



HAL
open science

Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance : Recherches historiques et reconstitutions

Anna Kuentz

► To cite this version:

Anna Kuentz. Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance : Recherches historiques et reconstitutions. Autre [q-bio.OT]. AgroParisTech, 2013. Français. NNT : 2013AGPT0047 . tel-01171004

HAL Id: tel-01171004

<https://pastel.hal.science/tel-01171004>

Submitted on 2 Jul 2015

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

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

Doctorat ParisTech

THÈSE

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**L'Institut des Sciences et Industries
du Vivant et de l'Environnement**

(AgroParisTech)

Spécialité : Hydrologie

Présentée et soutenue publiquement par

Anna KUENTZ

le 8 juillet 2013

Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance

Recherches historiques et reconstitutions

Jury

M. Cyril KAO, *AgroParisTech, Paris, France*
M. Nicolas MASSEI, *M2C, Université de Rouen, France*
M. Luc PERREAULT, *IREQ, Hydro-Quebec, Varennes, Québec*
Mme Anne-Catherine FAVRE, *LTHE, Grenoble Institut Polytechnique, France*
M. Benoît HINGRAY, *LTHE, CNRS, Grenoble, France*
M. Denis CŒUR, *ACTHYS Diffusion, Biviers, France*
M. Dominique ROUX, *EDF UP Méditerranée, Marseille, France*
M. Thibault MATHEVET, *EDF DTG, Grenoble, France*
M. Vazken ANDRÉASSIAN, *Irstea, Antony, France*

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Invité
Invité
Co-directeur de thèse
Directeur de thèse

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**L'Institut des Sciences et Industries
du Vivant et de l'Environnement**

(AgroParisTech)

Spécialité : Hydrologie

Présentée et soutenue publiquement par

Anna KUENTZ

le 8 juillet 2013

**Un siècle de variabilité hydro-climatique
sur le bassin de la Durance**

Recherches historiques et reconstitutions

Jury

M. Cyril KAO, *AgroParisTech, Paris, France*

M. Nicolas MASSEI, *M2C, Université de Rouen, France*

M. Luc PERREAULT, *IREQ, Hydro-Quebec, Varennes, Québec*

Mme Anne-Catherine FAVRE, *LTHE, Grenoble Institut Polytechnique, France*

M. Benoît HINGRAY, *LTHE, CNRS, Grenoble, France*

M. Denis CŒUR, *ACTHYS Diffusion, Biviers, France*

M. Dominique ROUX, *EDF UP Méditerranée, Marseille, France*

M. Thibault MATHEVET, *EDF DTG, Grenoble, France*

M. Vazken ANDRÉASSIAN, *Irstea, Antony, France*

Président

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Invité

Invité

Co-directeur de thèse

Directeur de thèse

AgroParisTech

EDF DTG, 21 avenue de l'Europe – BP41, 38040 Grenoble cedex

Istea, HBAN, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS10030, 92761 Antony cedex

Remerciements

Je souhaite remercier en premier lieu les membres de mon jury de thèse : Nicolas Masséi et Luc Perreault qui ont accepté le rôle de rapporteurs de ce mémoire, Anne-Catherine Favre, Benoît Hingray et Cyril Kao pour avoir lu et évalué ce travail en tant qu'examineurs. Denis Coeur, historien, et Dominique Roux, délégué à la coordination de l'eau à l'Unité de Production Méditerranée d'Électricité de France, ont apporté un regard transverse très intéressant au cours de la thèse et lors de la soutenance, je les remercie également d'avoir accepté de participer à ce jury.

Cette thèse a bénéficié d'une subvention de l'Agence Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) au travers d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (CIFRE) entre l'entreprise Électricité de France (EDF), qui l'a hébergée au sein du service Développement Mesures et Méthodes (DMM) de la Division Technique Générale (DTG), et le laboratoire IRSTEA d'Antony. Je remercie donc ces trois entités pour leur soutien financier et académique.

Cette thèse est loin d'être le fruit du travail d'une seule personne, je tiens donc à remercier ici tous ceux qui ont contribué, chacun à leur niveau, à en faire ce qu'elle est.

A ce titre, mes premiers remerciements vont à Thibault Mathevet qui a suivi mon travail au quotidien à EDF, pour ses nombreuses idées, ses conseils et la liberté qu'il a toujours tenu à me laisser. Sa contribution à ce travail est fondamentale sur le plan scientifique, mais je souhaite également souligner que sa passion pour l'hydrologie et son enthousiasme désormais légendaire (*génial!*) ont fortement contribué à ma motivation au jour le jour. Cette expérience était une première pour chacun de nous deux, ce fut un réel plaisir pour moi de parcourir ce chemin (parfois sinueux) en sa compagnie, et j'espère sincèrement que pour Thibault ce n'est qu'un début!

Je souhaite également remercier mon directeur de thèse Vazken Andréassian pour la confiance qu'il nous a accordée et l'expérience qu'il a apportée. Échanger avec lui a toujours été source de plaisir et d'ouverture.

Christian Perret a fortement contribué à ce travail en particulier dans sa première partie. Fin gourmet passionné d'hydrométrie et d'histoire, il représente une véritable mine de savoirs et d'anecdotes qu'il n'hésite pas à partager pour le plus grand plaisir de ses interlocuteurs. Je tiens ici à le remercier pour ses idées, ses remarques constructives et l'intérêt qu'il a toujours montré à travailler sur ces sujets.

Cette thèse aurait pris un tout autre chemin sans la précieuse contribution de Joël Gailhard. Personnage énigmatique arpenteur de couloirs et doté d'une incroyable capacité à gérer toutes les thématiques de l'équipe en même temps, travailler avec lui est une expérience particulière qu'il n'est pas vraiment possible de décrire mais que j'ai par-

ticulièrement appréciée. Ses apports, notamment en ce qui concerne les reconstitutions hydro-climatiques, ont été décisifs et ses grandes facultés de synthèse m'ont été d'une aide précieuse dans les moments où j'en avais besoin.

Un grand merci également à Rémy Garçon, expert au service DMM, pour sa confiance ainsi que pour sa disponibilité et sa pédagogie face à mes questionnements mathématiques et statistiques de dernière minute. Merci aussi de nous avoir fait découvrir différentes spécialités de Thiérache et la gare de Marly-Gomont !

Retrouver et exploiter des archives est une activité passionnante mais relativement complexe et très chronophage. En ce qui concerne la première étape, nous avons bénéficié de l'expérience de l'historien Denis Coeur que je souhaite remercier ici pour son aide précieuse. Pour la suite, j'ai eu la chance au cours de l'été 2012 de travailler avec Laura Guérin, stagiaire de deuxième année de l'école Polytech'Nice et Yasin Gach, stagiaire de première année de l'École Nationale Supérieure de l'Énergie, l'Eau et l'Environnement (ENSE3), qui ont minutieusement épluché, retranscrit, synthétisé et numérisé les nombreuses archives présentes à la DTG ou photographiées par D. Coeur, le tout avec sérieux et bonne humeur. Qu'ils en soient ici grandement remerciés. La longue série de la Durance à La Clapière a néanmoins été numérisée avant leur arrivée, cela grâce à l'aide des collègues du service : Cécile, Federico, Frédéric et Thibault qui ont accepté de dicter et taper ces chiffres, et à la patience de tous les autres qui ont dû écouter ces dictées pendant quelques heures.

Je remercie les hydromètres du Centre Hydrométrique Alpes (CHA), en particulier Thierry Garnier et Alain Menant qui m'ont emmenée plusieurs fois lors de leurs tournées de jaugeages sur la Durance et ses affluents. Merci à eux pour m'avoir fait découvrir leur métier et leur expérience, et pour avoir partagé leur connaissance de chaque station hydrométrique et plus largement du bassin de la Durance. Je souhaite également rendre hommage à Frédéric Gras que j'ai eu la chance de côtoyer lors d'une tournée de jaugeages sur la moyenne Durance.

Toute cette aventure a commencé grâce à Federico Garavaglia et Emmanuel Paquet, qui m'ont permis de réaliser mon stage de fin d'études sous leur encadrement à EDF. Grand merci à eux pour m'avoir introduite dans le monde mystérieux de l'hydrologie et donné l'envie d'aller plus loin.

Merci à Caroline Imbert, chef de service à DMM pendant la plus grande partie de ma thèse, pour m'avoir accueillie, pour avoir contribué au fort esprit d'équipe présent au sein du "domaine eau", et pour l'importance qu'elle a attaché à ce que ces trois années passées constituent pour moi une expérience professionnelle à part entière, notamment par ses nombreux conseils (même si je ne les ai pas tous suivis !)

Je remercie chaleureusement mes collègues de bureau successifs pour leur bonne humeur et tous les bons moments partagés : Marie-Thé et Joël, Pierre et Thibault, Mathieu, et enfin David, en première ligne pendant ma rédaction, que je remercie pour son éternelle joie de vivre et son aide précieuse sur \LaTeX !

Plus largement, tous les collègues de la DTG ont apporté leur petite touche personnelle à ces trois années, depuis leur bureau, la machine à café ou même sur les skis ou les crampons : Cécile pour nos nombreuses discussions sur des sujets très variés, sa bonne humeur et sa présence féminine (qui m'a manquée sur la fin !), Fede pour avoir partagé ses expériences et ses nombreux petits conseils de jeune docteur, et pour m'avoir mis la pression avec une soutenance au top en amphithéâtre ! Manu et l'histoire de sa vie (sans parler du Blond et de Buzz l'Éclair), Fred et ses conseils montagne, matos ou rédaction, Thomas M. et ses questions surprenantes, Mathieu le « traître du CHA » (merci pour les calages MORDOR), tous les joueurs de frisbee, les prévisionnistes du CHA pour la planification des week-end, William toujours là pour rendre service à coups d'ArcGIS

(merci pour les cartes de pluies!), Karine, son humour décapant et son rire communicatif, Thomas E. et ses multiples fonctions R bien pratiques, Jean-Pierre et ses explications sur le dépouillement des limnigrammes ou sur la fabrication de l'eau-de-vie, Jean-Jacques, le vélo et la Sicile, tous les stagiaires de passage, bref, impossible de citer tout le monde, mais que ce soit dit (ou répété) à tous : ANATEM!

Le fruit de ces trois années à la DTG n'est pas seulement le document que vous avez entre les mains. C'est également pour moi une expérience à la fois scientifique et humaine qui, quelle que soit la suite de mon parcours, me sera d'une grande utilité. Je remercie donc encore une fois toutes ces personnes qui chacune à leur manière, par leur humanité, m'ont aidé non seulement à construire cette thèse mais aussi à me construire moi même.

Même si mes passages à Paris ont été peu nombreux, je souhaite remercier toute l'équipe des doctorants d'IRSTEA Antony et de Sisyphe, et plus largement tous les membres du Club International d'Hydrologie Sociale avec qui j'ai passé de très bons moments d'hydrologie et de détente que ce soit au bureau, dans les conférences, au cours du stage de terrain de l'école doctorale sur mon bassin fétiche (vive les hydro-blaireaux!), chez Mamane ou lors de la Nouvelle Année Socialement Hydrologique. Des remerciements plus particuliers vont à Pierre Brigode et à Claire Magand avec qui j'ai partagé beaucoup, souvent par télécommunications interposées (toujours disponibles pour les petites questions urgentes!) mais aussi lors de week-ends hydrologiques notamment sur la Durance, rivière à laquelle Claire, vénérant son objet d'étude, n'a pas hésité à faire l'offrande de l'une de ses dents lors d'une descente tumultueuse!

Je souhaite également adresser un grand merci à tous mes proches (pas forcément au sens géographique) et à ma famille qui m'a toujours soutenue et encouragée dans mes choix. Merci à mes parents et grands-parents pour plein de choses, par exemple pour m'avoir fait aimer l'eau, la montagne et la Durance bien avant qu'elles ne deviennent l'objet de mon travail. Merci aussi à Antoine et Judith, que j'admire énormément tout simplement pour ce qu'ils sont et que je retrouve à chaque fois avec la même excitation que quand j'étais enfant. Une belle pensée aussi pour la relève, Jules, Anatole et Suzon, dont l'énergie fait plaisir à voir et à partager.

Enfin, tour à tour cuisinier, relecteur attentif, marchand de sable, instigateur de bouffées d'air ou encore compagnon de cordée, j'adresse un merci tout particulier à Titouan qui m'a accompagnée chaque jour et a contribué à sa manière à la réussite de cette thèse et aux bonheurs de ces trois années.

Et maintenant, n'oubliez pas de lire aussi la suite : bonne lecture!



Résumé

Dans un contexte de variabilité climatique et de multiplication des usages de l'eau, la compréhension et la prévision de la variabilité des débits des cours d'eau est aujourd'hui un enjeu majeur pour améliorer la gestion des ressources en eau à l'échelle des bassins versants. En France, le bassin versant de la Durance (Alpes du Sud), lieu de multiples usages de l'eau (hydroélectricité, agriculture, alimentation en eau potable, loisirs), fait l'objet d'une attention particulière en ce qui concerne les impacts du changement climatique qui pourraient être importants du fait de sa situation géographique et de son régime partiellement nival, et remettre en question les équilibres en place permettant le partage de la ressource.

Dans l'optique d'une meilleure anticipation de la variabilité hydrologique d'un bassin versant, bien connaître le passé est une étape fondamentale permettant à la fois une meilleure connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin et une mise en perspective des projections hydro-climatiques futures. Cette thèse a pour objectif et résultat principal de faire progresser l'état des connaissances sur la variabilité hydrologique du bassin de la Durance à l'échelle du dernier siècle. Deux axes principaux ont été développés pour remplir cet objectif.

Une première étape a été la recherche et la mise au jour d'un ensemble de longues séries hydrométriques concernant la Durance et ses affluents, permettant d'élever à 11 le nombre de séries centenaires de débits journaliers aujourd'hui disponibles sur ce bassin. Les nombreux documents accompagnant les données retrouvées nous ont par ailleurs permis de retracer, pour une partie de ces séries, l'évolution des méthodes utilisées pour les construire. Un processus de simulation des méthodes anciennes à partir de données horaires disponibles sur la période récente nous a permis de quantifier l'incertitude associée à ces méthodes et de mettre en évidence des biais importants causés par celles-ci sur certaines portions de séries. Une méthode de correction a été proposée et appliquée à plusieurs séries.

Le deuxième axe de notre travail a consisté en la reconstitution de séries hydrologiques en différents points du bassin. À cette fin, nous avons présenté et appliqué une méthode originale appelée ANATEM de reconstitution de séries climatiques à l'échelle du bassin versant à partir de données climatiques de grande échelle (champs de pressions atmosphériques), combinées à des informations plus régionales (séries de précipitations ou de températures observées). Les séries climatiques ainsi reconstituées ont ensuite été utilisées en entrée d'un modèle hydrologique pour construire des séries de débits. Ce processus nous a permis d'obtenir une vingtaine de séries hydrologiques couvrant la période 1884-2010 sur le bassin de la Durance. La comparaison des reconstitutions hydro-climatiques avec les longues séries de débits observés aujourd'hui disponibles a permis de valider la chaîne de reconstitution sur une période de plus d'un siècle.

Les séries observées et reconstituées illustrent finalement la variabilité hydrologique du bassin de la Durance qui se caractérise par une alternance de périodes sèches et humides à l'échelle de la décennie, ainsi que par une légère tendance à la baisse des débits. Ces longues séries de l'hydrologie du passé permettront de mettre en perspective les études prospectives sur les ressources en eau disponibles à l'échelle du siècle prochain.

Abstract

Understanding and predicting hydrological variability is becoming a major issue to improve water resources management at the watershed scale, as climate variability and multipurpose use of water increase stress on the available resources. In France, the Durance watershed (South part of the Alps) is both characterised by numerous water-related activities such as hydropower, irrigation, water supply, tourism, and by a wide range of meteorological contexts ranging from mountainous to dry Mediterranean watersheds. As a consequence, this watershed appears as very sensitive to observed and projected climate variability, with an impact on water resources sufficient to question the current balance between users.

In order to better forecast the Durance watershed hydrological variability, tracing back its past evolution is an essential step. Indeed, historical knowledge provides a better understanding of how the watershed works, and put into perspective hydro meteorological projections for the next century. The main goal of this Ph.D. thesis is then to improve our knowledge of the hydrological variability of the Durance watershed over the last century. Two main themes have been developed.

The first step focused on historical research, bringing to light 11 centennial time-series of daily streamflow on the Durance watershed. Those data were quite well documented, allowing us to follow the evolution of the methods used to construct some of those time-series. Based on recent streamflow time-series, a simulation process allowed us to quantify the uncertainty associated to the methods used in the past, and to highlight the significant biases they carried on some periods of time. A correction process was then developed, leading to the partial revision of some of the time-series.

A second step involved reconstructing hydrological time-series at different points of the watershed. An original method, called ANATEM, has been introduced and exhaustively applied to rebuild climatological time-series at the watershed scale. This method is based on the use of large scale climatological variables (atmospheric pressure fields) combined with regional scale observations (observed precipitation or air temperature). Those reconstructed climatological time-series were then prescribed in a rainfall-runoff model, allowing the computation of hydrological simulations on the 1884-2010 period. The comparison of the simulated data with our 11 centennial observed time series allowed us to validate our hydro-climatological reconstruction chain over more than a century.

Finally, the observed and simulated time-series illustrate the climatological and hydrological variability of the Durance watershed. This variability is characterised by the succession of alternatively dry and humid periods lasting for ten to fifteen years, and by a slight trend to streamflow decrease. These long-term hydrological time-series will then put into perspective future investigations on water resources available over the next century.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	vii
Table des matières	xi
Table des figures	xv
Liste des tableaux	xxv
Introduction	1
1 Présentation du bassin de la Durance	7
I Géographie	8
II Données climatiques et hydrologiques sur le bassin de la Durance	12
II.1 Données climatiques	12
II.2 Données hydrologiques	14
III Climatologie	19
III.1 Températures	19
III.2 Précipitations	19
III.3 Neige et glaciers	26
IV Géologie	27
IV.1 Une rivière voyageuse	27
IV.2 Quelques éléments de géologie	27
V Hydrologie	28
V.1 Modules	29
V.2 Régimes	29
V.3 Extrêmes	31
VI Aménagements de la Durance	33
VI.1 Les premiers canaux	33
VI.2 Les débuts de l'hydroélectricité en Durance	33
VI.3 Vers un aménagement global	34
VI.4 L'aménagement actuel	35
VII Le projet R ² D ² 2050	37
VIII Synthèse du premier chapitre	37

2	Données historiques	39
I	Recherche d'archives de données hydrologiques	41
II	Petit historique de l'hydrométrie en Durance	42
III	Mode de construction des séries historiques de débits journaliers	46
III.1	Méthode générale de construction d'une série de débits	46
III.2	Évolution des méthodes de mesure et d'échantillonnage de la hauteur d'eau	47
III.3	Description des méthodes de mesure et d'échantillonnage de la hauteur d'eau	48
IV	Simulation des méthodes anciennes de mesure et d'échantillonnage de la hauteur d'eau	52
IV.1	Simulation de la méthode de lecture quotidienne à heure fixe de la hauteur d'eau à l'échelle	52
IV.2	Simulation de la méthode d'enregistrement graphique et dépouillement manuel des limnigrammes	53
IV.3	Mode de comparaison	55
IV.4	Stations analysées	55
V	Analyse des incertitudes inhérentes à la méthode de lecture quotidienne à heure fixe de la hauteur d'eau à l'échelle	56
V.1	Exemple de la série de débits du Verdon à Colmars	56
V.2	Analyse sur un échantillon de stations	61
V.3	Impact de la méthode de lecture quotidienne à l'échelle sur le calcul du module interannuel	63
V.4	Correction des séries de débits construites par la méthode de lecture quotidienne à l'échelle	66
VI	Analyse des incertitudes inhérentes à la méthode d'enregistrement graphique et dépouillement manuel des limnigrammes	69
VI.1	Représentation en fonction de la variation infra-journalière de hauteur d'eau	69
VI.2	Représentation en fonction du débit moyen journalier	72
VII	Intégration dans le calcul de l'incertitude globale des débits	74
VIII	Synthèse du deuxième chapitre	76
3	La méthode ANATEM	77
I	Une combinaison de deux sources d'information	78
I.1	Reconstitution de séries par comparaison à une série témoin	78
I.2	Utilisation de variables de grande échelle : la méthode des analogues . . .	80
I.3	Formulations de la méthode ANATEM	82
II	Données et paramètres pour la méthode des analogues	87
II.1	Données synoptiques	87
II.2	Paramètres utilisés pour la méthode des analogues	88
III	Quelles séries pour le témoin ?	90
III.1	Nature du témoin	91
III.2	Qualité du témoin	92
IV	Synthèse du troisième chapitre	98
4	Reconstitution de séries climatiques sur le bassin de la Durance	101
I	Méthodologie	102
II	Outils d'évaluation des reconstitutions	103
III	Exemple - Reconstitution de séries climatiques sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette	107
III.1	Reconstitution de la série de températures moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette	108
III.2	Reconstitution de la série de précipitations moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette	125
IV	Analyse sur un échantillon de 22 bassins versants	140

IV.1	Reconstitution des séries de températures de l'air	140
IV.2	Reconstitution des séries de précipitations	150
V	Synthèse du quatrième chapitre	166
5	Analyses complémentaires sur la reconstitution des séries climatiques	167
I	Sensibilité des modèles TEM et ANATEM au choix de la formulation saisonnalisée ou non pour le témoin	168
I.1	Reconstitution de séries de températures	168
I.2	Reconstitution de séries de précipitations	172
II	Sensibilité au choix du témoin : analyse « multi-témoins » sur une période restreinte	177
II.1	Reconstitution de séries de températures	177
II.2	Reconstitution de séries de précipitations	182
III	Que peut-on faire à l'aide de « témoins » issus des réanalyses climatiques ?	187
III.1	Reconstitution de séries de températures	187
III.2	Reconstitution de séries de précipitations	190
IV	Sensibilité des modèles ANA et ANATEM à différents paramètres de la méthode des analogues	193
IV.1	Échantillonnage des analogues	193
IV.2	Choix des données synoptiques	194
V	Synthèse du cinquième chapitre	196
6	Reconstitution de séries hydrologiques sur le bassin de la Durance	199
I	Méthodologie	200
I.1	Modélisation hydrologique	200
I.2	Mise en place de la modélisation probabiliste	203
I.3	Qualité des modèles hydrologiques utilisés	203
I.4	Évaluation en deux temps des reconstitutions hydrologiques	204
II	Reconstitution de la série hydrologique de l'Ubaye à Barcelonnette	205
II.1	Performances du modèle hydrologique	206
II.2	Reconstitution à partir des séries climatiques ANATEM	210
II.3	Reconstitution à partir des données issues de la réanalyse uniquement	222
III	Résultats obtenus sur l'échantillon de 20 bassins versants (1948-2010)	227
III.1	Chroniques annuelles	227
III.2	Scores numériques relativement à la simulation de référence et aux obser- vations	233
IV	Évaluation sur le long terme pour 8 bassins versants	238
IV.1	Chroniques annuelles des reconstitutions hydro-climatiques sur 8 bassins versants	238
IV.2	Performances en comparaison aux débits observés	243
V	Validation croisée avec la dendrochronologie	246
VI	Synthèse du sixième chapitre	247
7	Variabilité à long terme observée et reconstituée sur le bassin de la Durance	249
I	Un siècle de variabilité hydrologique...	250
I.1	... observée	250
I.2	...reconstituée	251
II	Sensibilité au calage du modèle hydrologique	253
II.1	Sensibilité au critère de calage	253
II.2	Sensibilité à la période de calage	257
III	Comparaison avec les reconstitutions obtenues sans la série témoin de Gap	260
IV	Synthèse du septième chapitre	264
	Conclusion	267

Bibliographie	273
Annexes	283
A Reconstitution des températures de l'air sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette par le modèle ANATEM avec un témoin issu de la réanalyse	285
B Reconstitution des précipitations sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette par le modèle ANATEM avec un témoin issu de la réanalyse	293
C Reconstitution des précipitations sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette par les modèles ANA et ANATEM avec « resampling »	297
D Reconstitution des précipitations sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette par le modèle ANA à partir des données synoptiques EMULATE	305
E Reconstitutions de la série hydrologique de l'Ubaye à Barcelonnette à partir des séries climatiques ANA et TEM	309
F Article : Hydrométrie et hydrologie historiques du bassin de la Durance	323
G Article : More than 100 years of climatic and hydrologic variability of a Mediterranean and mountainous watershed : the Durance River	333

Table des figures

1.1	Localisation géographique du bassin de la Durance.	8
1.2	La Durance et ses principaux affluents.	9
1.3	Découpage de la Durance en trois sous-bassins.	10
1.4	Courbes hypsométriques des trois sous-bassins de la Durance.	11
1.5	Profils en long de la Durance, de l'Ubaye, du Buech et du Verdon.	11
1.6	Stations de mesures climatologiques sur le bassin de la Durance.	12
1.7	Points de mesures EDF du manteau neigeux sur le bassin de la Durance.	13
1.8	Points de mesure de débits en fonctionnement sur le bassin de la Durance, et sélection de 22 stations.	15
1.9	Caractéristiques de l'échantillon global de points de mesure de débits en service (a, c, e, g) et de la sélection de 22 points (b, d, f, h).	17
1.10	Sélection de points de mesure du débit et bassins versants correspondants.	18
1.11	Normales de températures de l'air sur le bassin de la Durance.	19
1.12	Normales de précipitations annuelles sur le bassin de la Durance.	20
1.13	Normales de précipitations annuelles par type de temps (Classification EDF-DTG, voir Garavaglia <i>et al.</i> , 2010) sur le bassin de la Durance (types de temps 1 à 4).	22
1.14	Normales de précipitations annuelles par type de temps (Classification EDF-DTG, voir Garavaglia <i>et al.</i> , 2010) sur le bassin de la Durance (types de temps 5 à 8).	23
1.15	Répartition saisonnière des précipitations en quelques points du bassin de la Durance.	24
1.16	Équivalent en eau de l'épaisseur moyenne du manteau neigeux à cinq dates de l'année en quelques points du bassin de la Durance.	26
1.17	Régimes hydrologiques en différents points du bassin de la Durance.	30
1.18	Représentation des crues et étiages en fonction de la surface du bassin versant (échelles logarithmiques).	31
1.19	Aménagements hydroélectriques de la Durance (Source : EDF).	35
2.1	Disponibilité temporelle des longues séries quotidiennes de débits.	42
2.2	Localisation et durée d'enregistrement des stations hydrométriques recensées sur la Durance.	45
2.3	Méthodes de construction de la série des débits du Verdon à Colmars.	47
2.4	Évolution des méthodes de construction pour 8 longues séries hydrologiques.	47
2.5	correspondance du 3 novembre 1909 entre M. Rambaud, Chef de station de Serres (ancienne station des Chambons) sur le Buëch et l'ingénieur en chef M. Martin.	48
2.6	Instructions pour les observations quotidiennes de hauteur aux échelles des stations hydrométriques (Imprimé du service des forces hydrauliques dans la région des Alpes, 1949).	49

2.7	Tableau récapitulatif pour l'année 1924 des hauteurs d'eau (en bleu) quotidiennes lues à midi à l'échelle à la station d'Embrun (La Clapière) sur la Durance et débits (en noir) correspondants obtenus via la courbe de tarage. Les hauteurs et débits maxima journaliers sont indiqués dans la marge pour deux journées de l'année : le 7 avril et le 27 septembre.	50
2.8	Limnigramme (évolution de la hauteur d'eau en fonction du temps) enregistré à la Station de Serres sur le Buëch sur la période du 29 mai au 2 juin 1912. Des tracés de dépouillement par moyenne des hauteurs « à vue » sont visibles.	51
2.9	Exemple de dépouillement manuel d'un limnigramme.	52
2.10	Étapes de simulation de la méthode de lecture ponctuelle quotidienne à l'échelle.	53
2.11	Étapes de simulation de la méthode de dépouillement des limnigrammes par moyenne « à vue ».	54
2.12	Évolution des débits horaires et journaliers moyens ou par lecture quotidienne à la station de Colmars sur le Verdon, erreurs liées à la méthode de lecture quotidienne.	57
2.13	Représentation d'une distribution par un boxplot.	57
2.14	Distributions (voir fig. 2.13) mensuelles des erreurs relatives liées à la méthode de lecture ponctuelle à 5h et midi à la station de Colmars sur le Verdon.	58
2.15	Représentation, en fonction de la date et de l'heure de lecture, des erreurs liées à la méthode de lecture quotidienne à l'échelle à la station de Colmars sur le Verdon, pour l'année 1996. A titre d'exemple, l'erreur du 16 mai 1996 pour une lecture faite à 13h vaut -0.18 (croix noire).	59
2.16	Hydrogramme horaire de la crue du 11 août 1996 du Verdon à Colmars : exemple d'écart important entre le débit instantané à heure fixe et le débit moyen journalier.	60
2.17	Représentation, en fonction de la date et de l'heure de lecture, des erreurs moyennes interannuelles liées à la méthode de lecture quotidienne à l'échelle à la station de Colmars sur le Verdon.	60
2.18	Représentation des erreurs moyennes interannuelles liées à la méthode de mesure ponctuelle du débit sur différentes stations.	62
2.19	Erreurs moyennes liées à la méthode de lecture quotidienne à l'échelle à la station de Montdauphin sur le Guil pour les années 1998 à 2001.	64
2.20	Erreurs moyennes interannuelles liées à la méthode de lecture quotidienne à l'échelle à la station de La Clapière sur la Durance pour les années 2001 à 2006.	64
2.21	Régimes interannuels, sur la période de lecture quotidienne à l'échelle, des séries observées et débiaisées, pour les trois stations permettant un débiaisage.	68
2.22	Représentation (voir fig. 2.13) des erreurs liées à la méthode de dépouillement manuel des limnigrammes en fonction de la variation infra-journalière de hauteur d'eau sur différentes stations.	70
2.23	Extrait de la courbe de tarage 1989A1, valable du 22-06-1989 au 29/10/1990 à la station de Colmars sur le Verdon (noir), et deux exemples d'approximations linéaires sur des plages de variation de hauteur d'eau de 5 cm (rouge) et 20 cm (bleu).	71
2.24	Représentation (voir fig. 2.13) des erreurs liées à la méthode de dépouillement manuel des limnigrammes en fonction du débit moyen journalier sur différentes stations.	73
2.25	Courbe de tarage 1989A1, valable du 22-06-1989 au 29/10/1990 à la station de Colmars sur le Verdon (noir), et deux exemples d'approximations linéaires sur des gammes de hauteur d'eau de 0.25 à 0.5 cm (rouge) et 1.25 à 1.5 cm (bleu).	74
3.1	Régimes de température de l'air d'une série cible à reconstituer et d'une série de référence (exemple de la reconstitution de la série de températures de l'air spatialisées sur le bassin de la Durance à La Clapière [cible] à partir de la série de températures de l'air observées à Marseille [référence]).	79

3.2	Écart des régimes de température de l'air d'une série cible à reconstituer et d'une série de référence (exemple de la reconstitution de la série de températures de l'air spatialisées sur le bassin de la Durance à La Clapière [cible] à partir de la série de températures de l'air observées à Marseille [référence]).	79
3.3	Représentation graphique de la formulation d'ANATEM pour les températures de l'air : reconstitution d'une journée j connaissant la valeur $Temoin_j$ du modèle $Temoin$ pour cette journée, ainsi que les valeurs $T_{ANA_j^k}$ et $Temoin_{ANA_j^k}$ de la température observée et du modèle $Temoin$ pour 50 journées analogues. (a) Estimation de la température \hat{T}_j^k à partir d'une journée analogue k , (b) estimation d'un ensemble de températures $[\hat{T}_j^k]_{k=1..50}$ à partir de 50 journées analogues (équation 3.5).	83
3.4	Représentation graphique de la formulation additive pour les précipitations : reconstitution d'une journée j (équation 3.7). Une telle formulation peut faire apparaître des valeurs négatives de précipitations (triangle rouge).	84
3.5	Représentation graphique de la formulation multiplicative pour les précipitations : filtrage préalable.	85
3.6	Représentation graphique de la formulation multiplicative pour les précipitations : reconstitution d'une journée j (équation 3.8). Une telle formulation peut faire apparaître des valeurs excessives de précipitations (triangle rouge).	85
3.7	Représentation graphique de la formulation d'ANATEM pour les précipitations : reconstitution d'une journée j connaissant la valeur $Temoin_j$ du modèle $Temoin$ pour cette journée, ainsi que les valeurs $P_{ANA_j^k}$ et $Temoin_{ANA_j^k}$ des précipitations observées et du modèle $Temoin$ pour 50 journées analogues. (a) Estimation des précipitations \hat{P}_j^k à partir d'une journée analogue k , (b) estimation d'un ensemble de précipitations $[\hat{P}_j^k]_{k=1..50}$ à partir de 50 journées analogues (équation 3.13).	87
3.8	Fenêtre spatiale des variables synoptiques utilisées pour l'analogie et points de la grille de la réanalyse 20CR.	89
3.9	Résultats de la critique de la série de températures de l'air à Marseille par comparaison à un modèle linéaire. Résidus cumulés du modèle linéaire en noir, valeurs du test d'Alexandersson en bleu, ellipses de Bois à 90% en rouge. Les ruptures détectées sont identifiées par une ligne verticale et hiérarchisées par un chiffre bleu en bas du graphique. 9.39 est la valeur critique du test d'Alexandersson pour un niveau de confiance à 90% pour l'effectif de la population étudiée (1500 valeurs mensuelles).	96
3.10	Séries de températures de l'air annuelles à Marseille observée et homogénéisée.	97
3.11	Séries d'anomalies annuelles de températures de l'air à Marseille observée et homogénéisée, et séries Météo-France utilisées comme références. L'anomalie annuelle de température de l'air est calculée par différence entre la valeur moyenne annuelle et la moyenne interannuelle de la série.	97
3.12	Résultats de la critique de la série de précipitations à Gap par comparaison à un modèle linéaire. Résidus cumulés du modèle linéaire en noir, valeurs du test d'Alexandersson en bleu, ellipses de Bois à 90% en rouge. 9.39 est la valeur critique du test d'Alexandersson pour un niveau de confiance à 90% pour l'effectif de la population étudiée (1500 valeurs mensuelles).	98
4.1	Localisation des 22 bassins cibles et des deux séries témoin utilisées pour les reconstitutions climatiques.	102
4.2	Représentation des performances de la reconstitution sous forme d'un diagramme de Taylor.	105
4.3	Représentation des distributions de l'observé et des reconstitutions.	106
4.4	Construction d'un diagramme de fiabilité. L'année 1996 est prise comme exemple et indiquée sur les graphes (a) et (c) par un triangle vert.	107

4.5	Performances du modèle ANA de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.	111
4.6	Performances du modèle ANA de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.	112
4.7	Performances du modèle ANA de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).	113
4.8	Performances du modèle TEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.	116
4.9	Performances du modèle TEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.	117
4.10	Performances du modèle TEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).	118
4.11	Performances du modèle ANATEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.	122
4.12	Performances du modèle ANATEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.	123
4.13	Performances du modèle ANATEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).	124
4.14	Performances du modèle ANA de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.	127
4.15	Performances du modèle ANA de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.	128
4.16	Performances du modèle ANA de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).	129
4.17	Performances du modèle TEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.	132
4.18	Performances du modèle TEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.	133
4.19	Performances du modèle TEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).	134
4.20	Performances du modèle ANATEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.	137
4.21	Performances du modèle ANATEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.	138
4.22	Performances du modèle ANATEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).	139
4.23	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps journalier.	140
4.24	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps mensuel.	141
4.25	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps annuel.	142
4.26	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps annuel (zoom).	142
4.27	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : ratio de moyenne.	143
4.28	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.	144
4.29	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps mensuel.	145
4.30	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps annuel.	145

4.31	Comparaison des performances en corrélation au pas de temps journalier des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM selon l'emplacement du bassin.	147
4.32	Comparaison des performances au pas de temps journalier des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM selon la distance au témoin, la surface, et l'altitude moyenne du bassin versant. Pour les méthodes ANA et ANATEM, les points correspondent aux reconstitutions moyenne.	149
4.33	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps journalier.	150
4.34	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps mensuel.	152
4.35	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps annuel.	152
4.36	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : ratio de moyenne.	154
4.37	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.	154
4.38	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps mensuel.	155
4.39	Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps annuel.	155
4.40	Comparaison des performances en corrélation au pas de temps journalier des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM selon l'emplacement du bassin.	157
4.41	Comparaison des performances au pas de temps journalier des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM selon la distance au témoin, la surface, et l'altitude moyenne du bassin versant. Pour les méthodes ANA et ANATEM, les points correspondent aux reconstitutions moyenne.	159
4.42	Diagrammes de Taylor au pas de temps journalier par type de temps (types de temps 1 et 2) et par méthode (ANA, TEM et ANATEM), pour les 22 bassins versants d'étude.	162
4.43	Diagrammes de Taylor au pas de temps journalier par type de temps (types de temps 3 et 4) et par méthode (ANA, TEM et ANATEM), pour les 22 bassins versants d'étude.	163
4.44	Diagrammes de Taylor au pas de temps journalier par type de temps (types de temps 5 et 6) et par méthode (ANA, TEM et ANATEM), pour les 22 bassins versants d'étude.	164
4.45	Diagrammes de Taylor au pas de temps journalier par type de temps (types de temps 5 et 6) et par méthode (ANA, TEM et ANATEM), pour les 22 bassins versants d'étude.	165
5.1	Sensibilité des reconstitutions de température de l'air au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : corrélation au pas de temps journalier.	169
5.2	Sensibilité des reconstitutions de température de l'air au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : biais sur le régime interannuel.	169
5.3	Sensibilité des reconstitutions de température de l'air au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.	170
5.4	Sensibilité des reconstitutions de température de l'air au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : corrélation au pas de temps journalier.	171
5.5	Sensibilité des reconstitutions de température de l'air au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : biais sur le régime interannuel.	171
5.6	Sensibilité des reconstitutions de température de l'air au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.	172

5.7	Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : corrélation au pas de temps journalier. . . .	173
5.8	Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : biais sur le régime interannuel.	174
5.9	Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.	174
5.10	Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : corrélation au pas de temps journalier.	175
5.11	Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : biais sur le régime interannuel.	176
5.12	Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.	176
5.13	Localisation des séries utilisées comme témoin pour les températures de l'air. . .	178
5.14	Corrélations au pas de temps journalier obtenues pour chaque station avec les différents témoins de température de l'air (méthodes TEM et ANATEM).	179
5.15	Corrélations au pas de temps journalier obtenues pour un bassin versant de reconstitution donné avec les différents témoins de température de l'air (méthode ANATEM).	180
5.16	Corrélations au pas de temps journalier obtenues avec chaque témoin de température de l'air, tous bassins versants de reconstitution confondus (méthodes TEM et ANATEM).	181
5.17	Localisation des séries utilisées comme témoin pour les précipitations.	182
5.18	Corrélations au pas de temps journalier obtenues pour chaque station avec les différents témoins de précipitations (méthodes TEM et ANATEM).	184
5.19	Corrélations au pas de temps journalier obtenues pour un bassin versant de reconstitution donné avec les différents témoins de précipitations (méthode ANATEM).	185
5.20	Corrélations au pas de temps journalier obtenues avec chaque témoin de précipitations, tous bassins versants de reconstitution confondus (méthodes TEM et ANATEM).	186
5.21	Chroniques annuelles des anomalies d'épaisseur et de température de l'air au sol au point-grille (4°,44°) de la réanalyse NOAA, et de 19 séries de températures de l'air homogénéisées de Météo-France.	188
5.22	Diagrammes de Taylor aux pas de temps journalier et mensuel obtenus pour les reconstitutions des températures du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette à partir de différents types de séries témoin.	189
5.23	Diagrammes de Taylor aux pas de temps journalier et mensuel obtenus pour les reconstitutions des températures du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette à partir de différents types de séries témoin.	191
5.24	Chroniques annuelles des anomalies de précipitations observées et des précipitations lissées sur 9 ans observées et reconstituées par ANA et ANATEM (témoin : P036) pour la station de Gap.	192
5.25	Chroniques annuelles des anomalies de précipitations de la série homogénéisée de Météo-France et des précipitations lissées sur 9 ans de la série homogénéisée de Météo-France et des reconstitutions par ANA et ANATEM (témoin : P026) pour la station de Marseille.	193
5.26	Diagrammes de Taylor au pas de temps annuel obtenus pour les reconstitutions des précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette à partir de deux méthodes d'échantillonnage des journées analogues.	195
5.27	Reconstitution de la série de précipitations à Gap par la méthode des analogues et deux archives climatiques différentes.	196
6.1	Schéma conceptuel du modèle hydrologique MORDOR (schéma H. Combes - EDF).	201

6.2	Performances du modèle hydrologique associé aux données climatiques SPAZM (simulation de référence) pour la représentation des débits de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.	206
6.3	Performances du modèle hydrologique associé aux données climatiques SPAZM (simulation de référence) pour la représentation des débits de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.	208
6.4	Performances du modèle hydrologique associé aux données climatiques SPAZM (simulation de référence) pour la représentation des débits de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel.	209
6.5	Diagramme de Taylor (3 pas de temps) du modèle hydrologique associé aux données climatiques SPAZM (simulation de référence) pour la représentation des débits de l'Ubaye à Barcelonnette.	210
6.6	Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps journalier.	213
6.7	Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps mensuel.	214
6.8	Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps annuel.	215
6.9	Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps journalier.	219
6.10	Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps mensuel.	220
6.11	Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps annuel.	221
6.12	Performances du modèle [Tair ANATEM (Ep. 20CR) / Pluie ANA] de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps journalier.	224
6.13	Performances du modèle [Tair ANATEM (Ep. 20CR) / Pluie ANA] de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps mensuel.	225
6.14	Performances du modèle [Tair ANATEM (Ep. 20CR) / Pluie ANA] de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps annuel.	226
6.15	Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).	228
6.16	Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).	229
6.17	Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).	230
6.18	Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).	231
6.19	Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).	232
6.20	Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Coefficient de corrélation au pas de temps journalier.	233
6.21	Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Coefficient de corrélation au pas de temps mensuel.	234
6.22	Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Coefficient de corrélation au pas de temps annuel.	235

6.23	Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Ratios de moyenne.	236
6.24	Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Ratios d'écart-type au pas de temps journalier.	237
6.25	Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Ratios d'écart-type au pas de temps mensuel.	237
6.26	Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Ratios d'écart-type au pas de temps annuel.	238
6.27	Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de la Durance à Val-des-Près.	239
6.28	Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de la Durance à Briançon.	239
6.29	Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de la Durance à La Clapière.	240
6.30	Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette.	240
6.31	Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin du Buech aux Chambons.	241
6.32	Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de l'Asse à la Clue de Chabrières.	241
6.33	Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin du Verdon à Colmars.	242
6.34	Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de l'Issole à Saint-André-les-Alpes.	242
6.35	Résultats des reconstitutions hydrologiques sur les huit bassins versants disposant d'une longue série de débits observés (Comparaison aux débits observés).	244
6.36	Ratios de moyenne des reconstitutions hydrologiques sur les huit bassins versants disposant d'une longue série de débits observés (comparaison aux débits observés).	245
6.37	Reconstitution des débits moyens des mois de mai et juin à la station de La Clapière sur la Durance à partir de données dendrochronologiques.	247
6.38	Reconstitution dendro-hydrologique et ANATEM des débits moyens des mois de mai et juin à la station de La Clapière sur la Durance.	247
7.1	Anomalies de débits observés en 8 points de mesure du bassin de la Durance.	250
7.2	Anomalies de débits observés en 8 points de mesure du bassin de la Durance - lissage sur neuf années glissantes.	251
7.3	Anomalies de débits reconstitués (ANATEM) en 8 points du bassin de la Durance.	252
7.4	Anomalies de débits reconstitués (ANATEM) en 8 points du bassin de la Durance - lissage sur neuf années glissantes.	252
7.5	Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques de la Durance à Val-des-Près, à Briançon et à La Clapière, et de l'Ubaye à Barcelonnette selon le critère de calage du modèle.	255
7.6	Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques du Buech aux Chambons, de l'Asse à la Clue de Chabrières, du Verdon à Colmars et de l'Issole à Saint-André-les-Alpes selon le critère de calage du modèle.	256
7.7	Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques de la Durance à Val-des-Près, à Briançon et à La Clapière, et de l'Ubaye à Barcelonnette selon la période de calage du modèle.	258
7.8	Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques du Buech aux Chambons, de l'Asse à la Clue de Chabrières, du Verdon à Colmars et de l'Issole à Saint-André-les-Alpes selon la période de calage du modèle.	259
7.9	Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques de la Durance à Val-des-Près, à Briançon et à La Clapière, et de l'Ubaye à Barcelonnette selon la méthode de reconstitution utilisée pour les précipitations.	261

7.10	Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques du Buech aux Chambons, de l'Asse à la Clue de Chabrières, du Verdon à Colmars et de l'Issole à Saint-André-les-Alpes selon la méthode de reconstitution utilisée pour les précipitations.	262
7.11	Anomalies de débits reconstitués (T ANATEM, P ANA) en 8 points du bassin de la Durance.	263
7.12	Anomalies de débits reconstitués (T ANATEM, P ANA) en 8 points du bassin de la Durance - lissage sur neuf années glissantes.	263
A.1	Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin épaisseur 20CR - Pas de temps journalier	286
A.2	Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin épaisseur 20CR - Pas de temps mensuel	287
A.3	Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin épaisseur 20CR - Pas de temps annuel	288
A.4	Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin température au sol 20CR - Pas de temps journalier	289
A.5	Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin température au sol 20CR - Pas de temps mensuel	290
A.6	Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin température au sol 20CR - Pas de temps annuel	291
B.1	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin précipitations 20CR - Pas de temps journalier	294
B.2	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin précipitations 20CR - Pas de temps mensuel	295
B.3	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin précipitations 20CR - Pas de temps annuel	296
C.1	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec resampling - Pas de temps journalier	298
C.2	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec resampling - Pas de temps mensuel	299
C.3	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec resampling - Pas de temps annuel	300
C.4	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec resampling - Pas de temps journalier	301
C.5	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec resampling - Pas de temps mensuel	302
C.6	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec resampling - Pas de temps annuel	303
D.1	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec données synoptiques EMULATE - Pas de temps journalier	306
D.2	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec données synoptiques EMULATE - Pas de temps mensuel	307
D.3	Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec données synoptiques EMULATE - Pas de temps annuel	308
E.1	Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps journalier	310
E.2	Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps mensuel	311

E.3	Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps annuel	312
E.4	Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps journalier	313
E.5	Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps mensuel	314
E.6	Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps annuel	315
E.7	Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps journalier	316
E.8	Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps mensuel	317
E.9	Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps annuel	318
E.10	Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps journalier	319
E.11	Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps mensuel	320
E.12	Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps annuel	321

Liste des tableaux

1.1	Principales caractéristiques hydro-climatiques des bassins versants sélectionnés. Q_A écoulement moyen annuel, P_A précipitations moyennes annuelles du bassin versant, T température moyenne.	18
1.2	Précipitations spatiales moyennes journalières (PJ en mm/jour) et moyennes annuelles (PA en mm/an) par type de temps (sur la période 1948-2010). « PA tot » : précipitation annuelle moyenne tous types de journées confondus. Pour chaque type de temps pluvieux, les cinq bassins les plus arrosés sont mis en évidence. . .	25
1.3	Modules hydrologiques en 22 points du bassin de la Durance. \bar{Q} Débit moyen interannuel et \bar{Q}_{sp} débit spécifique moyen interannuel (débit rapporté à la surface du bassin versant). Série complète : valeurs calculées sur la période de disponibilité (Dispo) des données de débits. Période 1994-2007 : valeurs calculées sur la période commune à toutes les séries.	30
1.4	Valeurs des débits journaliers minima annuels observés sur 10 jours (VCN_{10}) et 30 jours (VCN_{30}) consécutifs, et des débits journaliers maxima annuels (Q_{MA}) pour différents temps de retours.	32
2.1	Inventaire des 11 stations pour lesquelles une longue série hydrologique est aujourd'hui disponible sous forme numérique. Lorsque la station a changé de nom ou d'emplacement depuis son origine, l'ancien nom et la date de changement sont spécifiés.	42
2.2	Extraits des commentaires et correspondances retrouvés dans les archives des stations hydrologiques.	44
2.3	Stations utilisées pour la simulation des méthodes anciennes de construction de séries de débits, années de début et de fin de la série de hauteurs (et débits) horaires utilisée.	56
2.4	Erreurs sur le module interannuel calculées pour des lectures quotidiennes à 7 heures et midi, et heure et valeur de l'erreur maximale sur le module par station.	65
2.5	Périodes d'utilisation de la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle et heures de lecture correspondantes.	67
3.1	Correctifs appliqués pour l'homogénéisation de la série de températures de l'air à Marseille.	97
5.1	Noms des séries utilisées comme témoin pour les températures de l'air.	178
5.2	Noms des séries utilisées comme témoin pour les précipitations.	183

6.1 Résumé des performances des modèles hydrologiques calés sur chaque bassin versant; r coefficient de corrélation, r_a coefficient de corrélation des séries d'anomalies par rapport au régime moyen, α ratio d'écart-type, β ratio de moyennes, KGE Kling-Gupta Efficiency, NSE Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash et Sutcliffe, 1970). 204

Introduction

Nombre de chercheurs s'intéressent aujourd'hui au climat et à l'hydrologie du futur. Il s'agit là d'une question majeure, non seulement pour la science mais aussi pour l'ensemble de la société, puisque les enjeux liés à l'eau se sont multipliés et sont aujourd'hui nombreux : production d'électricité, agriculture, alimentation en eau potable, industrie, loisirs... Les changements climatiques actuels et prévus soulèvent de nombreuses questions quant à la gestion et au partage de la ressource en eau (Arnell, 2004; Milly *et al.*, 2005; Huntington, 2006; Beniston, 2009). Les bassins versants de montagne sont particulièrement sensibles aux changements climatiques car leur régime hydrologique influencé par la neige peut être fortement impacté par l'augmentation des températures (Viviroli *et al.*, 2011).

