modèles en considérant plusieurs GCM et plusieurs runs de différents GCM, plusieurs versions de 3 MDES (analog, dsclim, d2gen) ; plusieurs MH (Isba-Durance, Cequeau, Mordor) ; un MG basé sur différentes élaborations de la stratégie de gestion (AIC, AIP, AC).

Les principaux résultats sont les suivants :

- Classiquement, l'incertitude associée au choix du MDES est dite négligeable devant celle associée au choix du GCM. Les résultats obtenus pour le haut bassin de la Durance montrent qu'en réalité les incertitudes associées au choix du GCM ou au choix du MDES peuvent être, selon les variables météorologiques considérées, comparables.
- La dispersion des projections entre différents runs d'un même GCM est aussi potentiellement importante. Elle est équivalente à la dispersion entre GCM. Les changements peuvent être aussi très différents pour différentes versions d'un même MDES (e.g. modèles incluant ou non des prédicteurs thermodynamiques). Une telle sensibilité est évidemment problématique et plaide pour une meilleure compréhension des processus responsables de la variabilité des variables météorologiques d'intérêt.
- Par ailleurs, une incertitude non négligeable dans les changements simulés est également portée par le caractère stochastique des algorithmes de descente d'échelle. Elle justifie la génération multiple de scénarios météorologiques et hydrologiques, même si cette source d'incertitude est moins forte que celle associée au modèle de descente d'échelle lui-même ou aux variables explicatives choisies.
- Les incertitudes associées au modèle hydrologique sont modérées en comparaison des incertitudes précédentes. Elles ne sont cependant pas négligeables, en particulier sur les projections de débits futurs, du fait d'une représentation différentes des pertes par évaporation dans les modèles.

Ce travail met donc en évidence que les études d'impact du changement climatique basées sur un seul GCM, et/ou sur un seul MDES ou sur une seule réalisation d'une même chaîne GCM/MDES peuvent fortement sous-échantillonner l'incertitude sur les projections réalisées. L'approche multi-modèles et multi-réalisations est donc à recommander. Il en est de même pour les modèles hydrologiques.

Une quantification plus précise de la part d'incertitude propre aux différents types de modèles peut être, en théorie, appréhendée par une analyse de variance. Le nombre important de facteurs explicatifs possibles (GCM (modèle+runs), MDES (type+version+réalisations), MH (type+paramétrisation)) ainsi que la structure non balancée et souvent incomplète du jeu de donnée (matrice d'expérience non pleine) rend cette analyse difficile et relativement sensible au jeu d'expériences retenues pour l'analyse. Le développement d'une méthodologie robuste a été entamé

dans le cadre de ce projet. Elle doit être consolidée pour permettre de prendre en compte toute la complexité du problème.

Significativité des changements.

La variabilité intrinsèque liée aux GCM peut s'avérer particulièrement importante selon les variables météorologiques considérées, oblitérant du même coup la significativité des changements obtenus par ailleurs entre la période usuelle de référence (1960-1990) et la période future considérée.

La significativité des changements a été ici estimée de façon qualitative en comparant la modification de la variable considérée entre la période P0 et l'une des périodes future visée (P1 ou P2) avec les fluctuations de cette variable obtenues sur la période 1860-1999. Si les changements attendus sont significatifs pour diverses variables liées à l'augmentation des températures (pertes évaporatoires, enneigement, saisonnalité des débits), ils ne le sont apparemment pas pour d'autres variables telles que les précipitations.

Une évaluation quantitative de la significativité des changements au regard des projections obtenues peut se faire indépendamment pour chaque chaîne de simulation considérée (Lafaysse, 2011). Le cadre d'analyse nécessaire pour une évaluation globale pour l'ensemble des chaînes de simulation fait cependant actuellement défaut. Il serait donc intéressant aussi de le développer.