EDF gère en France un parc de 435 sites de production hydraulique d'une puissance cumulée de 20 000 MW. D'un point de vue énergétique, la souplesse de fonctionnement et la réactivité des aménagements hydrauliques leur confèrent une place privilégiée dans le parc de production d'EDF, comme base de la production d'électricité et surtout comme moyen d'ajustement lors des pointes de consommation. La prévision des apports naturels en eau au droit de ces ouvrages est un enjeu majeur du gestionnaire, que ce soit pour des raisons de sécurité, de respect des réglementations environnementales ou d'optimisation de la production. Dans un contexte industriel, au delà de la prévision à court et moyen-terme, connaître les éventuels impacts du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau à l'échelle de la décennie ou à des échelles plus larges encore est un réel atout pour l'orientation des choix stratégiques. Dans un contexte plus large, en tant que gestionnaire d'aménagements hydrauliques dont la fonction va pour certains au delà de la production électrique, EDF est également un acteur du partage de l'eau qui est au cœur des problématiques liées au changement climatique.

Le bassin versant de la Durance, affluent du Rhône dans le Sud-Est de la France, est un bon exemple de la complexité des enjeux liés à l'eau. En quelques mots, la chaîne de production hydro-électrique installée sur ce bassin a une puissance instantanée de 2000 MW mais a également une fonction de réservoir d'eau pour l'agriculture (environ 150 000 ha sont irrigués par les eaux de la Durance) et de régulation des crues de la Durance. S'ajoutent à ces usages les prélèvements permettant l'alimentation en eau potable des villes de Marseille et Aix-en-Provence, et l'usage touristique qui s'est développé principalement autour des lacs artificiels de la Durance et du Verdon. Satisfaire l'ensemble des usagers de l'eau de la Durance tout en respectant les contraintes environnementales

(débit minimal nécessaire au maintien de la biodiversité, gestion des sédiments) est donc une tâche d'envergure. L'étude et la gestion du bassin de la Durance est par ailleurs complexifiée par le caractère contrasté de son fonctionnement climatique et hydrologique naturel, lié à sa situation géographique entre les hautes montagnes du massif des Écrins et la Provence méditerranéenne.

Les changements climatiques pourraient remettre en cause les équilibres en place permettant le partage de l'eau : le bassin de la Durance est donc au centre des préoccupations concernant le changement climatique, non seulement à EDF, mais aussi dans le cadre plus large de projets de recherches. Le projet RIWER 2030 (Hingray *et al.*, 2013), centré sur la Haute-Durance, s'est attaché à générer des projections climatiques et hydrologiques jusqu'en 2100 et à proposer, en situation de changement climatique, des scénarios de gestion de l'aménagement de Serre-Ponçon tenant compte de son caractère multi-objectifs (François, 2013). Ce projet est suivi du projet R²D² 2050 (2010-2013) qui a pour objectif de progresser sur l'élaboration d'une vision prospective de la gestion de l'eau sur l'ensemble du bassin de la Durance à l'horizon 2050, au travers de plusieurs étapes visant à caractériser le fonctionnement actuel du bassin, à établir des projections hydro-climatiques et des projections de demande en eau, puis à les confronter pour proposer des options de gestion future.

Mieux anticiper les changements hydrologiques est aujourd'hui une préoccupation majeure, que ce soit à l'échelle de la planète ou du territoire de la Durance. Le titre de ce mémoire laisse pourtant présager que c'est au siècle passé que nous allons nous intéresser. Alors, pourquoi se tourner vers le passé ? Cette démarche n'est pas réellement nouvelle ni propre aux sciences : « Prenez dans le passé des exemples pour l'avenir : ce qui est déjà connu vous fera juger ce que vous ne connaissez pas encore » (Isocrate, IV^{ème} s. av. J.C.), « c'est le passé qui doit conseiller l'avenir » (Sénèque, 64 ap. J.C.). Mais si l'on quitte les philosophes de l'antiquité et que l'on se recentre sur l'hydrologie, on comprend aisément que prévoir la variabilité hydrologique future (demain, dans dix ans, dans cent ans) d'un cours d'eau passe nécessairement par une bonne connaissance de celui-ci, connaissance qui s'appuie sur des observations faites par le passé. Le passé est également un « terrain d'entraînement » sur lequel peuvent être validées des méthodes utilisées pour les projections hydro-climatiques. Enfin, on peut y voir un témoin de la variabilité hydrologique d'un cours d'eau, permettant de replacer dans un contexte plus large et plus relatif les variations actuelles et projetées (Perret *et al.*, 2012).

Si les impacts du changement climatique se font plus directement sur les températures de l'air et les précipitations, et seulement de manière indirecte sur les débits, l'étude de séries hydrologiques revêt un intérêt particulier lié au caractère intégrateur de cette variable. En effet, l'augmentation récente des températures est aujourd'hui indiscutable mais il reste plus difficile de déceler des changements dans les précipitations, notamment du fait de leur forte sensibilité aux caractéristiques locales du lieu où elles sont mesurées.

Pour toutes ces raisons, l'analyse de la variabilité hydrologique passée et présente et la recherche d'impacts du changement climatique dans les données observées font l'objet de nombreuses études. Beaucoup d'entre elles s'attachent à rechercher, dans un ensemble de séries d'observations de débits d'une région donnée, des tendances ou éventuellement des ruptures pouvant indiquer une modification dans le fonctionnement hydrologique de cette région. On retrouve ce type de démarche par exemple à l'échelle de la France (Renard, 2006), de la Suisse (Birsan *et al.*, 2005), de l'Allemagne (Renner et Bernhofer, 2011), de l'Espagne (Lorenzo-Lacruz *et al.*, 2012), de l'Europe (Stahl *et al.*, 2010), du Nord-Ouest des États-Unis (Rood *et al.*, 2005), du Canada (Zhang *et al.*, 2001) ou encore de l'Aus-

tralie (CSIRO, 2010). Certaines études mettent en perspective les changements observés sur les dernières années avec ceux que l'on peut attendre d'après les projections climatiques (Wilson *et al.*, 2010). Malheureusement, les séries hydrométriques disponibles pour mener ce genre d'exercice sont souvent relativement courtes, et on constate généralement une décroissance rapide de la densité spatiale de données hydrologiques lorsque l'on remonte dans le temps au delà des années 1960 ou 1970 (Hannah *et al.*, 2011). Par ailleurs, les longues séries hydrométriques disponibles concernent généralement des grands bassins versants, sur lesquels l'influence de l'homme s'ajoute à celle du climat, rendant plus complexe leur analyse. Hannaford *et al.* (2013) ont montré que la pente et même la direction des tendances détectées dans les séries hydrométriques sont fortement influencées par la variabilité hydrologique naturelle à l'échelle décennale, soulignant ainsi l'importance de fonder ces analyses sur de longues séries.

Au delà des longues séries d'observations hydrologiques, témoins fondamentaux du passé mais dont nous avons évoqué les problématiques de disponibilité spatio-temporelle et d'hétérogénéité, les hydrologues peuvent avoir recours à des sources d'informations parallèles permettant de reconstituer ou de se faire une idée plus ou moins précise de l'hydrologie passée d'un cours d'eau. On peut par exemple citer pour le cas des extrêmes hydrologiques le recours à des données ponctuelles comme les laisses de crues ou les écrits relatant les crues ou les étiages historiques. Pour la reconstitution de la variabilité du débit moyen (ou saisonnier) d'une rivière, il est souvent possible de relier celle-ci à celle d'autres phénomènes naturels comme bien sûr le climat, mais aussi l'accumulation de sédiments dans les lacs naturels (sédimentologie) ou la croissance des arbres (dendrochronologie).

Concernant l'utilisation de variables climatiques, des reconstitutions hydrologiques peuvent être basées sur des séries d'observations de variables climatiques locales comme les précipitations ou les températures de l'air, mais celles-ci sont souvent soumises aux mêmes problèmes de disponibilité temporelle que les séries de débits et présentent, pour ce qui est des précipitations, un caractère très local. En revanche, les progrès récents de la climatologie associés aux mesures anciennes de variables climatiques comme la pression atmosphérique permettent aujourd'hui de reconstituer au pas de temps journalier des champs de pression atmosphérique à l'échelle de la terre entière, et ce dès la fin du XIX^{ème} siècle. Ces informations précieuses rendent aujourd'hui possible la reconstitution du climat et de l'hydrologie d'une région sur une période de plus de cent ans.

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre d'une thèse hébergée à EDF et faisant l'objet d'un contrat CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la REcherche) entre cette entreprise et le laboratoire IRSTEA d'Antony.

Cette thèse a pour principal objectif de faire progresser l'état des connaissances sur la variabilité hydrologique du bassin de la Durance à l'échelle du dernier siècle. Deux axes principaux sont développés pour remplir cet objectif, d'une part la recherche et l'analyse de longues séries quotidiennes de débits observées, et d'autre part la reconstitution de séries hydro-climatiques par une méthode originale basée sur l'utilisation de données climatiques de grande échelle combinées à des informations plus régionales.

Nous présenterons dans un premier chapitre le contexte du bassin de la Durance d'un point de vue géographique, climatique et hydrologique. Les données climatiques et hydrologiques disponibles et utilisées dans cette thèse seront également détaillées, de même que les aménagements hydrauliques présents sur le bassin et leurs principaux usages. Une brève présentation du projet R²D² 2050 clôturera le chapitre.

Le deuxième chapitre sera consacré à la description de notre démarche de recherche et d'analyse de séries quotidiennes de données hydrométriques anciennes. Une première

partie détaillera les résultats de travaux de recherches documentaires menés dans le cadre de cette thèse. Ensuite, nous nous intéresserons à l'évolution des méthodes utilisées pour construire ces séries hydrométriques puis nous nous attacherons à quantifier l'incertitude associée aux méthodes les plus anciennes.

Dans un troisième chapitre, nous présenterons la méthode ANATEM permettant la reconstitution de données quotidiennes de températures de l'air et de précipitations à une échelle locale à partir d'informations climatiques de grande échelle (champs de pressions) associées à des données plus régionales.

La méthode ANATEM sera appliquée dans le quatrième chapitre à la reconstitution des séries de précipitations et de températures de l'air de 22 bassins versants situés dans le bassin de la Durance. Les résultats obtenus seront comparés aux données observées disponibles.

Le cinquième chapitre présentera plusieurs analyses complémentaires sur la méthode ANATEM, ayant pour objectif son optimisation ou l'évaluation de son utilisation dans des conditions de disponibilité moindre de données.

La reconstitution de séries hydrologiques à partir des séries climatiques préalablement construites sera présentée dans le sixième chapitre. Les reconstitutions hydrologiques seront comparées aux débits observés sur la période récente, mais également sur l'ensemble du XX^{ème} siècle pour plusieurs d'entre elles.

Enfin, le septième et dernier chapitre proposera une synthèse des données hydrologiques observées et reconstituées : on s'intéressera en particulier à la variabilité basse fréquence de l'hydrologie de la Durance (séquences d'années sèches et d'années humides) que les 140 années de données constituées nous permettent d'appréhender.

Présentation du bassin de la Durance

Ce premier chapitre a pour objet la présentation du bassin sur lequel porte notre étude. Le bassin de la Durance sera présenté sous ses aspects géographique, climatique, géologique et hydrologique. Nous donnerons également une description des aménagements hydrauliques qui sont nombreux sur ce bassin. Enfin, nous introduirons le projet R²D² 2050 auquel participe ce travail.

Sommaire

I	Géographie	8
II	Données climatiques et hydrologiques sur le bassin de la Durance .	12
	II.1 Données climatiques	12
	II.2 Données hydrologiques	14
III	Climatologie	19
	III.1 Températures	19
	III.2 Précipitations	19
	III.3 Neige et glaciers	26
IV	Géologie	27
	IV.1 Une rivière voyageuse	27
	IV.2 Quelques éléments de géologie	27
V	Hydrologie	28
	V.1 Modules	29
	V.2 Régimes	29
	V.3 Extrêmes	31
VI	Aménagements de la Durance	33
	VI.1 Les premiers canaux	33
	VI.2 Les débuts de l'hydroélectricité en Durance	33
	VI.3 Vers un aménagement global	34
	VI.4 L'aménagement actuel	35
VII	Le projet R²D² 2050	37
VIII	Synthèse du premier chapitre	37

I | Géographie

La Durance est un cours d'eau du sud-est de la France. Elle constitue, après la Saône, le deuxième affluent le plus important du Rhône. La figure 1.1 présente la localisation de la Durance et de son bassin versant.

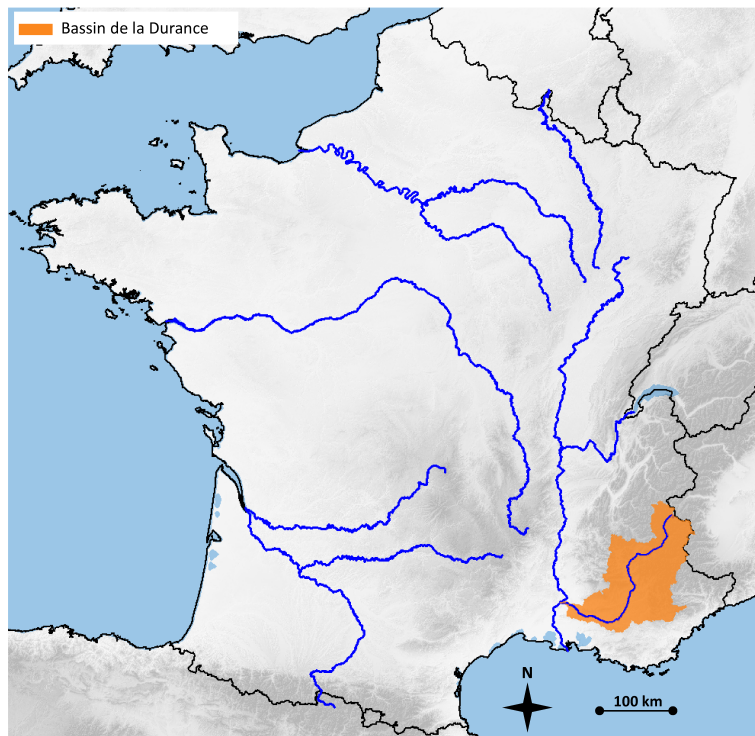


Figure 1.1 – Localisation géographique du bassin de la Durance.

De sa source, située sur les pentes nord-est du Sommet des Anges, proche du col de Montgenèvre dans les Hautes-Alpes, à sa confluence en rive gauche du Rhône au niveau de la ville d'Avignon, la Durance parcourt un peu plus de 300 kilomètres et descend un dénivelé d'environ 2380 m. Le système hydrographique le plus long est en fait le système Clarée-Durance, d'une longueur de 323 kilomètres environ. La Clarée prend sa source au lac de la Clarée, situé au niveau du seuil des Rochilles sur la commune de Névache, et se jette dans la Durance au lieu-dit La Vachette à Val-des-Près, près de Briançon.

La Durance traverse les départements des Hautes-Alpes puis Alpes de Haute-Provence, avant de constituer la limite entre le Vaucluse et le Var puis entre le Vaucluse et les Bouches-du-Rhône. Une faible proportion des départements de la Drôme et des Alpes Maritimes appartient également à son bassin versant.

Les principaux affluents de la Durance sont, en rive gauche et de l'amont vers l'aval le Guil, l'Ubaye, la Blanche, le Sasse, la Bléone, l'Asse, le Verdon et en rive droite la Clarée, la Guisane, la Gyronde, le Buech, le Jabron, le Largue et le Coulon (ou Calavon). Les plus importants sont présentés sur la figure 1.2. Notons également que le bassin versant hydrogéologique de la Fontaine-de-Vaucluse, source de la Sorgue, se trouve partiellement sur le bassin de la Durance. Une partie des eaux du bassin versant géographique du Coulon s'écoule en fait vers la Fontaine de Vaucluse via un important système karstique.

Le bassin versant drainé par la Durance couvre une surface d'environ 14300 km², s'étendant du sommet des Écrins, point culminant du bassin à 4102 m, aux régions provençales du sud-est de la France, très proches de la méditerranée. Les territoires drainés par cette rivière sont donc très variés. Pourtant, Pardé (1925, chap. 7) décrit le bassin de

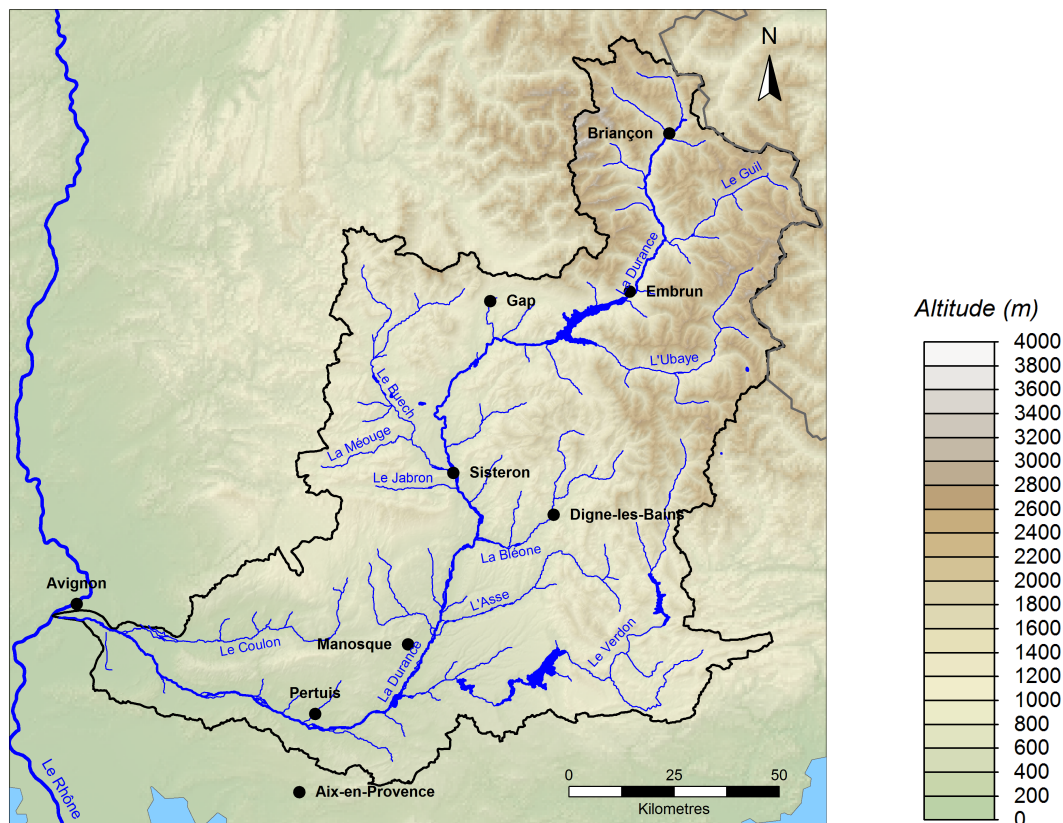


Figure 1.2 – *La Durance et ses principaux affluents.*

la Durance comme « presque entièrement montagneux », en effet, si les chaînes alpines ne couvrent qu'une faible partie (environ 1/6) du bassin, les massifs préalpins y ont pour leur part une très large extension.

La Durance est classiquement décrite à l'aide d'une division en trois parties de son territoire, détaillées ci-dessous.

- La haute Durance s'étend de la source à la confluence Durance-Ubaye, lieu de l'aménagement de Serre-Ponçon.
- La moyenne Durance est la partie comprise entre le confluent de l'Ubaye (aménagement de Serre-Ponçon) et celui du Verdon (aménagement de Jouques-Cadarache). Selon les sources, la limite peut aussi être prise au pont de Mirabeau, qui se trouve très légèrement en aval.
- La basse Durance correspond à la partie aval de la rivière, du confluent du Verdon jusqu'au Rhône.

Ce découpage en trois sous-bassins est présenté sur la figure 1.3. La figure 1.4 présente les courbes hypsométriques des trois sous-bassins et sur la figure 1.5 sont tracés les profils en long de la Durance et de trois de ses affluents.

Dans sa partie amont, la Durance est un torrent de montagne à forte pente : l'inclinaison moyenne du lit de la source à la confluence avec l'Ubaye approche les 20 m/km, et celle de l'Ubaye est encore plus importante (plus de 23 m/km). En dehors de quelques défilés comme ceux de Briançon, l'Argentière, ou Saint-Clément, son lit est relativement large, mais parfois encombré par les cônes de déjection de torrents affluents. Sa vallée est délimitée par la partie Sud-Est du massif des Écrins en rive droite, et par le massif du Queyras en rive gauche. On trouve dans ces massifs les sommets les plus élevés du bassin. Le massif des Écrins culmine à la Barre des Écrins (4102 m), et comporte plusieurs som-

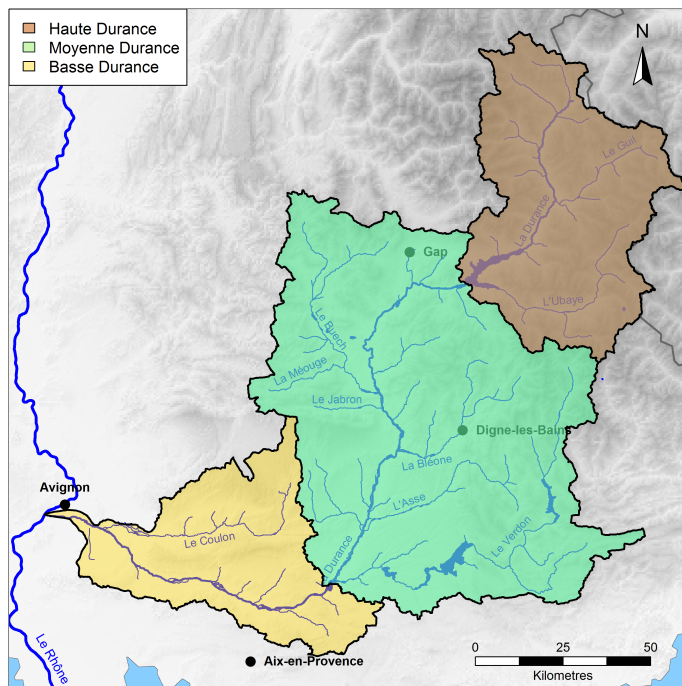


Figure 1.3 – *Découpage de la Durance en trois sous-bassins.*

mets proches de 4000m (Le mont Pelvoux 3946m, l'Ailefroide occidentale 3954 m) dont tout ou partie des eaux se déversent dans la Durance par l'intermédiaire de la Gyronde, confluence du Gyr et de l'Onde. Dans le massif du Queyras, drainé par le Guil, et en haute-Ubaye, on trouve encore de nombreux sommets au delà de 3000 mètres d'altitude. C'est le cas des pics de la Font Sancte (3385 m) et de Rochebrune (3325 m), de l'aiguille de Chambeyron (3411 m) ou encore du Bric de Rubren (3340 m) en Haute Ubaye à la frontière italienne. A Serre-Ponçon, la Durance draine un bassin versant de 3580 km², dont 80% est au dessus de 1500 m d'altitude, et 20% au dessus de 2500 m (figure 1.4).

En moyenne Durance, le paysage est déjà complètement différent. La vallée s'élargit, les montagnes laissent place à des collines et des plateaux comme celui de Valensole, situé en rive gauche. On trouve encore dans le haut-Verdon un sommet de plus de 3000 m, le mont Pelat (3051 m), mais le reste du bassin versant de cet affluent majeur de la Durance est à des altitudes inférieures à 2500 m, dont environ 60% sous 1000 mètres. En dehors du Verdon, les sommets les plus élevés de ce sous-bassin sont ceux du Dévoluy, qui dépassent pour plusieurs d'entre eux les 2500 mètres d'altitude et sont drainés par le Buëch (Grand Ferrand 2758 m, Pic de Bure 2709 m). Le lit de la Durance forme plusieurs méandres avant de se resserrer à une largeur de 30 mètres au niveau de la « porte de Provence » à Sisteron, puis de s'élargir à nouveau à plusieurs centaines de mètres. Il s'agit sur cette portion de la rivière, surtout après la confluence avec la Bléone, d'un lit en tresse, creusé dans les galets des terrasses alluviales. La pente du lit (environ 3.7 m/km) est nettement plus douce qu'en haute-Durance, tout en restant importante pour une rivière de cette ampleur et à cette distance de la mer. Les affluents de la moyenne Durance ont pour la plupart des pentes importantes. La surface du bassin versant de la Durance à Cadarache est de 11700 km², dont environ 30% est à une altitude supérieure à 1500 m (figure 1.4).

La basse Durance draine un bassin intermédiaire relativement petit. Ainsi, le bassin versant de la Durance n'augmente que de 3600 km² environ entre la confluence du Verdon et l'arrivée dans le Rhône. En dehors de la Clue de Mirabeau, où la vallée est large de

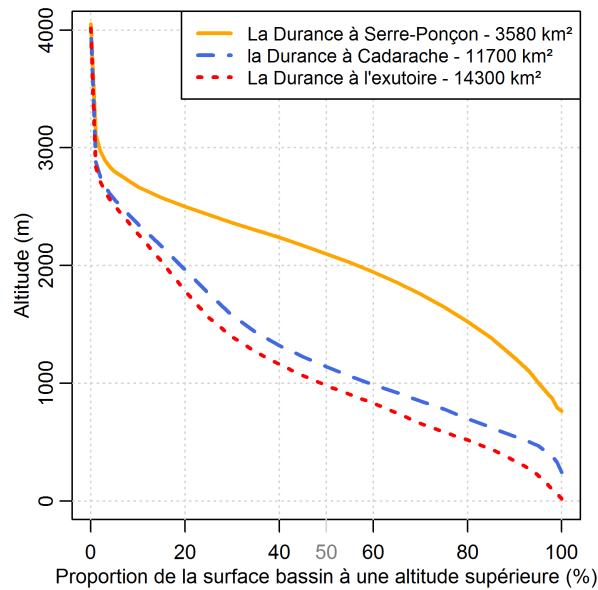


Figure 1.4 – *Courbes hypsométriques des trois sous-bassins de la Durance.*

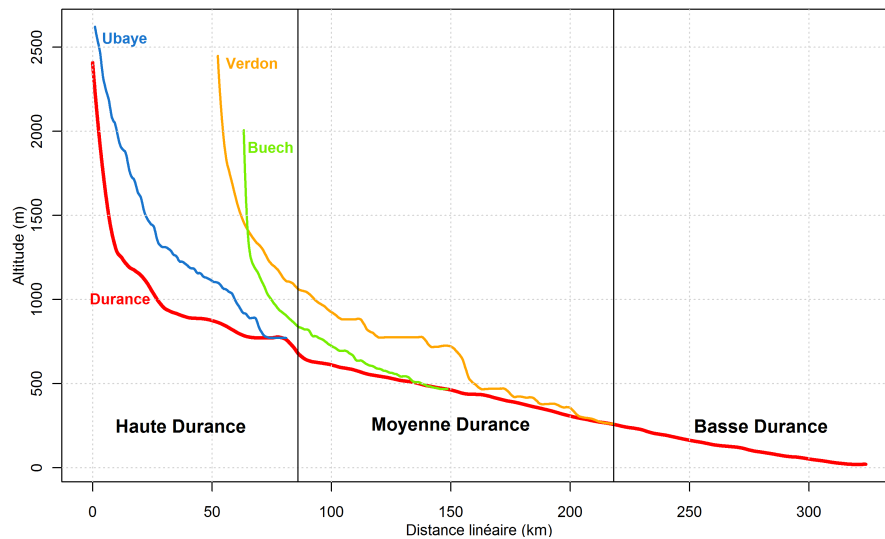


Figure 1.5 – *Profils en long de la Durance, de l'Ubaye, du Buech et du Verdon.*

moins de 150 m, la Durance circule alors dans une large plaine alluviale aride bordée de loin, au Nord par la longue chaîne du Lubéron, au Sud par les collines calcaires des chaînes de Trevaresse, des Côtes et des Alpilles. La pente moyenne de ce dernier tronçon de la Durance reste non négligeable : plus de 2 m/km. À la confluence avec le Rhône, la proportion du bassin de la Durance supérieure à 1500 m vaut 25% (figure 1.4).

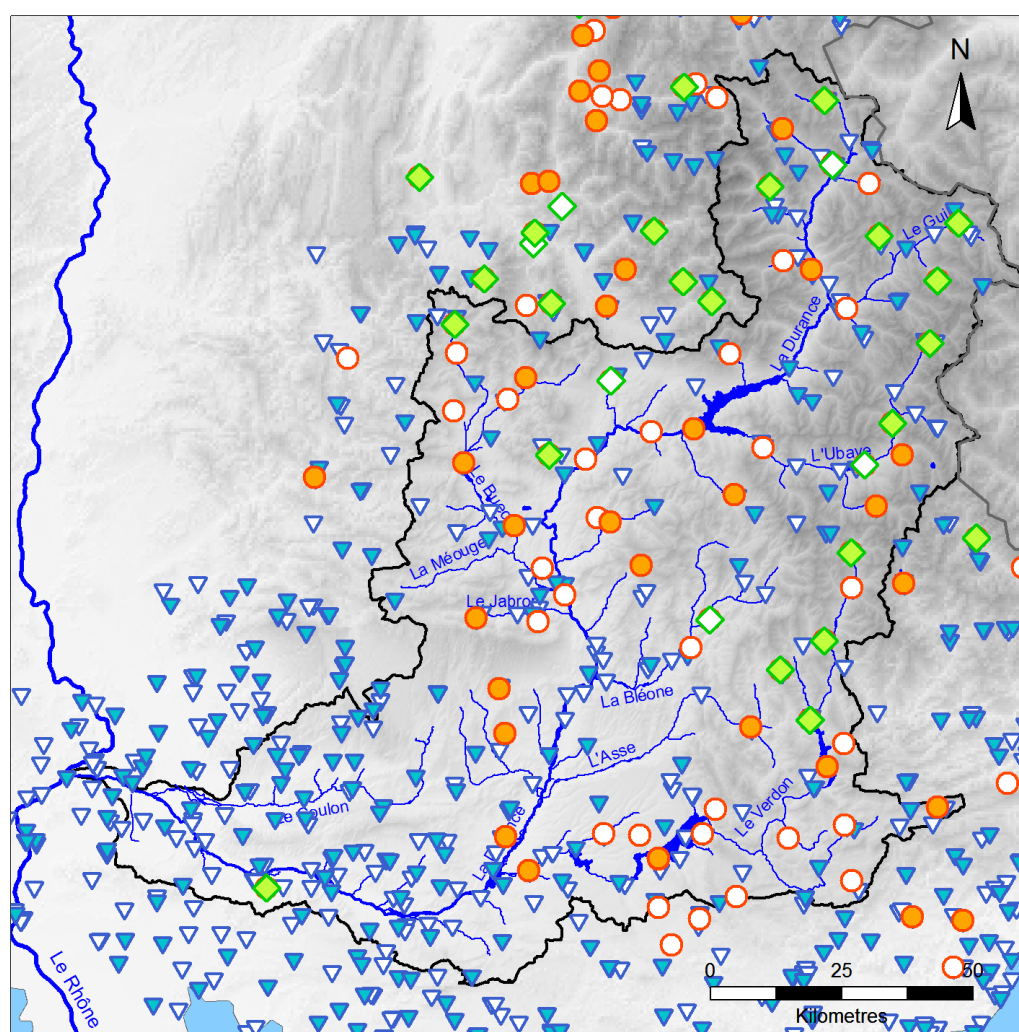
Ces observations mettent en évidence une décroissance rapide de l'altitude du bassin versant de l'amont vers l'aval, et une pente importante de la rivière sur toute sa longueur. La forte pente d'une grande partie des versants qui le composent est également une caractéristique importante du bassin de la Durance.

II | Données climatiques et hydrologiques sur le bassin de la Durance de la Durance

Avant de s'intéresser plus en détail au fonctionnement climatique et hydrologique du bassin de la Durance, nous présenterons dans cette section un aperçu des données disponibles sur ce bassin versant.

II.1 | Données climatiques

Les données climatiques sont nombreuses sur le bassin de la Durance. On trouve de nombreux points de mesure de précipitations et de températures de l'air répartis sur l'ensemble du bassin gérés par Météo-France ou par la Division Technique Générale (DTG) d'Électricité De France (EDF). Ces stations sont localisées sur la figure 1.6.



- | | |
|--|--|
| ○ Pluviomètres EDF arrêtés | ● Pluviomètres EDF en service |
| ◇ Mesures de températures d'air EDF arrêtées | ◇ Mesures de températures d'air EDF en service |
| ▽ Stations Météo-France arrêtées | ▽ Stations Météo-France en service |

Figure 1.6 – Stations de mesures climatologiques sur le bassin de la Durance.

De nos jours, la plupart de ces mesures sont effectuées au pas de temps horaire, mais nous utiliserons dans la suite essentiellement des données journalières. Pour les précipitations, la valeur journalière du jour j est définie comme le cumul de précipitation sur 24 heures : de six heures du matin (UTC) le jour j à six heures du matin (UTC) le jour $j + 1$ pour les données Météo-France, et de sept heures du matin (UTC) du jour j à sept heures du matin (UTC) du jour $j + 1$ pour les données EDF-DTG. Pour la température de l'air, les mesures disponibles sont généralement la température minimale journalière et la température maximale journalière. La température moyenne journalière est donc approximée par la moyenne de ces deux températures extrêmes journalières.

EDF gère également sur le bassin de la Durance un certain nombre de stations permettant d'établir des chroniques d'équivalent en eau de l'épaisseur du manteau neigeux. Il s'agit pour la plupart de perches à neige permettant une mesure de la hauteur de neige, au niveau desquelles sont réalisés ponctuellement des sondages manuels (carottages). Les carottes de neige sont ensuite pesées pour déduire la quantité d'eau correspondant à cette hauteur (équivalent en eau, ou valeur en eau). On trouve également huit nivomètres à rayonnement cosmique (NRC) qui mesurent directement l'eau contenue dans le manteau neigeux. Ces différents points de mesure sont répertoriés sur la figure 1.7

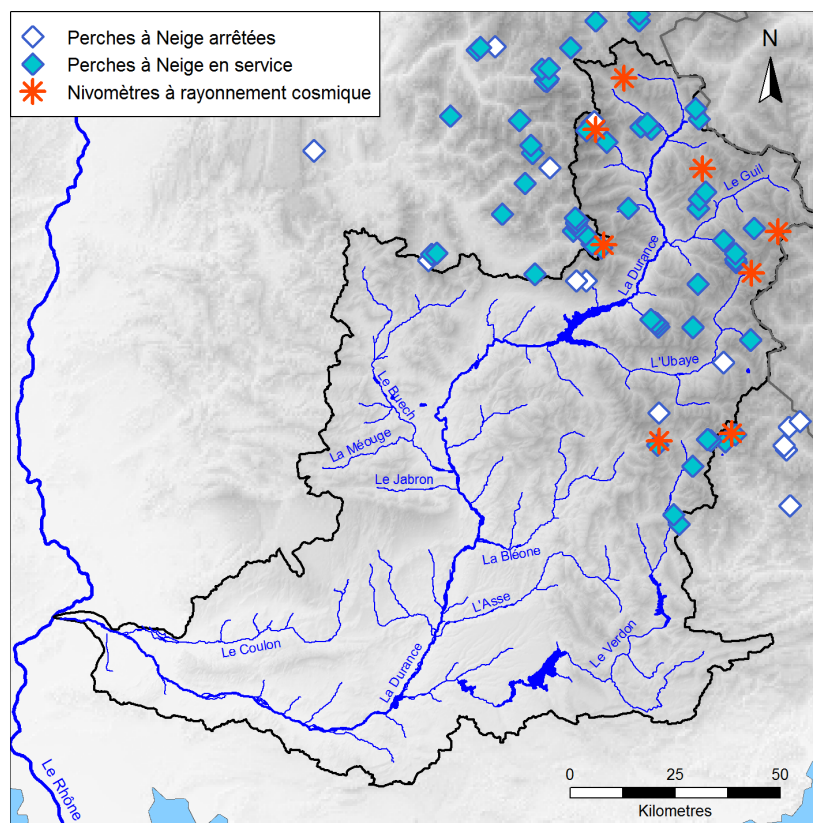


Figure 1.7 – Points de mesures EDF du manteau neigeux sur le bassin de la Durance.

Nous utiliserons dans ce travail des données climatiques spatialisées issues de l'archive SPAZM (Gottardi, 2009; Gottardi *et al.*, 2012). SPAZM est une réanalyse de précipitation et de température de l'air (min. et max.), réalisée grâce à l'extrapolation d'observations au sol par sélection de stations explicatives et régressions linéaires locales. Concernant les précipitations, la méthode d'extrapolation s'appuie sur une ébauche du champ de précipitation par type de circulation atmosphérique (moyenne interannuelle). Pour la

température, la méthode d'extrapolation s'appuie sur deux saisons (été/hiver) et deux types de journées (avec ou sans pluie). Cette archive produit des analyses au pas de temps journalier, à une échelle de 1 km² sur la moitié Sud du territoire français sur la période 01/01/1948 - 31/12/2010.

L'archive SPAZM que nous utiliserons dans le cadre de ce travail a été recalculée et adaptée pour les besoins du projet R²D² 2050 (voir section VII). En effet, Gottardi (2009) a mis en évidence un biais d'estimation des précipitations en montagne, causé notamment par un biais de sous-captation des précipitations solides en montagne. Ce biais a été corrigé statistiquement sur l'archive SPAZM et il existe par conséquent deux archives : SPAZM et SPAZM-majorée. La majoration a été appliquée globalement à toute l'étendue de la ré-analyse et différents travaux ont montré que le coefficient global de sous-captation (60%) n'était pas adapté aux Alpes du Sud. Une nouvelle archive SPAZM-R2D2 a été générée avec un coefficient de sous-captation de 30%.

II.2 | Données hydrologiques

L'idée de constituer des séries de débits sur le bassin de la Durance est ancienne puisqu'elle remonte à 1832 (Imbeaux, 1892). Au début du XX^{ème} siècle on trouvait déjà plusieurs stations hydrométriques opérationnelles fournissant des séries quotidiennes. Nous nous intéresserons dans cette section aux stations actuellement en fonctionnement mais plus de détails sur l'histoire de l'hydrométrie de la Durance et sur les séries anciennes de débits seront donnés dans le chapitre 2.

On décompte aujourd'hui près de 50 points de mesure du débit en fonctionnement sur le bassin de la Durance, localisés sur la figure 1.8. La plupart de ces stations sont gérées par EDF ou la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement de Provence-Alpes-Côte-d'Azur (DREAL PACA). Quelques stations appartiennent à d'autres entités comme le Service de Prévision des Crues Grand Delta (SPC Grand Delta) ou l'Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture (Irstea) de Grenoble. Les données de débits sont fournies par la banque HYDRO et la base de données EDF.

Pour la suite de ce travail, une sélection de 22 points de mesure de débits est utilisée. Cette sélection a été effectuée dans le cadre du projet R²D² 2050 (voir section VII) avec pour objectif d'être représentative de la variabilité des régimes et processus hydrologiques présents sur le bassin de la Durance. Le jeu de données sélectionné pour le projet R²D² 2050 contient initialement 25 stations, mais trois ont été retirées dans cette étude du fait du caractère très influencé des débits correspondants. Il s'agit des débits de la Durance à Oraison-l'Escale, à Jouques-Cadarache et au Pont de Mallemort. Les stations sélectionnées sont mises en évidence sur la figure 1.8.

On trouve deux types principaux de points de mesure du débit sur le bassin de la Durance : une majorité sont des stations hydrométriques installées sur des cours d'eau, mais certains points de mesure correspondent à un aménagement hydraulique au droit duquel les débits sont élaborés par un bilan, de manière à représenter le débit qui aurait coulé au droit de l'aménagement si celui-ci n'avait pas été construit. Ce bilan vise à déterminer le débit entrant dans l'aménagement à partir des données contrôlées, à savoir les débits sortants (turbinés, déversés, réservés) et de la variation de volume stocké dans le barrage. Ces débits sont élaborés par EDF au pas de temps journalier ou mensuel.

Une grande partie des points de mesure du débit fournissent des débits considérés comme naturels. On trouve cependant aussi des stations mesurant des débits influencés (débits réservés à l'aval des ouvrages par exemple) ou des débits dérivés. En ce qui concerne les débits correspondant à des aménagements, leur mode d'élaboration permet

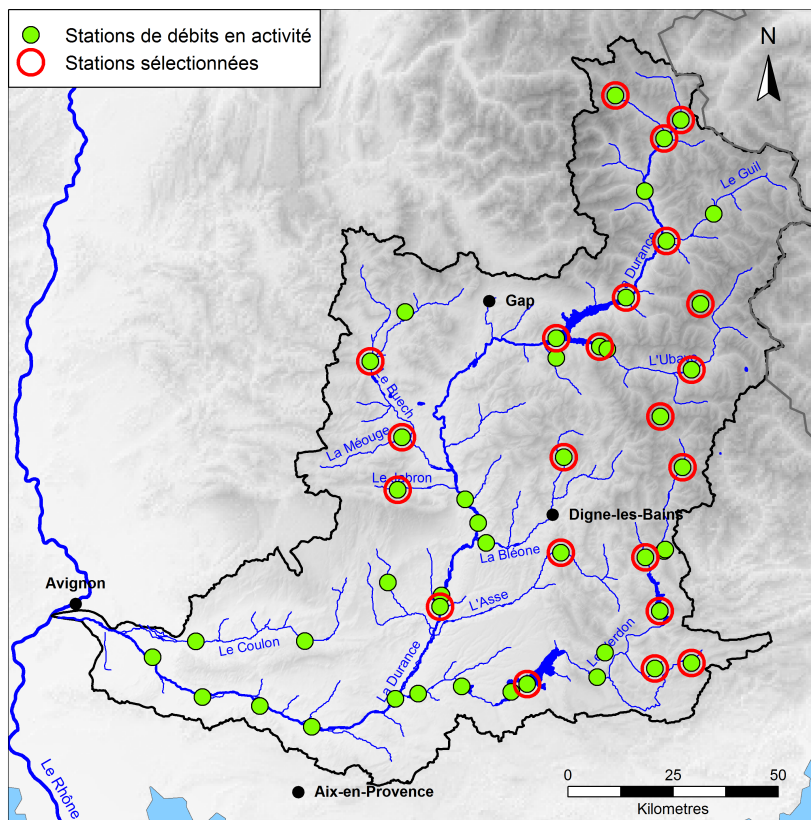


Figure 1.8 – *Points de mesure de débits en fonctionnement sur le bassin de la Durance, et sélection de 22 stations.*

de les considérer comme naturels sur les barrages où les influences amont hors hydro-électricité sont négligeables (agriculture, alimentation en eau potable, industries) comme Serre-Ponçon, Castillon et peut-être Sainte-Croix. En revanche, les séries produites par EDF de la Durance à l'Escale et Cadarache représentent de manière très imparfaite les écoulements naturels, du fait de l'importance des autres influences. C'est pour cette raison que ces deux points de mesure ont été retirés de notre sélection finale. Des travaux menés dans le cadre du projet R²D² (voir paragraphe VII) ont permis récemment d'établir des séries de prélèvements qui devraient permettre un désinfluencement correct des débits à l'Escale et Cadarache, mais ces données n'ont pu être prises en compte dans cette thèse pour des raisons de calendrier.

Les figures 1.9a et 1.9b montrent la répartition des différents types de points de mesure et de débits parmi l'ensemble des stations en service et pour la sélection de 22 stations.

Les répartitions des altitudes des points de mesure de débits et des surfaces des bassins versants correspondants sont montrées sur les figures 1.9c à 1.9f. Pour les deux jeux de données, la classe d'altitude entre 500 et 1000 mètres est la plus représentée. Les surfaces des bassins versants drainés par les points de mesure de débits varient entre 4 et 12800 km² pour l'ensemble des stations en activité, et entre 4 et 3580 km² pour les 22 stations sélectionnées. La classe la plus représentée est dans les deux cas celle des bassins ayant une surface entre 500 et 1000 km². La classe de surface entre 5000 et 15000 km² est moins représentée dans la sélection de 22 bassins que dans le jeu de données global. Cela est lié au fait que les débits des plus grands bassins (Durance en aval de Sisteron) sont aussi les plus influencés, ce qui a amené leur retrait de la sélection de points de mesure.

Les figures 1.9g et 1.9h montrent la répartition des dates de début de la série numérisée

des stations du jeu de données global et de la sélection. On constate que, parmi les stations actuellement en service, quelques-unes disposent de données dès le début du XX^{ème} siècle, mais que la plupart des séries disponibles numériquement ne commencent qu'à partir des années 1960. On verra par la suite (chapitre 2) qu'un travail de recherche et de valorisation d'archives hydrologiques nous a permis de prolonger vers le passé une partie de ces séries.

Les 22 points de mesure de débits sélectionnés, ainsi que les bassins versants associés sont finalement représentés sur la figure 1.10. On trouvera dans le tableau 1.1 un résumé des caractéristiques de ces bassins, avec le module interannuel, la pluie spatiale annuelle moyenne et la température spatiale moyenne de chacun d'entre eux. Ces deux dernières valeurs sont obtenues à partir de l'archive SPAZM présentée dans le paragraphe II.1.

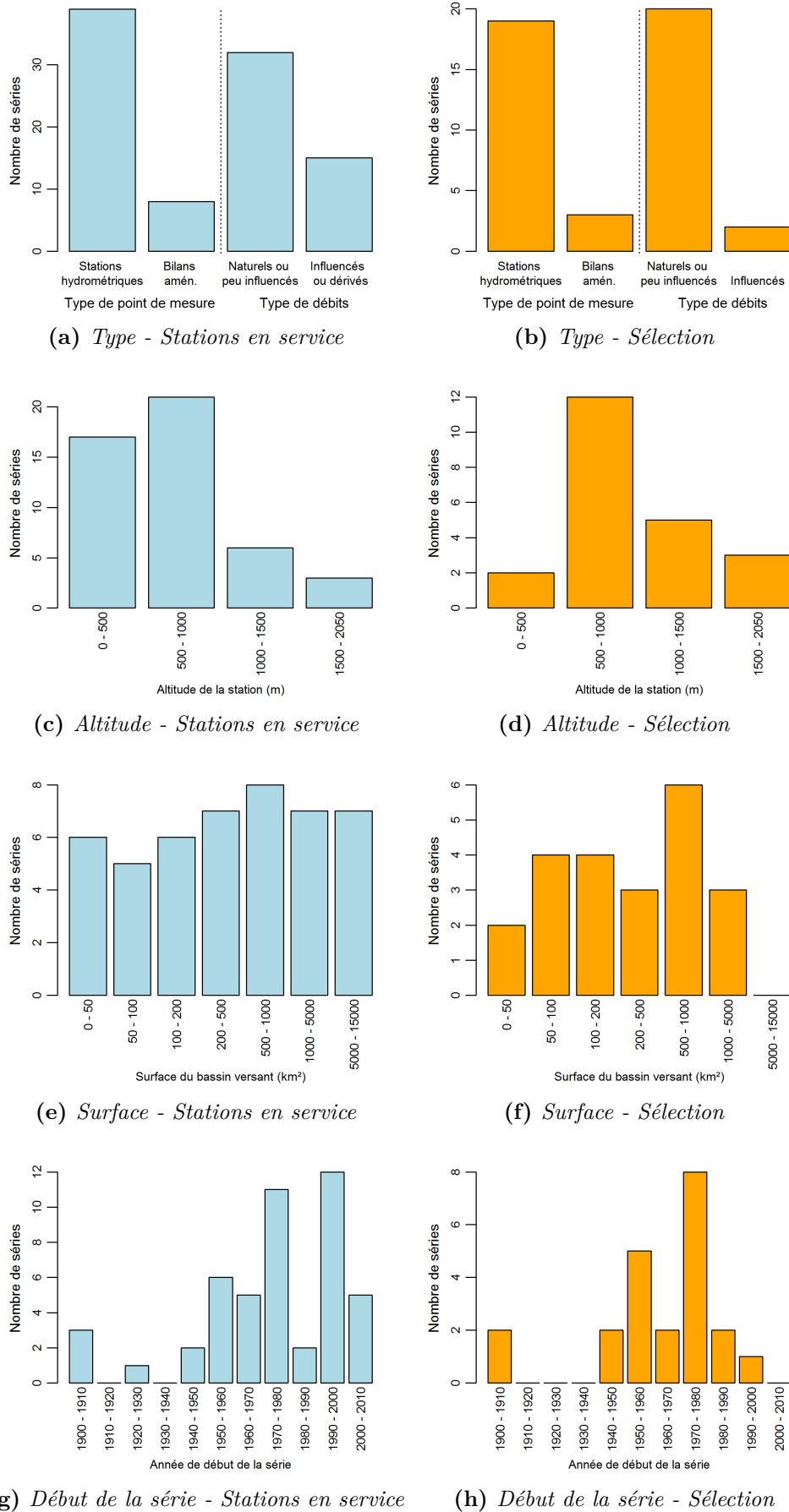


Figure 1.9 – Caractéristiques de l'échantillon global de points de mesure de débits en service (a, c, e, g) et de la sélection de 22 points (b, d, f, h).

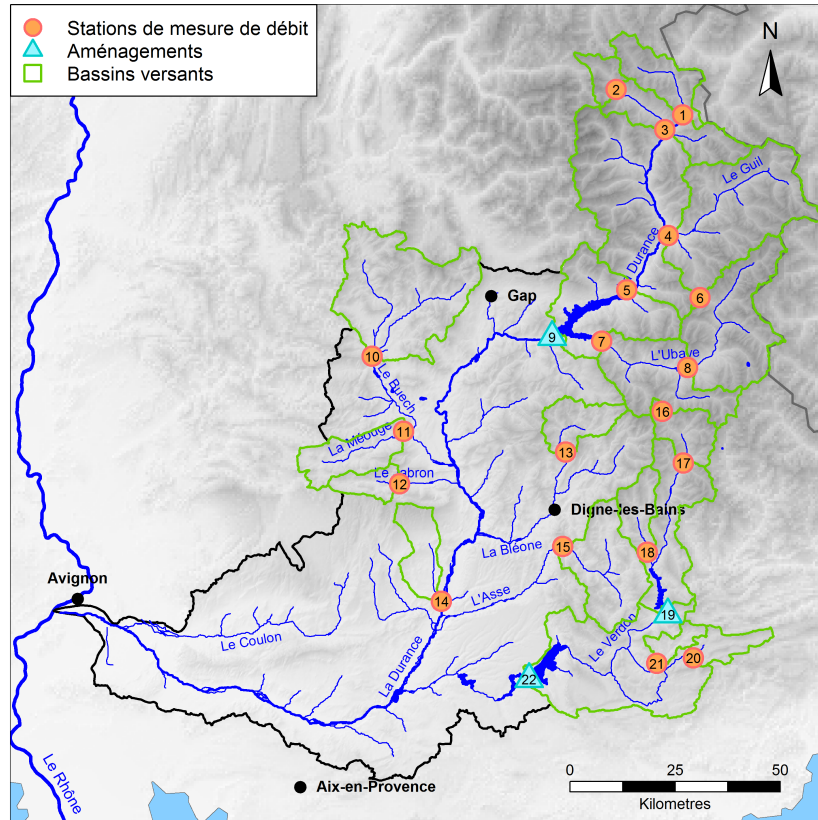


Figure 1.10 – Sélection de points de mesure du débit et bassins versants correspondants.

Num.	Nom Station	Altitude [m]	Surface [km ²]	Q_A [mm/an]	P_A [mm/an]	\bar{T} [°C]
1	La Durance à Val-des-Près	1360	203	789	1322	2.5
2	La Guisane au Monétier-les-Bains	1510	78	1129	1627	2.3
3	La Durance à Briançon	1187	548	796	1381	2.9
4	Le Guil à Montdauphin	895	725	505	1087	3.3
5	La Durance à La Clapière	787	2170	757	1352	3.5
6	Le Riou de Crachet à Saint-Paul	2020	4	2030	1532	1.6
7	L'Ubaye à Roche-Rousse	790	946	681	1235	4.1
8	L'Ubaye à Barcelonnette	1132	549	580	1201	3.6
9	La Durance à Serre-Ponçon	652	3582	691	1301	4.0
10	Le Buech aux Chambons	662	723	610	1259	7.4
11	La Méouge à Méouge	545	221	382	1094	8.9
12	Le Jabron à Piedguichard	593	89	514	1206	9.1
13	Le Bes à La Javie	805	165	536	1085	6.6
14	Le Lauzon à Villeneuve	341	124	227	1097	10.4
15	L'Assè à la Clue de Chabrières	605	375	382	1077	8.6
16	Le Verdon à Allos	1780	10	977	1592	2.7
17	Le Verdon à Colmars	1230	158	826	1453	4.3
18	L'Issole à Saint-André-les-Alpes	931	137	566	1229	6.8
19	Le Verdon à Castillon	790	657	627	1319	6.2
20	L'Artuby à La Bastide	1008	91	355	1272	8.4
21	Le Jabron à Comps-sur-Artuby	782	66	292	1116	9.0
22	Le Verdon à Sainte-Croix	400	1625	471	1176	8.2

Tableau 1.1 – Principales caractéristiques hydro-climatiques des bassins versants sélectionnés. Q_A écoulement moyen annuel, P_A précipitations moyennes annuelles du bassin versant, T température moyenne.

III | Climatologie

III.1 | Températures

Si la géographie du bassin de la Durance présente de grandes disparités spatiales, c'est également le cas de sa climatologie. La figure 1.11 présente les normales de températures de l'air spatialisées sur le bassin de la Durance, sur la période 1948-2010, obtenues à partir de l'archive SPAZM décrite dans le paragraphe II.1.

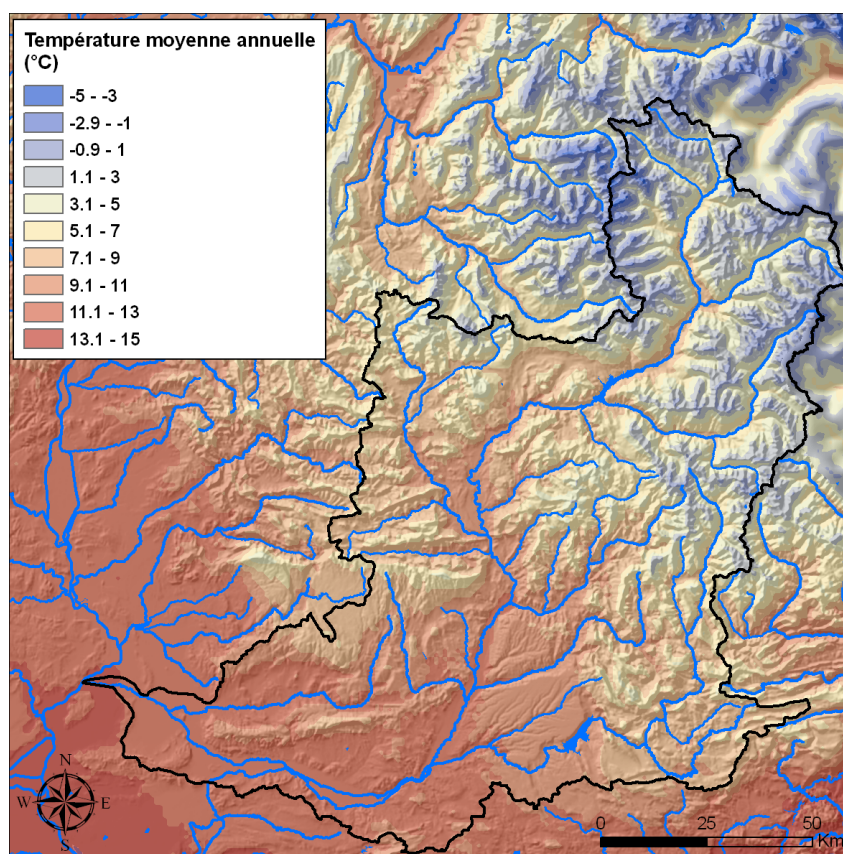


Figure 1.11 – Normales de températures de l'air sur le bassin de la Durance.

On observe un gradient marqué de températures du sud-ouest vers le nord-est : si la température moyenne sur l'ensemble du bassin de la Durance est de 9°C, ponctuellement les températures moyennes varient de -4°C dans certaines zones du massif des Écrins à près de 13°C à l'extrême sud-ouest du bassin. Un fort effet orographique s'ajoute à cette répartition, avec, au sein d'une même zone géographique, des températures plus élevées en vallée qu'en altitude.

III.2 | Précipitations

III.2.1 | Répartition spatiale et principales situations atmosphériques pluvieuses

Les précipitations qui arrosent le bassin de la Durance sont réparties de manière tout-à-fait inégale. En effet, de par leur géographie, les différentes régions du bassin ne sont pas également impactées par les différentes influences climatiques.

La figure 1.12 présente sous forme d'une carte les normales de précipitations annuelles sur la période 1948-2010, obtenues à partir de l'archive SPAZM décrite dans le paragraphe II.1. On observe clairement un gradient de précipitations entre le Nord-Est et le Sud-Ouest du bassin. Les précipitations moyennes annuelles sont en effet bien plus importantes dans les montagnes à l'amont du bassin (jusqu'à 3800 mm/an environ) que dans les régions méditerranéennes de l'aval (à partir de 550 mm/an environ). Un effet « masque » des montagnes se dessine également : les versants orientés au nord et à l'est sont protégés des flux du sud et d'ouest par les sommets qui les entourent.

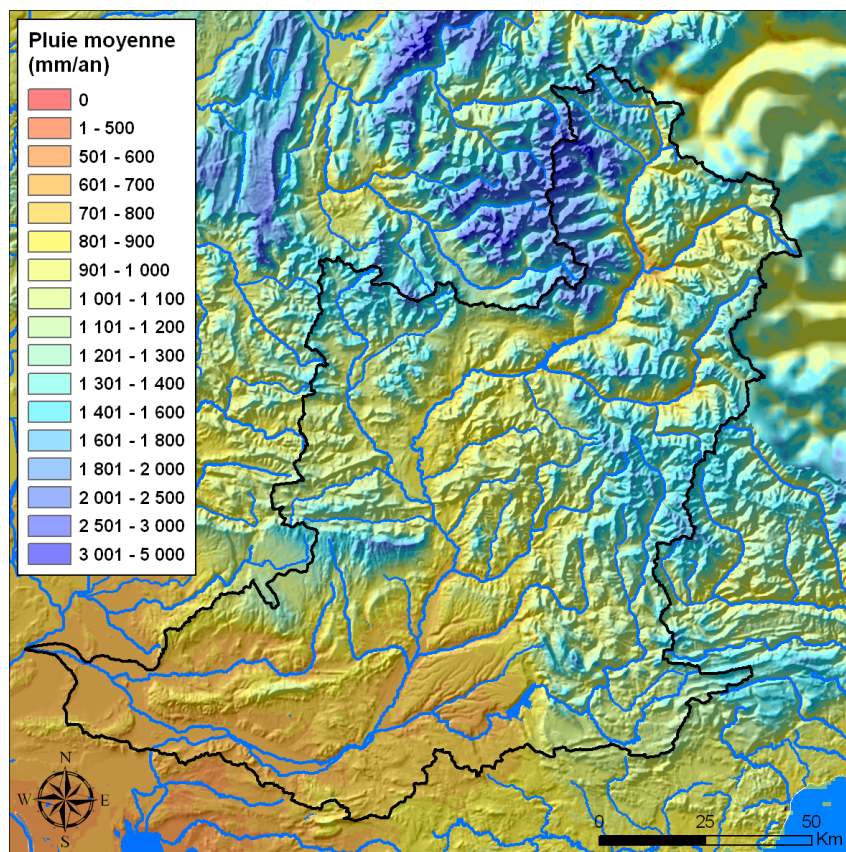


Figure 1.12 – Normales de précipitations annuelles sur le bassin de la Durance.

Cependant, malgré cette variabilité, on peut remarquer la pluviosité relativement faible de l'ensemble du bassin, comparativement à d'autres bassins proches comme ceux du Drac et de l'Isère. La précipitation annuelle moyenne répartie sur l'ensemble du bassin de la Durance est d'environ 1050 mm/an. Ainsi, bien que les régions de la Haute-Durance soient parmi les plus arrosées du bassin, leurs vallées sont abritées et réputées pour leur climat beau et sec. Pardé (1925, chap. 7, p. 466) attribue la sécheresse du bassin de la Durance à « l'existence d'une ceinture d'écrans montagneux [plutôt qu'aux] caractères spécifiques du climat méditerranéen ».

Suite à ces observations globales, on peut détailler les normales de précipitations annuelles en fonction du type de circulation atmosphérique. On utilisera pour cela la classification par types de temps décrite par Garavaglia *et al.* (2010). Cette classification regroupe les journées ayant présenté des circulations atmosphériques similaires en 7 classes « pluvieuses » et une classe « anticyclonique ».

Les figures 1.13 et 1.14 représentent, pour chacun des huit types de temps de cette classification, la répartition spatiale des précipitations moyennes journalières sur le bassin de la Durance.

Les journées apportant les précipitations journalières les plus importantes sur le bassin de la Durance sont celles appartenant aux classes de type de temps 7, 1, et 6.

La dépression centrale (7) affecte le bassin dans sa globalité, et plus particulièrement la moyenne Durance. Elle est responsable en moyenne de 16% des précipitations annuelles apportées sur le bassin, soit 173 mm. Sa fréquence d'occurrence moyenne est de 3% des journées et la précipitation moyenne d'une journée de ce type sur le bassin de la Durance est de 12.3 mm/jour.

L'onde atlantique (1) arrose essentiellement la rive droite de la haute-Durance, la vallée de l'Ubaye, le haut-Verdon et le haut-Buëch. La vallée du Guil reçoit un peu moins de précipitations que l'Ubaye voisine car elle est abritée de ce type d'évènements par les montagnes élevées du massif des Écrins, « barrière protectrice » qui n'est plus présente au niveau de l'entrée de la vallée de l'Ubaye. L'onde atlantique amène une précipitation moyenne d'environ 7 mm/jour sur l'ensemble du bassin de la Durance et sa fréquence d'occurrence est de 7% des journées. La pluie moyenne annuellement apportée par les journées appartenant à ce type de temps est de 198 mm, soit 19% de la précipitation annuelle du bassin.

Le retour d'Est (6) concerne en moyenne 6% des journées et apporte près de 14% (150 mm) de la précipitation annuelle en Durance. Il affecte essentiellement les parties orientales et montagneuses du bassin : les massifs situés en rive gauche de la haute-Durance, le haut et le moyen-Verdon, la partie amont des bassins de l'Asse et de la Bléone. Les montagnes les plus hautes situées au nord du bassin sont également bien arrosées. Dans le massif du Queyras, le retour d'Est est connu pour être régulièrement responsable de fortes chutes de neige (ex. : décembre 2008) ou de crues importantes du Guil comme celles du 13 Juin 1957 (Tricart, 1958, 1960; Poggi, 1959; Pardé, 1959, 1960) et du 13 juin 2000. La pluie moyenne d'une journée de retour d'est sur le bassin de la Durance est d'environ 6 mm.

Les autres classes de type de temps apportent des précipitations journalières plus faibles (inférieures à 3 mm/jour). Cependant, du fait de leur forte occurrence, les classes 4 et 2 ont un impact important sur la pluviométrie annuelle.

Le flux de Sud (4), dont la pénétration est facilitée par l'orientation de la vallée, qui va du Nord vers le Sud, c'est-à-dire vers la Méditerranée, sur plus de 2/3 du cours de la Durance, amène en moyenne 15% (160 mm) des précipitations annuelles du bassin pour une lame d'eau journalière moyenne inférieure à 3 mm. Représentant environ 18% des jours de l'année, les précipitations qu'il provoque se font ressentir sur les bassins des affluents rive gauche de la moyenne-Durance (Verdon, Asse), sur l'Ubaye, sur le versant Sud de la montagne de Lure, ainsi que dans le massif des Écrins.

La classe **océanique stationnaire (2)** concerne essentiellement les montagnes du Nord-Ouest du bassin. Si la précipitation moyenne des journées de ce type est relativement faible (environ 2 mm/jour), les journées de type océanique stationnaire sont nombreuses (23%) et amènent environ 16% (178 mm) de la précipitation annuelle moyenne du bassin.

Enfin, les classes **Sud-Ouest (3 ; 8% des journées)**, **Nord-Est (5 ; 7% des journées)** et **Anticyclonique (8 ; 28% des journées)** provoquent des précipitations moyennes journalières inférieures à 2 mm/jour et sont responsables à elles trois de 19% des précipitations annuelles.

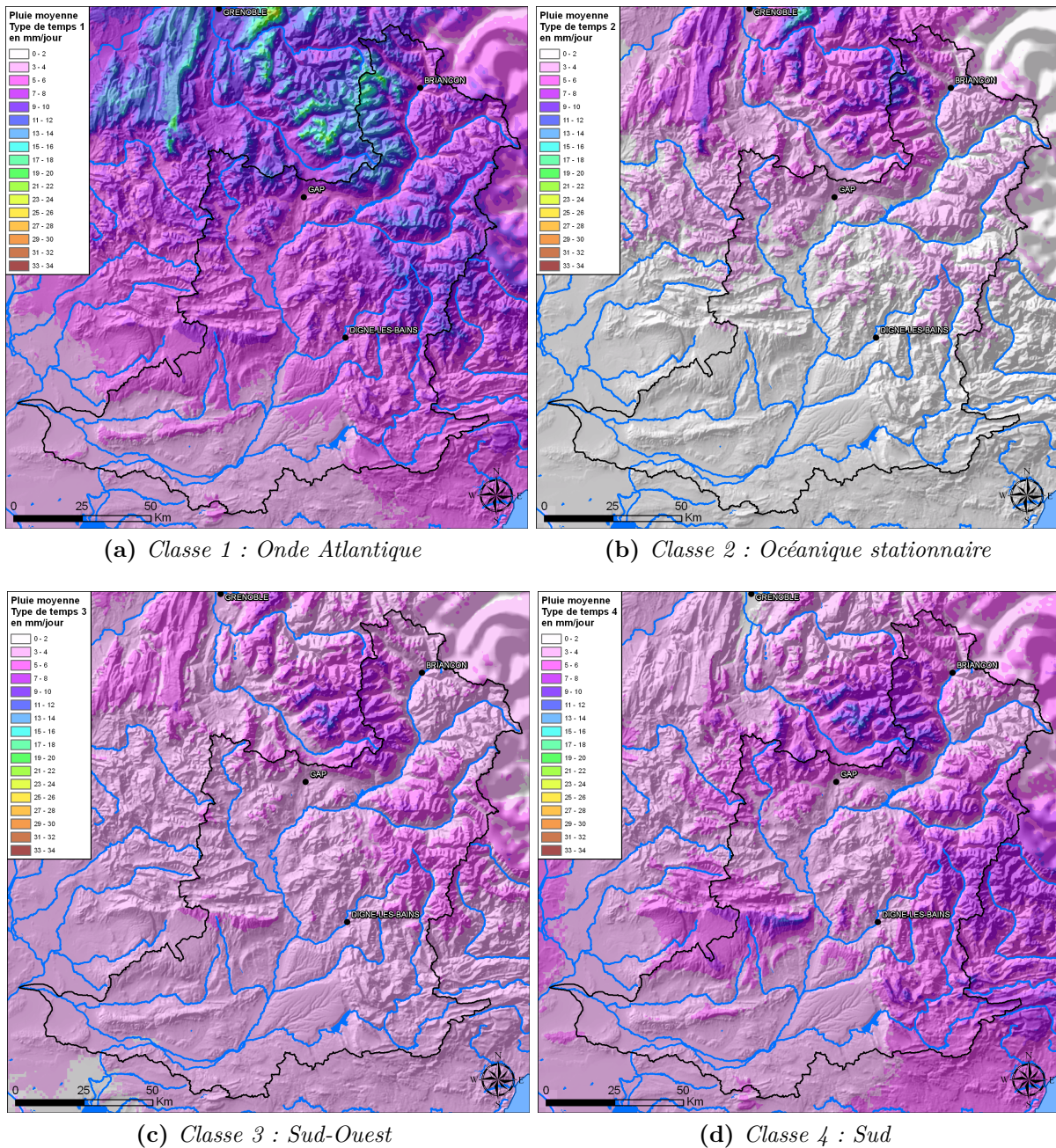


Figure 1.13 – Normales de précipitations annuelles par type de temps (Classification EDF-DTG, voir Garavaglia et al., 2010) sur le bassin de la Durance (types de temps 1 à 4).

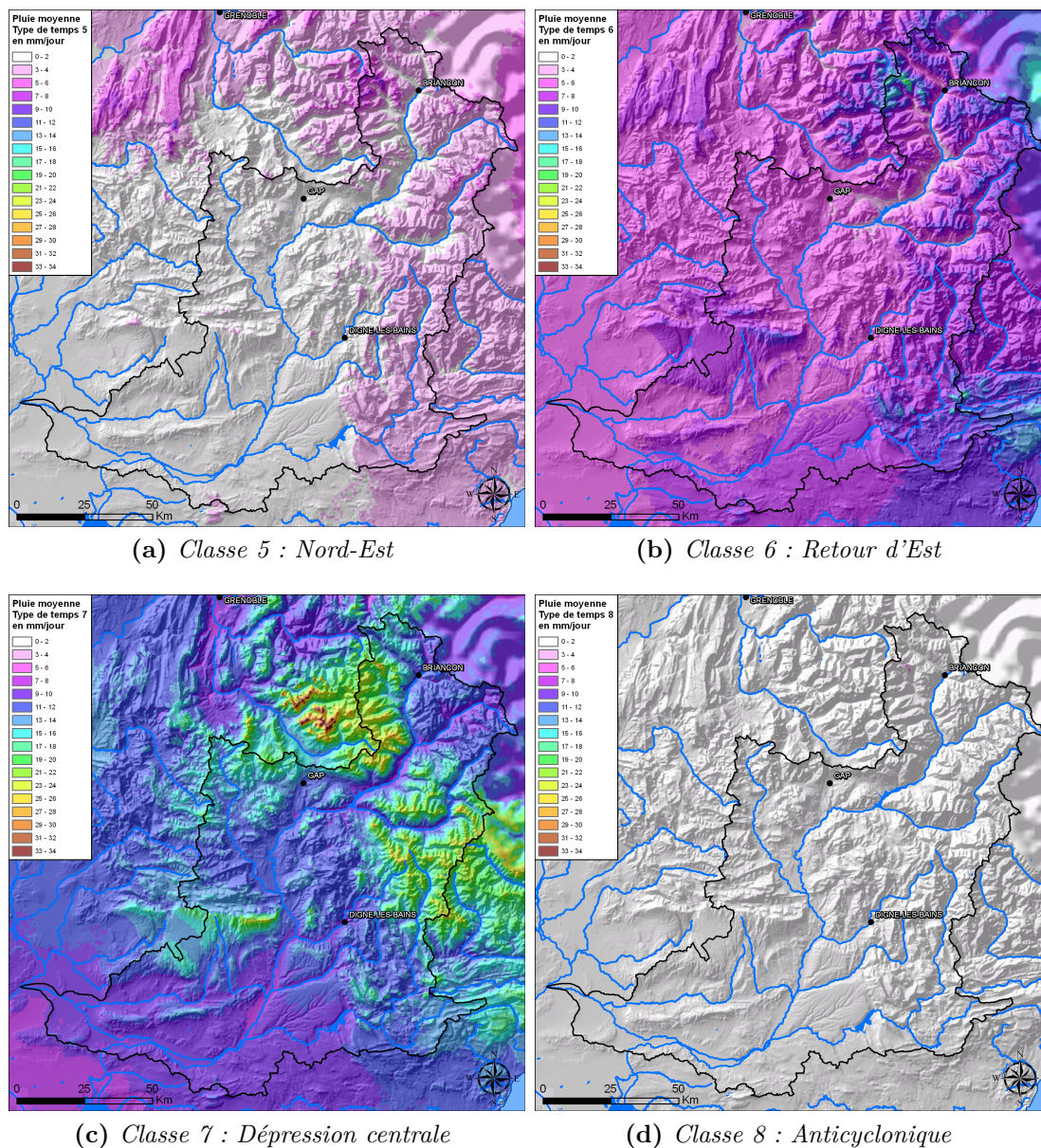


Figure 1.14 – Normales de précipitations annuelles par type de temps (Classification EDF-DTG, voir Garavaglia et al., 2010) sur le bassin de la Durance (types de temps 5 à 8).

Afin de rapporter ces observations aux bassins versants qui nous intéresseront plus particulièrement dans la suite de ce travail, le tableau 1.2 regroupe les valeurs des précipitations moyennes journalières par type de temps, et des précipitations annuelles moyennes apportées par les journées de chaque type de temps pour les 22 bassins présentés dans la section II.2.

On retrouve les observations que l'on a pu faire précédemment. L'ensemble du bassin est relativement protégé des flux de Sud-Ouest et de Nord-Est, les journées dont la circulation atmosphérique est de type « onde Atlantique » ou « océanique stationnaire » arrosent majoritairement les zones montagneuses de l'amont du bassin, tandis que celles de type « dépression centrale » ou de flux de Sud concernent plutôt la moyenne Durance. Le retour d'Est affecte assez uniformément les parties orientales du bassin.

III.2.2 | Saisonnalité

Tout comme leur répartition spatiale, la répartition saisonnière des précipitations qui arrosent le territoire Durancien est hétérogène. La figure 1.15 représente les moyennes mensuelles interannuelles (régimes) de précipitations calculées sur la période 1960-2005 en quelques points du bassin versant correspondant à l'emplacement de pluviomètres. Bien qu'il s'agisse de mesures ponctuelles traduisant une climatologie pouvant être soumise à des effets locaux importants, on peut y retrouver des informations plus globales.

L'influence du climat méditerranéen se fait ressentir dès l'amont du bassin par la présence de précipitations importantes en automne. Les influences continentales restent néanmoins présentes et se traduisent par une humidité estivale relativement élevée malgré la présence d'un minimum en juillet. Ainsi, au Monétier les Bains, près de Briançon, la saisonnalité des précipitations n'est pas très marquée. Dans le Queyras (Abriès - Ristolas) et dans l'Ubaye (La Condamine), on trouve deux périodes plus arrosées à l'automne et au printemps, et des précipitations plus faibles en hiver et en été. Cette saisonnalité s'accroît en allant vers l'aval du bassin, le minimum d'été se creusant pour devenir bien inférieur à celui de l'hiver. Plus au sud, les précipitations diminuent dans leur globalité, mais l'importance des apports de l'automne s'accroît.

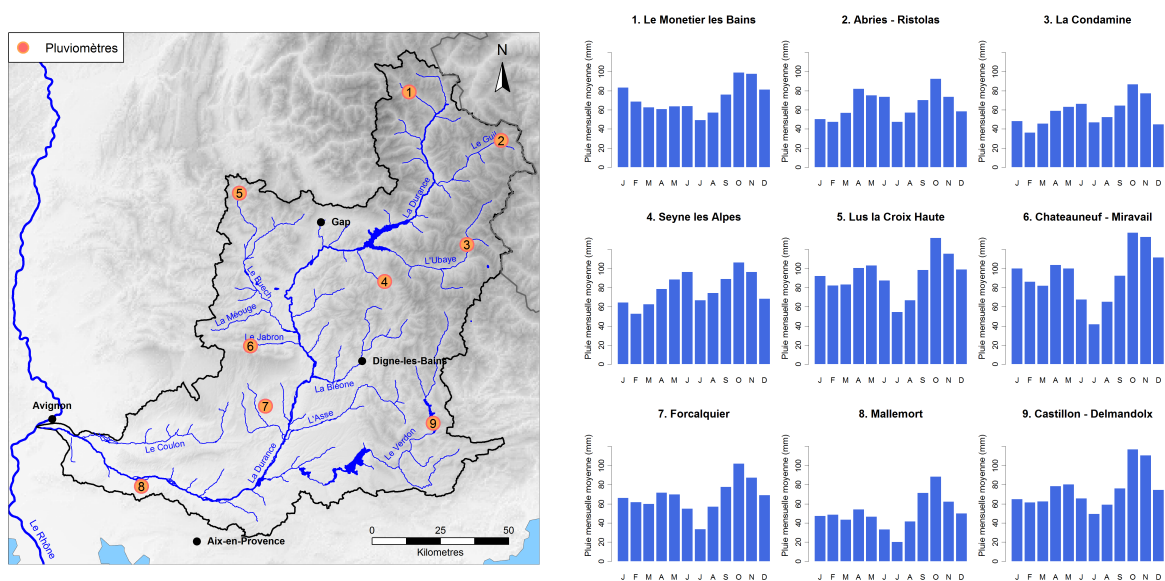


Figure 1.15 – Répartition saisonnière des précipitations en quelques points du bassin de la Durance.

N°	Nom Station	PA tot. [mm/an]	occ.	Type de temps							
				1 7%	2 23%	3 8%	4 18%	5 7%	6 6%	7 3%	8 28%
1	La Durance à Val-des-Près	1322	PJ	8.4	4.9	2.6	2.6	2.6	6.6	11.0	0.7
			PA	240	388	77	140	81	162	162	72
2	La Guisane au Monétier-les-Bains	1627	PJ	10.7	6.9	3.3	3.0	3.0	6.5	14.0	0.7
			PA	307	544	97	161	94	159	192	73
3	La Durance à Briançon	1381	PJ	9.0	5.1	2.8	2.7	2.7	6.7	12.0	0.7
			PA	258	401	82	146	84	164	169	77
4	Le Guil à Montdauphin	1087	PJ	7.4	2.5	2.4	2.4	2.8	6.8	10.0	0.8
			PA	212	200	69	127	86	165	144	83
5	La Durance à La Clapière	1352	PJ	9.4	4.2	3.0	3.0	2.7	6.5	13.0	0.7
			PA	269	334	88	159	83	159	184	76
6	Le Riou de Crachet à Saint-Paul	1532	PJ	10.7	3.2	3.5	3.8	3.6	7.8	17.0	1.1
			PA	306	255	104	207	111	189	243	117
7	L'Ubaye à Roche-Rousse	1235	PJ	8.6	2.5	2.8	3.4	2.5	6.2	15.0	0.9
			PA	246	196	83	181	79	151	208	90
8	L'Ubaye à Barcelonnette	1201	PJ	8.2	2.4	2.7	3.2	2.6	6.4	14.0	0.8
			PA	234	190	78	174	82	156	197	89
9	La Durance à Serre-Ponçon	1301	PJ	9.2	3.7	3.0	3.0	2.5	6.2	13.0	0.8
			PA	262	288	87	164	79	151	189	79
10	Le Buech aux Chambons	1259	PJ	8.7	3.9	3.1	3.4	1.8	5.5	14.0	0.4
			PA	249	305	92	181	55	133	198	46
11	La Méouge à Méouge	1094	PJ	6.9	2.2	2.7	3.5	1.5	6.8	13.0	0.5
			PA	198	176	79	190	48	165	185	53
12	Le Jabron à Piedguichard	1206	PJ	7.2	2.0	2.9	4.4	1.6	7.6	16.0	0.6
			PA	208	160	84	237	50	185	219	63
13	Le Bes à La Javie	1085	PJ	8.0	2.4	2.6	2.5	2.0	5.2	11.0	1.0
			PA	229	188	76	133	63	125	159	110
14	le Lauzon à Villeneuve	1097	PJ	6.5	1.6	2.8	4.0	1.5	7.0	14.0	0.6
			PA	186	126	82	215	47	169	205	67
15	L'Asse à la Clue de Chabrières	1077	PJ	6.7	1.8	2.2	3.1	2.2	6.9	12.0	1.1
			PA	193	138	64	166	67	167	169	112
16	Le Verdon à Allos	1592	PJ	11.3	3.1	3.7	4.5	2.9	7.5	20.0	1.1
			PA	323	242	109	245	90	182	286	114
17	Le Verdon à Colmars	1453	PJ	10.0	2.7	3.3	4.4	2.6	7.1	19.0	1.0
			PA	287	214	97	238	80	172	263	100
18	L'Issole à Saint-André-les-Alpes	1229	PJ	8.3	2.3	2.7	3.5	2.2	6.6	14.0	1.1
			PA	237	183	78	187	70	160	203	112
19	Le Verdon à Castillon	1319	PJ	8.8	2.4	2.8	4.0	2.4	7.1	16.0	1.0
			PA	251	185	84	213	75	173	229	108
20	L'Artuby à La Bastide	1272	PJ	7.4	1.4	2.2	4.5	2.8	9.4	15.0	1.1
			PA	211	109	66	241	85	229	216	114
21	Le Jabron à Comps-sur-Artuby	1116	PJ	6.5	1.3	2.1	3.7	2.4	8.2	13.0	1.0
			PA	186	103	61	198	75	198	183	110
22	Le Verdon à Sainte-Croix	1176	PJ	7.3	1.7	2.4	3.7	2.4	7.7	14.0	1.0
			PA	209	135	69	199	74	187	198	104

Tableau 1.2 – Précipitations spatiales moyennes journalières (PJ en mm/jour) et moyennes annuelles (PA en mm/an) par type de temps (sur la période 1948-2010). « PA tot » : précipitation annuelle moyenne tous types de journées confondus. Pour chaque type de temps pluvieux, les cinq bassins les plus arrosés sont mis en évidence.

III.3 | Neige et glaciers

Du fait de l'altitude moyenne relativement élevée du bassin (section I) la neige a une importance assez forte sur le régime hydrologique de la Durance et de ses affluents, particulièrement à l'amont du bassin. Sa bonne connaissance conditionne aussi la gestion des ouvrages installés sur la Durance. La figure 1.16 présente, pour quelques points du bassin, les équivalents en eau de l'épaisseur moyenne interannuelle du manteau neigeux au premier jour des mois de janvier à mai, calculés sur la période 1961-2008. Il s'agit pour la plupart de mesures faites manuellement, d'où leur caractère ponctuel (à la fois dans le temps et dans l'espace) et l'absence de données pour les autres mois de l'année. De la même manière que ce qui a été présenté sur les régimes de précipitations, il est important de noter que les régimes niveaux montrés ici sont représentatifs d'une dynamique globale mais peuvent aussi être influencés par des effets locaux (orientation, vents, etc.).

On observe qu'à l'amont du bassin, à des altitudes élevées comme au point de mesure de Chardonnet (2455 m, Haute-Clarée), on peut trouver un manteau neigeux important avec un maximum atteint autour du premier mai pouvant dépasser 800 mm de valeur en eau. À des altitudes un peu moins élevées (Cézanne, 1870 m), les quantités de neige accumulées sont légèrement moins importantes et le maximum observé se trouve proche du premier avril.

Un peu plus en aval et à des altitudes similaires (Plattes Longues, Chauriande, Clot Larousse), on trouve des régimes niveaux ressemblant à ceux de Chardonnet ou Cézanne, mais avec des quantités de neige bien inférieures à celles observées plus en amont à des altitudes semblables, essentiellement du fait de la plus faible pluviométrie de cette région, observée dans la section III.2. Aux sources du Verdon (Lac d'Allos, 2260 m), la quantité de neige est plus importante et la valeur en eau moyenne dépasse les 400 mm au premier avril.

À des altitudes plus basses (Les Violins, Réallon, Larche), on trouve des épaisseurs inférieures à 200 mm d'équivalent en eau et une fonte plus précoce avec un maximum de la valeur en eau du manteau neigeux au premier mars.

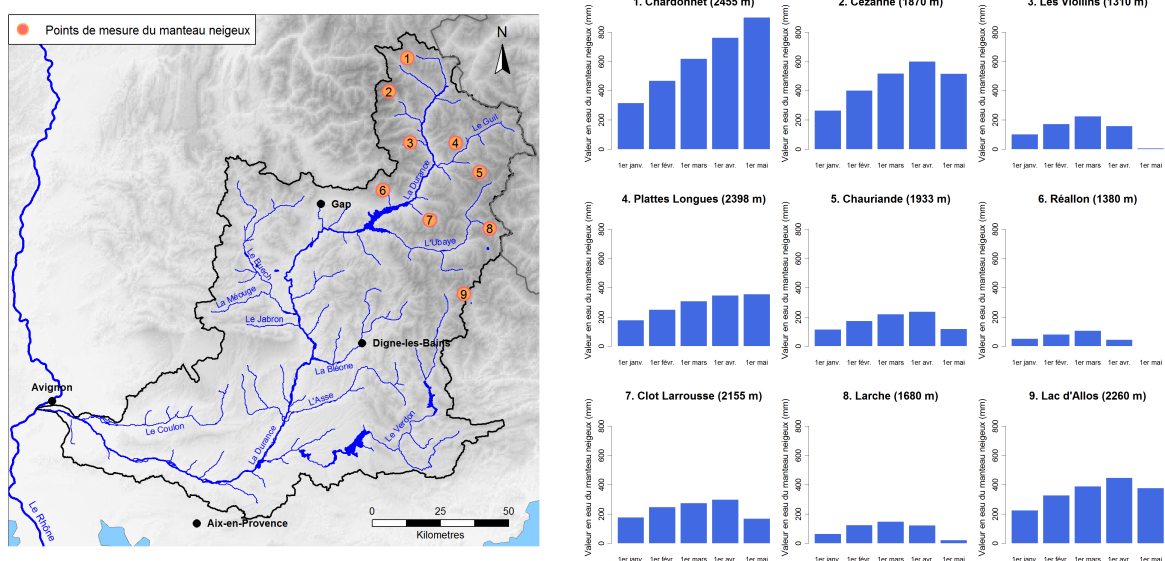


Figure 1.16 – Équivalent en eau de l'épaisseur moyenne du manteau neigeux à cinq dates de l'année en quelques points du bassin de la Durance.

Si la neige joue un rôle non négligeable dans l'hydrologie de la Durance, les glaciers ont une influence relativement faible et localisée. La couverture glaciaire du bassin de la Durance est en effet assez peu étendue. En 2009, on trouvait sur le bassin de la Durance 61 glaciers, couvrant une surface d'environ 20 km² (Gardent *et al.*, 2011), soit moins de 0.6% du bassin de la Durance à Serre-Ponçon. La plupart de ces glaciers sont regroupés dans le massif des Écrins, sur les parties amont des bassins du Gyr et de l'Onde, qui forment la Gyronde. On trouve également quelques glaciers de faible étendue en haute-Ubaye. D'après Gardent (2013), la surface couverte par les glaciers dans le bassin de la Durance a par ailleurs diminué de près de 30% depuis les années 1960, où elle était d'environ 28 km² (Voir aussi à ce sujet Cossart *et al.*, 2006).

IV | Géologie

IV.1 | Une rivière voyageuse

La Durance n'a pas toujours suivi le cheminement qu'on lui connaît aujourd'hui : entre la fin de l'ère tertiaire et le début du quaternaire, il y a environ 2 millions d'années, elle prenait sa source dans les préalpes aux environs de Sisteron, puis franchissait le seuil de Saint-Pierre-de-Vence, en bordure Est de la chaîne des Alpilles pour se jeter dans la mer Méditerranée.

D'après Gouvernet *et al.* (1979), au début du quaternaire, la partie amont de la Durance actuelle n'était pas encore connectée avec les parties moyenne et inférieure et s'écoulait à cette époque vers l'Isère par l'intermédiaire du Drac actuel. Une étude de la « transfluence Durance-Isère » (Monjuvent, 1973) montre que pendant les glaciations du quaternaire, les glaciers de la Durance et du Drac étaient reliés par le seuil du Bayard. Une partie des eaux de ce glacier rejoignait alors la basse vallée de la Durance par l'intermédiaire du Buëch.

Au cours des glaciations du quaternaire, la partie aval de la Durance se décale vers le Sud-Est. Lors de la glaciation du Riss (-240000 ans à -180000 ans), la Durance abandonne le seuil de Saint-Pierre-de-Vence et d'Eyguières pour s'engager dans le seuil de Lamanon. Les galets et alluvions apportés pendant toute cette période par cet ancien fleuve, sur une très large étendue du fait des déplacements successifs de son lit, ont formé un delta qui correspond à ce que l'on appelle aujourd'hui la plaine de la Crau. C'est au cours de la glaciation de Würm, il y a environ 20000 ans, que la Durance, par des phénomènes d'érosion et de dépôt d'alluvions, est captée par un affluent rive gauche du Rhône, et ainsi détournée vers le fleuve (Gouvernet *et al.*, 1979).