MDES / scénarios multiréalisations et sous-échantillonnage

Pour la génération de scénarios météorologiques locaux, l'approche multi-modèles (GCM/MDES) et multi-réalisations s'avère donc incontournable. Cependant, une telle approche conduit à devoir considérer un nombre considérable de scénarios (12x6x100 soit 7 200 scénarios de 240 ans dans le cas présent pour un seul modèle hydrologique et un seul modèle de gestion !). Une limitation majeure est apparue relative aux modèles d'impact qui ne peuvent pas « digérer » autant de scénarios, pour des questions de ressources en calcul insuffisantes. Cela pose la question de la réduction du nombre de scénarios météorologiques à digérer par le modèle d'impact. Cela pose en particulier la question d'un sous-échantillonnage représentatif et raisonné de l'ensemble des scénarios pouvant être produits à l'aide d'une approche multi-modèle.

L'après RIWER2030

Le projet RIWER2030 a conduit au développement de différents modèles nécessaires à la mise d'une chaîne de simulation intégrée allant de la génération de scénarios météorologiques régionaux à la simulation de la gestion d'une retenue d'eau multi-usage. Ces développements ont été accompagnés de différentes réflexions et développements méthodologiques tant pour l'évaluation des modèles impliqués dans cette chaîne que pour l'estimation de l'impact du changement proprement dit et des incertitudes associées à cette estimation.

Ce projet a permis une collaboration réelle et fructueuse entre les chercheurs du LTHE et les collaborateurs scientifiques et experts d'EDF qui a enrichi à divers titres chacune des équipes impliquées. Il a conduit aussi à diverses publications et communications listées dans l'annexe A9.

Les travaux effectués ici, d'ordre essentiellement exploratoire, ne s'arrêtent pas là. Le projet R2D2, par exemple, vient élargir sur le territoire Durance à la fois les objectifs, les partenaires (IRSTEA, UPMC, SCP) et les ambitions du projet RIWER2030. Nombre des questions encore en suspens comme celle des incertitudes liées à la modélisation hydrologique, la modélisation de la gestion du système réel de la chaîne de production Durance-Verdon, le développement de scénarios de modification des usages de la ressource, trouveront dans ce projet une prolongation naturelle.

La recherche d'une stratégie de régionalisation du climat optimale sera aussi poursuivie dans le cadre du projet Européen Complex (2012-2015). Elle embarquera en particulier la problématique de la génération de scénarios météorologiques multivariés avec un focus particulier sur la génération d'autres variables clés liées à la production d'énergie renouvelables (solaire, éolien). Le modèle de gestion développé ici sera aussi utilisé et adapté dans le cadre de ce projet pour 2 autres systèmes de gestion (Norvège centrale, Italie du Nord) intégrant la gestion de ces énergies intermittentes. La question du sous-échantillonnage des réalisations MDES est une autre question qui s'est révélée cruciale. Elle est actuellement abordée dans le cadre du projet R2D2 en partenariat avec IRSTEA ainsi que dans le cadre d'une collaboration avec des chercheurs du laboratoire Gipsa-Lab de Grenoble spécialisés dans le traitement du signal.

6. Remerciements

Le projet RIWER2030 a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche. La thèse de Matthieu Lafaysse, réalisée en synergie avec le projet RIWER2030 a été financée par l'Ecole Nationale de la Météorologie.

Nous tenons à remercier Laurent Terray, Michel Déqué, Eric Martin, Pierre Etchevers, Charles Obled, Christian Pagé, Julien Boé, Marion Chelle-Michou, Delphine Mayer, Jean-Maxime Bertrand, Anne-Catherine Favre, Cécile Picouet, Meriem Saïd, Joël Poitevin, Frédéric Gottardi, Anna Kuentz, Yves Lejeune, Samuel Morin, le pôle Odette Nave, Claire Petracci, Ghyslaine Biondi, Sandrine Anquetin, Thierry Lebel, Pascal Poulhe, Patrick Juen, Wajdi Nechba, Etienne Leblois, Wiem Benkidhiri, Matthieu Texier, Chadha Marzougui, pour leur contributions à titres divers à ce projet.