IV.2 | Quelques éléments de géologie

Nous n'entrerons pas ici dans une description détaillée de la très complexe géologie du bassin de la Durance, mais donnerons seulement quelques éléments notables du point de vue de l'hydrologue. Clébert et Rouyer (1995) en proposent une description très simplifiée : « Née à la limite des schistes lustrés piémontais qui caractérisent le versant italien, la Durance briançonnaise traverse d'abord les roches cristallines et métamorphiques de la zone intra-alpine. Entre Guillestre et Embrun, elle franchit sur une courte distance les flyshs particuliers à l'Ubaye, puis pénètre la zone du calcaire jurassique des Préalpes du sud. À la sortie du lac de Serre-Ponçon, elle emprunte la couverture sédimentaire des Massifs centraux pour retrouver en aval de Tallard le calcaire jurassique. À Sisteron, verrou glaciaire, elle traverse brièvement la pointe extrême du crétacé de la montagne

de Lure. À la hauteur de Château-Arnoux, en amont du confluent de la Bléone, elle atteint la grande zone des poudingues tertiaires du plateau de Valensole, jusqu'au pied du Lubéron. »

Une grande partie de la surface du bassin est constituée de roches imperméables (marnes, schistes, argiles). Les zones plus perméables sont principalement celles constituées de calcaires que l'on trouve dans le Briançonnais, le bas-Queyras, le haut-Embrunais, dans le sud du Dévoluy et dans le Verdon moyen, mais aussi au niveau du massif du Vaucluse, de la chaîne du Lubéron et des petits massifs provençaux du Sud. Les poudingues que l'on trouve en rive gauche de la Durance, de la Bléone au Verdon, présentent également une bonne perméabilité (Pardé, 1925).

Les « terres noires », formations marneuses observables dans les fonds de vallées du bas-Embrunais et de la moyenne Ubaye, mais aussi plus en aval dans le bassin du Buech et dans les Préalpes de Digne, sont caractéristiques de cette région. Ces roches très imperméables et très friables sont propices à la formation de ravines aux pentes raides et de torrents très actifs qui font l'objet d'études approfondies sur des sites expérimentaux situés dans le bassin de la Bléone (Mathys *et al.*, 1996). Les terres noires participent à la forte érodabilité du bassin de la Durance qui est également une caractéristique importante de sa géologie. La quantité de sédiments transportés chaque année par la Durance avant aménagement est estimée à plus de 10 millions de tonnes, faisant du transport solide un enjeu majeur de la gestion de l'eau dans cette région.

On trouvera de plus amples informations sur la géologie du bassin de la Durance dans les guides géologiques de Gouvernet *et al.* (1979) ou Debelmas (1983). La Durance, et en particulier son bassin amont, a fait l'objet de nombreuses études géologiques. Citons notamment l'ouvrage de Péguy (1947) qui propose une esquisse physique de la zone intra-alpine des Alpes françaises du Sud dans laquelle on peut trouver de nombreuses informations géo-morphologiques, mais aussi concernant le climat, les glaciers et les eaux de cette région. Une description géologique du bassin supérieur de la Durance a également été écrite par Onde (1940).

V | Hydrologie

Une légende raconte que lorsque le Pô et la Durance se sont séparés, le premier a dit à la seconde : « je vais fertiliser les plaines de Lombardie, toi, va dévaster la Provence... ». La Durance, parfois considérée comme « fléau de la Provence », est ainsi depuis toujours connue pour l'irrégularité de son régime, provoquant en moyenne et basse Durance à la fois des épisodes de sécheresse importante et de très fortes crues. Cela explique sans doute l'intérêt que lui ont porté les hydrologues depuis très longtemps.

Les premières mesures hydrométriques recensées sur la Durance datent de 1832 (Lallement, 2001), et dès 1892, Imbeaux s'intéresse de près à cette rivière et publie *La Durance, régimes, crues et inondations*, ouvrage conséquent dans lequel il décrit le fonctionnement hydro-climatique du bassin à partir des données disponibles à l'époque, avec un accent mis sur l'étude des crues. A la suite de cette analyse, Imbeaux propose déjà des relations amont-aval et pluie-débit dans l'optique de l'organisation d'un système d'annonce de crues.

En 1913, Wilhelm publie une étude mettant en évidence l'intérêt de construire des barrages sur le cours de la Durance. Pardé consacre également en 1925 un chapitre de son *Régime du Rhône* à cet affluent majeur du Rhône. Des études hydrologiques sont également publiées au moment de la construction des aménagements (Serra, 1953; Morlat *et al.*, 1956). Les affluents de la Durance, et en particulier les torrents de montagne du

Briançonnais, du Queyras ou de l’Embrunais, concentrent aussi l’intérêt des hydrologues (Surell, 1841; Wyart, 1950).

Aujourd’hui encore, la Durance est souvent choisie comme terrain d’étude pour le développement en hydrologie (Garçon, 1996; Paquet et Garçon, 2002; Bernard et Smith, 2005; Lafaysse, 2011; François, 2013, projet RIWER 2030, projet R²D² 2050).

V.1 | Modules

Le tableau 1.3 présente, pour chacun des points de mesure du débit de la sélection présentée dans la section II.2 et localisés sur la figure 1.10, les surfaces des bassins versants drainés par ces points de mesure, les modules interannuels et débits spécifiques (débit rapporté à la surface du bassin versant) interannuels calculés sur la période commune de disponibilité des séries de débits 1994 - 2007 ainsi que sur l’ensemble de chacune des séries de débits. Les commentaires ci-dessous se rapportent aux calculs effectués sur la période commune, ceci afin de faciliter les comparaisons entre bassins.

Ces valeurs permettent de constater que le débit moyen rapporté au kilomètre carré varie fortement d’un bassin à l’autre, de moins de 10 à plus de 30 L/s/km². Les débits spécifiques les plus importants sont observés dans les petits bassins de montagne situés en amont : 30.8 L/s/km² pour le bassin versant de la Guisane au Monêtier-les-Bains, 31.8 L/s/km² pour le Riou de Crachet, petit torrent affluent de l’Ubaye à Saint-Paul, 30.5 L/s/km² pour le Verdon à Allos. Déjà à Briançon, la Durance n’écoule plus qu’une moyenne de 22.5 L/s/km².

Le bassin du Guil, avec un débit spécifique de 16.6 L/s/km² est nettement moins arrosé que celui de l’Ubaye qui voit passer encore à Roche-Rousse 20.9 L/s/km². En dehors des parties amont du Buech et du Verdon, on voit une nette chute des écoulements sur les affluents de la moyenne Durance : 15.1 L/s/km² sur le bassin de la Méouge au Pont de Méouge, 10.7 L/s/km² sur celui de l’Asse à la Clue de Chabrières, 14.2 L/s/km² sur le Verdon à Sainte-Croix, soutenu par les zones de montagnes présentes en amont du bassin.

V.2 | Régimes

La complexité géographique et climatique du bassin versant de la Durance, décrite dans les paragraphes précédents, a des répercussions sur son hydrologie. Les régimes hydrologiques observés dans les différentes parties du bassin y sont en effet très variés. La figure 1.17, qui représente les régimes hydrologiques en différents points du bassin correspondant à des stations de mesure de débit ou à des aménagements, permet d’illustrer ce fait. On peut y observer un « glissement », de l’amont vers l’aval, d’un régime nival à un régime de type méditerranéen.

Sur la partie la plus en amont du bassin, les régimes de la Durance et de ses premiers affluents sont de type nival, avec un maximum du débit mensuel en juin et un étiage hivernal bien marqué (minimum en février) : c’est le cas de la Guisane au Monêtier-les-Bains. Sur l’Ubaye à Roche-Rousse, et dans une moindre mesure sur le Guil à Château-Queyras, on observe une légère remontée des débits en octobre-novembre laissant entrevoir l’influence des pluies d’automne méditerranéennes. À La Clapière sur la Durance, cette influence se traduit par un ralentissement de la décrue à l’automne, mais le régime observé reste globalement nival.

Au fur et à mesure que l’on avance vers l’aval, l’importance de la composante nivale diminue et le maximum d’automne augmente : on l’observe aisément sur les principaux affluents de la moyenne-Durance, à Castillon sur le Verdon, aux Chambons sur le Buëch.

N°	Nom Station	Surface [km ²]	Série complète			Période 1994-2007	
			\bar{Q} [m ³ /s]	\bar{Q}_{sp} [L/s/km ²]	Dispo	\bar{Q} [m ³ /s]	\bar{Q}_{sp} [L/s/km ²]
1	La Durance à Val-des-Près	203	5.1	25.0	1975-2010	4.5	22.4
2	La Guisane au Monétier-les-Bains	78	2.8	35.8	1978-2010	2.4	30.8
3	La Durance à Briançon	548	13.8	25.2	1953-2010	12.3	22.5
4	Le Guil à Montdauphin	725	11.6	16.0	1982-2007	12.0	16.6
5	La Durance à La Clapière	2170	52.1	24.0	1960-2010	48.5	22.3
6	Le Riou de Crachet à Saint-Paul	4	0.1	32.6	1980-2010	0.1	31.8
7	L'Ubaye à Roche-Rousse	946	20.4	21.6	1960-2010	19.8	20.9
8	L'Ubaye à Barcelonnette	549	10.1	18.4	1904-2010	9.3	16.9
9	La Durance à Serre-Ponçon	3582	78.4	21.9	1948-2010	75.1	21.0
10	Le Buech aux Chambons	723	14.0	19.4	1971-2010	13.4	18.5
11	La Méouge à Méouge	89	1.4	16.3	1982-2010	1.3	15.1
12	Le Jabron à Piedguichard	89	1.4	16.3	1994-2010	1.3	15.1
13	Le Bes à La Javie	165	2.8	17.0	1963-2010	2.6	15.7
14	Le Lauzon à Villeneuve	124	0.9	7.2	1965-2010	0.9	7.1
15	L'Asse à la Clue de Chabrières	375	4.5	12.1	1952-2010	4.0	10.7
16	Le Verdon à Allos	10	0.3	31.0	1978-2010	0.3	30.5
17	Le Verdon à Colmars	158	4.1	26.2	1958-2010	4.0	25.0
18	L'Issole à Saint-André-les-Alpes	137	2.5	18.0	1904-2010	2.3	16.7
19	Le Verdon à Castillon	657	13.1	19.9	1948-2010	12.2	18.6
20	L'Artuby à La Bastide	91	1.0	11.3	1977-2010	1.0	11.4
21	Le Jabron à Comps-sur-Artuby	66	0.6	9.3	1975-2010	0.5	8.1
22	Le Verdon à Sainte-Croix	1625	24.3	14.9	1977-2010	23.1	14.2

Tableau 1.3 – Modules hydrologiques en 22 points du bassin de la Durance. \bar{Q} Débit moyen interannuel et \bar{Q}_{sp} débit spécifique moyen interannuel (débit rapporté à la surface du bassin versant). Série complète : valeurs calculées sur la période de disponibilité (Dispo) des données de débits. Période 1994-2007 : valeurs calculées sur la période commune à toutes les séries.

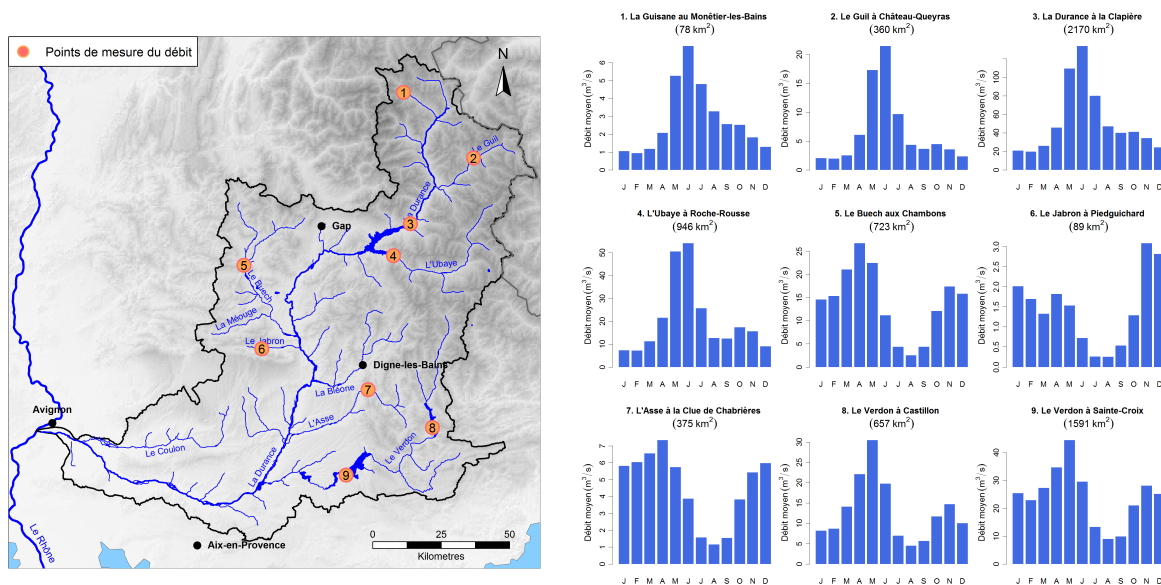


Figure 1.17 – Régimes hydrologiques en différents points du bassin de la Durance.

C'est encore plus marqué sur l'Asse à la Clue de Chabrières, dont les sources sont nettement moins élevées. Pourtant sur ces rivières, le débit mensuel maximum du printemps, en avril sur le Buëch et l'Asse, en mai sur le Verdon, reste nettement supérieur à celui de l'automne. Ainsi, à Sainte-Croix, le régime du Verdon reste très nettement marqué par l'influence nivale des parties élevées de son bassin. Seul le Jabron présente un pic en novembre supérieur à son débit d'automne, cela s'explique sans doute par la faible altitude, comparé à ses voisins, de son bassin versant dont l'altitude médiane est 955 m et dont le point culminant est le sommet de la Montagne de Lure à 1826 m. Cette dernière

semble par ailleurs être parmi les zones les plus arrosées par les épisodes de type Sud ou dépression centrale, dont l'occurrence est élevée à l'automne.

V.3 | Extrêmes

Pour chaque station de débit du jeu de données présenté dans la section II.2, nous avons calculé les valeurs des débits de crue et d'étiage pour différents temps de retour.

Les grandeurs suivantes sont calculées pour des temps de retour de 2, 5, 10, 20 et 50 ans :

- Le VCN_{10} , minimum annuel du débit observé sur 10 jours consécutifs, établi pour chaque temps de retour à partir des observations et de leur fréquence empirique ;
- Le VCN_{30} , minimum annuel du débit observé sur 30 jours consécutifs, établi pour chaque temps de retour à partir des observations et de leur fréquence empirique ;
- Le débit moyen journalier maximum annuel Q_{MA} , établi pour chaque temps de retour à l'aide d'un ajustement de Gumbel.

Les résultats obtenus sont reportés dans le tableau 1.4.

Sur la figure 1.18, une partie de ces grandeurs est représentée en fonction de la surface du bassin versant correspondant.

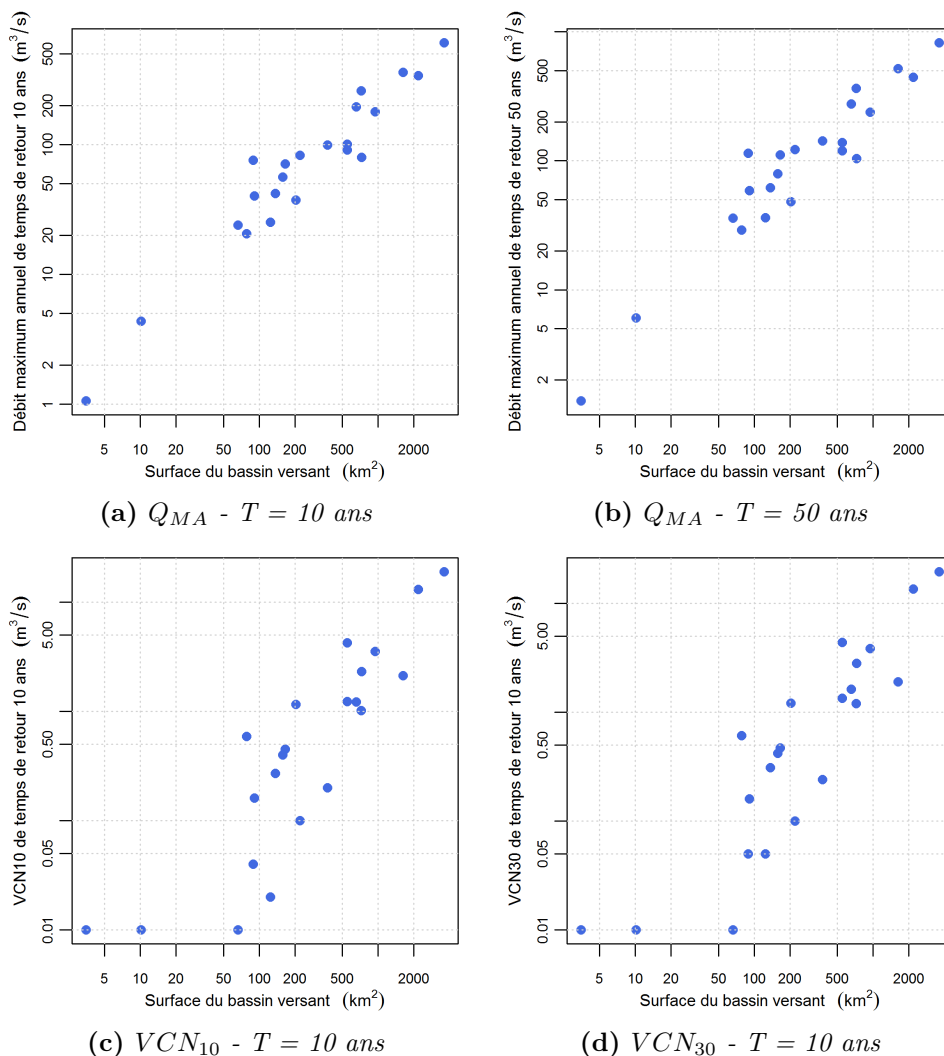


Figure 1.18 – Représentation des crues et étiages en fonction de la surface du bassin versant (échelles logarithmiques).

Station		Temps de retour					
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	50 ans	
1	La Durance à Val-des-Prés	VCN_{10}	1.7	1.4	1.2	1.1	0.6
		VCN_{30}	1.7	1.4	1.2	1.1	0.8
		Q_{MA}	24.9	32.3	37.3	42.0	48.1
2	La Guisane au Monétier-les-Bains	VCN_{10}	0.84	0.64	0.59	0.57	0.56
		VCN_{30}	0.86	0.66	0.61	0.59	0.58
		Q_{MA}	10.9	16.8	20.6	24.3	29.1
3	La Durance à Briançon Aval	VCN_{10}	5.4	4.9	4.2	3.9	2.1
		VCN_{30}	5.6	5.0	4.4	4.2	3.3
		Q_{MA}	58.9	78.2	91.1	103.3	119.2
4	Le Guil à Montdauphin	VCN_{10}	4.4	3.6	2.3	1.9	1.9
		VCN_{30}	4.5	3.8	2.8	2.7	2.7
		Q_{MA}	51.7	68.5	79.6	90.2	104.0
5	La Durance à la Clapière	VCN_{10}	16.7	13.9	13.1	12.2	11.1
		VCN_{30}	17.4	14.5	13.5	12.9	12.0
		Q_{MA}	220.2	292.5	340.5	386.4	445.9
6	Le Riou de Crachet à Saint-Paul de Vars	VCN_{10}	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
		VCN_{30}	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
		Q_{MA}	0.69	0.91	1.06	1.20	1.38
7	L'Ubaye à Roche-Rousse	VCN_{10}	4.9	3.8	3.6	3.3	3.1
		VCN_{30}	5.5	4.1	3.8	3.5	3.2
		Q_{MA}	111.8	152.1	178.7	204.3	237.4
8	L'Ubaye à Barcelonnette	VCN_{10}	2.1	1.5	1.2	0.8	0.6
		VCN_{30}	2.3	1.6	1.3	1.0	0.8
		Q_{MA}	57.3	83.3	100.5	117.0	138.3
9	La Durance à Serre-Ponçon	VCN_{10}	23.7	19.9	18.9	17.3	15.9
		VCN_{30}	25.5	20.8	19.5	18.8	17.5
		Q_{MA}	364.4	510.6	607.3	700.2	820.3
10	Le Buech aux Chambons	VCN_{10}	1.4	1.1	1.0	1.0	0.9
		VCN_{30}	1.5	1.3	1.2	1.2	1.1
		Q_{MA}	139.4	211.8	259.7	305.7	365.1
11	La Méouge au pont de Méouge	VCN_{10}	0.20	0.10	0.10	0.10	0.10
		VCN_{30}	0.24	0.13	0.10	0.10	0.10
		Q_{MA}	37.6	64.6	82.5	99.7	121.9
12	Le Jabron à Piedguichard	VCN_{10}	0.10	0.07	0.04	0.04	0.04
		VCN_{30}	0.10	0.07	0.05	0.02	0.02
		Q_{MA}	31.4	58.0	75.6	92.5	114.4
13	Le Bes à la Clue de Pérour	VCN_{10}	0.60	0.48	0.45	0.39	0.28
		VCN_{30}	0.67	0.50	0.47	0.34	0.30
		Q_{MA}	24.77	52.55	70.95	88.59	111.43
14	Le Lauzon à Villeneuve	VCN_{10}	0.07	0.05	0.02	0.02	0.01
		VCN_{30}	0.10	0.07	0.05	0.03	0.02
		Q_{MA}	12.6	20.1	25.1	29.9	36.1
15	L'Asse à la Clue de Chabrières	VCN_{10}	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
		VCN_{30}	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1
		Q_{MA}	50.1	79.6	99.2	117.9	142.2
16	Le Verdon à Allos	VCN_{10}	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00
		VCN_{30}	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01
		Q_{MA}	2.4	3.6	4.4	5.1	6.1
17	Le Verdon à Colmars	VCN_{10}	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1
		VCN_{30}	0.9	0.6	0.4	0.4	0.3
		Q_{MA}	29.4	45.5	56.1	66.3	79.5
18	L'Issole à Saint-André-les-Alpes	VCN_{10}	0.45	0.34	0.27	0.25	0.22
		VCN_{30}	0.60	0.40	0.31	0.28	0.27
		Q_{MA}	19.1	32.8	41.9	50.6	61.9
19	Le Verdon à Castillon	VCN_{10}	2.0	1.5	1.2	1.1	0.8
		VCN_{30}	2.5	1.8	1.6	1.2	1.0
		Q_{MA}	101.3	157.5	194.6	230.3	276.5
20	L'Artuby à la Bastide	VCN_{10}	0.20	0.16	0.16	0.15	0.10
		VCN_{30}	0.21	0.17	0.16	0.16	0.11
		Q_{MA}	18.9	31.7	40.1	48.3	58.8
21	Le Jabron à Comps-sur-Artuby	VCN_{10}	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00
		VCN_{30}	0.05	0.01	0.01	0.00	0.00
		Q_{MA}	10.5	18.6	24.0	29.2	35.8
22	Le Verdon à Ste-Croix	VCN_{10}	4.9	3.0	2.1	1.4	1.2
		VCN_{30}	5.4	3.9	1.9	1.6	1.5
		Q_{MA}	178.7	287.5	359.6	428.7	518.1

Tableau 1.4 – Valeurs des débits journaliers minima annuels observés sur 10 jours (VCN_{10}) et 30 jours (VCN_{30}) consécutifs, et des débits journaliers maxima annuels (Q_{MA}) pour différents temps de retours.

VI | Aménagements de la Durance

La situation climatique et hydrologique particulière de la Durance a fait de cette rivière le lieu d'aménagements relativement précoces. En effet, la sécheresse de toute la partie aval du bassin a poussé les hommes qui l'habitaient à construire des ouvrages permettant d'exploiter les eaux de la Durance pour l'irrigation des terres. Par ailleurs, la forte pente de la Durance la rendait bien exploitable pour l'énergie hydraulique, bien que l'irrégularité de son régime obligeait à placer les installations sur des canaux de dérivation plutôt qu'au bord du lit de la rivière.

VI.1 | Les premiers canaux

C'est en basse-Durance que se concentre la majorité des grands canaux. En 1171 est construit le canal de Saint-Julien. Celui-ci permet alors de fournir l'énergie à plusieurs moulins à farine et les eaux de restitution sont utilisées pour l'irrigation (EDF, 1963). Le canal de Craponne, premier grand canal d'irrigation du bassin, est construit au XVI^{ème} siècle sous la direction d'Adam de Craponne. Ce canal franchit la chaîne des Alpilles par le seuil de Lamanon pour alimenter les cultures de la plaine de la Crau, empruntant ainsi le tracé qui était celui de la Durance elle-même dans des temps bien antérieurs (voir paragraphe IV). Au milieu du XIX^{ème} siècle, face à la grave pénurie d'eau qui freine le développement de la ville de Marseille, on construit un canal de plus de 90 km de long qui amène vers le port méditerranéen les eaux de la Durance. Le tracé de ce canal, appelé canal de Marseille est parsemé de plusieurs ouvrages d'art importants dont l'aqueduc de Roquefavour. On compte dans les années cinquante une quinzaine de canaux principaux d'irrigation en basse Durance, pour une dotation concédée de 85 m³/s. Le canal d'Aix prélève quant-à-lui les eaux du Verdon au niveau de Quinson, avec une concession de 6 m³/s. Un historique détaillé des aménagements hydrauliques en Provence est retracé par Jean (2011).

VI.2 | Les débuts de l'hydroélectricité en Durance

Si le berceau français de la Houille Blanche se trouve en Isère, où son utilisation à grande échelle se développe rapidement dès la fin du XIX^{ème} siècle, l'arrivée de l'hydroélectricité en Durance est également précoce. Les premières usines construites sur ce territoire sont celle dite du Pont Baldy à Briançon en 1894, qui alimentait l'éclairage de la ville et actionnait des câbles porteurs desservant les forts, puis celle de Serres en 1900, qui fournissait l'électricité à une usine de production de carbure de calcium. Ces deux petites usines sont suivies de la construction de la première centrale importante à La Brillanne, qui s'achève en 1907. L'électricité produite par cette centrale est transportée jusque vers Marseille et Avignon. Deux usines encore plus puissantes sont ensuite construites à Ventavon puis à l'Argentière. Une description détaillée de ces premières centrales est donnée par Wilhelm (1913), on pourra également se reporter à l'ouvrage de Jacquignon (2000) qui retrace l'histoire de l'électricité dans les Hautes-Alpes jusqu'en 1946.

Le développement d'usines hydroélectriques continue pendant toute la première moitié du XX^{ème} siècle. En 1955, la puissance totale installée sur le bassin de la Durance est ainsi, d'après EDF (1963), de 270 MW avec une production moyenne annuelle de 1050 GWh. Cependant, comme le souligne Wilhelm dès 1910, ces usines sont gênées par l'irrégularité du régime de la Durance, les étiages d'hiver ne permettant pas de garantir des puissances élevées, et les crues obligeant à déverser de l'eau et donc à perdre de l'énergie.

VI.3 | Vers un aménagement global

Le développement des usages de l'eau de la Durance provoque une demande en eau croissante qui peut amener, en période de sécheresse, des conflits entre usager. Par ailleurs, les grandes crues de la Durance causent des dégâts souvent importants. Dès le XIX^{ème} siècle la nécessité d'entreprendre des travaux qui permettraient une « régularisation du régime de la Durance » s'impose.

Pour atteindre cet objectif, deux théories s'opposent alors. La première consiste en d'importants travaux de reboisement et de regazonnement. En effet, d'après l'*Étude sur les Torrents des Hautes-Alpes* publiée par Surell en 1841, un lien existe entre la formation des torrents et l'absence de forêt. La déforestation massive par l'homme, mais aussi la présence massive du mouton sur les montagnes ont contribué à dénuder les sols du bassin, et Surell préconise le reboisement des versants pour limiter la violence des torrents. Cette idée est reprise par l'ancien Inspecteur général de la Restauration des Terrains en Montagne (R.T.M.) Demontzey (1896). Ce dernier, moins nuancé que son prédécesseur, considère que le reboisement des versants est l'unique possibilité pour régulariser le régime de la Durance. Cette solution devrait permettre selon Demontzey une « diminution [puis une] suppression de son caractère de torrentialité ». Un sol boisé permettrait ainsi de stabiliser les sols et de limiter l'écoulement torrentiel lors de fortes pluies, tout en favorisant l'infiltration. Cette solution permettrait donc, d'après ses défenseurs, de limiter la violence des crues et d'augmenter les débits d'étiage par les sources alimentées par l'infiltration dans les sols. Le charriage de matériaux solides serait également diminué.

La deuxième solution envisagée est la construction d'un grand barrage avec une retenue ayant une capacité suffisante pour retenir l'eau excédentaire en période humide et la restituer en période sèche, mais aussi atténuer les crues. Déjà en 1856, suite aux dégâts occasionnés sur l'ensemble du bassin par une crue de la Durance, et alors que ceux de la crue de 1843 étaient encore bien présents dans les mémoires (Baraille, 2001), l'idée de construire un grand barrage régulateur est soulevée. Le lieu de Serre-Ponçon ressort déjà à la suite de prospections comme le plus adapté, car il offre la possibilité de créer un très grand réservoir suffisamment élevé et bien alimenté. Cependant, à l'emplacement potentiel du barrage le sol est constitué d'une grande épaisseur d'alluvions perméables dont on n'arrive pas à connaître à l'époque la profondeur précise. Tant que les enjeux liés à l'irrigation et à la production hydro-électrique ne sont pas apparus, le coût de l'aménagement paraît trop important au regard des gains qu'il apporterait.

En 1913, Wilhelm, ingénieur des Ponts et Chaussées, publie *La Durance : Étude de l'utilisation de ses eaux et de l'amélioration de son régime par la création de barrages*. Cet ouvrage fondateur démontre que le reboisement n'est pas une solution suffisamment rapide et efficace pour répondre aux besoins de régularisation du régime qui sont ceux de l'époque et propose une étude poussée sur la possibilité d'un aménagement global de la rivière. Il est le premier à mettre en avant le fait que ce type d'aménagement proposerait une réponse unique aux intérêts conjugués de l'agriculture, de la production hydro-électrique et de la protection contre les inondations. Wilhelm consacre également une partie de son ouvrage au problème de la quantification et de la gestion des matériaux charriés. En raison de la complexité technique de l'aménagement, celui-ci est encore repoussé. L'idée d'un aménagement sur le Verdon est en revanche retenue, mais le barrage de Castillon ne sera achevé qu'en 1949, et restera insuffisant au vu des besoins croissants.

Dès sa création, Électricité de France reprend les études du site de Serre-Ponçon et la profondeur des alluvions est finalement estimée à plus de 100 mètres. Un concours d'idées lancé en 1948 aboutit à la conclusion que seul un barrage poids en terre est réalisable. Des études complémentaires permettent de proposer la solution, finalement

adoptée, d'une digue en terre avec noyau étanche argileux. Des études hydrologiques sont également menées pour permettre le dimensionnement de l'ouvrage (Serra, 1953; Morlat *et al.*, 1956).

C'est finalement en 1955 qu'une loi décidant de l'aménagement hydroélectrique de la chaîne Durance-Verdon est votée. La construction de cet ensemble d'aménagements, de canaux, de barrages et de centrales hydro-électriques est confiée à EDF, avec un objectif triple : la production d'électricité, l'alimentation en eau des cultures et des villes (irrigation et eau potable), et la régulation des crues. La construction de ces aménagements est étalée jusqu'en 1976. L'aménagement décidé en 1955 est décrit dans EDF (1963).

VI.4 | L'aménagement actuel

L'aménagement hydroélectrique actuel est schématisé sur la figure 1.19. Cet aménagement comporte deux réservoirs de tête que sont les lacs artificiels de Serre-Ponçon sur la Durance et Sainte-Croix sur le Verdon, d'une capacité respective de 1.2 et 0.7 milliards de m³. Ceux-ci remplissent la fonction principale de stockage et de restitution avec un cycle de fonctionnement annuel (remplissage au printemps, maintien de cote en été, restitution pendant l'automne et l'hiver).



Figure 1.19 – Aménagements hydroélectriques de la Durance (Source : EDF).

De ces deux barrages partent les deux branches du canal EDF qui court sur 250 km et dans lequel sont dérivées les eaux de la Durance et du Verdon, excepté un débit réglementaire pour le maintien de l'écosystème dans le lit naturel de la rivière, appelé débit réservé. Au niveau de Mallemort, le canal s'éloigne du cours naturel de la Durance pour se diriger vers l'étang de Berre. Cette solution permet de gagner 100 m de dénivellée par rapport à une restitution dans le Rhône à Avignon, tout en diminuant la longueur de canal nécessaire. Le canal est une succession de « marches d'escalier » correspondant

aux centrales hydroélectriques installées sur son parcours. L'eau déviée à Serre-Ponçon est ainsi turbinée 15 fois avant d'être rejetée dans l'étang de Berre.

Plusieurs barrages sur le cours de la Durance (L'Escale, Cadarache, Mallemort) permettent de récupérer les apports des bassins intermédiaires et de les réinjecter dans le canal. À Mallemort, une répartition des eaux est faite entre la déviation vers l'étang de Berre et le cours naturel de la Durance. En effet, en plus du débit réservé, des contraintes environnementales au niveau de l'étang de Berre (salinité, dépôts de limons) empêchent de dévier toute l'eau vers celui-ci. Depuis 2007, le quota de rejets par EDF dans l'étang de Berre est fixé à 1.2 milliards de mètres cubes d'eau et 60000 tonnes de limons par an. Plus en amont, la petite retenue de Cadarache remplit un rôle de démodulation : l'eau est turbinée aux centrales de têtes aux heures de pointe de la consommation électrique, puis en partie stockée à Cadarache pour être restituée de manière plus régulière.

En amont des deux réservoirs de tête ainsi que sur certains affluents on trouve un grand nombre de centrales hydroélectriques de plus ou moins grande importance. Au total, 16 barrages et 32 centrales hydroélectriques sont présents sur le bassin de la Durance. L'aménagement Durance-Verdon produit en année moyenne 6.5 milliards de kWh/an, sa puissance instantanée de 2000 MW peut être déployée en 10 minutes.

Une réserve de 200 millions de m³ est prévue dans le réservoir de Serre-Ponçon pour l'irrigation. Il s'agit d'un droit de « destockage » à la demande des irrigants de la Basse-Durance (représentés par la Commission Exécutive Durance ou CED), mais ceux-ci disposent également d'un droit de prélèvement sur le débit à Cadarache. A cet endroit, la dotation en eau pour les besoins de l'irrigation peut atteindre 114 m³/s pendant les mois de plein arrosage. Sur les aménagements du Verdon, 250 millions de m³ sont également réservés aux besoins de l'irrigation et à l'alimentation en eau potable des villes d'Aix-en-Provence et Marseille, gérés principalement par la Société du Canal de Provence. Au total, la quantité moyenne d'eau de la Durance prélevée par an est estimée à 1.5 milliards de m³ pour l'agriculture, et à 230 millions de m³ pour l'eau potable. Le périmètre irrigué par les eaux de la Durance est estimé à 150000 ha, dont 80000 ha se trouvent en basse Durance.

Si le tourisme n'a pas été réellement pris en compte en 1955 dans les usages servis par l'aménagement Durance-Verdon, il représente aujourd'hui une part importante et croissante des enjeux liés à cet aménagement. Les activités touristiques se sont en effet très fortement développées autour des lacs artificiels (Serre-Ponçon et les lacs du Verdon), la conjugaison de la montagne et des activités nautiques (navigation, baignade) les rendant particulièrement attrayants. Wilhelm n'avait d'ailleurs pas omis en 1910 de mentionner cet argument dans sa promotion d'un aménagement de la Durance : « Pour les amateurs de pittoresque, le lac artificiel de la Durance constituera une attraction peu ordinaire, dans un cadre sauvage et grandiose. Nombreux seront les touristes qui viendront parcourir ses rives, ou naviguer sur ses eaux bleues, dans lesquelles se mireront les hautes cimes du Morgon et du Colbas ». Les sports d'eau-vive constituent également une économie non-négligeable sur la Haute Durance et ses affluents (Guisane, Ubaye...), ainsi que sur le Haut-Verdon. La prise en compte de ces usages implique de nouvelles contraintes de gestion des aménagements, comme les côtes minimales touristiques des lacs (maintien d'une côte suffisamment haute pendant l'été), ou les débits minimaux nécessaires à la navigation (mise en place de lâchers d'eau sur le Verdon par exemple).

VII | Le projet R²D² 2050

Le projet « Risque, Ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050 », démarré en décembre 2010, se propose de progresser sur l'élaboration d'une vision prospective de la gestion de l'eau à l'échelle du territoire complexe et fortement anthropisé qu'est le bassin de la Durance. Sept partenaires sont impliqués dans ce projet, sous la coordination d'Irstea Lyon (Eric Sauquet) : Irstea Lyon, EDF R&D LNHE Chatou, EDF DTG Grenoble, Université Pierre et Marie Curie Paris, Irstea Antony, LTHE Grenoble, Société du Canal de Provence, ACTeon.

L'objectif du projet R²D² 2050 est d'analyser, dans le bassin de la Durance et à l'horizon 2050, les conséquences potentielles de scénarios réalistes d'évolutions climatiques et anthropiques sur l'équilibre offre / demande en eau (en termes de fréquence et d'intensité des déficits et étiages sévères) et de proposer *in fine* différentes stratégies d'adaptation et de mitigation socioéconomique pour une gestion intégrée et durable de la ressource. Le projet R²D² 2050 examinera spécifiquement le devenir des ressources hydriques en amont de Mallemort en différents points clefs du bassin et cherchera à représenter les usages et demandes en eau connectés à l'hydrosystème. Il permettra en particulier d'apporter des éclairages sur :

- les évolutions du régime hydrologique des principaux cours d'eau du bassin versant et de l'offre en eau ;
- les demandes en eau actuelles et futures des usages de l'eau (hydroélectricité, agriculture, tourisme, etc.), y compris des principaux écosystèmes aquatiques, locales ou extérieures qui exercent une pression sur l'hydrosystème Durance - Verdon ;
- les déséquilibres potentiels futurs qui découlent de la confrontation offre/demande sous scénarios de changement climatique et d'évolution socio-économique ;
- les marges de manœuvre et alternatives de gestion permettant d'assurer une gestion « équilibrée et durable » de la ressource en eau en cohérence avec les objectifs et les enjeux de l'aménagement du territoire ;
- les principales incertitudes attachées aux résultats obtenus, ainsi que l'importance relative des sources d'incertitude potentielles.

Le projet R²D² 2050 prendra en compte les réflexions et conclusions du « Schéma d'Orientation pour une Utilisation Raisonnée et Solidaire de la Ressource en Eau » (SOURSE) porté par la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Il contribuera également au renforcement de la base de connaissances sur le changement climatique et sur l'adaptation à l'échelle nationale, complétant en particulier le projet EXPLORE 2070 « Élaboration et évaluation des stratégies d'adaptation au changement climatique en France face à l'évolution des hydrosystèmes et des milieux côtiers à l'horizon 2050-2070 » piloté par le Ministère de l'écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement.

La principale contribution de cette thèse au projet est de préciser la variabilité de la climatologie et des fonctionnements hydrologiques de la Durance, aussi bien dans l'espace que dans le temps.

VIII | Synthèse du premier chapitre

Nous avons présenté dans ce premier chapitre différentes caractéristiques du bassin de la Durance sur lequel porte notre étude. Il s'agit d'un bassin versant de grande taille (14000 km²) situé dans les Alpes du Sud entre le massif des Écrins et la Méditerranée. Une première description géographique a permis de diviser le territoire étudié en trois parties appelées haute-Durance, moyenne-Durance et basse-Durance, présentant des caractéris-

tiques différentes. Une rapide présentation des données hydro-climatiques disponibles a montré que le bassin de la Durance est fortement instrumenté.

L'observation de la répartition spatiale des précipitations a mis en évidence la répartition inégale des précipitations dans le bassin, et une analyse en fonction du type de circulation atmosphérique a montré que les différentes régions du bassin ne sont pas également impactées par les différentes influences climatiques, ce qui se traduit par des régimes hydrologiques variés. Ces différents éléments mettent en évidence la complexité naturelle qui caractérise le bassin de la Durance.

Les aménagements hydrauliques sont nombreux sur ce bassin. Si les premières installations présentes étaient avant tout dédiées à l'irrigation, il existe aujourd'hui une chaîne cohérente d'aménagements de la Durance et du Verdon ayant le triple objectif de produire de l'électricité, fournir l'eau nécessaire à l'irrigation en moyenne et basse-Durance, et réguler les crues. Des enjeux touristiques et environnementaux sont également pris en compte dans la gestion de ces aménagements.

La dernière partie de ce chapitre était consacrée à la présentation du projet R²D² 2050 ayant pour objectif de progresser sur l'élaboration d'une vision prospective de la gestion de l'eau à l'échelle du territoire complexe et fortement anthropisé qu'est le bassin de la Durance.

Suite à cette présentation générale du contexte qu'est le bassin de la Durance, nous présenterons dans le chapitre suivant une première étape vers la connaissance de sa variabilité hydrologique passée, à savoir la recherche et l'analyse de longues séries historiques de débits.

Données historiques

Nous présentons dans ce chapitre les résultats d'un premier axe de notre travail ayant consisté à rechercher, numériser, analyser et éventuellement corriger des longues séries quotidiennes de débits. Une première partie est consacrée à la description de la démarche de recherche documentaire menée en collaboration avec un historien. Nous proposons ensuite quelques éléments d'histoire sur l'hydrométrie dans le bassin de la Durance puis nous nous penchons sur l'analyse de l'évolution des méthodes de construction des séries quotidiennes de débits. Un processus de simulation des méthodes anciennes est présenté puis appliqué à plusieurs stations hydrométriques dans le but de quantifier l'incertitude liée à ces méthodes et éventuellement de corriger certaines portions de séries hydrométriques.

Sommaire

I	Recherche d'archives de données hydrologiques	41
II	Petit historique de l'hydrométrie en Durance	42
III	Mode de construction des séries historiques de débits journaliers . .	46
III.1	Méthode générale de construction d'une série de débits	46
III.2	Évolution des méthodes de mesure et d'échantillonnage de la hauteur d'eau	47
III.3	Description des méthodes de mesure et d'échantillonnage de la hauteur d'eau	48
IV	Simulation des méthodes anciennes de mesure et d'échantillonnage de la hauteur d'eau	52
IV.1	Simulation de la méthode de lecture quotidienne à heure fixe de la hauteur d'eau à l'échelle	52
IV.2	Simulation de la méthode d'enregistrement graphique et dépouillement manuel des limnigrammes	53
IV.3	Mode de comparaison	55
IV.4	Stations analysées	55
V	Analyse des incertitudes inhérentes à la méthode de lecture quotidienne à heure fixe de la hauteur d'eau à l'échelle	56
V.1	Exemple de la série de débits du Verdon à Colmars	56
V.2	Analyse sur un échantillon de stations	61

V.3	Impact de la méthode de lecture quotidienne à l'échelle sur le calcul du module interannuel	63
V.4	Correction des séries de débits construites par la méthode de lecture quotidienne à l'échelle	66
VI	Analyse des incertitudes inhérentes à la méthode d'enregistrement graphique et dépouillement manuel des limnigrammes	69
VI.1	Représentation en fonction de la variation infra-journalière de hauteur d'eau	69
VI.2	Représentation en fonction du débit moyen journalier	72
VII	Intégration dans le calcul de l'incertitude globale des débits	74
VIII	Synthèse du deuxième chapitre	76

I | Recherche d'archives de données hydrologiques

Dans le but de caractériser l'hydrologie de la Durance au cours du dernier siècle, il est nécessaire de disposer de longues séries de données hydrologiques couvrant cette période. Certaines séries étaient déjà disponibles sous forme numérique au début de ce travail de thèse dans les bases de données d'EDF ou de la banque HYDRO. C'est par exemple le cas des séries de débits de l'Ubaye à Barcelonnette (depuis 1904), de la Durance à La Roche de Rame (depuis 1910), ou de l'Issole à Saint-André-les-Alpes (depuis 1904).

Afin d'enrichir cette base de données anciennes, une recherche documentaire a été menée en partenariat avec la société ACTHYS-Diffusion représentée par M. Denis Coeur. Divers lieux d'archives ont été explorés, avec pour objectif de retrouver des séries de données hydrologiques, mais aussi des informations sur les modes d'élaboration de ces séries : méthodes de mesure de la hauteur, jaugeages, courbes de tarages, emplacement des stations, etc.

Une première étape de ce travail a consisté à recenser les différentes sources de données. Les principaux fonds explorés ont été ceux de la Société Hydrotechnique de France (S.H.F), des archives départementales et nationales, de l'École Nationale des Ponts et Chaussées et de la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) Provence-Alpes-Côte d'Azur.

L'essentiel des informations nous intéressant ont été retrouvées à la DREAL PACA au Tholonet (Aix-en-Provence), où sont regroupées les archives des anciens services des Grandes Forces Hydrauliques et de la 6ème Circonscription Électrique. On y trouve les dossiers de création de chaque station, avec généralement les séries originales de relevés journaliers des hauteurs et débits sur la période 1910-1950, conservés sous forme de tableaux annuels manuscrits. On retrouve également dans la plupart des dossiers des courbes de tarage ainsi que différents documents relatifs aux techniques et méthodes utilisés, aux campagnes de jaugeages, aux conditions d'écoulement du cours d'eau et de mesure du débit, etc.

Dans un deuxième temps, l'accent a été mis sur un certain nombre de stations pour un travail plus poussé consistant à numériser (par photographie numérique) les documents constituant les dossiers. Les stations choisies représentent des points d'intérêt particulier, faisant généralement partie des stations sélectionnées dans le jeu de données du projet R²D². Ce travail a finalement permis d'exhumer 5 nouvelles séries journalières centenaires ainsi que des informations sur les modes de construction de ces nouvelles séries et de séries déjà numérisées.

Pour finir, un travail de numérisation manuelle et par reconnaissance vocale a permis de transformer ces photographies en séries numériques. Parallèlement, une synthèse des données périphériques a permis de constituer des « dossiers-stations » retraçant l'histoire de huit longues séries hydrologiques (Guérin, 2012).

Le tableau 2.1 liste les 11 stations pour lesquelles nous disposons aujourd'hui d'une longue série numérisée de débits journaliers. Certaines de ces stations ont subi un déplacement au cours de leur histoire. Les déplacements dont nous avons pu trouver trace sont signalés dans le tableau par l'ancien nom de la station (parfois identique) et l'année de changement. Ces déplacements ont en général un impact modéré sur les séries de débits, mais on sait par exemple que le déplacement de la station de Briançon en 1908 a des conséquences plus importantes, car les confluences de deux affluents se trouvent entre les emplacements de l'ancienne station (à l'amont) et de la nouvelle (à l'aval). Oraison - l'Escale et Jouques - Cadarache sont deux cas particuliers : il s'agit aujourd'hui d'aménagements hydroélectriques au droit desquels les débits sont à présent calculés par bilan à l'aménagement, la première partie de la série correspondant à une station hydrométrique

proche de l'aménagement actuel. Il est à noter que, excepté pour l'Ubaye à Barcelonnette dont la série est quasi-continue, toutes les séries présentent des lacunes plus ou moins longues, généralement entre les années 40 et les années 60. La figure 2.1 montre la disponibilité temporelle de chacune des longues séries.

Rivière	Station	BV [km ²]	Début	Ancienne Station	Changement
Durance	Val-des-Près (La Vachette)	210	1917		
Durance	Briançon	548	1904	Briançon	1908
Durance	L'Argentière-la-Bessée	984	1910	La Roche de Rame	1996
Durance	La Clapière (Embrun)	2170	1904	La Clapière	1954
Ubaye	Barcelonnette	549	1904		
Buech	Les Chambons	771	1906	Serres	1964
Durance	Oraison - l'Escale	6760	1924	Pont de Volonne	1964
Asse	Clue de Chabrières	375	1908		
Verdon	Colmars	158	1903	Colmars	1995
Issole	Saint-André-les-Alpes	137	1904		
Durance	Jouques - Cadarache	11700	1918	Pont de Mirabeau	1959

Tableau 2.1 – Inventaire des 11 stations pour lesquelles une longue série hydrologique est aujourd'hui disponible sous forme numérique. Lorsque la station a changé de nom ou d'emplacement depuis son origine, l'ancien nom et la date de changement sont spécifiés.

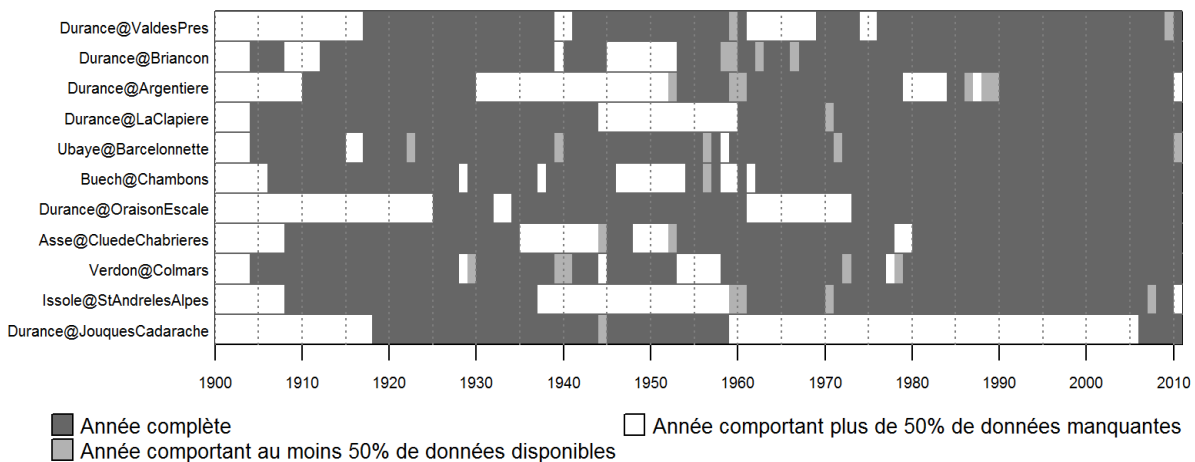


Figure 2.1 – Disponibilité temporelle des longues séries quotidiennes de débits.

II | Petit historique de l'hydrométrie en Durance

Les recherches menées par D. Coeur (ACTHYS-Diffusion, 2011, 2012), mais aussi les travaux menés précédemment sur la station de Pont de Mirabeau (Lallement, 2001, 2009) ont permis de mettre en évidence la richesse de l'hydrométrie sur le bassin de la Durance.

Les relevés quotidiens de hauteurs d'eau les plus anciens retrouvés ont été effectués en 1900 à la station de Pont de Mirabeau. Il est cependant attesté que des lectures quotidiennes à l'échelle ont eu lieu à cette station dès 1891, et même peut-être dès 1832, année de la mise en place par l'administration des Ponts et Chaussées d'un programme systématique d'étude des débits de la Durance au Pont de Mirabeau. Celui-ci sera progressivement renforcé au fil des événements climatiques majeurs rencontrés (crues de 1843,

1856, 1882, 1886). En ce qui concerne les mesures de débits, les premiers jaugeages recensés concernent également la station de Pont de Mirabeau. Ils ont été effectués en août 1836 à l'aide de flotteurs. Ces mesures, réalisées en période d'étiage, étaient motivées par des soucis de gestion de l'eau à des fins de partage agricole.

Les mesures quotidiennes de hauteur étaient faites principalement dans un souci d'annonce des crues dommageables pour la Basse Durance et les zones d'Avignon et d'Arles. Un Service Hydrométrique d'Annonce des Crues (SHAC) du Rhône et de ses affluents dont la Durance est créé par circulaire en 1876. Imbeaux est l'auteur de travaux importants sur ce sujet. Il propose l'organisation d'un système d'annonce des crues basé sur des lois de propagation établissant une relation entre les débits à Bonpas ou Sisteron et ceux de Pont de Mirabeau. Pour améliorer l'anticipation, Imbeaux est même à l'origine du premier modèle hydrologique établi sur la Durance, puisqu'il propose une relation entre « les crues à Mirabeau et les pluies génératrices tombées dans le bassin d'amont » (Imbeaux, 1892).

En 1892, Imbeaux recense déjà six échelles de hauteur d'eau auxquels des mesures sont faites « assez régulièrement depuis plus ou moins longtemps », plus deux en création. Il regrette néanmoins l'absence de stations à l'amont de Sisteron et le manque de jaugeages aux stations existantes. En 1903, la création du service des Grandes Forces Hydrauliques (GFH, dépendant du ministère de l'agriculture et des travaux publics) provoque une relance de l'hydrométrie sur les Alpes, avec la systématisation des mesures quotidiennes et des jaugeages et l'installation de nouvelles stations. La finalité du suivi hydrométrique ne se limite plus à l'annonce des crues, il s'agit également de prospecter le potentiel hydraulique de la région. La gestion des stations sera reprise au début des années 1940 par la 6^{ème} circonscription électrique, service du ministère de la production industrielle et des communications.

Finalement, ce sont plus de 150 stations hydrométriques qui ont existé ou existent encore sur le bassin de la Durance, certaines couvrant plus de 100 ans de mesures (figure 2.2). L'ensemble de ces données représente environ l'équivalent de 4500 années de débits. Cette densité de mesures dès le début du XX^{ème} siècle apparaît extraordinaire et témoigne d'une grande volonté de connaître le fonctionnement hydrologique de ces bassins. Sur les huit stations examinées plus en détail, nous avons également retrouvé un total d'environ 1500 jaugeages et 150 courbes de tarage effectués avant 1960.

Les documents retrouvés témoignent d'une correspondance régulière entre les observateurs, chefs de stations, ingénieurs du bassin et ingénieurs en chef. Une sélection d'extraits de ces échanges est présentée dans le tableau 2.2. Ces documents montrent le fort investissement de l'ensemble du personnel pour le développement des matériels et techniques de mesures, des configurations des stations et un souci constant de la qualité des mesures.

L'amélioration des stations se retrouve dans de nombreux documents qui témoignent de ces préoccupations permanentes. Ces améliorations se sont concrétisées, au début du XX^{ème} siècle, lors du passage de stations du SHAC d'observation des hauteurs et d'annonce des crues, à des stations hydrométriques avec une estimation quantitative des débits. Cette transformation, qui a eu lieu au moment de la mise en place du réseau des grandes forces hydrauliques, avait pour objectif de connaître les régimes des débits sur l'ensemble du bassin tout au long de l'année (pas seulement pendant les crues). Ensuite, on retrouve également de nombreux documents sur les évolutions des matériels de la station : passerelles, treuils, limnigraphes, chariots de manœuvre, bateaux avec câble. Les constructeurs de matériels entretiennent des correspondances avec les ingénieurs du SHAC pour améliorer les techniques et matériels. La question de la sécurité est régulièrement évoquée pour faire progresser les conditions de la mesure, notamment sur les passerelles.

On retrouve également de nombreux documents relatifs à la qualité des mesures de

Thème	Station de jaugeage	Commentaire et date
Matériel	La Durance à la Vachette	« Nous avons ramené à Grenoble pour vérification et tarage le moulinet de M. Jarrel, chef de station. Cet instrument n'avait pas été étalonné depuis 1931 » (Inspection de la station par les GFH, 11/1945)
Matériel	L'Ubaye à Barcelonnette	« Passerelle légère, constituée par 2 à 3 échelles recouvertes de madriers et soutenues du pont par des cordes amarrées aux poutres. Médiocre et peu sûre, à améliorer » (21/06/1908)
Matériel Hauteur	L'Asse à la Clue de Chabrière	« La rigueur de la température s'est opposée pendant le premier trimestre à la mise en place du treuil tracteur. Conformément aux instructions, la glace a été cassée tous les jours par le cantonnier observateur qui débarrassait soigneusement les abords de l'échelle avant de faire les lectures » (1er trimestre 1914)
Matériel Hauteur	Le Buëch à Serres	« L'échelle et le limnigraphe sont en bon état, faciles d'accès, et le fonctionnement en est satisfaisant. Il paraît inutile de continuer les observations journalières de l'échelle, les graphiques du limnigraphe donnant les indications nécessaires » (03/11/1909)
Hauteur	L'Asse à la Clue de Chabrière	« il est possible qu'au début l'observateur ne lisait pas correctement les cotes, surtout les négatives. Je me rappelle fort bien le lui avoir expliqué » (15/06/1912)
Jaugeage	Le Buëch aux Chambons	Concernant les jaugeages : « la difficulté de leur mise en place dû au régime torrentiel de l'écoulement ainsi que de son irrégularité à l'emplacement du jaugeage » « pour les basses eaux, les jaugeages sont effectués en aval en un point variable à chaque opération, là où les eaux se trouvent le plus concentrées » (1909)
Jaugeage	Le Verdon à Colmars	« Il me paraît utile, pour la sécurité des opérateurs, de pourvoir la passerelle d'un garde corps à l'aval. On pourrait peut être se contenter d'un fort fil de fer tendu entre deux crochets scellés au culées du pont. » « Le Lit paraît se maintenir fixe depuis 1907; mais quelques gros blocs roulent à chaque crue. Il est nécessaire de les enlever pour assurer dans le profil de jaugeage un écoulement régulier sans lequel les mesures sont très imprécises » (22/08/1910)
Hauteur et jaugeage	La Durance au Pont de Mirabeau	« les variations de débits ne correspondent pas aux hauteurs d'eau lues à l'échelle », « la nécessité de faire des jaugeages à l'emplacement de l'échelle » (1901)
Période de jaugeage	La Durance à la Vachette	« un relâchement dans les périodes de transition, les eaux basses ne paraissent être observées que de temps en temps » (1953)
Période de jaugeage	L'Asse à la Clue de Chabrière	« La mauvaise saison étant passée, je prie M. Canton de réaliser sans plus tarder la mise en place du nouveau treuil et de reprendre les opérations activement. Je rappelle que pour déterminer la courbe de tarage, il manque plusieurs points à l'extrême étiage et aux crues » (22/04/1914)
Qualité de la station	L'Ubaye à Barcelonnette	« La station paraît médiocre en raison de l'instabilité du lit et de l'imprécision des jaugeages. La courbe de tarage est médiocre à tous les débits. La sensibilité de l'échelle est faible en basse eaux. » (1945)
Qualité de la station	L'Asse à la Clue de Chabrière	« irrégularité du lit de la rivière où de gros blocs sont échoués dans le voisinage du profil de jaugeage » (1944)
Qualité des débits et mesure des hauteurs	Le Verdon à Colmars	« Une étude comparative entre les différentes stations du bassin en 1952 signale des résultats médiocres de débits à cette station. Ces erreurs auraient pour origine soit un détarage du moulinet soit une erreur systématique de lecture à l'échelle. Il apparaît par la suite que l'échelle, devenue illisible car n'ayant jamais été changée sur toute la période, serait à l'origine de ces écarts » (1953)
Vie de la station	La Durance à la Vachette	« Le matériel de la station de jaugeage de la Vachette a été emporté ou détruit par les allemands lors de leur retour à la Vachette au début septembre 1944 » (24/11/1944)
Vie de la station	Le Buëch à Serres	« Je tiens cependant à préciser (puisque cela semble nécessaire) que l'étude détaillée du régime d'un bassin quelconque repose sur des observations [...] s'étendant sur plusieurs dizaines d'années. [...] Je regrette d'avoir à constater que le chef de station de Serres ait cru que les circonstances de guerre le dégageaient de toute obligation » (11/03/1944)

Tableau 2.2 – Extraits des commentaires et correspondances retrouvés dans les archives des stations hydrologiques.

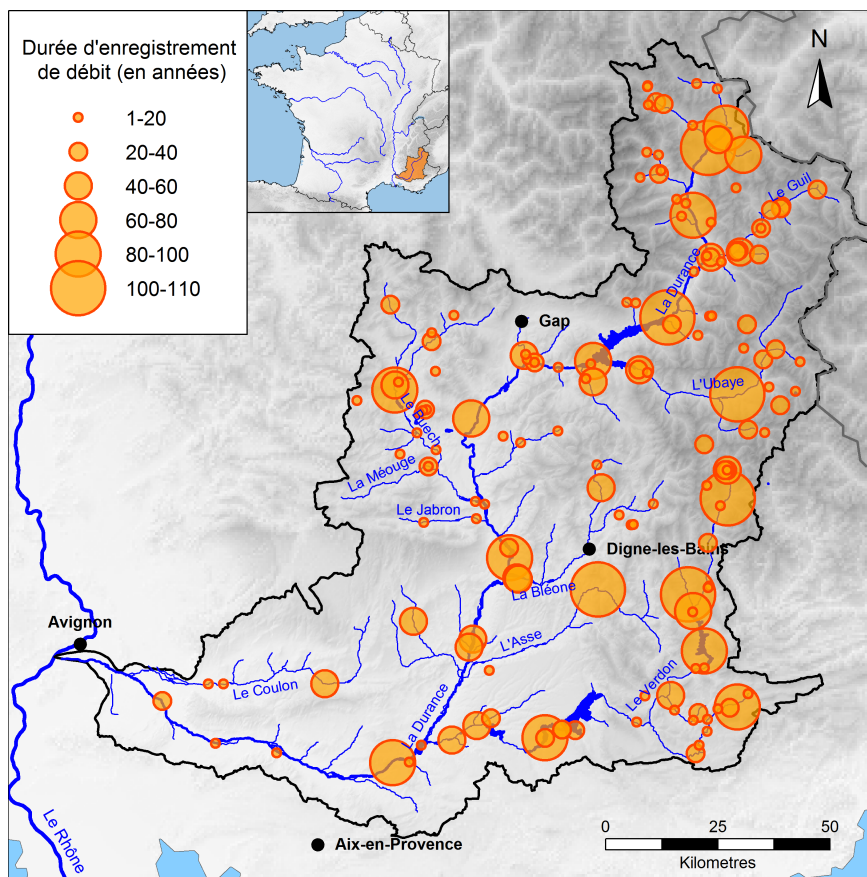


Figure 2.2 – Localisation et durée d'enregistrement des stations hydrométriques recensées sur la Durance.

hauteurs. Concernant ces mesures, la qualité de l'échelle, son emplacement, son accessibilité ou sa lisibilité sont souvent évoqués. La qualité de l'observateur, ses capacités à bien comprendre les instructions de lecture de l'échelle ou son assiduité sont parfois questionnées pour juger de la qualité des estimations de débits. Des indications particulières sont données lorsque la rivière et l'échelle de mesure des hauteurs sont en glace.

Concernant les jaugeages, on retrouve de nombreux documents relatifs aux matériels utilisés : flotteurs (très rarement), tube de Pitot (ponctuellement pour les étiages), plus couramment les moulinets de Woltman, le moulinet Richard à deux hélices ou les moulinets Ott (nombreuses références différentes). A partir du début des années 1950, on observe l'apparition des jaugeages par dilution chimique sur les stations de Colmars et la Vachette. Pour chacune des huit stations examinées plus en détail, on est capable de retrouver la liste des jaugeages effectués depuis leur création (environ 200 par station en 60 ans), les matériels utilisés, le dépouillement des verticales (parfois, avec la vérification des calculs et la validation du jaugeage par un supérieur). Comme pour la configuration de certaines stations, la dangerosité des jaugeages est évoquée. La question du choix de la bonne section de jaugeage (en fonction du débit et du lit de la rivière) est largement évoquée, les nombreux problèmes de transport solide et d'instabilité du lit sont souvent évoqués (Verdon à Colmars, Asse à la Clue de Chabrières) pour regretter la difficulté de l'exercice et de l'obtention de données fiables de débits.

A partir des jaugeages à disposition, des courbes de tarages sont tracées et on en trouve de très nombreuses (10 à 20 par station en 60 ans). Encore une fois, de nombreuses

correspondances et discussions portent sur la représentativité des courbes de tarage en fonction du régime des eaux (étiages, crue), des gammes trop limitées de débits jaugés ou de l'instabilité des sections de jaugeage et de mesure de hauteurs. Les difficultés climatiques sont rappelées pour dire que les périodes de jaugeages sont trop limitées dans le temps pour être capable de jauger les extrêmes de débits. Au-delà des considérations sur la qualité des jaugeages, des courbes de tarage et de la stabilité du fond des rivières, la qualité des débits était parfois estimée par comparaison graphique entre stations amont-aval ou par de simples modèles linéaires. Ces analyses permettaient de mettre en évidence des erreurs de lecture des observateurs, ou des incertitudes liées aux mesures de hauteurs, à l'instabilité du lit des rivières ou à la représentativité des courbes de tarages.

Enfin, ces documents révèlent les nombreuses inspections et tournées des ingénieurs des grandes forces hydrauliques. Ces inspections avaient pour objectif d'évaluer l'état physique et technique des stations de mesures, en pointant les améliorations à apporter au matériel (configuration de la passerelle, des limnigraphes, étalonnage des moulinets, etc.), la nécessité d'arrêter l'exploitation d'une station ou de la déplacer (tout en conservant pendant une durée les deux stations afin d'assurer une période de recouvrement). Ces tournées servaient également à évaluer la qualité des données produites (mesures de hauteurs, jaugeages, courbes de tarage, débits), ainsi que la compétence et la disponibilité des agents.

III | Mode de construction des séries historiques de débits journaliers

III.1 | Méthode générale de construction d'une série de débits

Contrairement aux séries climatologiques de précipitations ou de températures de l'air, les séries hydrologiques ne sont pas des séries de mesures directes. En effet, excepté dans certains cas particuliers (conduite, canal), il n'est pas possible d'effectuer une mesure continue de débit dans un cours d'eau. La grandeur mesurée de manière continue, ou du moins à pas de temps fixe (aujourd'hui généralement horaire) est la hauteur d'eau au droit de la section de mesure. Pour convertir cette hauteur d'eau en débit écoulé dans la section correspondant, une loi « hauteur-débit » est nécessaire. Ce modèle, appelé courbe de tarage, est établi à l'aide de jaugeages effectués manuellement pour différentes gammes de débits. Un jaugeage consiste en une mesure synchronisée du débit et de la hauteur d'eau à la station de mesure. Chaque jaugeage constitue ainsi un point dans l'espace hauteur-débit, l'ensemble de ces points permettant de tracer la courbe de tarage.

Il existe différentes techniques pour la mesure des hauteurs d'eau, pour les jaugeages et pour le tracé de la courbe de tarage, et bien entendu toutes ces techniques ont fortement évolué depuis le début de nos séries de mesures. Toutes ces techniques impliquent différents niveaux d'incertitudes qui se cumulent pour donner finalement l'incertitude globale du débit. Nous nous intéresserons dans la partie qui suit uniquement à l'évolution des méthodes de mesure de la hauteur d'eau, et plus précisément au mode d'échantillonnage temporel de celle-ci.

III.2 | Évolution des méthodes de mesure et d'échantillonnage de la hauteur d'eau

L'analyse des « méta-données » collectées avec les données elles-mêmes a permis de mettre en évidence une évolution des méthodes de mesure continue de la hauteur d'eau. Sur la plupart des stations étudiées, on distingue trois étapes principales au cours desquelles on peut observer quelques variations.

La figure 2.3 illustre l'évolution de la méthode d'élaboration de la série de hauteurs d'eau et de débits de la station de Colmars sur le Verdon : les plus anciennes données retrouvées pour cette station datent de 1903, et ont été établies par lecture ponctuelle à heure fixe, par un observateur, de la hauteur d'eau à l'échelle. A partir de 1957, un limnimètre a été mis en place, et les débits journaliers étaient obtenus par dépouillement manuel du limnigramme. Depuis 1983, la hauteur d'eau est mesurée, enregistrée et convertie en débit toutes les heures à l'aide d'un enregistreur numérique.

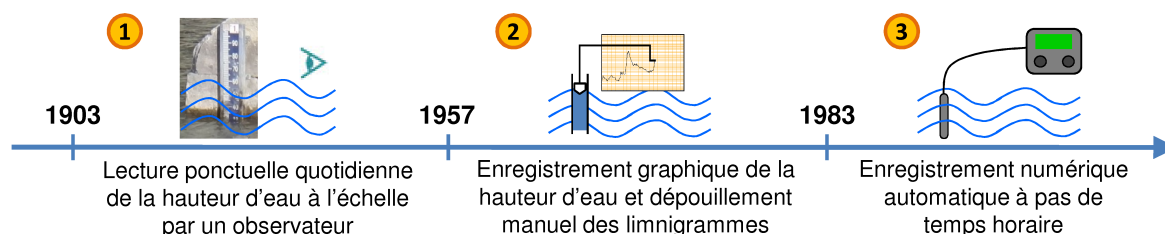


Figure 2.3 – Méthodes de construction de la série des débits du Verdon à Colmars.

Cette évolution se retrouve sur la plupart des stations pour lesquelles nous avons pu retracer l'historique des méthodes employées. La figure 2.4 retrace l'usage des différentes méthodes sur ces huit stations. On peut néanmoins noter une grande variation dans les dates de mise en place de l'enregistrement graphique (limnigraphe), en effet, certaines stations comme celles de Briançon sur la Durance ou des Chambons sur le Buëch en ont été équipées très tôt, quasiment dès la mise en service de la station dans les années 1900, tandis que d'autres ont continué d'être relevées manuellement jusque dans les années 1950, ou même jusqu'en 1967 sur l'Asse à la Clue de Chabrières. Une correspondance datée du 3 novembre 1909 entre le Chef de station de Serres (ancienne station des Chambons) sur le Buëch et l'ingénieur en chef, reproduite sur la figure 2.5, mentionne le bon fonctionnement du limnigraphe à cette station et propose l'arrêt des lectures quotidiennes à l'échelle.

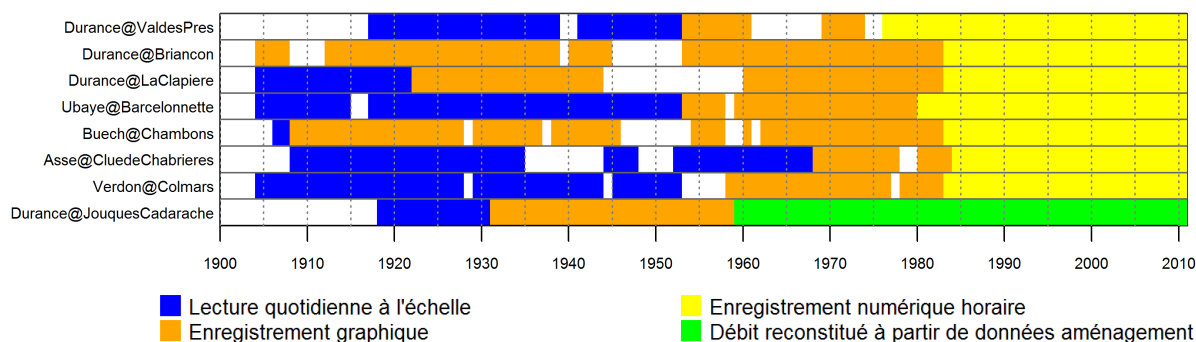


Figure 2.4 – Évolution des méthodes de construction pour 8 longues séries hydrologiques.

Contrairement à la mise en place des limnigraphes, l'installation d'enregistreurs numériques se fait sur toutes les stations à des époques relativement proches, la première



Figure 2.5 – correspondance du 3 novembre 1909 entre M. Rambaud, Chef de station de Serres (ancienne station des Chambons) sur le Buëch et l'ingénieur en chef M. Martin.

à en être équipée étant Val-des-Près sur la Durance en 1976, et la dernière la Clue de Chabrières sur l'Asse en 1984.

Une station se distingue sur la période récente, il s'agit de la station de Jouques - Cadarache sur la Durance. En effet, cette station correspond aujourd'hui à un aménagement hydroélectrique, les débits sont donc calculés à l'aide des données de cet aménagement (variations de réserve, débits turbinés...), et désinfluencés des aménagements hydroélectriques situés à son amont.

III.3 | Description des méthodes de mesure et d'échantillonnage de la hauteur d'eau

III.3.1 | Lecture ponctuelle à l'échelle

Un opérateur est chargé de se rendre tous les jours à heure fixe à la station de jaugeage afin d'y lire la hauteur d'eau à l'échelle. Ces hauteurs sont consignées par écrit et converties en débit à l'aide de la courbe de tarage, généralement consignée sous forme de tables au centimètre. Chaque jour, une seule hauteur est mesurée, et donc un seul débit est estimé, et ceux-ci sont utilisés comme hauteur et débit « journaliers ». A titre d'illustration, les instructions de lecture fournies aux observateurs de stations hydrométriques sont reproduites sur la figure 2.6. La figure 2.7 montre un exemple de tableau récapitulatif annuel des hauteurs quotidiennes lues à midi à l'échelle à la station d'Embrun (La Clapière) sur la Durance avec les débits correspondants obtenus via la courbe de tarage.

III.3.2 | Enregistrement graphique et dépouillement manuel des limnigrammes

La hauteur d'eau est enregistrée sous forme graphique à l'aide d'un système composé généralement d'un flotteur placé dans un puits de mesure et mécaniquement relié à une pointe graphite. Cette pointe graphite trace la courbe des hauteurs d'eau sur une feuille de papier millimétré fixée à un tambour tournant actionné par un système à ressort de type

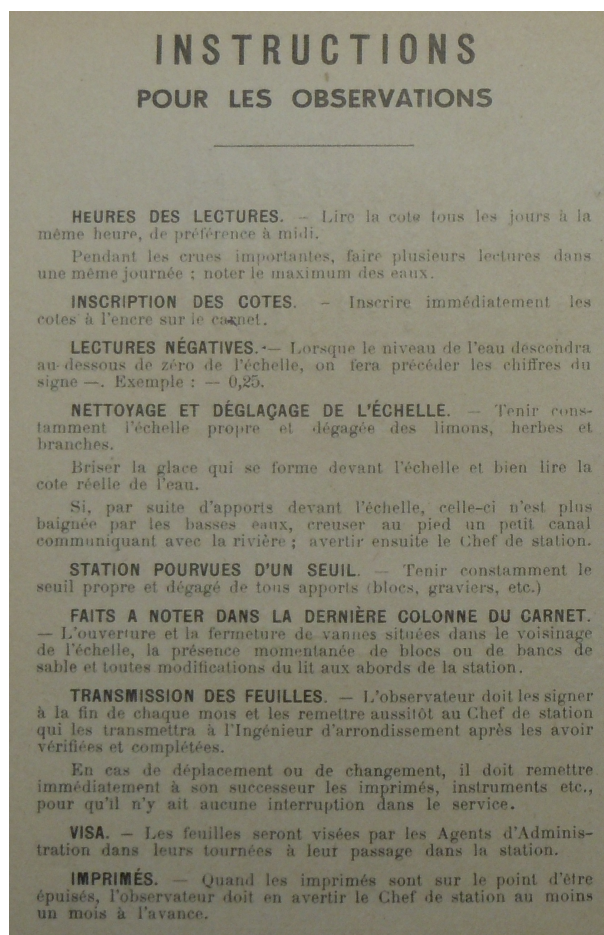


Figure 2.6 — *Instructions pour les observations quotidiennes de hauteur aux échelles des stations hydrométriques (Imprimé du service des forces hydrauliques dans la région des Alpes, 1949).*

« horlogerie », et renouvelée toutes les semaines, tous les quinze jours ou tous les mois. L'enregistrement graphique continu de la hauteur d'eau obtenu est un limnigramme. La figure 2.8 montre l'un des limnigrammes de la station de Serres sur le Buëch.

Chaque limnigramme est ensuite dépouillé par un opérateur pour en déduire les débits journaliers. Plusieurs méthodes de dépouillement des limnigrammes détaillées ci-dessous ont été observées dans les données.

Moyenne des hauteurs « à vue ». L'opérateur évalue à vue la moyenne des hauteurs de la journée, souvent en traçant un trait. Cette hauteur est consignée comme hauteur journalière et traduite en débit via la courbe de tarage. Le débit journalier est dans ce cas le débit correspondant par la courbe de tarage à la hauteur moyenne lue graphiquement.

Moyenne de n valeurs de débit. L'opérateur relève sur le limnigramme du jour j n valeurs de hauteurs réparties à intervalles réguliers au cours d'une journée, chacune de ces hauteurs est convertie en débit via la courbe de tarage, et le débit journalier est calculé par moyenne des n débits ainsi obtenus. Dans la plupart des cas on trouve $n = 12$, parfois $n = 6$ ou $n = 24$.

Machine à dépouiller. Le limnigramme est dépouillé à l'aide d'une tablette à numériser qui se décale automatiquement en abscisse d'un intervalle donné (par exemple correspondant à une heure ou deux heures). L'opérateur pointe pour chaque abscisse l'ordonnée de la courbe du limnigramme. La machine enregistre les valeurs ainsi numérisées

Rivière de la Durance		STATION D'Embrun												BASSIN de la Durance	
		<i>Station</i>													
		ANNÉE 1924												Altitude du 0 de l'échelle :	
		T. 37.													
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septemb.	Octobre	Novemb.	Décemb.			
1	0.17 26.6	0.08 20.5	0.06 19.5	0.22 30.8	0.72 98.	1.08 121	0.65 87	0.29 48	0.29 27.5	0.28 47.	0.29 27.5	0.29 27.5	1	0.29 27.5	
2	0.17 26.6	0.08 20.5	0.06 19.5	0.23 21.7	0.66 87	1.17 193	0.64 84	0.27 46	0.29 27.5	0.28 68	0.29 44.	0.29 27.5	2	0.29 27.5	
3	0.17 26.6	0.08 20.5	0.06 19.5	0.22 30.8	0.81 96	1.10 176	0.59 89	0.25 44	0.29 27.5	0.28 52.	0.29 41.8	0.29 27.5	3	0.29 27.5	
4	0.17 26.6	0.09 21.0	0.05 19.5	0.23 21.7	0.71 104	1.00 154	0.63 82	0.25 44	0.27 27.5	0.28 50.	0.29 40.7	0.29 27.5	4	0.29 27.5	
5	0.15 22.	0.07 21.0	0.06 19.5	0.21 29.9	0.63 91	0.92 136	0.64 84	0.25 44	0.27 27.5	0.28 57.	0.29 39.6	0.29 27.5	5	0.29 27.5	
6	0.15 22.	0.09 21.0	0.05 19.5	0.21 29.9	0.61 86	0.87 116	0.59 76	0.25 44	0.24 32.6	0.26 78.	0.29 27.5	0.29 27.5	6	0.29 27.5	
7	0.14 25.6	0.10 21.5	0.05 19.5	0.25 33.5	0.59 86	0.85 122	0.60 77	0.25 44	0.25 33.5	0.29 61.	0.28 36.5	0.28 27.5	7	0.28 27.5	
8	0.14 25.6	0.10 21.5	0.05 19.5	0.27 38.5	0.65 86	0.82 118	0.61 79	0.24 42.9	0.25 34.5	0.29 56.	0.28 36.5	0.28 27.5	8	0.28 27.5	
9	0.13 23.6	0.10 21.5	0.05 19.5	0.27 38.5	0.65 86	0.82 116	0.59 70	0.24 40.7	0.25 34.5	0.29 53.	0.28 33.5	0.28 27.5	9	0.28 27.5	
10	0.13 23.6	0.10 21.5	0.05 19.5	0.25 34.5	1.11 203	0.80 113	0.54 68	0.29 27.5	0.29 27.5	0.28 52.	0.28 34.5	0.28 27.5	10	0.28 27.5	
11	0.13 23.6	0.10 21.5	0.05 19.5	0.25 34.5	1.33 232	0.80 113	0.50 63	0.29 27.5	0.28 39.6	0.28 52.	0.28 34.5	0.28 27.5	11	0.28 27.5	
12	0.13 23.6	0.10 21.5	0.07 20.	0.25 33.5	1.05 162	0.82 116	0.49 61	0.28 39.6	0.25 34.5	0.28 51.	0.28 33.5	0.28 27.5	12	0.28 27.5	
13	0.12 22.9	0.10 21.5	0.08 20.5	0.23 21.7	0.97 147	0.71 96	0.49 61	0.28 39.6	0.24 32.6	0.28 50.	0.24 32.6	0.28 27.5	13	0.28 27.5	
14	0.11 22.2	0.09 21.0	0.08 20.5	0.22 30.8	0.85 122	0.60 78	0.51 64	0.28 39.6	0.23 27.5	0.28 47.	0.28 30.8	0.28 27.5	14	0.28 27.5	
15	0.11 22.2	0.09 21.0	0.09 21.	0.22 30.8	0.83 118	0.60 78	0.45 57	0.28 39.6	0.23 27.5	0.28 46.	0.28 29.9	0.28 27.5	15	0.28 27.5	
16	0.10 21.5	0.09 21.0	0.08 20.5	0.25 34.5	0.70 109	0.60 78	0.45 57	0.24 42.9	0.24 32.6	0.28 45.	0.28 29.9	0.28 27.5	16	0.28 27.5	
17	0.11 22.9	0.09 21.0	0.09 21.	0.27 38.5	0.81 114	0.59 76	0.45 57	0.24 40.7	0.22 30.8	0.28 44	0.29 27.5	0.28 27.5	17	0.28 27.5	
18	0.12 22.9	0.08 20.5	0.10 21.5	0.27 38.5	0.81 114	0.60 78	0.53 53	0.29 48.	0.22 30.8	0.28 42.9	0.27 26.6	0.28 27.5	18	0.28 27.5	
19	0.11 22.2	0.07 20.	0.10 21.5	0.27 38.5	1.05 188	0.64 84	0.41 51	0.28 45.	0.22 30.8	0.28 41.8	0.28 27.5	0.09 21.0	19	0.09 21.0	
20	0.11 22.2	0.07 20.	0.11 22.9	0.27 38.5	1.17 193	0.74 102	0.29 48	0.28 41.8	0.21 29.9	0.28 40.7	0.28 27.5	0.09 21.0	20	0.09 21.0	
21	0.12 22.9	0.08 20.5	0.11 22.9	0.27 38.5	0.97 127	0.73 128	0.42 52	0.28 41.8	0.20 29.9	0.28 27.5	0.28 27.5	0.09 21.0	21	0.09 21.0	
22	0.12 22.9	0.10 21.5	0.11 22.9	0.27 44.0	1.20 224	0.77 104	0.43 53	0.28 38.5	0.21 29.9	0.28 27.5	0.28 27.5	0.09 21.0	22	0.09 21.0	
23	0.12 22.9	0.09 21.	0.10 21.5	0.26 50.	1.25 212	0.72 98	0.40 52	0.28 38.5	0.21 29.9	0.28 26.6	0.28 27.5	0.09 21.0	23	0.09 21.0	
24	0.12 22.9	0.07 20.	0.13 23.6	0.26 66.	1.22 203	0.70 95	0.45 70	0.28 47.	0.21 29.9	0.28 38.5	0.28 27.5	0.09 21.0	24	0.09 21.0	
25	0.10 21.5	0.07 20.	0.13 23.6	0.26 64.	1.17 193	0.72 98	0.48 60	0.28 44.	0.25 33.5	0.27 32.5	0.27 26.6	0.28 27.5	25	0.28 27.5	
26	0.10 21.5	0.07 20.	0.13 23.6	0.26 74.	1.20 200	0.74 102	0.44 54	0.28 41.8	0.24 32.6	0.27 33.5	0.27 26.6	0.28 27.5	26	0.28 27.5	
27	0.10 21.5	0.07 20.	0.13 23.6	0.26 101.	1.05 167	0.71 104	0.29 48	0.28 40.7	0.20 29.9	0.28 38.5	0.28 27.5	0.28 27.5	27	0.28 27.5	
28	0.11 22.9	0.05 19.5	0.11 22.9	0.26 98.	0.99 121	0.72 98	0.28 47.	0.28 38.5	0.20 29.9	0.28 42.9	0.28 27.5	0.28 27.5	28	0.28 27.5	
29	0.09 21.0	0.05 19.5	0.11 22.9	0.26 89.	0.98 149	0.69 93	0.41 79	0.28 36.5	0.24 32.6	0.28 40.7	0.28 27.5	0.28 27.5	29	0.28 27.5	
30	0.08 20.5	0.05 19.5	0.11 22.9	0.26 116.	1.02 158	0.69 93	0.41 57	0.28 36.5	0.24 32.6	0.28 27.5	0.28 27.5	0.28 27.5	30	0.28 27.5	
31	0.09 21.0	0.05 19.5	0.11 22.9	0.26 176.	1.10 176	0.70 95	0.41 51	0.27 38.5	0.24 32.6	0.28 27.5	0.28 27.5	0.28 27.5	31	0.28 27.5	
Totaux	3.92 78.5	2.45 60.5	3.59 70.7	10.91 140.1	29.81 45.77	43.55 33.47	14.20 20.72	10.65 127.4	8.43 119.2	11.59 146.0	6.68 94.7	3.39 69.1	T		
Moyennes	0.12 23.2	0.08 20.7	0.11 22.7	0.35 46.8	0.76 14.8	0.78 112	0.52 66.8	0.34 44.2	0.27 37.3	0.28 47.1	0.26 31.4	0.11 22.3	M		

Figure 2.7 – Tableau récapitulatif pour l'année 1924 des hauteurs d'eau (en bleu) quotidiennes lues à midi à l'échelle à la station d'Embrun (La Clapière) sur la Durance et débits (en noir) correspondants obtenus via la courbe de tarage. Les hauteurs et débits maxima journaliers sont indiqués dans la marge pour deux journées de l'année : le 7 avril et le 27 septembre.

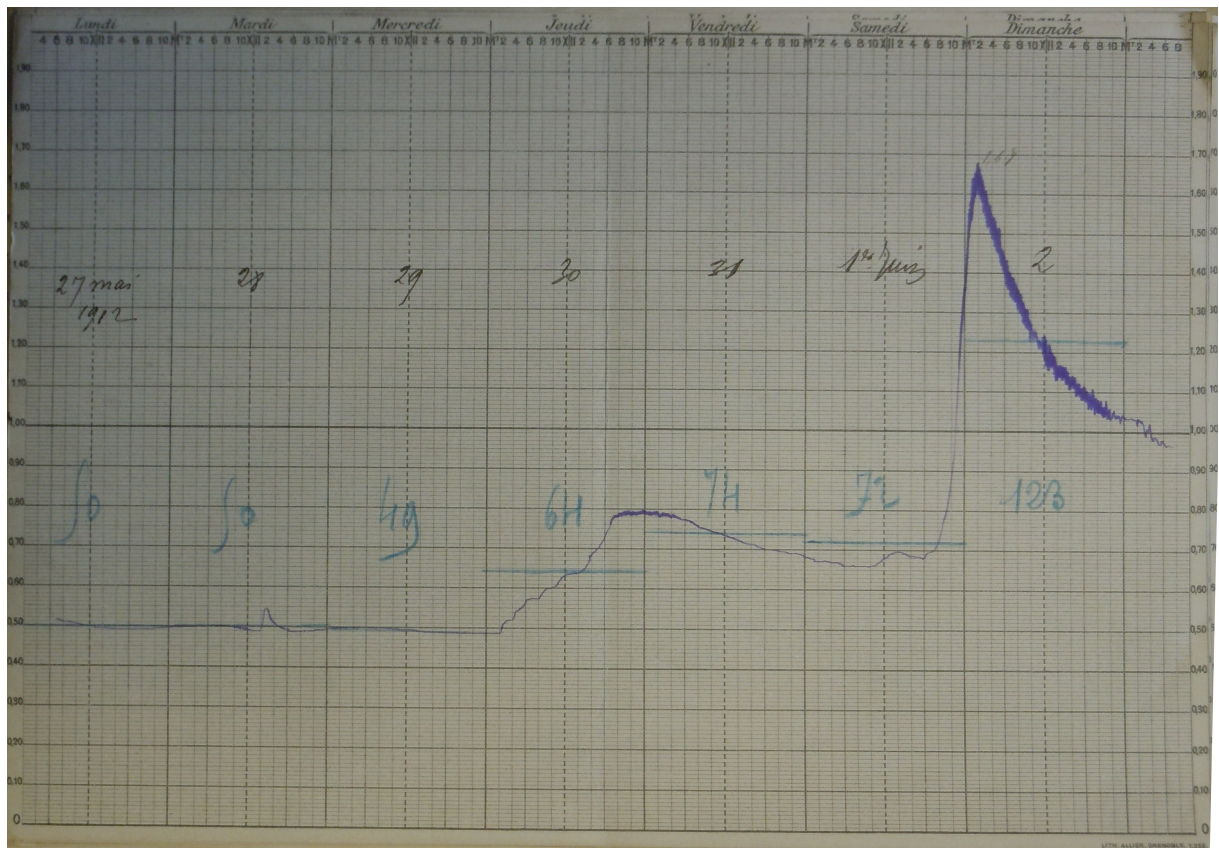


Figure 2.8 – Limnigramme (évolution de la hauteur d'eau en fonction du temps) enregistré à la Station de Serres sur le Buëch sur la période du 29 mai au 2 juin 1912. Des tracés de dépouillement par moyenne des hauteurs « à vue » sont visibles.

et calcule la moyenne pour chaque journée. Cette méthode est en fait un cas particulier de la méthode « moyenne de n valeurs de débits » décrite ci-dessus.

Sur un même limnigramme, plusieurs méthodes de dépouillement peuvent être employées pour les différents jours. Généralement, l'opérateur choisit le mode de dépouillement jour par jour en fonction de la variation infra-journalière de hauteur : lorsque la hauteur varie peu dans la journée il effectue une moyenne des hauteurs « à vue », tandis que lorsqu'elle varie fortement il choisit de relever plusieurs valeurs (moyenne de n valeurs). La figure 2.9 donne une illustration d'un dépouillement de limnigramme pour lequel deux méthodes différentes sont utilisées : la hauteur est quasi-constante pendant le jour j_1 , la méthode de moyenne des hauteurs « à vue » est donc utilisée pour le dépouiller. Au contraire, le jour j_2 est dépouillé par moyenne de 12 valeurs de débit car la variation infra-journalière de hauteur est forte.

III.3.3 | Enregistrement automatique numérique des hauteurs d'eau

Un limnimètre permettant de mesurer en temps réel la hauteur d'eau est relié à un enregistreur numérique automatique. La hauteur d'eau est stockée toutes les heures, et le débit correspondant à chaque hauteur est déduit de la courbe de tarage. Le débit moyen journalier est calculé par moyenne des 24 valeurs de débits horaires. La moyenne journalière des débits horaires se fait sur les valeurs de une heure du matin à minuit. Les technologies de limnimètres et d'enregistreurs ont elles aussi évolué pendant cette période.

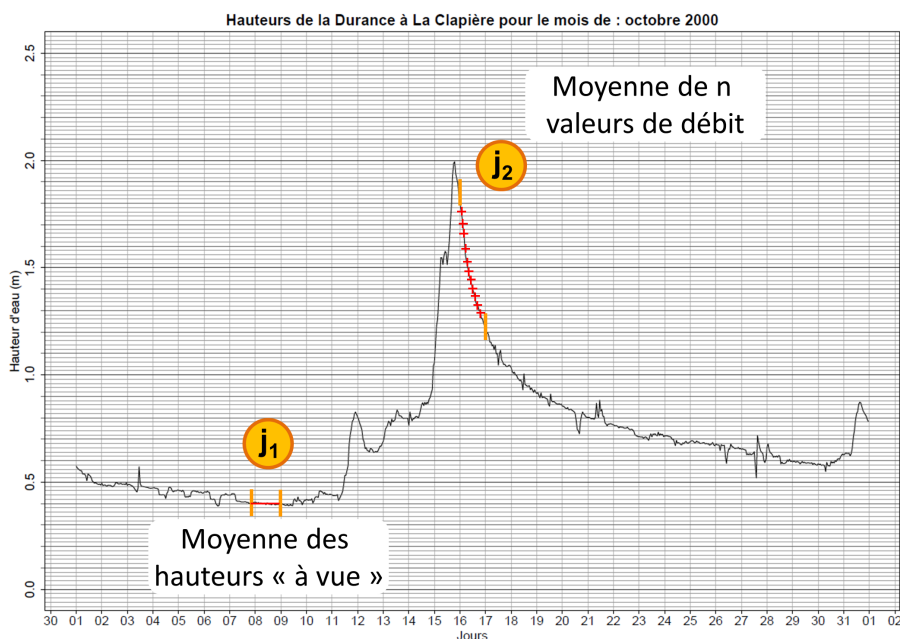


Figure 2.9 – Exemple de dépouillement manuel d'un limnigramme.