7. Références

Balland, P., Huet, P., Lafont, E., Leteurtois, J.P., Pierron, P., 2002. Propositions de simplification et de modernisation du dispositif d'intervention de l'Etat sur la gestion des eaux et du lit de la durance contribution `a un plan durance. Rapport technique,.

Bellman, R., 1957. Dynamic Programming.

Brasseur, G.P., Roeckner, E., 2005. Impact of improved air quality on the future evolution of climate. *Geophys. Res. Lett.* 32.

Buishand, T.A., Shabalova, M.V., Brandsma, T., 2004. On the choice of the temporal aggregation level for statistical downscaling of precipitation. *Journal of climate* 17, 1816–1827.

Dufresne, J.L., Quaas, J., Boucher, O., Denvil, S., Fairhead, L., 2005. Contrasts in the effects on climate of anthropogenic sulfate aerosols between the 20th and the 21st century. *Geophys. Res. Lett.* 32.

Dupeyrat, A., Agosta, C., Sauquet, E., Hendrickx, F., 2008. Sensibilité aux variations climatiques d'un bassin à forts enjeux - le cas de la garonne. Presented at the In Proceedings 13th IWRA World Water Congress, volume 15.

Etchevers, P., 2000. Modélisation de la phase du cycle continental de l'eau à l'échelle régionale : impact de la modélisation de l'enneigement sur l'hydrologie du bassin versant du Rhône.

Fowler, H.J., Blenkinsop, S., Tebaldi, C., 2007. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology* 27, 1547–1578.

François, B., 2013. Gestion optimale d'un réservoir hydraulique multiusages et changement climatique. Modèles, projections et incertitudes.

Garçon, R., 1996. Prévision opérationnelle des apports de la Durance à Serre-Ponçon à l'aide du modèle MORDOR. Bilan de l'année 1994-1995. *La Houille Blanche* 71–76.

Gottardi, F., Obled, C., Gailhard, J., Paquet, E., 2012. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of Hydrology* 432, 154–167.

Goussebaille, J., Miquel, J., Roche, P.A., 1986. Gestion des barrages réservoirs en avenir incertain. Utilisation de méthodes en avenir certain sur scénarios. Rapport V11 19èmes Journées de l'Hydraulique: 9-11. Société Hydrotechnique de France, Paris.

Hargreaves, G., Hargreaves, G., Riley, J., 1985. Agricultural Benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. Drainage Eng-ASCE* 111, 113–124.

Hashimoto, T., Stedinger, J., Loucks, D., 1982. Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria for Water-Resource System Performance Evaluation. *Water Resour. Res.* 18, 14–20.

Hendrickx, F., Sauquet, E., 2012. Impact of warming climate on water management for the Ariège River basin (France). *Hydrological Sciences Journal*.

Hingray, B., Favre, A.C., Katz, R.W., A., en preparation. The variance inflation factor to measure temporal transferability of downscaling models. *J. Climate*.

Hingray, B., Favre, A.C., Vidal, J.P., Creutin, J.D., Anquetin, S., Borga, M., Chardon, J., Engeland, K., Radanovic, S., Ramos, M.H., 2013. Downscaling of climate model outputs for CRE estimation. Scoping Report. COMPLEX « Knowledge based climate mitigation systems for a low carbon economy » EU FP7 research project. Grant 308601. 70p.