Cette brève description permet de constater que les méthodes d'élaboration des séries de débits journaliers ont considérablement évolué au cours du dernier siècle. Ainsi, lorsque nous prenons une série longue dans son ensemble, nous sommes en présence de plusieurs séries mises bout-à-bout, chacune ayant été élaborée selon des méthodes différentes. La grandeur référencée sous le titre de « débit journalier » dans la série peut elle-même varier, puisqu'il s'agit dans le cas de la méthode de lecture ponctuelle à l'échelle d'un débit instantané à heure fixe et par les méthodes récentes à enregistrement horaire d'un débit moyen journalier obtenu par l'intermédiaire de 24 valeurs horaires.

IV | Simulation des méthodes anciennes de mesure et d'échantillonnage de la hauteur d'eau

Afin de quantifier l'impact des différentes méthodes décrites au paragraphe précédent en terme d'incertitude sur la valeur finale du débit journalier, nous nous proposons d'effectuer une comparaison des débits obtenus par les différentes méthodes. Dans cette optique, la méthode actuelle (enregistrement automatique numérique des hauteurs d'eau) sera prise comme référence, et comparée aux débits obtenus par les deux autres méthodes. Pour cela il est nécessaire de disposer de séries de débits obtenus par les trois méthodes sur la même période. Il s'agit donc dans un premier temps de simuler les deux méthodes anciennes sur la période récente sur laquelle des enregistrements horaires de débits sont disponibles.

IV.1 | Simulation de la méthode de lecture quotidienne à heure fixe de la hauteur d'eau à l'échelle

Pour chaque station étudiée, nous disposons, sur une période d'en général une vingtaine d'années, des hauteurs horaires à la station et des courbes de tarage associées à différentes périodes de validité.

Le principe de simulation de la méthode de mesure ponctuelle à l'échelle est relativement simple : il s'agit principalement d'échantillonner la série de débits horaires et de les considérer comme des débits journaliers à heure fixe. À cet échantillonnage s'ajoutera néanmoins la prise en compte de deux sources d'incertitude inhérentes à la méthode. D'une part la hauteur lue par l'observateur à l'échelle est toujours empreinte d'une certaine incertitude du fait de la difficulté que peut causer cette lecture. L'écart-type de cette incertitude sur la hauteur lue à l'échelle est estimé empiriquement à 2 cm. Par ailleurs on imagine aisément que l'heure à laquelle l'observateur effectue sa mesure, bien qu'étant théoriquement la même chaque jour, est en réalité incertaine ; on estimera, empiriquement, l'écart-type de l'incertitude sur l'heure de mesure à environ une heure.

Le schéma de la figure 2.10 représente les différentes étapes de la méthode de simulation utilisée, dont le détail est donné ci-après.

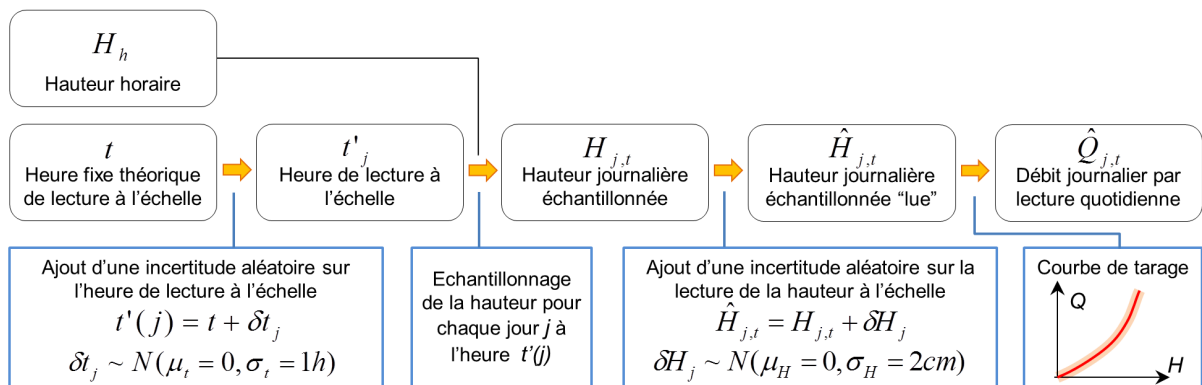


Figure 2.10 – Étapes de simulation de la méthode de lecture ponctuelle quotidienne à l'échelle.

- Connaissant l'heure théorique t de lecture de la hauteur par l'observateur, l'heure « effective » t' de lecture est estimée par ajout d'une incertitude δt tirée aléatoirement dans une loi normale de moyenne μ_t nulle et d'écart-type $\sigma_t = 1h$. Après tirage de l'incertitude, l'heure t' de lecture est arrondie à l'heure entière la plus proche.
- La hauteur journalière $H_{j,t}$ échantillonnée à l'heure fixe théorique t est la hauteur horaire issue de la mesure automatique pour le jour j à l'heure effective t' .
- Partant de la hauteur d'eau échantillonnée $H_{j,t}$, la hauteur « qui aurait été lue par l'observateur » $\hat{H}_{j,t}$ est calculée par ajout d'une incertitude δH tirée aléatoirement dans une loi normale de moyenne μ_H nulle et d'écart-type $\sigma_H = 2cm$.
- Finalement, le débit $\hat{Q}_{j,t}$ considéré comme débit journalier obtenu par la méthode de lecture à l'échelle à l'heure fixe théorique t , sera le débit correspondant à la hauteur $\hat{H}_{j,t}$ selon la courbe de tarage valide au jour j .

IV.2 | Simulation de la méthode d'enregistrement graphique et dépouillement manuel des limnigrammes

Cette méthode, décrite dans la partie III.3, peut être décomposée en deux étapes principales. Dans un premier temps, la hauteur d'eau est enregistrée graphiquement par un automate, et dans un second temps le limnigramme obtenu est dépouillé manuellement. Dans le cadre de cette simulation, nous nous focaliserons sur l'étape de dépouillement du limnigramme et considérerons que la hauteur d'eau représentée sur le graphique correspond effectivement à celle de la rivière.

Pour le dépouillement manuel d'un limnigramme l'opérateur utilisait généralement au moins deux techniques différentes : la moyenne des hauteurs « à vue » et la moyenne

de n valeurs de débits. Pour simuler le dépouillement, nous devrions donc définir un critère d'utilisation de l'une ou l'autre des deux méthodes. Nous avons dit que l'opérateur choisissait la méthode à utiliser en fonction de la variation de hauteur à l'intérieur de la journée à dépouiller. Nous pourrions donc utiliser la variation infra-journalière de hauteur comme critère de sélection, mais cela soulève deux problèmes.

D'une part les hauteurs sur la période où les débits étaient effectivement obtenus par dépouillement de limnigrammes n'ont pas été numérisées, et encore moins à un pas de temps infra-journalier : on ne peut donc pas caler un modèle de sélection de méthode sur cette période à moins de relever les variations infra-journalières de hauteur à la main sur les limnigrammes disponibles.

D'autre part, en observant les limnigrammes correspondant à la période d'utilisation de cette technique d'enregistrement graphique et les modes de dépouillement choisis par les opérateurs chargés de leur dépouillement, on constate que le choix de la méthode à utiliser semble dépendre fortement de la sensibilité de l'opérateur. D'une personne à l'autre, ou même d'un moment à un autre pour la même personne, le « seuil » de variation de hauteur déterminant la méthode à utiliser n'est pas forcément le même. Cette observation a été confirmée par l'expérience d'hydromètres d'EDF-DTG ayant effectué ces dépouillements par le passé (Escallon, 2011).

Compte-tenu de ces obstacles, nous nous proposons pour la simulation des débits obtenus par dépouillement de limnigrammes, de considérer en première approximation le cas le plus pénalisant, c'est-à-dire celui où la moyenne « à vue » serait utilisée pour tous les jours de la chronique. Cette simulation pourra être considérée comme représentant une borne supérieure de l'incertitude induite par la méthode d'enregistrement graphique et de dépouillement manuel des hauteurs d'eau.

La simulation de la méthode de dépouillement des limnigrammes par moyenne des hauteurs « à vue » consiste à extraire la hauteur moyenne journalière et à la transformer en débit via la courbe de tarage. Il semble également important de prendre en compte l'incertitude induite par l'évaluation « à vue » sur le graphique de la hauteur moyenne journalière. Cette moyenne était généralement évaluée en traçant un trait horizontal de manière à ce que les surfaces entre la courbe des hauteurs et le trait soient les mêmes de part et d'autre de celui-ci. On considèrera que l'écart-type de cette incertitude est de 1 cm de hauteur d'eau, ce qui correspond à 1 mm sur le limnigramme.

Le processus de simulation de la méthode de dépouillement par moyenne des hauteurs « à vue » est représenté sur le schéma 2.11. Les principales étapes sont détaillées ci-dessous.

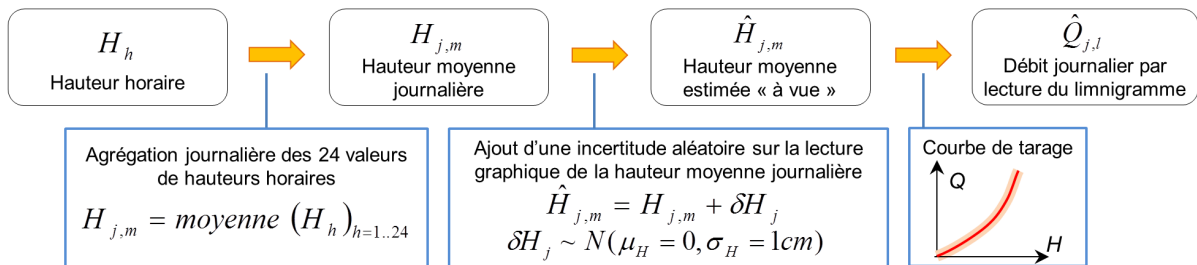


Figure 2.11 – Étapes de simulation de la méthode de dépouillement des limnigrammes par moyenne « à vue ».

- À partir de la série de hauteurs horaires H_h , la hauteur moyenne journalière $H_{j,m}$ est calculée par moyenne des 24 valeurs horaires.
- La hauteur moyenne journalière $\hat{H}_{j,m}$ qui aurait été estimée graphiquement « à vue » est représentée par la somme de la hauteur moyenne journalière $H_{j,m}$ et d'une erreur aléatoire tirée dans une loi normale de moyenne μ_H nulle et d'écart type $\sigma_H = 1\text{cm}$.

- Finalement, le débit $\widehat{Q}_{j,l}$ simulant le débit obtenu par dépouillement manuel du limnigramme par la méthode de moyenne des hauteurs « à vue » est le débit correspondant, selon la courbe de tarage valide au jour j , à la hauteur moyenne journalière estimée $\widehat{H}_{j,m}$.

IV.3 | Mode de comparaison

Les deux processus de simulation décrits dans les paragraphes IV.1 et IV.2 permettent de disposer, pour chaque station étudiée et sur la période récente de disponibilité de données horaires (généralement des années 1980 à aujourd'hui), de deux séries de débits simulées représentant les séries $\widehat{Q}_{j,t}$ et $\widehat{Q}_{j,l}$ qui auraient été obtenues si la mesure avait été faite en employant respectivement, d'une part la méthode de mesure quotidienne à l'heure fixe théorique t de la hauteur d'eau à l'échelle, et d'autre part l'enregistrement graphique des hauteurs avec dépouillement manuel des limnigrammes.

Les deux séries ainsi obtenues vont maintenant être comparées à la série prise comme référence qui est la série de débits moyens journaliers \bar{Q}_j obtenus par moyenne des 24 valeurs de débits issues de l'enregistrement numérique horaire de la hauteur d'eau.

La série \bar{Q}_j étant prise comme référence, l'erreur relative de chacune des deux méthodes sera calculée de la manière suivante :

$$\varepsilon_{j,t} = \frac{\widehat{Q}_{j,t} - \bar{Q}_j}{\bar{Q}_j} \quad (2.1)$$

et

$$\varepsilon_{j,l} = \frac{\widehat{Q}_{j,l} - \bar{Q}_j}{\bar{Q}_j} \quad (2.2)$$

Pour une station donnée, ces erreurs relatives seront calculées pour chaque jour de la période de simulation.

IV.4 | Stations analysées

Nous souhaitons dans la suite de ce chapitre appliquer le processus de simulation et de comparaison des méthodes de construction d'une série de débit journalier présenté ci-dessus à différentes stations ayant des comportements hydrologiques variés.

Ce processus nécessite pour être appliqué à une station de disposer de données de hauteurs horaires ainsi que des courbes de tarages et de leurs dates d'application. Il sera donc appliqué à un ensemble restreint de stations pour lesquelles nous disposons de ces données indispensables. Ces stations analysées sont présentées dans le tableau 2.3.

Station	Bassin Versant	Début	Fin
La Durance à Briançon	548	1983	2010
Le Guil à Montdauphin	725	1986	2007
La Durance à La Clapière	2170	1983	2010
L'Ubaye à Roche-Rousse	946	1983	2010
Le Buëch aux Chambons	723	1983	2010
La Méouge à Méouge	221	1983	2010
Le Jabron à Piedguichard	89	1994	2010
L'Asse à la Clue de Chabrières	375	1983	2010
Le Verdon à Colmars	158	1983	2010

Tableau 2.3 – Stations utilisées pour la simulation des méthodes anciennes de construction de séries de débits, années de début et de fin de la série de hauteurs (et débits) horaires utilisées.

V | Analyse des incertitudes inhérentes à la méthode de lecture quotidienne à heure fixe de la hauteur d'eau à l'échelle

V.1 | Exemple de la série de débits du Verdon à Colmars

La figure 2.12 représente, pour la période du 20 avril au 10 juin 2004, différentes séries de débits à la station de Colmars sur le Verdon. Les données issues de la méthode actuelle d'établissement des séries de débits sont représentées : débit horaire et débit moyen journalier. Deux courbes correspondent aux débits journaliers obtenus par la simulation de la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle (voir IV.1), pour des heures de mesure de 5 heures du matin et midi. Dans la partie inférieure du graphique, les courbes de l'erreur relative journalière correspondant aux deux heures de mesure simulées sont tracées.

Sur la courbe des débits horaires, on observe un cycle infra-journalier très marqué qui est dû aux variations naturelles de débit liées à la variabilité de l'intensité de la fonte des neiges au cours de la journée. C'est en raison de ce cycle que le débit moyen journalier peut potentiellement être éloigné du débit mesuré à une heure donnée de la journée. On peut constater par exemple que le débit correspondant à une mesure quotidienne à midi est globalement situé sur l'enveloppe inférieure de la courbe des débits horaires. L'écart relatif $\varepsilon_{j,t}$ entre ce débit et le débit moyen journalier est donc globalement négatif, et peut atteindre -30% du débit moyen journalier.

En revanche, si la mesure quotidienne était faite à 5 heures plutôt qu'à midi, la valeur obtenue serait plus proche du débit moyen journalier, le biais est dans ce cas proche de zéro.

Cet exemple permet d'illustrer le fait que le biais induit par la méthode de lecture quotidienne à l'échelle peut pour certaines saisons être relativement important et que celui-ci dépend de l'heure de mesure.

A partir de la série journalière d'erreurs relatives $\varepsilon_{j,t}$ calculées pour une heure de lecture donnée t d'après la formule 2.1, il est possible d'observer la distribution de cette erreur en fonction de la période de l'année.

Cette distribution sera présentée sous forme de graphiques en « boîtes à moustaches » ou « boxplots ». Les différents éléments de chaque boxplot représentent les quantiles 10, 25, 50, 75 et 90% de la distribution des erreurs. Les points ajoutés correspondent à la

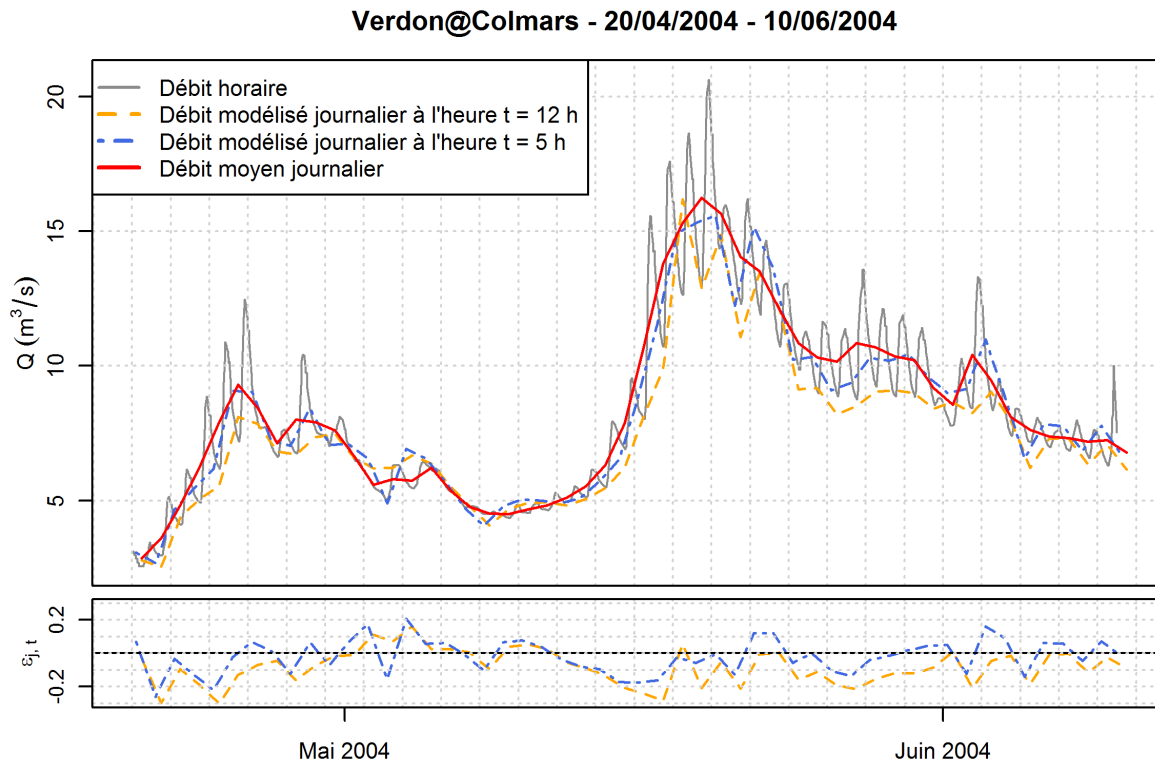


Figure 2.12 – Évolution des débits horaires et journaliers moyens ou par lecture quotidienne à la station de Colmars sur le Verdon, erreurs liées à la méthode de lecture quotidienne.

moyenne de cette distribution. La figure 2.13 montre comment le boxplot est obtenu à partir de la distribution cumulée d’une série.

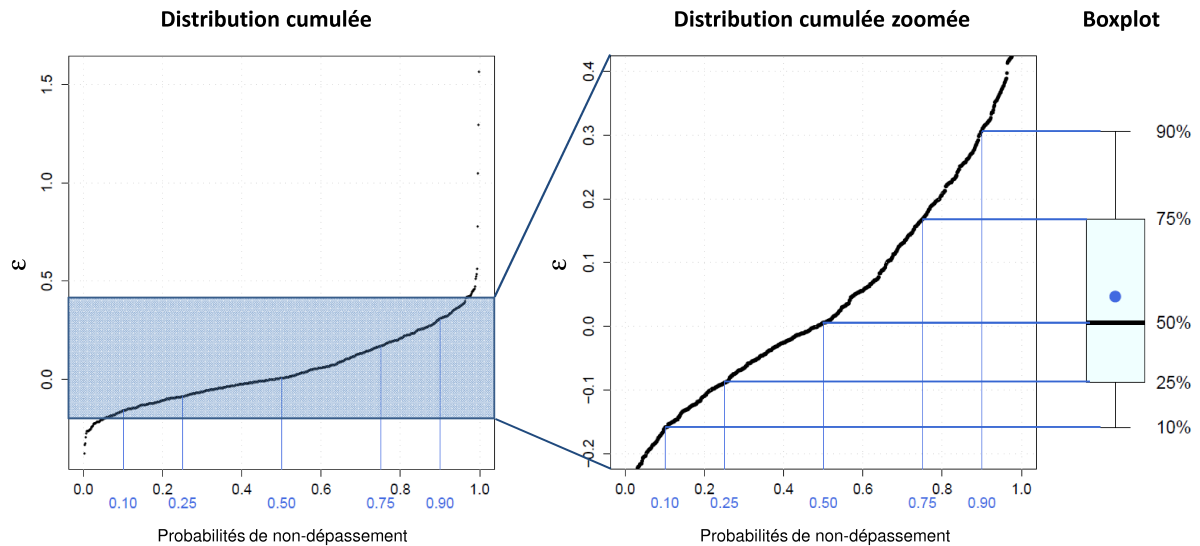


Figure 2.13 – Représentation d’une distribution par un boxplot.

Dans la suite du paragraphe chaque boxplot représente, pour une heure t de lecture fixée, la distribution des erreurs relatives $\varepsilon_{j \in m, t}$ correspondant aux journées d’un mois m donné. Chaque graphe regroupe les douze boxplots correspondant aux douze mois de l’année pour une heure t de lecture donnée.

La figure 2.14 représente ces résultats à la station de Colmars sur le Verdon, pour les deux heures de lecture : 5 heures du matin (figure 2.14a) et midi (figure 2.14b). Ces deux

graphes montrent que la structure statistique (moyenne, quantiles) de l'erreur relative $\varepsilon_{j,t}$ entre débit moyen journalier et débit journalier obtenu par simulation de la méthode de lecture quotidienne à l'échelle dépend fortement de l'heure de mesure et de la période de l'année.

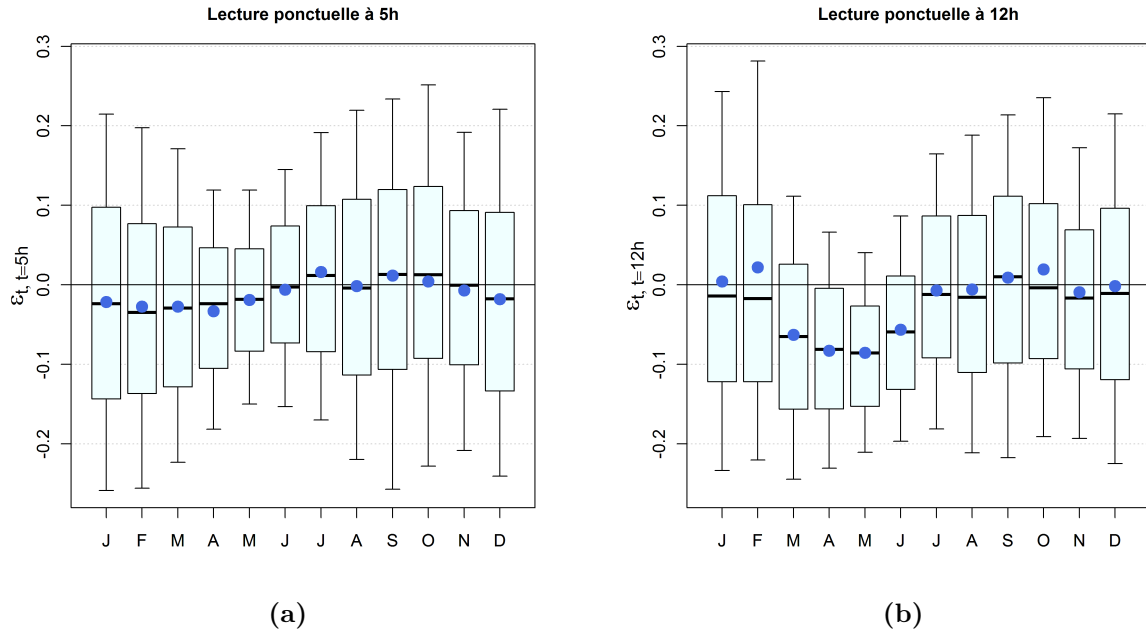


Figure 2.14 – Distributions (voir fig. 2.13) mensuelles des erreurs relatives liées à la méthode de lecture ponctuelle à 5h et midi à la station de Colmars sur le Verdon.

La figure 2.14b permet d'observer une forte saisonnalité de l'erreur $\varepsilon_{j,t}$, en effet, celle-ci est maximale pendant la fin de l'hiver et le printemps (de mars à mai) : le biais mensuel moyen pour la station du Verdon à Colmars atteint -9% environ au mois de mai, alors qu'il est proche de zéro de juillet à février. Cette observation confirme l'influence du cycle infra-journalier provoqué par la fonte des neiges sur le biais observé, puisque les mois correspondant au maximum de l'erreur sont les mois au cours desquels la fonte a le plus d'influence sur le débit.

Par ailleurs, la variabilité des processus hydrologiques (fonte ou absence de fonte, crues) est également illustrée par une très forte dispersion des boxplots. Il est cependant intéressant de noter que cette dispersion est la plus faible pendant les mois de fonte où l'erreur est la plus forte, ce qui laisse penser que les processus hydrologiques sont plus homogènes pendant cette période, avec la domination de la fonte des neiges.

La comparaison des figures 2.14a et 2.14b permet de constater que l'heure de lecture à l'échelle a également une grande importance. Ainsi, si l'on compare pour ces deux heures de lecture les distributions des mois de mai, on remarque des différences notables : pour une lecture à 5h, le biais moyen est de -1% environ, avec un intervalle interquantile 10-90% allant de -15% à +12% ; Si la lecture est faite à midi, on constate un biais moyen de -9%, et l'intervalle interquantile 10-90% est beaucoup moins centré autour de zéro puisqu'il va de -21% à +4%. Plus globalement, comme déjà observé sur la figure 2.12, un biais systématique important est observé sur les débits de printemps obtenus par simulation de la méthode de lecture à l'échelle avec une lecture à midi, tandis que pour une lecture à 5 heures du matin, ce biais est presque insignifiant (<4%).

Afin de synthétiser dans un même graphique les deux facteurs mis en évidence ci-dessus, que sont l'heure de lecture et la période de l'année, nous pouvons utiliser une représentation sous forme de graphe « 3D ». Pour une année donnée A , l'erreur $\varepsilon_{j \in A, t}$ est

calculée pour chaque jour j et pour chaque heure de lecture t possible. L'erreur $\varepsilon_{j \in A, t}$ est ensuite représentée par une échelle de couleurs, en fonction du jour de l'année en abscisse et de l'heure de lecture en ordonnée.

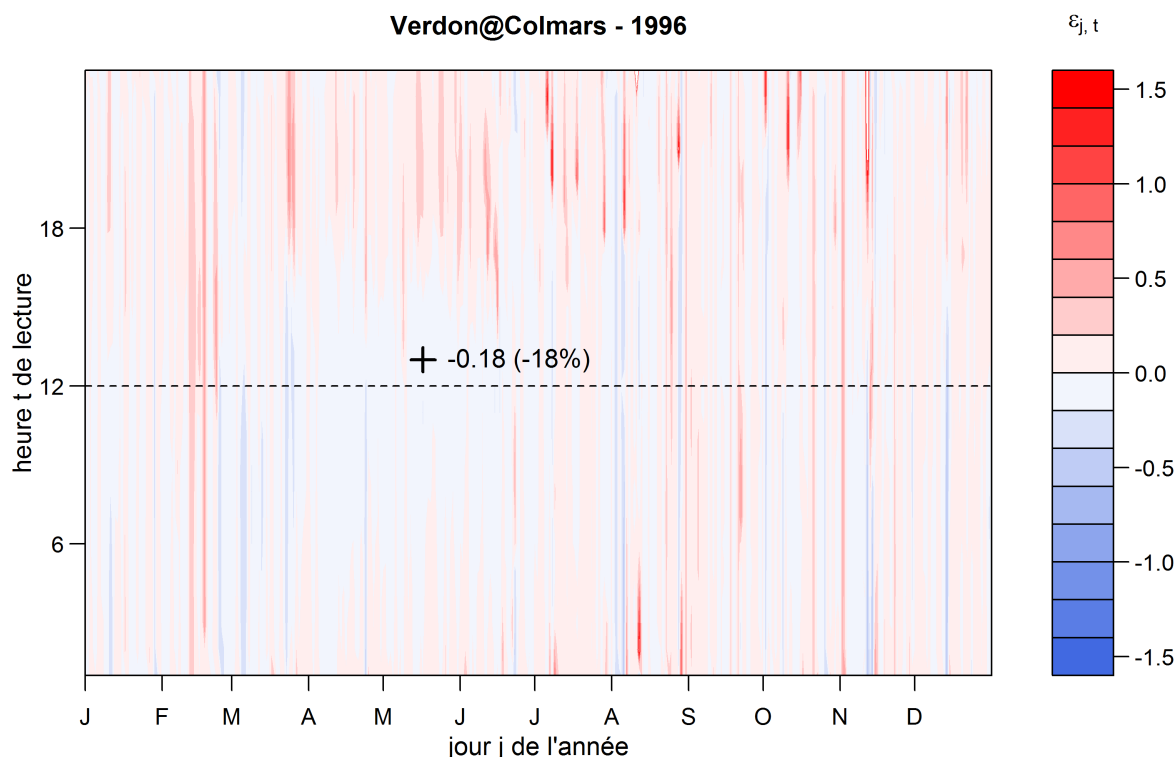


Figure 2.15 – Représentation, en fonction de la date et de l'heure de lecture, des erreurs liées à la méthode de lecture quotidienne à l'échelle à la station de Colmars sur le Verdon, pour l'année 1996. A titre d'exemple, l'erreur du 16 mai 1996 pour une lecture faite à 13h vaut -0.18 (croix noire).

La figure 2.15 montre le graphique obtenu par cette méthode pour l'année 1996 à la station de Colmars sur le Verdon. Le point correspondant à la date du 16 mai 1996 pour une lecture à 13 heures est placé en exemple, l'erreur correspondant à ce point est $\varepsilon_{j=16/05/1996, t=13h} = -0.18$, soit -18% . Cette représentation met en évidence une structure relativement marquée de l'erreur de mars à juin, avec des erreurs globalement négatives de 6 heures à 14 heures, et globalement positives de 17 heures à minuit. Sur le reste de l'année, on n'observe pas de structuration claire de l'erreur, qui prend néanmoins parfois des valeurs élevées, pouvant correspondre à des crues qui induisent de fortes variations infra-journalières de débit. La figure 2.16 illustre ce genre de cas : lors de la crue du 11 août 1996 du Verdon à Colmars, le débit horaire a dépassé les $14 \text{ m}^3/\text{s}$ à une heure du matin, soit près de trois fois le débit moyen de la journée. Cela se traduit par une erreur relative pour une lecture à une heure du matin de 1.72 , représentée par une « tache rouge » sur la figure 2.15.

On peut construire un graphique de ce type pour chaque année de la chronique simulée. Dans le but d'analyser de manière plus statistique la structure de ces graphiques annuels, ces derniers ont été « superposés » afin d'extraire, pour chaque jour de l'année et chaque heure de lecture, une valeur moyenne interannuelle d'erreur (régime d'erreur). La figure 2.17 présente ce graphique de moyennes interannuelles pour la station du Verdon à Colmars. Les valeurs maximales $\max(\varepsilon_{j,t})_{t=1..24}$ et minimales $\min(\varepsilon_{j,t})_{t=1..24}$ de l'erreur moyenne interannuelle sont marquées pour chaque journée de deux points respectivement rouge et bleu.

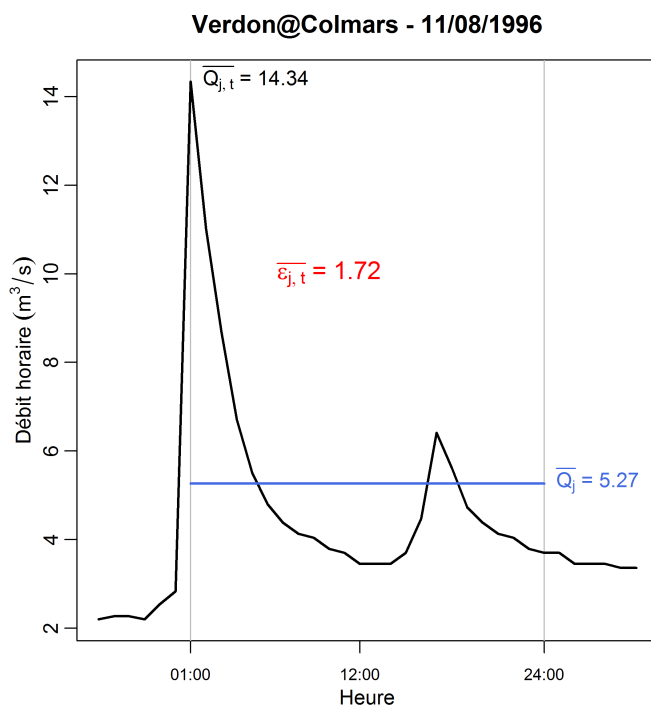


Figure 2.16 – Hydrogramme horaire de la crue du 11 août 1996 du Verdon à Colmars : exemple d'écart important entre le débit instantané à heure fixe et le débit moyen journalier.

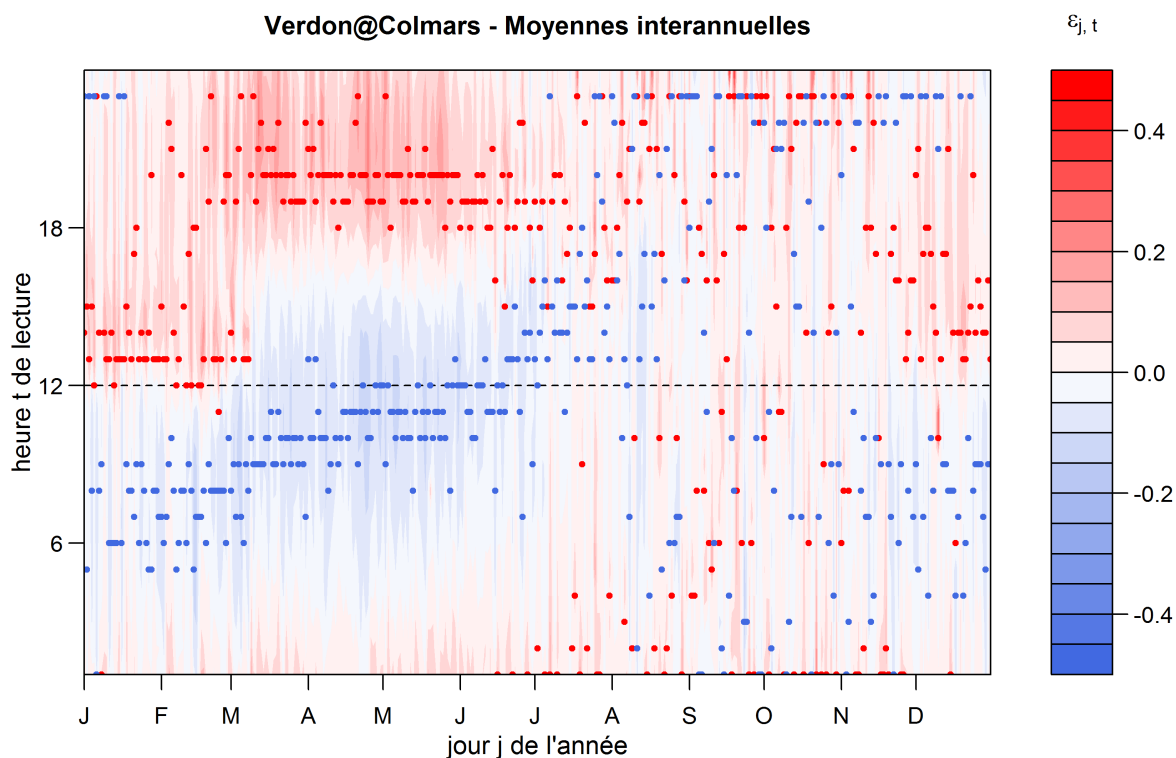


Figure 2.17 – Représentation, en fonction de la date et de l'heure de lecture, des erreurs moyennes interannuelles liées à la méthode de lecture quotidienne à l'échelle à la station de Colmars sur le Verdon.

On peut observer la mise en place d'un cycle infra-journalier par la présence d'une structure marquée de l'erreur dès la fin du mois de décembre et jusque fin-juin. Le cycle est plus marqué à partir du mois de mars, période à laquelle la fonte prend de l'importance.

Pendant le printemps le pic de l'erreur positive (correspondant au pic du débit horaire) arrive aux environs de 20 heures, tandis que l'erreur négative est la plus importante vers 11 heures. On retrouve également l'observation faite sur la figure 2.14 : au printemps, l'erreur est nettement plus marquée à midi qu'à 5 heures du matin.

L'écart temporel entre l'heure du pic de fonte (généralement en début d'après-midi) et le pic de débit à la station est représentatif de la distance parcourue par l'eau entre le manteau neigeux et la station de débit. L'heure du pic de débit peut ainsi informer sur l'état du manteau neigeux (Lundquist, 2005a,b). On peut d'ailleurs observer que le cycle a tendance à se décaler vers des heures plus tardives à l'approche de l'été, cela pourrait s'expliquer par l'éloignement vers l'amont de la limite des neiges, ce qui augmente la distance à parcourir entre la zone de fonte et la station de mesure du débit. L'augmentation de la durée du jour et donc de la durée journalière de fonte pourrait également avoir une influence.

Sur la période de la fin de l'été et de l'automne, les gammes d'erreurs moyennes sont globalement plus faibles et on n'observe pas d'organisation particulière de celles-ci au cours de la journée.

V.2 | Analyse sur un échantillon de stations

La démarche décrite pour l'exemple du Verdon à Colmars dans le paragraphe V.1 a été étendue à l'ensemble des stations présentées au paragraphe IV.4.

La représentation sous forme de graphique « 3D » des moyennes inter-annuelles de l'erreur relative entre débit moyen journalier et débit journalier obtenu par simulation de la méthode de lecture quotidienne à l'échelle sera utilisée pour la comparaison des résultats aux différentes stations.

Les graphiques représentant les erreurs moyennes interannuelles en fonction du jour de l'année et de l'heure de lecture à l'échelle pour toutes les stations analysées sont présentés sur la figure 2.18. Ils permettent d'observer que l'influence de la méthode de mesure ponctuelle à heure fixe sur le débit journalier obtenu est fortement dépendante des caractéristiques hydro-climatiques des bassins versants étudiés.

Nous laisserons dans un premier temps de côté les stations de La Clapière et Briançon sur la Durance, et de Montdauphin sur le Guil.

Sur les graphiques de l'Ubaye à Roche-Rousse et, dans une moindre mesure, du Buech aux Chambons, on remarque un comportement similaire à celui observé sur le Verdon à Colmars : au printemps, les erreurs relatives sont organisées en un cycle infra-journalier assez marqué. Les heures du maximum et du minimum journaliers varient d'une station à l'autre : alors que sur le Verdon à Colmars le maximum du débit, et donc de l'erreur, était atteint vers 20 heures, il a lieu aux alentours de 23 heures sur l'Ubaye à Barcelonnette, et de 2-3 heures du matin sur le Buech aux Chambons. On peut rapprocher ces observations de l'altitude de la station : le maximum de l'onde de fonte arrive plus tôt à Colmars, dont l'altitude est élevée (1230 m), qu'à Roche-Rousse (790 m) où il est néanmoins plus précoce qu'aux Chambons (662 m).

Pour d'autres stations, comme le Jabron à Piedguichard, l'Asse à la Clue de Chabrières ou encore la Méouge au pont de Méouge, le graphique obtenu ne permet pas de mettre en évidence une structuration claire des erreurs. On observe ponctuellement des erreurs importantes probablement dues à des crues qui provoquent de fortes variations au cours de la journée, surtout sur un petit bassin comme celui du Jabron à Piedguichard (89 km²).

Revenons maintenant aux stations de Briançon sur la Durance et de Montdauphin sur le Guil. On observe sur les graphiques qui leur correspondent un cycle très nettement marqué, avec même à Briançon l'apparition d'une double oscillation journalière. Bien

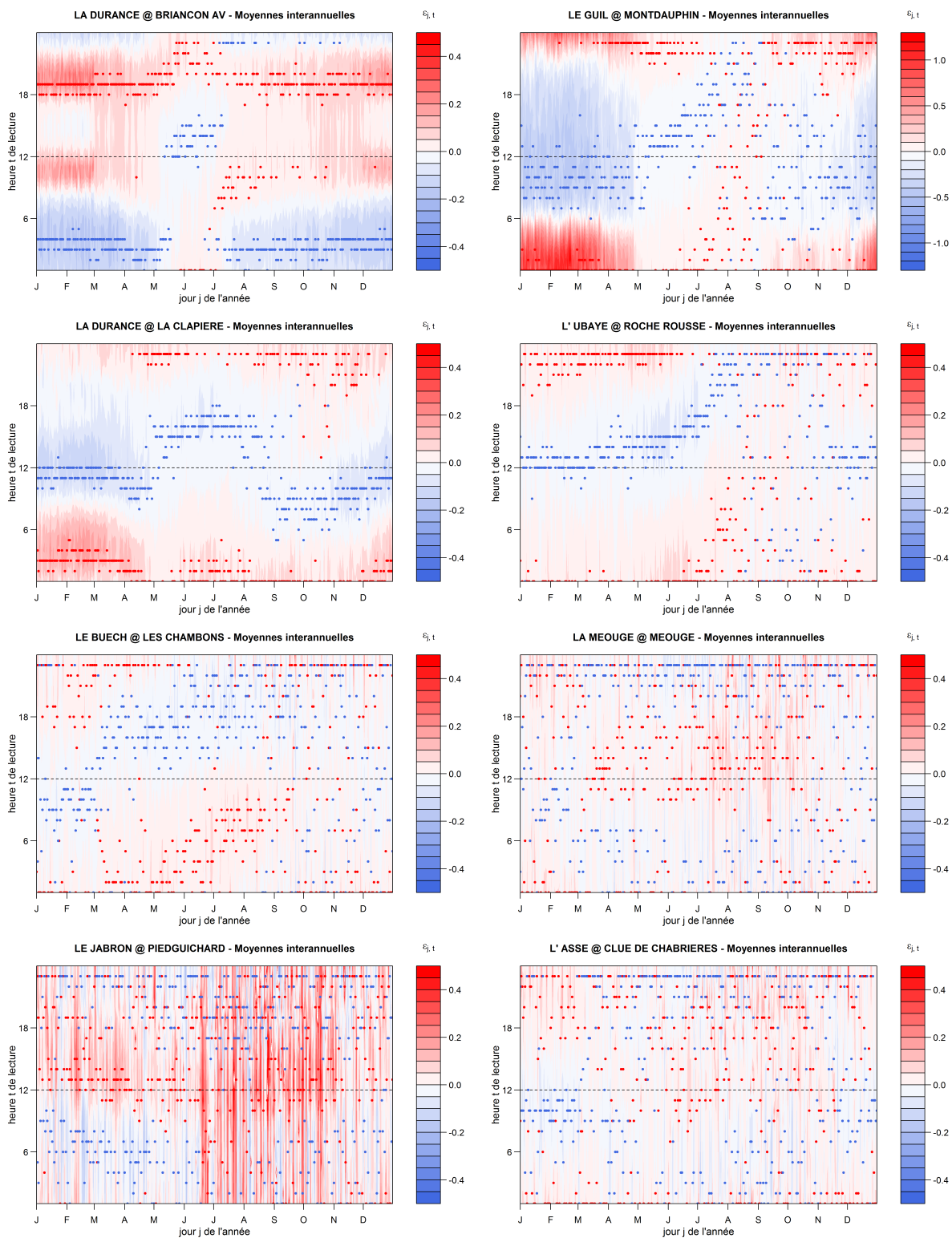


Figure 2.18 – Représentation des erreurs moyennes interannuelles liées à la méthode de mesure ponctuelle du débit sur différentes stations.

que ces stations drainent des bassins d'altitude, on peut penser que la neige n'est pas la première cause de ces cycles particulièrement marqués. En effet, ces deux stations sont situées à l'aval de petites centrales, la centrale de Pont-Baldy sur la Cerveyrette en amont de Briançon, et la centrale d'Eygliers sur le Guil.

Si l'influence des éclusées de ces centrales est faible sur les débits journaliers, celle-ci n'est pas négligeable au pas de temps horaire. Le cycle observé est donc plus probablement lié aux turbinages, il s'arrête d'ailleurs de manière bien plus brutale que ceux observés sur les stations de Colmars ou de Roche-Rousse, pendant l'été à Briançon, et pendant l'été et l'automne à Montdauphin. On observe également, dès l'arrêt des turbinages au mois de mai, la réapparition d'un cycle moins marqué et décalé par rapport à celui de l'hiver, correspondant au comportement « naturel » de la station.

La station de La Clapière étant située sur la Durance à l'aval de sa confluence avec le Guil, les débits y sont influencés à la fois par la centrale de Pont-Baldy et par celle d'Eygliers. Le cycle des turbinages y est moins marqué que sur les stations de Briançon et Montdauphin, en raison du fait que la station de La Clapière est bien plus éloignée de ses influences que ne le sont les deux précédentes.

La figure 2.19 permet d'illustrer l'influence de l'usine hydroélectrique d'Eygliers sur le Guil à la station de Montdauphin. Les graphiques annuels d'erreurs relatives $\max(\varepsilon_{j,t})$ à cette station sont présentés pour les années 1998 à 2001.

En 1998, 1999 et début 2000 on observe nettement un cycle journalier pendant les mois d'hiver et en début de printemps. Ce cycle s'arrête brutalement début mai, et n'est plus visible en été et à l'automne. Cet disparition correspond à l'arrêt des éclusées à Maison-du-Roy du fait des contraintes touristiques en été et de débits entrants trop importants au printemps et à l'automne.

En juin 2000, une crue a rendu indisponible l'aménagement de Maison-du-Roy, ce qui a provoqué l'arrêt des turbinages pendant plusieurs années. La station de mesure de Montdauphin a également été endommagée, et remise en service mi-septembre, d'où l'interruption des données pendant trois mois. On remarque qu'après cette interruption, en fin d'année 2000 et en 2001, le cycle bien marqué que l'on avait observé sur les années précédentes a disparu, ce qui confirme que ce cycle était celui des éclusées de l'usine hydroélectrique.

La station de mesure de Montdauphin a été démontée en avril 2003, ce qui réduit à deux années la durée de la série non-influencée et ne permet donc pas de refaire l'analyse sur cette période uniquement. Cet exercice peut en revanche être fait pour la station de La Clapière sur la Durance, elle aussi influencée par l'usine de Maison-du-Roy. Grâce à l'arrêt des turbinages, on dispose à cette station de sept années de données non influencées par les éclusées Maison-du-Roy, de 2001 à 2006. Malheureusement, l'influence de Pont-Baldy est toujours présente, on peut l'observer sur la figure 2.20, qui représente les erreurs moyennes interannuelles en fonction du jour de l'année et de l'heure de lecture à l'échelle à la station de La Clapière sur la Durance, de 2001 à 2006. Le cycle observé de septembre à mars semble être celui des éclusées de Pont-Baldy, retardé d'environ sept heures par rapport à la station de Briançon.

V.3 | Impact de la méthode de lecture quotidienne à l'échelle sur le calcul du module interannuel

Nous avons vu que les débits journaliers obtenus par lecture quotidienne à l'échelle peuvent être biaisés par rapport aux débits moyens journaliers. Selon la saison et l'heure de lecture, ce biais sur le débit journalier peut être non négligeable. La non-prise en

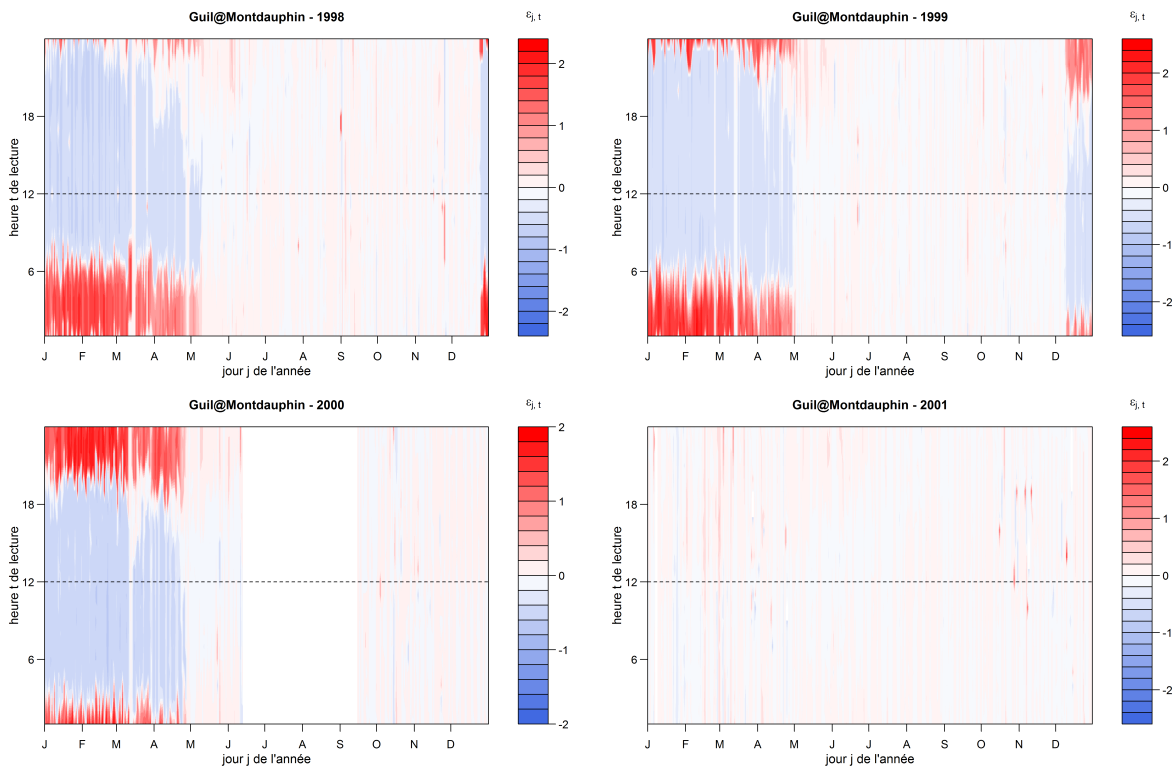


Figure 2.19 – Erreurs moyennes liées à la méthode de lecture quotidienne à l'échelle à la station de Montdauphin sur le Guil pour les années 1998 à 2001.

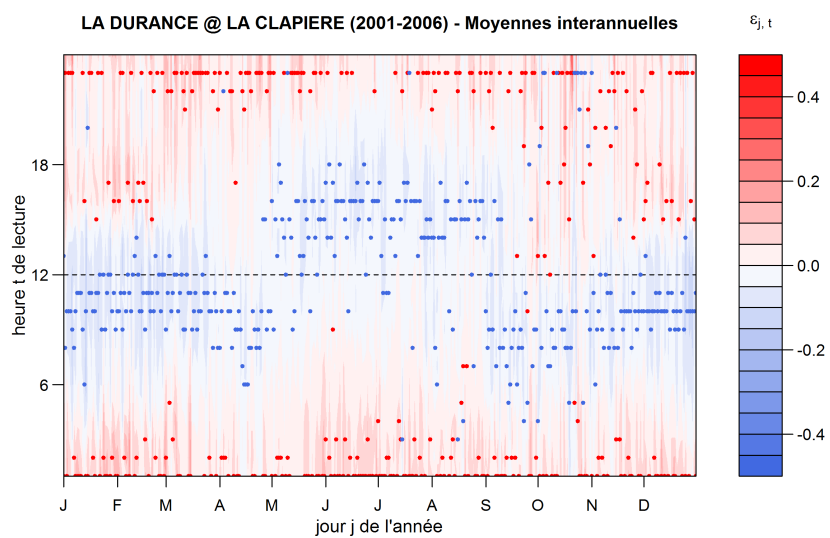


Figure 2.20 – Erreurs moyennes interannuelles liées à la méthode de lecture quotidienne à l'échelle à la station de La Clapière sur la Durance pour les années 2001 à 2006.

compte de ce biais peut ainsi impacter l'analyse de l'évolution du régime hydrologique à une station, qui est un paramètre important utilisé par exemple dans les études d'impact du changement climatique. Une autre grandeur importante pour ce type d'analyses est le module interannuel, c'est-à-dire le débit moyen sur une période de plusieurs années. Il paraît donc intéressant d'évaluer le biais induit par la méthode de lecture ponctuelle à l'échelle sur cette grandeur.

Pour connaître l'impact de cette méthode sur le calcul du module interannuel, nous allons comparer les modules obtenus par les deux méthodes. Pour cela, nous pouvons simplement calculer l'erreur relative entre le module \bar{Q}_{IA} calculé par moyenne de tous les débits moyens journaliers, et le module $Q_{IA,t}$ calculé à partir des débits obtenus par simulation de la méthode de lecture quotidienne à heure fixe. Pour une heure fixe de mesure t donnée, l'erreur E_t entre les deux types de modules interannuels peut être donnée par :

$$E_t = \frac{Q_{IA,t} - \bar{Q}_{IA}}{\bar{Q}_{IA}} \quad (2.3)$$

Pour une station de mesure donnée, cette erreur peut être calculée pour les 24 heures de lecture quotidienne possibles. Afin de prendre en compte les décalages du cycle infajournalier observés d'une station à l'autre, nous nous intéresserons également à l'erreur maximale E_{max} sur le module et à l'heure de lecture t_{max} correspondante :

$$E_{max} = E_{t_{max}} \text{ avec } t_{max} \text{ tel que } |E_{t_{max}}| = \max_{t=1h...24h} |E_t| \quad (2.4)$$

Le tableau 2.4 regroupe les valeurs des erreurs sur le module pour les deux heures de lecture à l'échelle les plus courantes, 7 heures et midi, ainsi que l'erreur maximale de chaque station et l'heure de lecture correspondante.

Station	$E_{t=7h}$	$E_{t=12h}$	t_{max}	E_{max}
La Durance à La Clapière	1.0 %	-3.6 %	3 h	5.2 %
L'Ubaye à Roche-Rousse	0.8 %	-2.1 %	1 h	3.5 %
La Durance à Briançon	-2.6 %	2.0 %	20 h	6.8 %
Le Guil à Montdauphin	-5.3 %	-10.0 %	1 h	18.4 %
Le Buëch aux Chambons	0.7 %	0.2 %	3 h	1.1 %
La Méouge à Méouge	-0.6 %	0.3 %	22 h	1.8 %
Le Jabron à Piedguichard	0.8 %	1.3 %	16 h	4.1 %
Le Verdon à Colmars	-2.7 %	-4.6 %	20 h	8.0 %
L'Asse à la Clue de Chabrières	-1.6 %	-0.2 %	23 h	3.3 %

Tableau 2.4 – Erreurs sur le module interannuel calculées pour des lectures quotidiennes à 7 heures et midi, et heure et valeur de l'erreur maximale sur le module par station.

Pour la majorité des stations de mesures de débits présentées dans le tableau 2.4, la répercussion sur le calcul du module de l'erreur liée à la méthode de lecture quotidienne à l'échelle est limitée (moins de 5 % d'erreur). Sur le Verdon à Colmars en revanche, l'erreur faite sur le module atteint 8 % dans le cas d'une lecture à 20 heures. Cela s'explique sans doute par le fait qu'il s'agit de la station la plus haute en altitude.

Les stations de la Durance à Briançon et à La Clapière, et du Guil à Montdauphin présentent aussi des valeurs d'erreurs plus élevées, mais comme montré précédemment, celles-ci ne sont pas représentatives d'un comportement naturel puisqu'elles sont influencées par les éclusées de centrales situées à leur amont.

Il paraîtrait intéressant d'étendre ce type de calculs à d'autres stations de régime nival non influencées par des aménagements, mais les résultats obtenus ici montrent déjà que le biais induit par la méthode de lecture ponctuelle de la hauteur d'eau à l'échelle peut atteindre 5 à 10% sur ce type de bassins, ce qui peut avoir une importance notable dans le cadre d'études pour des dimensionnement d'ouvrages ou pour l'analyse des impacts du changement climatique.

V.4 | Correction des séries de débits construites par la méthode de lecture quotidienne à l'échelle

V.4.1 | Principe

Les observations précédentes ont permis de constater que la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle peut significativement biaiser le débit journalier, cela en fonction de l'heure de lecture et de la période de l'année. Afin de pouvoir considérer dans son ensemble une série de débit construite en partie par cette méthode, il paraît dès lors important d'effectuer préalablement un travail d'homogénéisation de celle-ci.

Nous proposons ici une méthode de correction de ce biais. Il s'agit simplement de s'appuyer sur le régime de l'erreur observée via la simulation de la méthode sur la période récente de disponibilité de données horaires pour corriger la partie ancienne de la série.

Afin de pouvoir appliquer cette méthode il faut d'une part connaître l'heure à laquelle la lecture à l'échelle se faisait et d'autre part admettre l'hypothèse que l'écart relatif moyen entre le débit moyen journalier et le débit obtenu par lecture quotidienne à l'échelle était le même au moment de la construction de la série historique par lecture quotidienne à l'échelle que sur la période récente de simulation. Ainsi, les stations aujourd'hui influencées au pas de temps horaire comme celles de la Durance à Briançon et à La Clapière, ou du Guil à Montdauphin, ne pourront être débiaisées.

Si l'on dispose d'une série de débits journaliers $Q_{j,t}$ obtenus par lecture quotidienne à l'échelle à une heure fixe connue t , on peut écrire d'après l'équation 2.1 :

$$\bar{Q}_j = \frac{Q_{j,t}}{\varepsilon_{j,t} + 1} \quad (2.5)$$

Afin de déduire de cette équation une estimation \hat{Q}_j du débit moyen journalier, il faut connaître une estimation $\hat{\varepsilon}_{j,t}$ de l'erreur relative entre les deux débits pour chaque jour j .

Comme nous l'avons vu, l'erreur $\varepsilon_{j,t}$ est, pour une heure de lecture à l'échelle t donnée, fortement dépendante de la période de l'année. Il est nécessaire d'adapter l'estimation $\hat{\varepsilon}_{j,t}$ de l'erreur à appliquer au jour j en fonction de la saison du jour j . Nous proposons pour cela d'utiliser le régime de l'erreur établi statistiquement sur la période récente comme indiqué au paragraphe V.1 (figure 2.14).

Ainsi, si l'on nomme $\mu_{m,t}$ et $\sigma_{m,t}$ la moyenne et l'écart-type de la distribution des erreurs relatives du mois m pour l'heure de lecture à l'échelle t , établies statistiquement sur la période de disponibilité de données horaires, on utilisera pour chaque jour j faisant partie du mois m une estimation de l'erreur relative $\hat{\varepsilon}_{j \in m, t}$ tirée aléatoirement dans une loi normale de moyenne $\mu_{m,t}$ et d'écart-type $\sigma_{m,t}$:

$$\hat{\varepsilon}_{j \in m, t} \sim \mathcal{N}(\mu_{m,t}, \sigma_{m,t}) \quad (2.6)$$

Finalement, l'estimation du débit moyen journalier pour un jour j faisant partie du mois m sera obtenue par l'équation :

$$\hat{Q}_{j \in m} = \frac{Q_{j \in m, t}}{\hat{\varepsilon}_{j \in m, t} + 1} \quad \text{avec} \quad \hat{\varepsilon}_{j \in m, t} \sim \mathcal{N}(\mu_{m, t}, \sigma_{m, t}) \quad (2.7)$$

V.4.2 | Application

Parmi les stations présentées dans la figure 2.4, l'heure de lecture à l'échelle utilisée pendant la période où cette méthode était appliquée n'est pas systématiquement connue. Les informations qui ont pu être retrouvées sont présentées dans le tableau 2.5.

Station	Période historique de lecture à l'échelle	Heure de lecture à l'échelle
La Durance à Val-des-Près (La Vachette)	1917 - 1952	inconnue
La Durance à Briançon	aucune	aucune
La Durance à La Clapière	1904 - 1921	12 h
L'Ubaye à Barcelonnette	1904 - 1952	inconnue
Le Buech aux Chambons	1906 - 1907	7 h
L'Asse à la Clue de Chabrières	1908 - 1962	7 h
Le Verdon à Colmars	1904 - 1952	12 h
La Durance à Jouques-Cadarache (Pont de Mirabeau)	1918 - 1930	7 h

Tableau 2.5 – Périodes d'utilisation de la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle et heures de lecture correspondantes.

Comme nous l'avons vu au paragraphe V.2, plusieurs stations présentes dans le tableau 2.5 sont influencées au pas de temps horaire. Il s'agit des stations de Briançon, La Clapière et Montdauphin. La station de Jouques-Cadarache correspond à un aménagement, les débits à cette station ne sont pas disponibles au pas de temps horaire.

Finalement, la méthode de correction présentée ici ne peut donc, à l'heure actuelle, être appliquée qu'à trois stations : Le Buëch aux Chambons, L'Asse à la Clue de Chabrières et le Verdon à Colmars.

Le débiaisage des séries de débits journaliers obtenues par lecture quotidienne à l'échelle a donc été effectué pour ces trois stations, et les figures 2.21 représentent, pour chacune de ces stations, le régime hydrologique moyen de la période d'utilisation de la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle, pour la série observée et pour la série débiaisée.

L'intervalle interquantiles 10%-90% représenté sur les figures 2.21 est obtenu en remplaçant dans l'équation 2.7 l'estimateur $\hat{\varepsilon}_{j \in m, t}$ de l'erreur relative décrit précédemment par les quantiles 10% et 90%, $Q_{10}(\varepsilon_{j \in m, t})$ et $Q_{90}(\varepsilon_{j \in m, t})$ de la distribution mensuelle de l'erreur établie sur la période de simulation. Il ne s'agit donc pas d'un intervalle de confiance de la correction du régime, mais d'une représentation, pour chaque mois m , de la gamme d'erreurs journalières $\varepsilon_{j \in m, t}$ observées pendant ce mois.

Le régime hydrologique du Verdon à Colmars (figure 2.21a) est de type pluvio-nival avec un maximum du débit moyen mensuel en mai-juin, et un maximum secondaire lié aux pluies d'automne en novembre. On remarque à nouveau le biais important lié au cycle de fonte pendant la période de hauts débits au printemps. L'intervalle interquantiles 10%-90% des erreurs journalières est plus large pendant le printemps (~ 65 mm/mois en mai) et l'automne (~ 30 mm/mois en novembre) qu'en hiver et en été. Cela peut s'expliquer par les crues qui ont principalement lieu pendant ces deux saisons et peuvent induire de

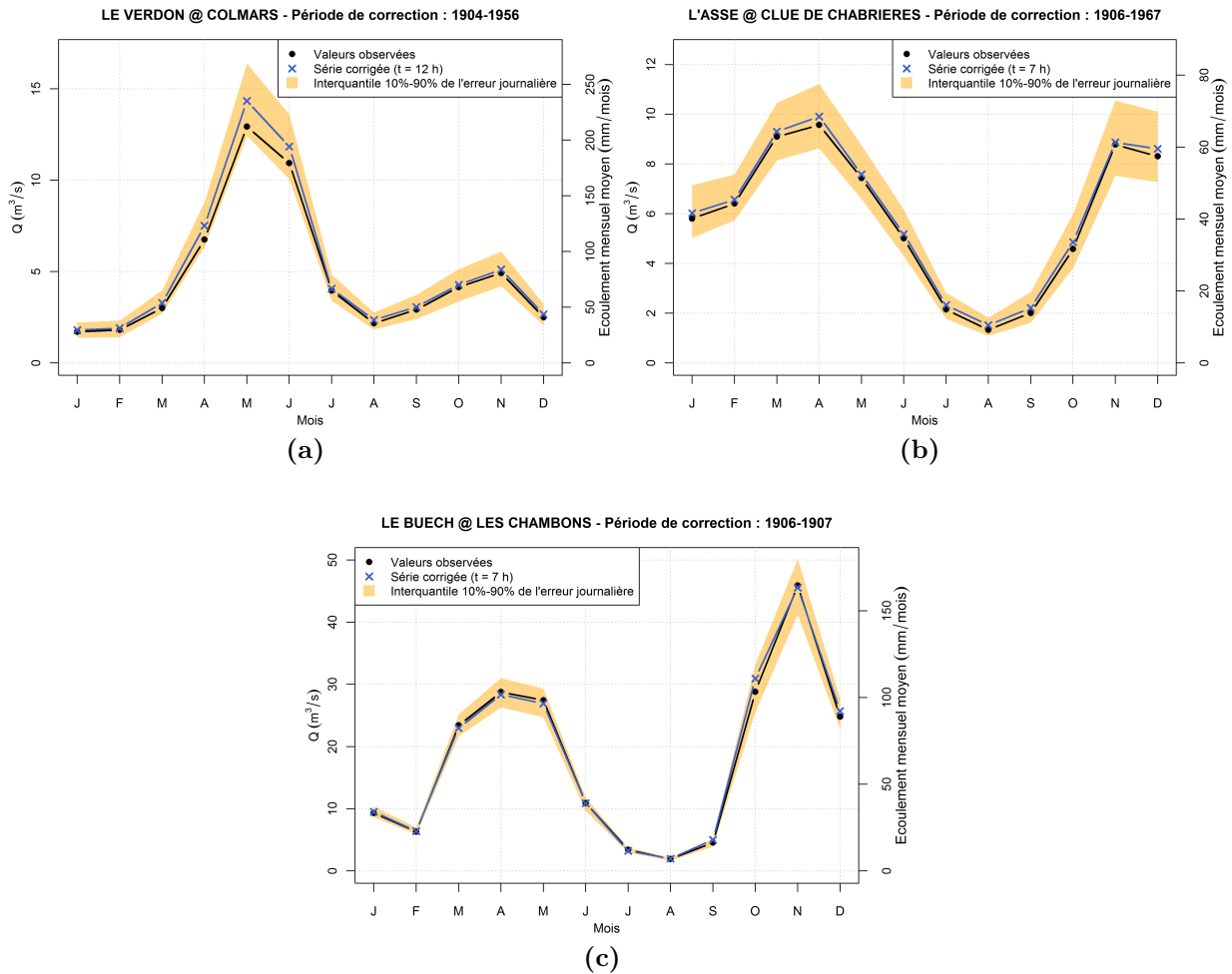


Figure 2.21 – Régimes interannuels, sur la période de lecture quotidienne à l'échelle, des séries observées et débiaisées, pour les trois stations permettant un débiaisage.

fortes variations infra-journalières de débit, sans qu'il n'y ait de systématisme sur l'heure du pic de crue.

Sur l'Asse à la Clue de Chabrières (figure 2.21b), dont le régime hydrologique est nettement moins influencé par la fonte, le biais induit par la méthode de lecture quotidienne à l'échelle est peu significatif : le régime de la série débiaisée reste proche de celui des débits observés. En revanche, on note, de la même manière que sur le Verdon à Colmars, un élargissement de l'intervalle interquartiles 10%-90% des erreurs journalières pendant les périodes de crues.

Le régime hydrologique du Buëch aux Chambons présenté sur la figure 2.21c est peu représentatif du comportement général des débits à cette station, du fait que la période d'utilisation de la méthode de lecture quotidienne à l'échelle ne dure que deux ans à cette station (1906-1907). On note d'ailleurs que le régime représenté ici est bien différent de celui présenté sur la figure 1.17. La figure 2.21c permet néanmoins d'observer qu'ici encore le régime de la série débiaisée est assez proche de celui de la série observée, et que l'intervalle interquartiles 10%-90% des erreurs journalières est à nouveau plus large pendant les périodes de hauts débits que pendant les périodes d'étiage.

VI | Analyse des incertitudes inhérentes à la méthode d'enregistrement graphique et dépouillement manuel des limnigrammes

De la même manière que dans la partie précédente, nous avons appliqué le processus de simulation décrit au paragraphe IV.2 à l'ensemble de stations pour lequel nous disposons d'information suffisantes (tableau 2.3).

Comme écrit au paragraphe IV.2, le processus de simulation utilisé ici ne modélise qu'une des méthodes de dépouillement, la moyenne des hauteurs « à vue », qui est la plus pénalisante, du fait de la conjugaison de deux facteurs potentiels d'erreurs. D'une part la moyenne des hauteurs est évaluée graphiquement, et d'autre part le débit utilisé comme débit moyen journalier est le débit correspondant, d'après la courbe de tarage, à la hauteur moyenne journalière. Les courbes de tarage n'étant pas des relations linéaires, cette approximation peut être la source d'erreurs potentiellement importantes.

Pour chacune des stations, l'erreur relative $\varepsilon_{j,l}$ (équation 2.2) a été calculée pour chaque jour de la chronique simulée. A partir de cette chronique d'erreurs relatives entre débit moyen journalier et débit journalier obtenu par simulation du dépouillement manuel de limnigrammes, on peut construire une distribution de cette erreur. Cette distribution sera représentée non plus en fonction de la période de l'année, mais en fonction de deux critères ayant potentiellement une influence sur la valeur de l'erreur : la variation infra-journalière de hauteur d'eau et le débit moyen journalier.

VI.1 | Représentation en fonction de la variation infra-journalière de hauteur d'eau

Comme nous l'avons rappelé au paragraphe IV.2, le choix de la méthode de dépouillement des limnigrammes se faisait généralement en fonction de la variation observée de hauteur d'eau au cours de la journée à dépouiller. Il paraît dès lors intéressant d'observer la distribution de l'erreur relative $\varepsilon_{j,l}$ en fonction de la variation infra-journalière de hauteur ΔH_j :

$$\Delta H_j = H_{j,max} - H_{j,min} \quad (2.8)$$

où $H_{j,max}$ et $H_{j,min}$ sont respectivement les hauteurs horaires maximale et minimale observées au cours de la journée j .

Pour une station donnée, on établit dix classes de variation infra-journalière de hauteur ΔH_j . Les limites supérieures de ces classes sont les quantiles 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% et 100% de la distribution des ΔH_j , les dix classes ont donc des effectifs similaires. On classe ensuite les erreurs $\varepsilon_{j,l}$ en fonction de la classe d'appartenance de la variation de hauteur ΔH_j du même jour. Comme dans la partie précédente, les résultats sont présentés sous forme de « boxplots » représentant les quantiles 10%, 25%, 50%, 75%, 90% et la moyenne de la distribution des erreurs de la classe (voir figure 2.13).

Les résultats obtenus pour les différentes stations étudiées sont présentés sur la figure 2.22. On remarque tout d'abord que, dans la plupart des cas, la gamme d'erreur $\varepsilon_{j,l}$ observée est bien plus faible que pour la méthode de lecture quotidienne à l'échelle. Sur la majorité des stations, l'erreur relative moyenne par classe ne dépasse pas $\pm 2\%$. Cette constatation est plutôt rassurante puisque les limnigraphes ont été mis en place avec l'objectif de construire des séries de débits journaliers d'une meilleure précision que ce qui était fait antérieurement avec la méthode de lecture quotidienne à l'échelle.

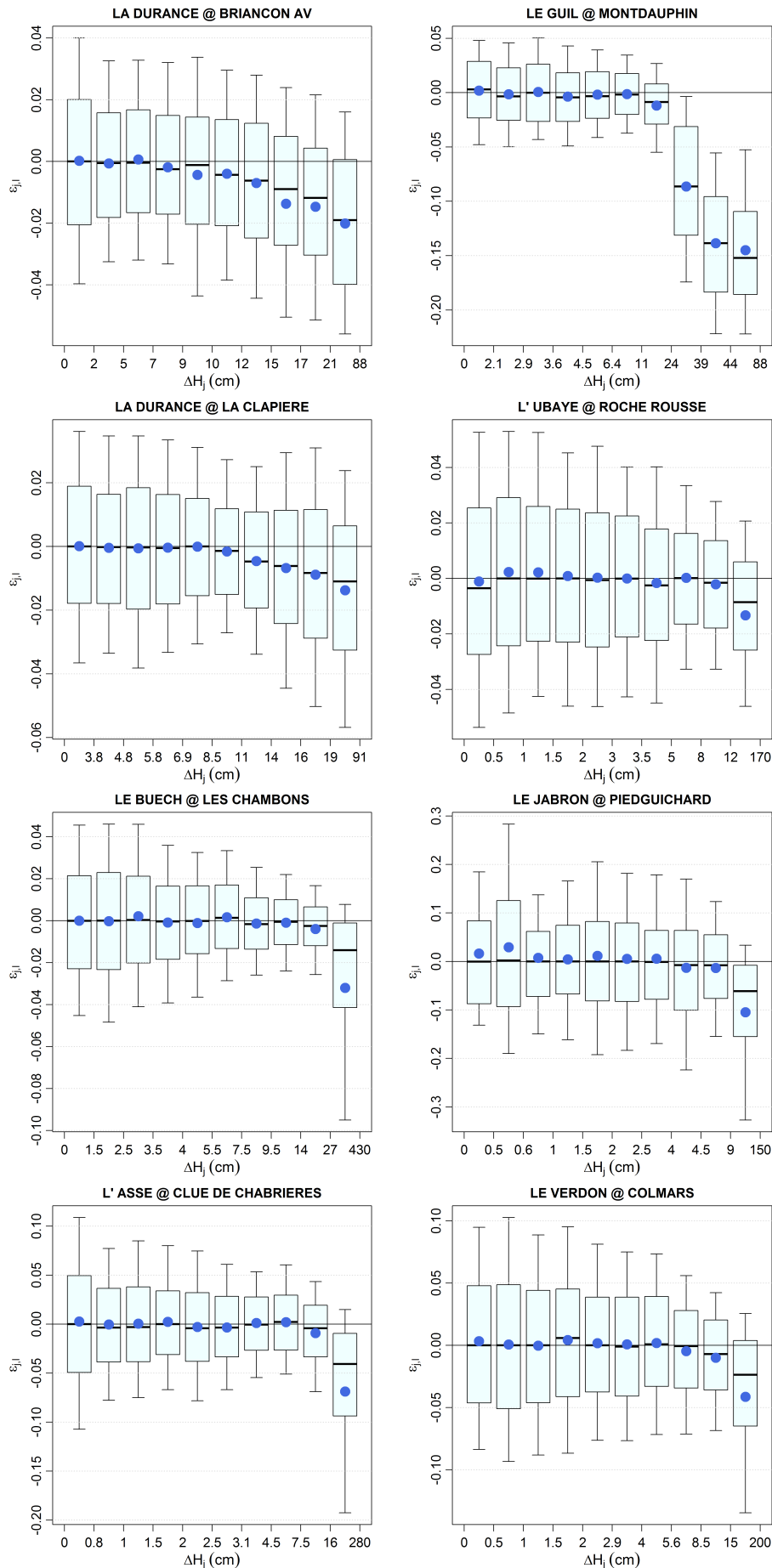


Figure 2.22 – Représentation (voir fig. 2.13) des erreurs liées à la méthode de dépouillement manuel des limnigrammes en fonction de la variation infra-journalière de hauteur d'eau sur différentes stations.

On observe également sur l'ensemble des stations une augmentation de la valeur absolue de l'erreur avec la variation infra-journalière de hauteur d'eau, les erreurs $\varepsilon_{j,l}$ sont généralement quasi-nulles pour les six à huit premières classes de ΔH_j et s'éloignent de zéro seulement à partir de la septième classe, voire sur certaines stations uniquement pour la dernière classe. L'approximation consistant à prendre comme « débit moyen journalier » le débit correspondant à la hauteur moyenne journalière est donc plus mauvaise quand la variation de hauteur dans la journée est grande.

Cette observation s'explique par la non-linéarité de la courbe de tarage : sur une faible plage de valeurs de hauteur et donc de débit, une approximation linéaire de la courbe de tarage peut rester assez juste, tandis que sur une plus grande plage de valeurs, l'approximation linéaire s'éloigne trop de la courbe. Cette affirmation est illustrée par la figure 2.23, sur laquelle est tracée une portion de la courbe de tarage n° 1989A1 du Verdon à Colmars. On voit que sur une plage de variation en hauteur de 5 cm la relation hauteur-débit peut être considérée comme presque linéaire, tandis que sur une variation plus importante de 20 cm l'approximation linéaire de la relation hauteur-débit est assez éloignée de la courbe réelle.

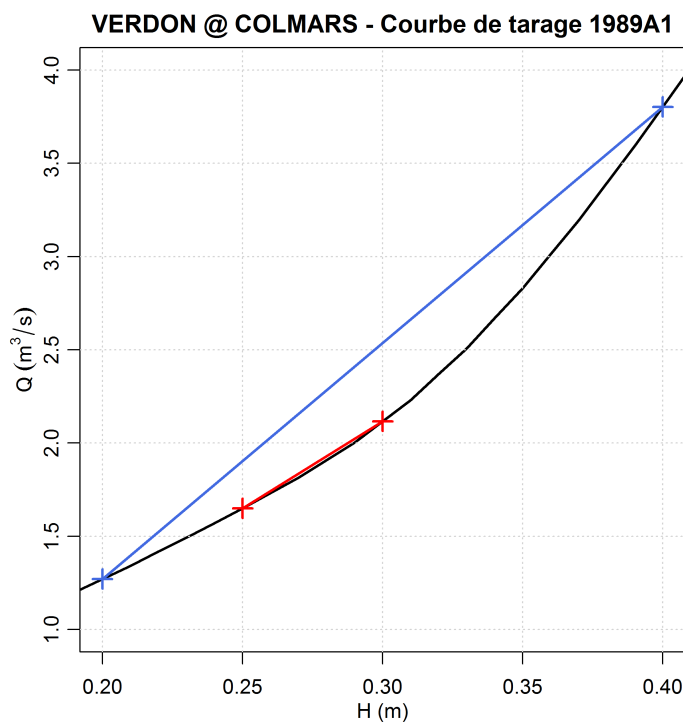


Figure 2.23 – Extrait de la courbe de tarage 1989A1, valable du 22-06-1989 au 29/10/1990 à la station de Colmars sur le Verdon (noir), et deux exemples d'approximations linéaires sur des plages de variation de hauteur d'eau de 5 cm (rouge) et 20 cm (bleu).

Connaissant la non-linéarité des courbes de tarage, on peut intuitivement s'attendre à un tel résultat. Pour cette raison, dans les faits, lorsque la variation infra-journalière de hauteur était importante un autre mode de dépouillement était utilisé (moyenne de n valeurs, machine à dépouiller).

On peut également souligner, à la vue des graphes de la figure 2.22, que l'erreur relative moyenne est toujours négative. Cela est dû au fait que la courbe de tarage est une relation convexe, ce qui implique, d'après l'inégalité de Jensen (1906), que le débit correspondant à la moyenne de n valeurs de hauteurs est inférieur ou égal à la moyenne des n débits correspondants aux n valeurs de hauteurs.

On remarque que la station de Montdauphin sur le Guil est celle qui atteint les

gamme d'erreur les plus importantes, mais c'est aussi la station dont les variations infra-journalières de hauteur sont les plus élevées : le quantile 80% de ΔH_j vaut presque 40 cm alors que sur la plupart des stations il est inférieur à 15 cm. Il paraît donc logique que pour des variations infra-journalières de hauteur si importantes l'erreur atteigne des valeurs élevées. On peut néanmoins rappeler que, d'une part, dans le cas de cette station, comme nous l'avons vu au paragraphe V.2, les variations infra-journalières de hauteur sont provoquées artificiellement par les éclusées de la centrale de Maison-du-Roy, et que d'autre part, dans le cas où de telles variations auraient pu être observées, l'opérateur chargé du dépouillement n'aurait pas utilisé la méthode de moyenne des hauteurs « à vue », mais une moyenne de plusieurs valeurs de débits.

VI.2 | Représentation en fonction du débit moyen journalier

Nous nous proposons ici d'analyser les distributions de l'erreur relative entre débit moyen journalier et débit obtenu par simulation de la méthode de dépouillement manuel des limnigrammes par moyenne des hauteurs « à vue », en fonction du débit moyen journalier \bar{Q}_j .

De la même manière que précédemment, dix classes sont établies, ayant pour limites les onze déciles de la distribution des débits journaliers \bar{Q}_j . Chaque valeur d'erreur $\varepsilon_{j,l}$ est ensuite classée dans la classe correspondant à la valeur du débit moyen journalier du même jour j . Les résultats sont à nouveau présentés sous forme de boxplots (voir figure 2.13).

On retrouve les graphiques correspondant à cette analyse sur la figure 2.24. À nouveau on remarque des gammes d'erreurs $\varepsilon_{j,l}$ relativement faibles comparativement à ce qui a pu être observé avec la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle.

On peut également observer d'une manière générale une décroissance de l'erreur $\varepsilon_{j,l}$ lorsque le débit moyen journalier augmente. Sur certaines stations comme le Guil à Montdauphin cette décroissance s'observe sur la valeur absolue de l'erreur moyenne par classe, qui passe de -12% pour des débits compris entre 1.5 et 4.4 m³/s à environ zéro pour des débits supérieurs à 16 m³/s. Sur les autres stations, la valeur moyenne est plus stable (proche de zéro), mais l'intervalle interquantiles 10%-90% diminue lorsque le débit augmente.

Si l'on revient à la courbe de tarage, on peut à nouveau trouver une explication à ce phénomène : la relation hauteur-débit est plus proche d'une fonction linéaire pour les hauts débits que pour les débits faibles. L'exemple de la courbe de tarage n° 1989A1 du Verdon à Colmars, tracée sur la figure 2.25, permet de le constater. La courbe est plus courbée pour les faibles gammes de débits. Ainsi, pour une même variation infra-journalière de hauteur de 25 cm, l'approximation linéaire est plus proche de la courbe réelle lorsque les débits sont importants que lorsqu'ils sont faibles.

Finalement, l'analyse sous deux angles différents des distributions de l'erreur relative $\varepsilon_{j,l}$ entre débit moyen journalier et débit journalier obtenu par simulation de la méthode de dépouillement manuel des limnigrammes par moyenne des hauteurs « à vue » montre que les gammes d'erreurs atteintes sont relativement faibles comparativement aux erreurs liées à la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle.

Sur les stations dont les débits horaires ne sont pas influencés, l'erreur moyenne est très proche de zéro, mais on peut trouver ponctuellement des erreurs relativement importantes pour des gammes de débits faibles. Pour des classes de variation infra-journalière de hauteur d'eau élevée, on observe un biais moyen parfois important. Cependant, comme écrit précédemment, pour de telles variations de hauteur d'eau au cours d'une journée (supérieures à 15 centimètres à l'échelle, soit 1.5 cm sur le limnigramme), le dépouillement

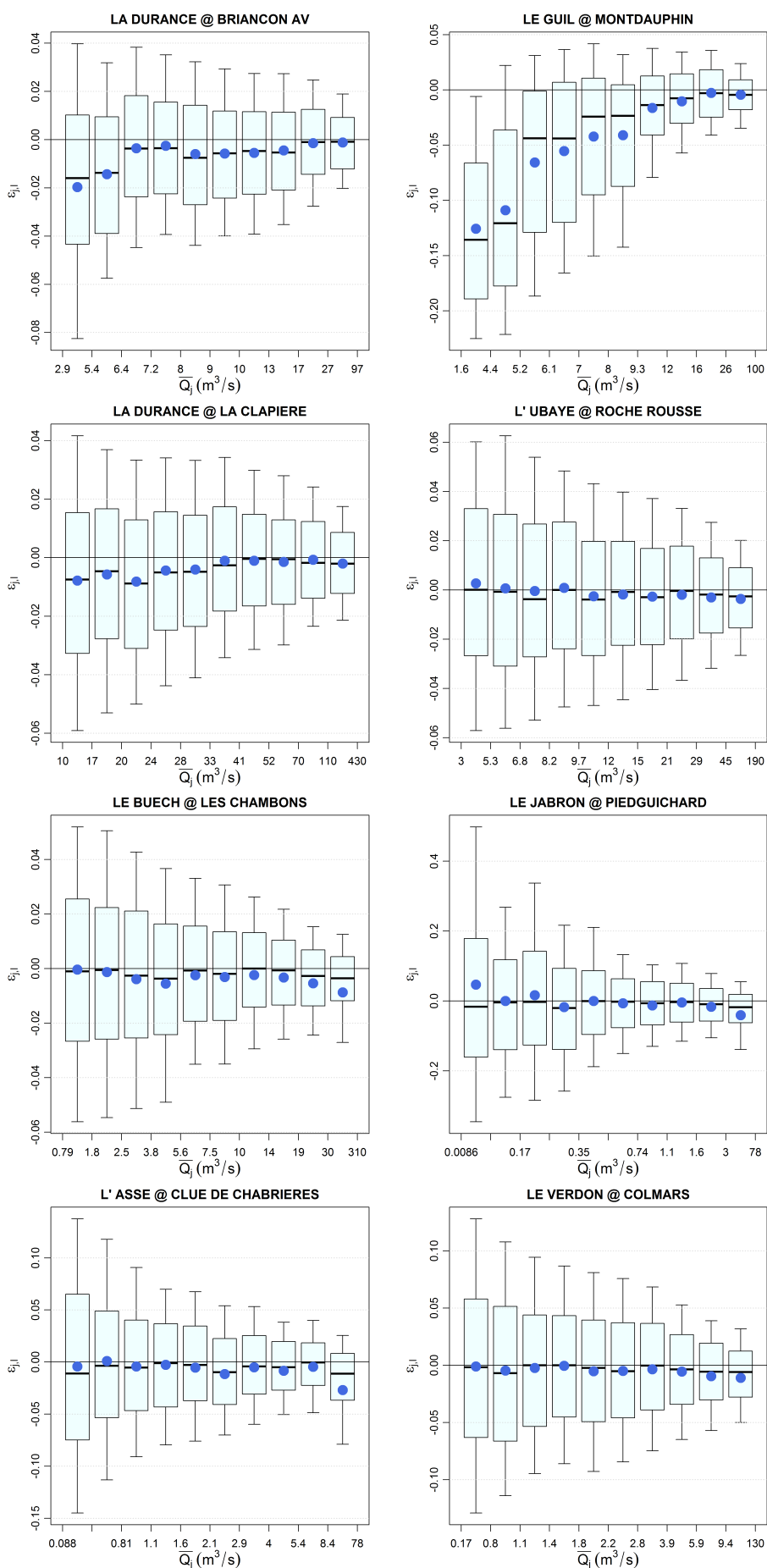


Figure 2.24 – Représentation (voir fig. 2.13) des erreurs liées à la méthode de dépouillement manuel des limnigrammes en fonction du débit moyen journalier sur différentes stations.

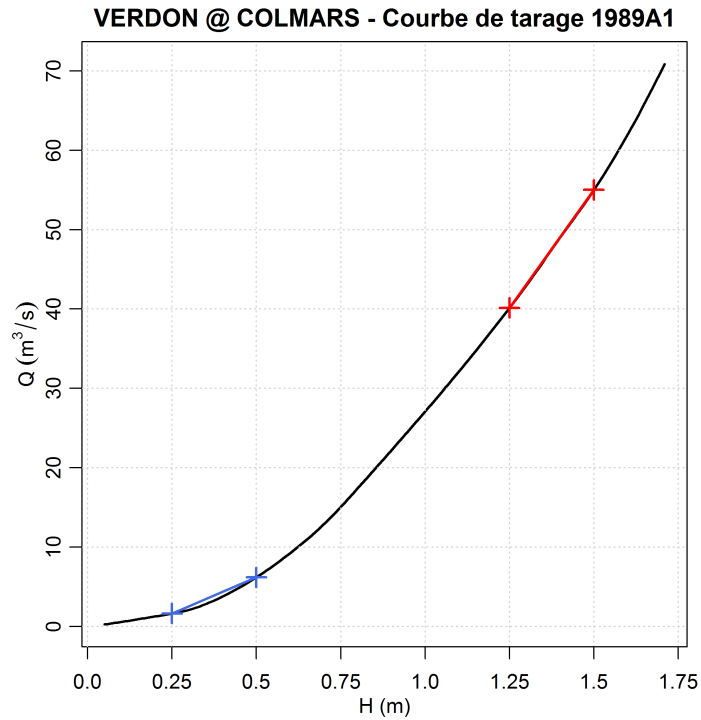


Figure 2.25 – Courbe de tarage 1989A1, valable du 22-06-1989 au 29/10/1990 à la station de Colmars sur le Verdon (noir), et deux exemples d’approximations linéaires sur des gammes de hauteur d’eau de 0.25 à 0.5 cm (rouge) et 1.25 à 1.5 cm (bleu).

n’était pas fait par moyenne des hauteurs « à vue » mais par une autre méthode impliquant le relevé de plusieurs valeurs au cours de la journée. L’erreur calculée à partir de la simulation effectuée ici peut-être considérée comme une borne supérieure de l’erreur liée au mode réel de dépouillement des limnigrammes.

Ces différentes observations nous amènent à la conclusion que le biais lié à la méthode d’enregistrement graphique de la hauteur d’eau et de dépouillement manuel des limnigrammes était suffisamment faible pour qu’un débiaisage des séries obtenues par cette méthode ne paraisse pas nécessaire.

VII | Intégration dans le calcul de l’incertitude globale des débits

Les travaux décrits dans ce chapitre s’inscrivent dans un contexte plus large d’études sur l’incertitude des débits menées à EDF-DTG (Mathevet *et al.*, 2008; Jalbert *et al.*, 2011; Perret *et al.*, 2013, thèse en cours Thomas Morlot). Ces différents travaux visent à qualifier les incertitudes des débits produits par EDF DTG en s’intéressant aux différentes étapes de la construction d’une série hydrométrique : mesure de hauteur d’eau, sensibilité de la section de mesure, précision des jaugeages, choix du modèle de tracé de la courbe de tarage et variabilité temporelle du contrôle hydraulique.

Concernant la transformation hauteur-débit, l’instabilité temporelle de la courbe de tarage liée à l’instabilité du lit de la rivière est modélisée par un modèle de vieillissement. Partant du principe qu’un jaugeage porte un maximum d’informations au moment de sa réalisation, une approche variographique (Jalbert *et al.*, 2011) combinée au tracé d’une courbe de tarage pour chaque jaugeage effectué (Perret *et al.*, 2013) permet de modéliser la part d’incertitude sur les débits associée au tracé de la courbe de tarage (notée S_e)

ainsi que son « vieillissement » (noté σ).

Finalement, l'intervalle de confiance à 70% d'une valeur de débit est exprimée de la manière suivante :

$$IC_{70\%} = \sqrt{S_e^2 + I_r^2 + \sigma^2} \quad (2.9)$$

Le terme I_r correspond à l'incertitude liée à la mesure du niveau d'eau, au calage du capteur de niveau d'eau et à la sensibilité de la relation hauteur-débit. Dans le cas de données de débits « modernes » (enregistrement automatique horaire), ce terme est décomposé de la manière suivante :

$$I_r = S \cdot \sqrt{P^2 + C^2} \quad (2.10)$$

où S est la sensibilité de la section pour la courbe considérée, P la précision des capteurs (directement issue des données constructeurs) et C le calage des capteurs (adéquation entre la cote lue à l'échelle et la mesure du capteur).

Les travaux présentés dans ce chapitre interviennent au niveau du terme d'incertitude sur la hauteur d'eau I_r . Il s'agit en effet d'adapter ce terme aux anciennes méthodes de construction des séries.