- Hingray, B., Picouet, C., Musy, A., 2009. Hydrologie 2. Une science pour l'ingénieur. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Huebener, H., Cubasch, U., Langematz, U., Spanghel, T., Niehoerster, F., Fast, I., Kunze, M., 2007. Ensemble climate simulations using a fully coupled ocean-troposphere-stratosphere general circulation model. *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.* 365, 2089–2101.
- IPCC, 2007a. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. The physical science basis., Cambridge University Press. ed.
- IPCC, 2007b. Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Contribution of Working Groups I, II and III. Synthesis Report. Cambridge University Press.
- Johns, T.C., Durman, C.F., Banks, H.T., Roberts, M.J., McLaren, A.J., Ridley, J.K., Senior, C.A., Williams, K.D., Jones, A., Rickard, G.J., Cusack, S., Ingram, W.J., Crucifix, M., Sexton, D.M.H., Joshi, M.M., Dong, B.W., Spencer, H., Hill, R.S.R., Gregory, J.M., Keen, A.B., Pardaens, A.K., Lowe, J.A., Bodas-Salcedo, A., Stark, S., Searl, Y., 2006. The new Hadley Centre Climate Model (HadGEM1): Evaluation of coupled simulations. *J. Clim.* 19, 1327–1353.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, A., Reynolds, R., Jenne, R., Joseph, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* 77, 437–471.
- Kuentz, A., 2013. 100 ans de variabilité climatique observée et reconstituée sur le bassin de la Durance.
- Kuentz, A., Mathevet, T., Gailhard, J., Garçon, R., Perret, C., Andreassian, V., 2012. Homogénéisation et reconstitution de longues séries hydro-climatiques sur le bassin de la Durance. 25ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie.
- Lafaysse, M., 2011. Changement climatique et régime hydrologique d'un bassin alpin. Génération de scénarios sur la Haute-Durance, méthodologie d'évaluation et incertitudes associées.
- Lafaysse, M., Hingray, B., Etchevers, P., Martin, E., Oblé, C., 2011. Influence of spatial discretization, underground water storage and glacier melt on a physically-based hydrological model of the Upper Durance River basin. *Journal of Hydrology* 403, 116–129.
- Lafaysse, M., Hingray, B., Terray, L., Gailhard, J., Mezghani, A., 2013. Sources of uncertainties in future climate and hydrological projections: the Alpine Durance basin. In revision. *Water Resource Research*.
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M., Chandler, R.E., Kendon, E.J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H.W., Sauter, T., Themessl, M., Venema, V.K.C., Chun, K.P., Goodess, C.M., Jones, R.G., Onof, C., Vrac, M., Thiele-Eich, I., 2010. Precipitation Downscaling Under Climate Change: Recent Developments to Bridge the Gap Between Dynamical Models and the End User. *Rev. Geophys.* 48.
- May, W., 2008. Climatic changes associated with a global “2 degrees C-stabilization” scenario simulated by the ECHAM5/MPI-OM coupled climate model. *Clim. Dyn.* 31, 283–313.
- Mezghani, A., Hingray, B., 2009. A combined downscaling-disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables over complex terrain: Development and multi-scale validation for the Upper Rhone River basin. *J. Hydrol.* 377, 245–260.
- Mezghani, A., Hingray, B., Lafaysse, M., submitted. Atmospheric predictors for precipitation downscaling over France. *Journal of Climate*.
- Morin, G., Paquet, P., W., S., 1995. Le Modèle de Simulation de Quantité et de Qualité CEQUEAU. INRS-Eau Rapport de Recherche, no 433.
- Moy, W., Cohon, J., Revelle, C., 1986. A Programming-Model for Analysis of the Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water-Supply Reservoir. *Water Resour. Res.* 22, 489–498.
- Quintana-Segui, P., Le Moigne, P., Durand, Y., Martin, E., Habets, F., Baillon, M., Canellas, C., Franchisteguy, L., Morel, S., 2008. Analysis of near-surface atmospheric variables: Validation of the SAFRAN analysis over France. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 92–107.
- Salas, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, H., Guérémy, J., Marquet, P., Planton, S., Royer, J., Tyteca, S., 2005. Description and validation of CNRM-CM3 Global Coupled Model. Working Note 103, CNRM. Disponible à http://www.cnrm.meteo.fr/scenario2004/paper_cm3.pdf.
- Sauquet, E., Coll., 2010. R2D2-2050: Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050. Projet de recherche GICC. Irstea Lyon.
- Tebaldi, C., Mearns, L.O., Nychka, D., Smith, R.L., 2004. Regional probabilities of precipitation change: A Bayesian analysis of multimodel simulations. *Geophys. Res. Lett.* 31.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchisteguy, L., Baillon, M., Soubeyroux, J.-M., 2010. A 50-year high-resolution

atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int. J. Climatol.* 30, 1627–1644.