En ce qui concerne la méthode de lecture ponctuelle à l'échelle, nous avons montré qu'au delà du biais constaté en période de fonte, il existe une incertitude inhérente à l'échantillonnage des débits à heure fixe, qui dépend de la période de l'année. Nous avons pris en compte dans nos calculs d'erreurs liées à cette méthode (section V) l'incertitude sur la lecture humaine de la hauteur d'eau à l'échelle ainsi que l'incertitude sur l'heure de lecture. Connaissant l'heure de lecture quotidienne de la station il est donc possible d'écrire le terme I_r comme une fonction du mois de l'année, dont la valeur est équivalente à l'intervalle interquantiles 15%-85% (pour un intervalle de confiance à 70%) des erreurs relatives $\varepsilon_{j,t}$ observées à cette station sur la période de simulation de la méthode.

Pour les portions de séries hydrologiques établies par enregistrement graphique et dépouillement des limnigrammes, on peut également s'appuyer sur nos travaux pour écrire le terme I_r correspondant. Il faudra cependant ajouter cette fois l'incertitude liée au capteur et à son calage (à la manière de ce qui est fait sur la période « moderne ») qui n'ont pas été prises en compte dans les calculs de l'erreur liée à cette méthode (section VI). L'intervalle interquantiles 15%-85% des erreurs relatives $\varepsilon_{j,t}$ observées sur la période de simulation permet de déterminer l'incertitude inhérente à la méthode de dépouillement. Il ne sera cependant plus fonction de la période de l'année mais du débit journalier, puisque nous avons vu que les gammes d'erreurs sont plus larges pour les faibles débits. Il faut également rappeler qu'en se limitant à la méthode de dépouillement par moyenne des hauteurs « à vue », on fournit une borne supérieure de l'incertitude liée au dépouillement des limnigrammes, puisque dans la pratique, un mode de dépouillement plus précis était utilisé lorsque la variation infra-journalière de hauteur était importante.

Les données historiques retrouvées contiennent pour plusieurs stations l'ensemble des jaugeages depuis le début de la vie des stations, les courbes de tarage et les hauteurs. Ces données nous permettraient également de « critiquer » les courbes de tarage anciennes et de les recalculer avec des populations de jaugeages plus robustes. Cela nous permettrait de valoriser l'historique de ces stations à la manière de Perret *et al.* (2013) pour mettre à jour ces séries.

VIII | Synthèse du deuxième chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre différents aspects de nos travaux sur les longues séries hydrométriques du bassin de la Durance. Une démarche de recherche documentaire menée en collaboration avec un historien nous a permis de mettre au jour plusieurs longues séries hydrométriques jusqu'ici non utilisées, portant à 11 le nombre de longues séries quotidiennes aujourd'hui disponibles sur le bassin, la plupart commençant entre 1904 et 1910.

La richesse hydrométrique du bassin de la Durance s'est également traduite par de nombreuses « méta-données » (correspondances, plans, règlements, jaugeages, courbes de tarage) qui nous ont notamment permis de montrer que les longues séries de débits ont généralement été construites par une succession de méthodes différentes, ce qui peut remettre en cause leur homogénéité.

Un processus de simulation des méthodes anciennes de construction de séries journalières de débits à partir de données horaires récentes a été mis en place et a permis de quantifier une partie des incertitudes liées à ces méthodes. Il est apparu que les séries de débits journaliers établies par lecture quotidienne à l'échelle peuvent être significativement biaisées en période de fonte des neiges sur des stations de montagne. Une méthode de correction des séries obtenues de cette manière a été proposée et appliquée aux trois séries le permettant. Concernant les séries établies par enregistrement graphique de la hauteur d'eau et dépouillement manuel des limnigrammes, la simulation n'a pas révélé de biais systématique, mais une incertitude liée à la méthode de dépouillement dépendant de la gamme de débit et de la variation infra-journalière de hauteur d'eau.

Ces analyses s'inscrivent dans un cadre plus large de travaux menés à EDF DTG sur l'incertitude des séries hydrométriques. Elles permettent de déterminer un terme de l'incertitude des séries anciennes qui s'ajoute aux autres sources d'incertitudes que sont par exemple les jaugeages en rivière, le tracé et la gestion de la courbe de tarage. Il s'agit donc d'une étape vers la qualification de l'incertitude globale des débits anciens qui devrait être facilitée par l'exploitation des nombreux jaugeages et courbes de tarage retrouvés.

Dans l'objectif de compléter et de fournir un objet de comparaison à ces données hydrométriques observées, nous souhaitons produire des reconstitutions hydrologiques au pas de temps journalier. Nous présentons dans la suite de ce document notre démarche de reconstitution hydrologique qui passe par une étape de reconstitution climatique (chapitres 3 à 5 puis par une transformation en débit à l'aide d'un modèle hydrologique (chapitre 6). Les longues séries de débits observés présentées dans ce chapitre seront comparées aux séries reconstituées dans les chapitres 6 et 7.

La méthode ANATEM

Ce chapitre a pour objet la présentation de la méthode ANATEM de reconstitution de séries climatiques au pas de temps journalier par combinaison d'informations climatiques régionales et synoptiques. Une utilisation courante de chacune de ces deux sources d'information est d'abord décrite, puis les formulations permettant leur combinaison pour la reconstitution climatique sont données. Ensuite, les données et paramétrages utilisés pour la mise en œuvre de cette méthode sont indiqués.

Sommaire

I	Une combinaison de deux sources d'information	78
I.1	Reconstitution de séries par comparaison à une série témoin	78
I.2	Utilisation de variables de grande échelle : la méthode des analogues	80
I.3	Formulations de la méthode ANATEM	82
II	Données et paramètres pour la méthode des analogues	87
II.1	Données synoptiques	87
II.2	Paramètres utilisés pour la méthode des analogues	88
III	Quelles séries pour le témoin ?	90
III.1	Nature du témoin	91
III.2	Qualité du témoin	92
IV	Synthèse du troisième chapitre	98

I | Une combinaison de deux sources d'information

La méthode ANATEM, que nous introduisons dans ce chapitre, est basée sur le principe de la réunion de deux sources d'information, traditionnellement utilisées individuellement pour la reconstitution, la critique ou la simulation de séries de données climatiques. Nous utiliserons d'une part une information régionale appelée témoin, classiquement utilisée pour la reconstitution de données, et d'autre part une information de plus grande échelle, ou information synoptique, au travers d'une méthode appelée méthode des analogues.

Nous présentons dans cette section une méthode d'utilisation de chacune des deux sources d'information précitées, puis la formulation de la méthode ANATEM permettant de combiner ces deux méthodes pour valoriser les deux sources d'information qu'elles utilisent.

I.1 | Reconstitution de séries par comparaison à une série témoin

C'est le plus souvent dans le cas d'une panne temporaire d'une station de mesure que l'on cherche à reconstituer des données climatiques journalières. Pour reconstituer les données manquantes, on recherche généralement une information locale disponible au pas de temps journalier et pouvant être corrélée à la série à combler. Cette information locale est la plupart du temps une série d'observations à une station géographiquement proche de la station cible, ou bien une combinaison de plusieurs de ces séries.

La reconstruction se fait alors en deux temps. Il faut d'abord établir un modèle représentant au pas de temps journalier le lien entre la station cible et la (ou les) station(s) explicative(s). Cela nécessite de disposer, sur une période donnée, à la fois des données de la station cible et de celles de la (ou des) station(s) explicative(s). Le modèle obtenu est ensuite appliqué à la période à reconstituer.

I.1.1 | Reconstitution de séries de températures de l'air

La méthode de reconstitution d'une série de températures de l'air couramment mise en œuvre à EDF-DTG utilise une série de référence à laquelle est appliquée une correction additive. La série de référence doit bien entendu être disponible à la fois sur la période de reconstitution et sur une période suffisamment longue sur laquelle la série cible est aussi disponible (cette dernière période sera appelée « période commune »).

Sur la figure 3.1, on a représenté les moyennes mensuelles interannuelles des températures de l'air d'une série à reconstituer appelée « cible » et d'une série de référence appelée « référence ». Ces douze valeurs de moyennes mensuelles interannuelles seront dans la suite de ce document appelées « régime ». Elles sont établies sur la période de recouvrement des deux séries.

On peut calculer, toujours sur la période de disponibilité commune, la température moyenne de chaque série et en déduire la différence α entre la température moyenne de la série cible et celle de la série de référence. Un modèle (noté *Témoin*) de reconstitution de la série cible au jour j à partir de la série de référence pourrait être :

$$Cible(j) \approx Témoin(j) = Référence(j) + \alpha \quad (3.1)$$

$$\text{avec } \alpha = \frac{\text{Moyenne (Cible)}}{\text{Période commune}} - \frac{\text{Moyenne (Référence)}}{\text{Période commune}}$$

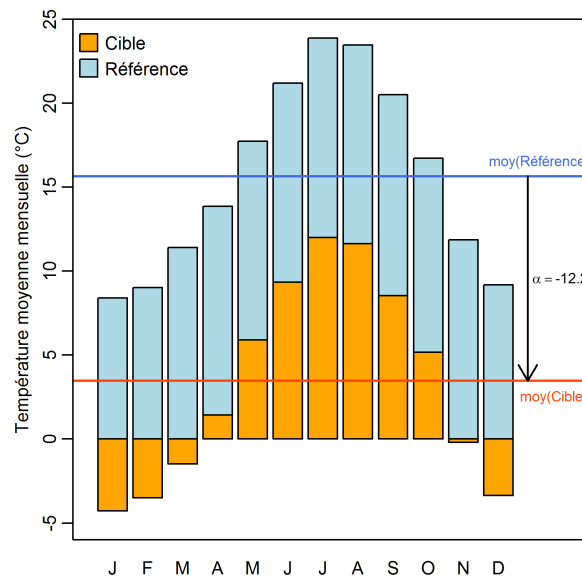


Figure 3.1 – Régimes de température de l'air d'une série cible à reconstituer et d'une série de référence (exemple de la reconstitution de la série de températures de l'air spatialisées sur le bassin de la Durance à La Clapière [cible] à partir de la série de températures de l'air observées à Marseille [référence]).

Dans l'exemple présenté, ce modèle simple consisterait donc à utiliser pour la reconstitution de la série cible la série de référence diminuée de 12.2°C.

Afin de tenir compte des effets saisonniers, on peut représenter les écarts entre les régimes de la série cible et de la série de référence : pour chaque mois, on a tracé sur la figure 3.2 la différence entre la température moyenne mensuelle de la série cible et celle de la série de référence.

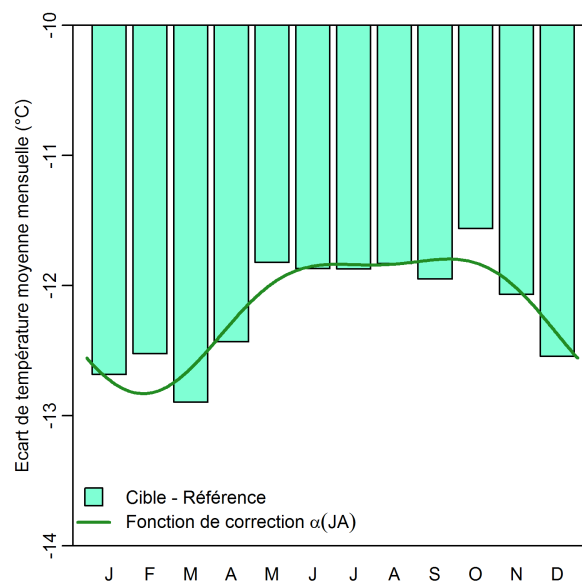


Figure 3.2 – Écarts des régimes de température de l'air d'une série cible à reconstituer et d'une série de référence (exemple de la reconstitution de la série de températures de l'air spatialisées sur le bassin de la Durance à La Clapière [cible] à partir de la série de températures de l'air observées à Marseille [référence]).

On constate que la valeur du correctif à appliquer varie, dans le cas de notre exemple,

entre -11.5°C et -12.9°C . Il paraît donc judicieux d'utiliser une correction variable au cours de l'année.

Dans cette optique, la pratique à EDF-DTG consiste à ajuster une fonction harmonique sur le régime des écarts mensuels entre série cible et série de référence. On notera cette fonction $\alpha[JA(j)]$ où $JA(j)$ est le jour de l'année (de 1 à 366) correspondant au jour j . En utilisant cette fonction, on peut réécrire le modèle de reconstitution de la série cible en fonction de la série de référence de la manière suivante :

$$Cible(j) \approx Temoin(j) = Référence(j) + \alpha[JA(j)] \quad (3.2)$$

I.1.2 | Reconstitution de séries de précipitations

Pour la reconstitution de séries de précipitations, on peut procéder de manière semblable à ce qui a été décrit pour les températures de l'air, mais avec cette fois une formulation de type multiplicatif. En effet, de manière générale, on considère que la différence de précipitations entre deux postes est une proportion, plutôt qu'une valeur constante. Par ailleurs, ce type de formulation permet également d'éviter l'apparition de précipitations négatives.

La formulation utilisée pour les précipitations est la suivante :

$$Cible(j) \approx Temoin(j) = Référence(j) \cdot \alpha \quad (3.3)$$

$$\text{avec } \alpha = \frac{\text{Moyenne (Cible)}}{\text{Moyenne (Référence)}} \cdot \frac{\text{Période commune}}{\text{Période commune}}$$

À nouveau, on peut également choisir une formulation prenant en compte les effets saisonniers. On applique pour cela une correction dépendant du jour de l'année, mais cette fois la fonction de correction $\alpha[JA(j)]$ (où $JA(j)$ est le jour de l'année correspondant au jour j à reconstituer) est ajustée sur le régime des ratios de précipitations mensuelles de la série cible et de la série de référence.

$$Cible(j) \approx Temoin(j) = Référence(j) \cdot \alpha[JA(j)] \quad (3.4)$$

L'intérêt d'une telle formulation « saisonnalisée » pour la reconstitution des précipitations est *a priori* moins évident que pour la reconstitution de températures de l'air, car la saisonnalité des précipitations est généralement nettement moins marquée que celle des températures de l'air. Nous utiliserons dans nos applications la version « simple » (équation 3.3) du modèle *Temoin* et discuterons ce choix dans la section I du chapitre 5.

I.2 | Utilisation de variables de grande échelle : la méthode des analogues

La méthode des analogues a été introduite pour la prévision météorologique par Lorenz (1969). Le terme d'*analogues* désigne deux situations atmosphériques similaires, et la méthode des analogues repose sur l'hypothèse que deux situations atmosphériques similaires à l'échelle synoptique engendrent des effets locaux similaires.

La méthode des analogues est appliquée dans plusieurs pays pour des usages variés, dont la prévision météorologique (Kruizinga et Murphy, 1983; Van Den Dool, 1989). Avec l'intérêt croissant pour la connaissance du climat futur, la méthode des analogues a montré

des performances intéressantes pour la descente d'échelle de modèles climatiques globaux (GCM, General Circulation Model) (Zorita et von Storch, 1999; Timbal et McAvaney, 2001; Wetterhall *et al.*, 2005). Elle est aujourd'hui régulièrement utilisée dans les études d'impacts du changement climatique (Timbal *et al.*, 2003; Timbal et Jones, 2007; Bourqui *et al.*, 2011; Teng *et al.*, 2012; Hingray *et al.*, 2013). Bien que peu répandue, l'utilisation de la méthode des analogues pour reconstituer des chroniques climatiques sur le passé existe par exemple dans Timbal *et al.* (2006), où des séries de précipitations sont reconstituées à partir de différents modèles de circulation générale (GCM) et comparés aux observations pour tenter d'expliquer le déclin de précipitations observé depuis les années 1960 dans le Sud-Ouest de l'Australie.

En France, l'utilisation de la méthode des analogues pour la prévision des précipitations a été initiée par Duband (1970, 1981). Le but était alors de reproduire, en l'objectivant, le processus d'apprentissage et de prévision utilisé intuitivement par les prévisionnistes. Un système de prévision opérationnel basé sur cette méthode a été mis en place dans les années 1970 à EDF. Cette méthode a ensuite fait l'objet de plusieurs évolutions (Bontron, 2004; Ben Daoud *et al.*, 2010; Horton *et al.*, 2012).

La méthode des analogues telle que nous l'utiliserons par la suite est proche de celle décrite par Obled *et al.* (2002). Les hypothèses de base telles que décrites dans cet article sont les suivantes :

1. Il y a eu dans le passé des situations synoptiques non nécessairement identiques, mais similaires à celle du jour pour lequel une prévision est à faire (*journée cible*) ;
2. Pendant les journées correspondant à ces situations synoptiques similaires (*journées analogues*), les variables climatiques (précipitations, températures) dépendent en partie de la situation synoptique, mais aussi de caractéristiques plus locales (relief, vents locaux, etc.).
3. Pour la journée cible, la partie des variables climatiques locales expliquée par la situation synoptique sera la même que celle observée sur les journées analogues.

De ces hypothèses émanent les deux étapes principales nécessaires à l'application de la méthode des analogues. La première consiste à rechercher, dans une longue archive météorologique, les journées présentant les situations synoptiques ressemblant le plus à celle de la journée cible à décrire. Ces journées sont extraites et constituent l'échantillon de journées analogues. Le choix des journées analogues se fait en utilisant un critère d'analogie basé sur des variables synoptiques appelées prédicteurs. L'archive météorologique dans laquelle sont recherchées les journées analogues est souvent appelée réservoir d'analogues, et les journées qui la composent sont désignées par le terme de journées « candidates ».

La seconde étape consiste à extraire de chaque journée analogue la ou les variables locales d'intérêt. On obtient ainsi un échantillon empirique des valeurs de ces variables locales pouvant être observées pour le type de situation synoptique considéré. Ainsi, un ensemble de valeurs de la ou les variables locales d'intérêt est retenu pour chaque journée cible, l'utilisation de leur distribution statistique permettant de fournir une prévision probabiliste.

Ces étapes sont celles d'une méthode de **prévision** par analogues, mais les mêmes seront ici utilisées pour la **reconstitution** de séries passées. Simplement, l'archive météorologique dans laquelle on recherchera les journées similaires couvrira dans ce cas une période non plus antérieure mais postérieure (ou contemporaine) à la journée cible à reconstituer.

L'utilisation de la méthode des analogues nécessite de disposer, sur la période servant de réservoir d'analogues, d'une archive météorologique de variables synoptiques ainsi que

d'une archive des variables locales d'intérêt (précipitations, températures de l'air à l'échelle d'un bassin versant).

Pour les journées à modéliser, les valeurs des variables synoptiques (prédicteurs) doivent être connues. Dans le cas d'une utilisation en prévision météorologique, elles sont généralement produites par un modèle numérique de prévision. Pour la reconstitution de données anciennes il peut s'agir de variables observées et spatialisées ou de réanalyses (voir paragraphe II.1).

I.3 | Formulations de la méthode ANATEM

Contrairement à la prévision météorologique ou à l'analyse du climat futur, la reconstitution de longues séries climatiques sur le passé présente l'avantage de la disponibilité de données observées, à la fois à l'échelle régionale et à l'échelle synoptique.

Il est donc possible pour l'usage qui nous intéresse ici de combiner les deux sources d'informations utilisées par les méthodes décrites précédemment, c'est-à-dire d'une part une information régionale, une longue série appelée témoin, et d'autre part l'information portée par les variables synoptiques de grande échelle, exploitée à travers la méthode des analogues. C'est ce que propose la méthode ANATEM (ANalogues + TEMoin).

I.3.1 | Formulation pour la reconstitution de séries de températures de l'air

On peut formuler la méthode ANATEM de la manière suivante : la température reconstituée pour la journée cible est obtenue à partir de l'information régionale (témoin), corrigée des erreurs identifiées au travers de journées analogues.

Si l'on considère que pour reconstituer la température de la journée cible, on dispose d'un modèle *Temoin* basé sur une série quotidienne régionale servant de référence (équation 3.1 ou 3.2), ainsi que de n journées analogues d'un point de vue synoptique, la formulation de la méthode ANATEM sera :

$$\left[\widehat{T}_j^k \right]_{k=1\dots n} = \text{Temoin}_j + \left[T_{ANA_j^k} - \text{Temoin}_{ANA_j^k} \right]_{k=1\dots n} \quad (3.5)$$

où \widehat{T}_j^k est la $k^{\text{ième}}$ température reconstituée pour la journée cible j , Temoin_j la valeur du modèle *Temoin* pour la journée cible, $\text{Temoin}_{ANA_j^k}$ la valeur du modèle *Temoin* pour la $k^{\text{ième}}$ journée analogue et $T_{ANA_j^k}$ la température observée de la $k^{\text{ième}}$ journée analogue.

En fait, le modèle *Temoin* appliqué au jour cible j est corrigé par la distribution des écarts entre ce modèle *Temoin* et la température réellement observée pour les n journées analogues.

Une représentation graphique de la formulation d'ANATEM pour les températures de l'air est présentée sur la figure 3.3. Pour la reconstruction d'une journée j , on dispose du modèle *Temoin* et de n journées analogues $[ANA_j^k]_{k=1\dots n}$. Sur le graphe 3.3a, on a représenté, pour chaque journée ANA_j^k analogue de la journée j à reconstituer, les valeurs de la température observée $T_{ANA_j^k}$ en fonction des valeurs $\text{Temoin}_{ANA_j^k}$ du modèle *Temoin* (points noirs).

Pour une journée analogue k donnée, d'après l'équation 3.5, on peut écrire la température reconstituée \widehat{T}_j^k comme une fonction de la valeur de Temoin_j , ayant pour paramètres les valeurs de $T_{ANA_j^k}$ et $\text{Temoin}_{ANA_j^k}$:

$$\widehat{T}_j^k = f(x_j) = x_j + a_j^k \quad \text{avec} \quad x_j = \text{Temoin}_j \quad \text{et} \quad a_j^k = \left[T_{ANA_j^k} - \text{Temoin}_{ANA_j^k} \right] \quad (3.6)$$

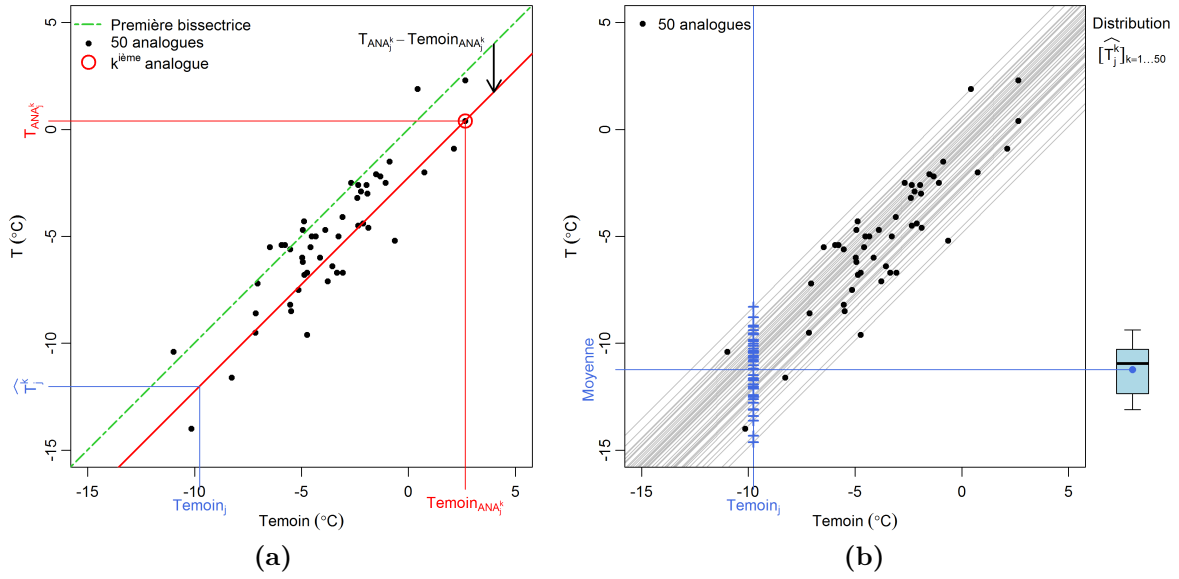


Figure 3.3 – Représentation graphique de la formulation d’ANATEM pour les températures de l’air : reconstitution d’une journée j connaissant la valeur $Temoin_j$ du modèle *Temoin* pour cette journée, ainsi que les valeurs $T_{ANA_j^k}$ et $Temoin_{ANA_j^k}$ de la température observée et du modèle *Temoin* pour 50 journées analogues. (a) Estimation de la température \hat{T}_j^k à partir d’une journée analogue k , (b) estimation d’un ensemble de températures $[\hat{T}_j^k]_{k=1...50}$ à partir de 50 journées analogues (équation 3.5).

Ainsi, la valeur de T_j^k se lit dans l’espace $(Temoin, T)$ comme le point d’abscisse $Temoin_j$ sur la droite de pente unité et d’ordonnée à l’origine $T_{ANA_j^k} - Temoin_{ANA_j^k}$, tracée en rouge sur la figure 3.3a.

Si l’on répète l’opération pour chacune des n journées analogues, on obtient l’ensemble de droites parallèles représentées sur la figure 3.3b, et l’ensemble des températures reconstituées pour la journée j est l’ensemble des points d’abscisse $Temoin_j$ de chacune de ces droites. La distribution de ces valeurs (quantiles 10, 25, 50, 75 et 90%) est représentée par un boxplot à droite du graphique, et la valeur moyenne par un point bleu.

Dans le cas de la reconstitution de la journée j représenté sur la figure 3.3b, on peut dire que, sur les n journées sélectionnées ayant une situation synoptique semblable à la journée j , le modèle *Temoin* était en moyenne supérieur à la température réelle observée, ce qui a amené à corriger négativement ce modèle pour la journée j à reconstituer. Finalement, pour cette journée j , alors que le modèle *Temoin* a une valeur de -9.0°C , les cinquante valeurs de températures de l’air produites par la méthode ANATEM ont une moyenne de -11.2 , et leurs quantiles 10% et 90% sont respectivement de -13.1°C et -9.3°C .

I.3.2 | Formulation pour la reconstitution de séries de précipitations

La reconstitution de précipitations par combinaison de deux sources d’informations nécessite une formulation plus complexe que celle utilisée pour les températures de l’air. Il faut en effet tenir compte de plusieurs contraintes, notamment le choix d’une formulation multiplicative pour le modèle *Temoin* (équation 3.1), et les problématiques liées aux valeurs nulles de précipitations.

Si l’on reprend la représentation graphique utilisée dans le paragraphe précédent, on peut, pour une journée j à reconstituer, représenter les valeurs de la précipitation observée $P_{ANA_j^k}$ en fonction des valeurs $Temoin_{ANA_j^k}$ du modèle *Temoin* de chacune des n journées

analogues à la journée j . On voit sur la figure 3.4 que si l'on procédait de la même manière que pour la reconstitution des températures de l'air, c'est-à-dire en utilisant la formulation « additive » (équation 3.7), on ferait potentiellement apparaître des valeurs négatives de précipitations reconstituées. De plus, dans le cas de très faible valeurs de $Temoin_j$, une correction additive pourrait s'avérer excessive.

$$\left[\widehat{P}_j^k\right]_{k=1\dots n} = Temoin_j + \left[P_{ANA_j^k} - Temoin_{ANA_j^k}\right]_{k=1\dots n} \quad (3.7)$$

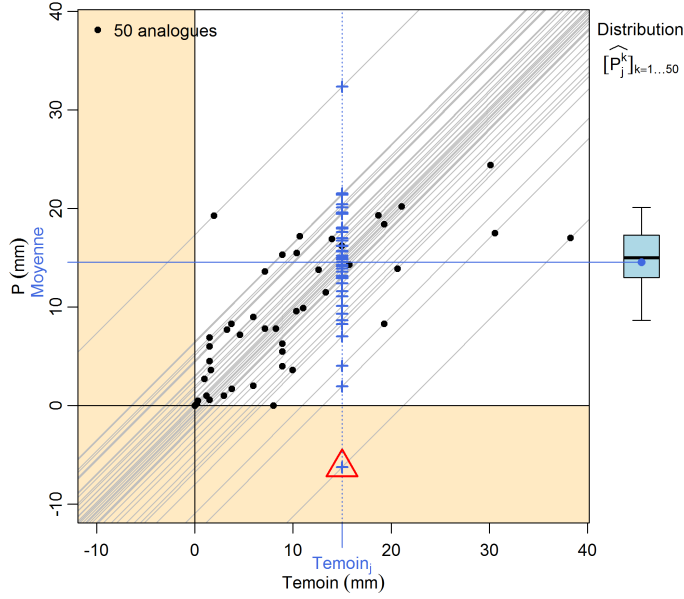


Figure 3.4 – Représentation graphique de la formulation additive pour les précipitations : reconstitution d'une journée j (équation 3.7). Une telle formulation peut faire apparaître des valeurs négatives de précipitations (triangle rouge).

Afin de pallier à ce problème, il peut être envisagé d'utiliser une formulation multiplicative (équation 3.8).

$$\left[\widehat{P}_j^k\right]_{k=1\dots n} = Temoin_j \times \left[\frac{P_{ANA_j^k}}{Temoin_{ANA_j^k}}\right]_{k=1\dots n} \quad (3.8)$$

Cependant, l'utilisation de cette formulation pose deux problèmes. En premier lieu, la valeur de \widehat{P}_j^k peut-être infinie si $Temoin_{ANA_j^k}$ est nul. Une simple exclusion de ces valeurs biaiserait la reconstitution, mais ce problème peut-être contourné par une étape de filtrage préalable, comme représenté sur la figure 3.5. Plus concrètement, de manière arbitraire, les journées analogues pour lesquelles $P_{ANA_j^k} > 10 \cdot Temoin_{ANA_j^k}$ voient leur valeur de $P_{ANA_j^k}$ remplacée par $10 \cdot Temoin_{ANA_j^k}$. Symétriquement, les journées analogues pour lesquelles $P_{ANA_j^k} < 0.1 \cdot Temoin_{ANA_j^k}$ voient leur valeur de $P_{ANA_j^k}$ remplacée par $0.1 \cdot Temoin_{ANA_j^k}$. Des expériences menées avec d'autres valeurs du seuil de filtrage (de 2 à 100) ont montré que celle-ci n'a pas d'impact sur les performances globales de la reconstitution, cela en raison du fait que, d'une manière générale, très peu de journées analogues sont concernées par ce filtrage.

Après filtrage, la formulation multiplicative pour les précipitations est représentée graphiquement sur la figure 3.6. On peut y observer le second problème soulevé par cette formulation multiplicative : dans certains cas où la valeur de $Temoin_{ANA_j^k}$ est bien plus

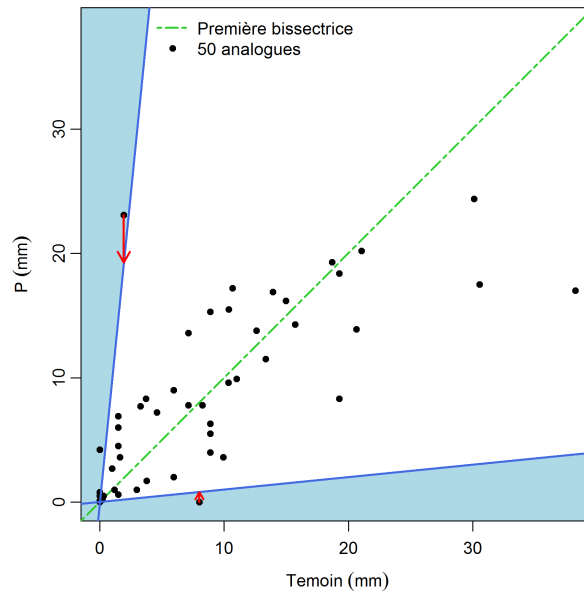


Figure 3.5 – Représentation graphique de la formulation multiplicative pour les précipitations : filtrage préalable.

faible que celles de $P_{ANA_j^k}$ et de $Temoin_j$, on voit apparaître des valeurs aberrantes de précipitation reconstituée : le modèle multiplicatif peut provoquer des corrections excessives pour les valeurs élevées de $P_{ANA_j^k}$.

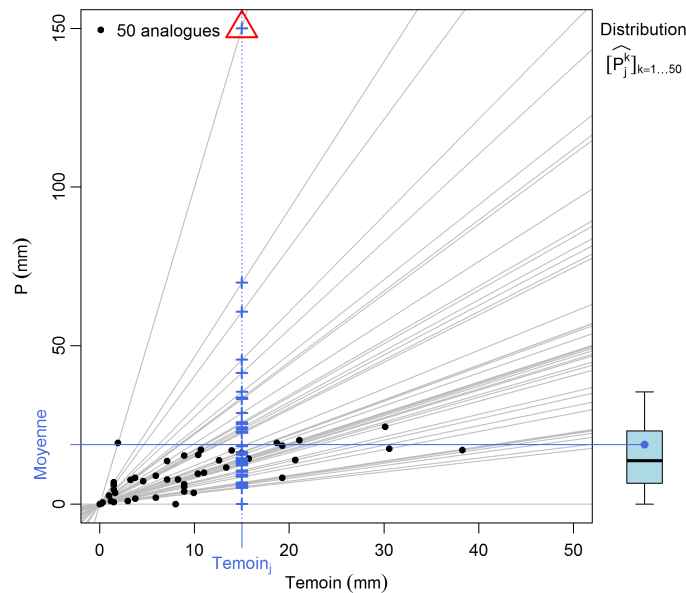


Figure 3.6 – Représentation graphique de la formulation multiplicative pour les précipitations : reconstitution d'une journée j (équation 3.8). Une telle formulation peut faire apparaître des valeurs excessives de précipitations (triangle rouge).

Il apparaît finalement qu'aucune des deux formulations, additive ou multiplicative, ne peut convenir pour la reconstitution souhaitée de précipitations journalières. Les observations précédentes laissent penser qu'un bon modèle de correction devrait avoir un comportement proche du modèle multiplicatif pour les faibles valeurs de la variable $Temoin_j$, et du modèle additif pour les fortes valeurs de $Temoin_j$. Ces conditions peuvent être remplies en utilisant une formulation analytique du type de l'équation 3.9.

$$\widehat{P}_j^k = f(x_j) = \frac{x_j^2 + a_j^k \cdot x_j}{x_j + b_j^k} \quad (3.9)$$

où $x_j = \text{Temoin}_j$ et où a_j^k et b_j^k sont des paramètres à exprimer en fonction de $P_{ANA_j^k}$ et $\text{Temoin}_{ANA_j^k}$.

Les asymptotes de cette fonction lorsque $x_j = \text{Temoin}_j$ tend vers 0 et lorsque $x_j = \text{Temoin}_j$ tend vers $+\infty$ peuvent être exprimées de la manière suivante :

$$\widehat{P}_j^k = \frac{x_j^2 + a_j^k \cdot x_j}{x_j + b_j^k} = x_j \cdot \frac{x_j + a_j^k}{x_j + b_j^k} \underset{x_j \rightarrow 0}{\sim} x_j \cdot \frac{a_j^k}{b_j^k} \quad (3.10)$$

$$\widehat{P}_j^k = \frac{x_j^2 + a_j^k \cdot x_j}{x_j + b_j^k} = x_j \cdot \left(1 + \frac{a_j^k}{x_j}\right) \cdot \left(1 + \frac{b_j^k}{x_j}\right)^{-1} \underset{x_j \rightarrow +\infty}{\sim} x_j + (a_j^k - b_j^k) \quad (3.11)$$

On constate que cette fonction présente bien un comportement « multiplicatif » lorsque x_j est faible (droite de pente $x_j + a_j^k/x_j + b_j^k$ et d'ordonnée à l'origine nulle), et un comportement « additif » lorsque x_j est grand (droite de pente unité et d'ordonnée à l'origine $a_j^k - b_j^k$).

Il reste à définir la formulation des paramètres a_j^k et b_j^k en fonction de $P_{ANA_j^k}$ et $\text{Temoin}_{ANA_j^k}$. Nous nous sommes appuyés pour cela sur la formulation proposée par Dufour et Garçon (1997) pour un tout autre usage soumis pourtant aux mêmes problématiques, à savoir l'assimilation de données de débits dans un modèle hydrologique pour la prévision. Le choix de la formulation des paramètres est effectué de manière à passer par le point $[\text{Temoin}_{ANA_j^k}, P_{ANA_j^k}]$ et à réaliser un compromis entre la ressemblance à la formulation additive pour les grandes valeurs et la ressemblance à la formulation multiplicative pour les faibles valeurs (voir Dufour et Garçon, 1997).

Les paramètres de l'équation 3.9 s'expriment finalement de la manière suivante :

$$a_j^k = P_{ANA_j^k} \quad \text{et} \quad b_j^k = \frac{(\text{Temoin}_{ANA_j^k})^2}{P_{ANA_j^k}} \quad (3.12)$$

La formulation de la méthode ANATEM pour les précipitations s'écrit donc ainsi :

$$\left[\widehat{P}_j^k\right]_{k=1\dots n} = \left[\frac{\text{Temoin}_j^2 + P_{ANA_j^k} \cdot \text{Temoin}_j}{\text{Temoin}_j + \frac{(\text{Temoin}_{ANA_j^k})^2}{P_{ANA_j^k}}} \right]_{k=1\dots n} \quad (3.13)$$

Afin d'éviter d'obtenir des valeurs infinies, il est à nouveau nécessaire d'effectuer un filtrage préalable, nous utiliserons pour cela la méthode qui a été proposée pour la formulation multiplicative (figure 3.5).

On peut à nouveau représenter graphiquement cette formulation d'ANATEM pour la reconstitution des précipitations d'une journée j , pour laquelle on dispose du modèle Temoin et de n journées analogues $[ANA_j^k]_{k=1\dots n}$. Les graphiques obtenus sont présentés sur la figure 3.7.

La courbe représentant la fonction présentée dans l'équation 3.13 est tracée en rouge sur la figure 3.7a. On constate graphiquement qu'elle tend bien pour les valeurs faibles de précipitations vers une formulation multiplicative, et pour les précipitations élevées vers

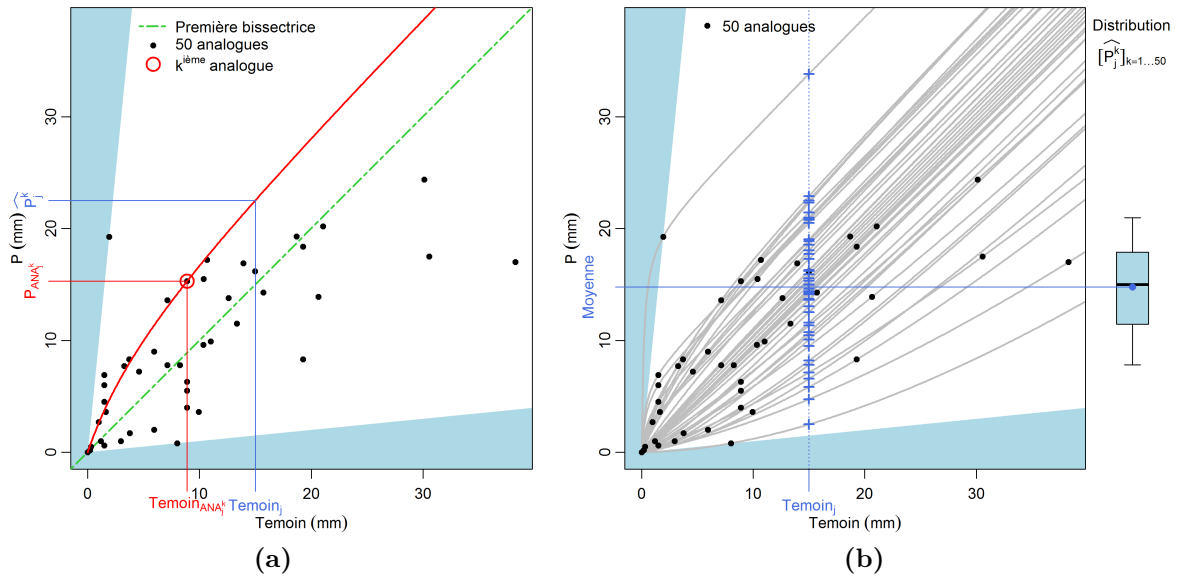


Figure 3.7 – Représentation graphique de la formulation d’ANATEM pour les précipitations : reconstitution d’une journée j connaissant la valeur $Temoi_n_j$ du modèle *Temoi* pour cette journée, ainsi que les valeurs $P_{ANA_j^k}$ et $Temoi_{ANA_j^k}$ des précipitations observées et du modèle *Temoi* pour 50 journées analogues. (a) Estimation des précipitations \hat{P}_j^k à partir d’une journée analogue k , (b) estimation d’un ensemble de précipitations $[\hat{P}_j^k]_{k=1\dots 50}$ à partir de 50 journées analogues (équation 3.13).

une formulation additive.

La figure 3.7b représente le faisceau de courbes obtenu en renouvelant l’opération pour les n journées analogues. On obtient finalement un ensemble de valeurs de précipitations reconstituées pour la journée j dont la distribution est représentée par le boxplot situé à droite du graphique. Dans l’exemple de la journée j représenté sur la figure 3.7b, l’utilisation des journées analogues a amené en moyenne à corriger légèrement et négativement la valeur du modèle *Temoi* : alors que le modèle *Temoi* fournissait pour la journée j une valeur de 15 mm, la moyenne des valeurs reconstituées à l’aide de la méthode ANATEM vaut 14.8 mm.

II | Données et paramètres pour la méthode des analogues

La méthode des analogues, présentée dans la section I.2, s’appuie sur des données climatiques de large échelle appelées données synoptiques pour repérer, dans une archive climatique, des journées analogues à la journée à reconstituer dont pourront être extraites les variables de reconstitution. Nous présentons dans cette section les données synoptiques utilisées pour la mise en œuvre de cette méthode ainsi que les différents paramètres permettant la sélection des journées analogues.

II.1 | Données synoptiques

L’utilisation de la méthode des analogues dans un objectif de reconstitution de données sur une période passée nécessite de disposer sur cette période, et sur une période

instrumentée servant de « réservoir d’analogues », de données synoptiques permettant la sélection des journées analogues.

Plusieurs projets et travaux menés depuis les années 1990 ont abouti à la production de longues archives de données climatiques appelées réanalyses. La démarche adoptée pour produire une réanalyse climatologique consiste à appliquer les moyens et les techniques de la prévision météorologique quotidienne moderne de manière rétrospective pour « rejouer » une période passée.

Les données produites par les modèles de prévision météorologique sont multiples, elles donnent une description précise de l’état atmosphérique qui peut avoir de multiples usages, au delà de la prévision météorologique opérationnelle, pour l’étude *a posteriori* des variations climatiques. Cependant, les méthodes et modèles de prévision opérationnelle étant en constante évolution, l’usage *a posteriori* des données issues de modèles utilisés en temps réel mettrait en évidence une variabilité « artificielle » du fait de leur forte hétérogénéité temporelle. L’idée de la réanalyse est d’utiliser, *a posteriori*, une méthode et un modèle uniques pour reconstituer un certain nombre de variables décrivant l’état atmosphérique sur une longue période.

Le modèle numérique de prévision utilisé pour la réanalyse est constamment actualisé par des données météorologiques observées via un processus appelé assimilation. La quantité et le type de données assimilées à chaque pas de temps varient fortement d’une réanalyse à l’autre, et au cours du temps pour certaines réanalyses.

Plusieurs grandes organisations nationales ou internationales sont à l’origine de réanalyses. Le National Center for Environmental Prediction (NCEP) et le National Center for Atmospheric Research (NCAR) des États-Unis ont produit la réanalyse « NCEP-NCAR » (Kalnay *et al.*, 1996), qui est régulièrement actualisée pour couvrir une période allant de 1948 à aujourd’hui.

Le centre européen de prévisions météorologiques à moyen terme (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts : ECMWF) est également à l’origine d’une réanalyse, appelée « ERA-40 » (Uppala *et al.*, 2005), et couvrant la période 1957-2002.

Pour trouver une archive couvrant une période plus ancienne, il faut se tourner vers la « 20th Century Reanalysis » (« 20CR », Compo *et al.*, 2011), issue du projet éponyme soutenu par le U.S. Department of Energy, et par le Climate Program Office de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Cette réanalyse est produite en assimilant uniquement des données de pression au niveau de la mer, ce qui permet de remonter à la fin du XIX^{ème} siècle. La période couverte par cette réanalyse est 1871-2010.

Au delà de ces réanalyses, d’autres types de données peuvent être utilisés pour la mise en œuvre de la méthode des analogues, c’est le cas des produits du projet « EMULATE », qui propose une archive de pressions quotidiennes au niveau de la mer sur la zone Europe et Nord-Atlantique, pour la période 1850-2003. Ces données, disponibles à un pas d’espace de 5°, ont été obtenues par interpolation à partir de données observées terrestres et maritimes.

II.2 | Paramètres utilisés pour la méthode des analogues

Il existe de multiples façons d’optimiser la méthode des analogues. De nombreux travaux ont été menés en ce sens, que ce soit dans une optique de prévision météorologique (Van Den Dool, 1994; Bontron, 2004; Ben Daoud *et al.*, 2010) ou de descente d’échelle de modèles climatiques de circulation globale (Teng *et al.*, 2012; Timbal et McAvaney, 2001).

Il ne s’agit pas ici de proposer une nouvelle méthode des analogues, mais bien de combiner les informations fournies par la méthode des analogues avec d’autres sources

d'information. Nous nous appuyerons donc sur une méthode pré-existante (Hingray *et al.*, 2013), qui a été développée pour la descente d'échelle de modèles climatiques dans le cadre du projet RIWER 2030 (Climat Régionaux et incertitudes, ressources en eau et énergétiques associées de 1960 à 2030). Il s'agit d'une évolution de la méthode décrite par Obled *et al.* (2002). Nous décrirons rapidement dans cette section les différents paramètres de cette méthode.

II.2.1 | Prédicteurs (variables synoptiques)

Les variables utilisées pour la qualification des journées analogues à une journée j sont les hauteurs des géopotentiels 700 et 1000 hPa, de la journée j à 0h00 et à 24h00, en différents points de l'espace correspondant aux nœuds de la grille de la réanalyse utilisée, à l'intérieur d'une fenêtre spatiale prédéfinie, centrée sur le sud de la France. La figure 3.8 montre la fenêtre spatiale d'analogie ainsi que les différents points utilisés pour une archive disponible au pas d'espace de 2° (exemple : réanalyse 20CR).

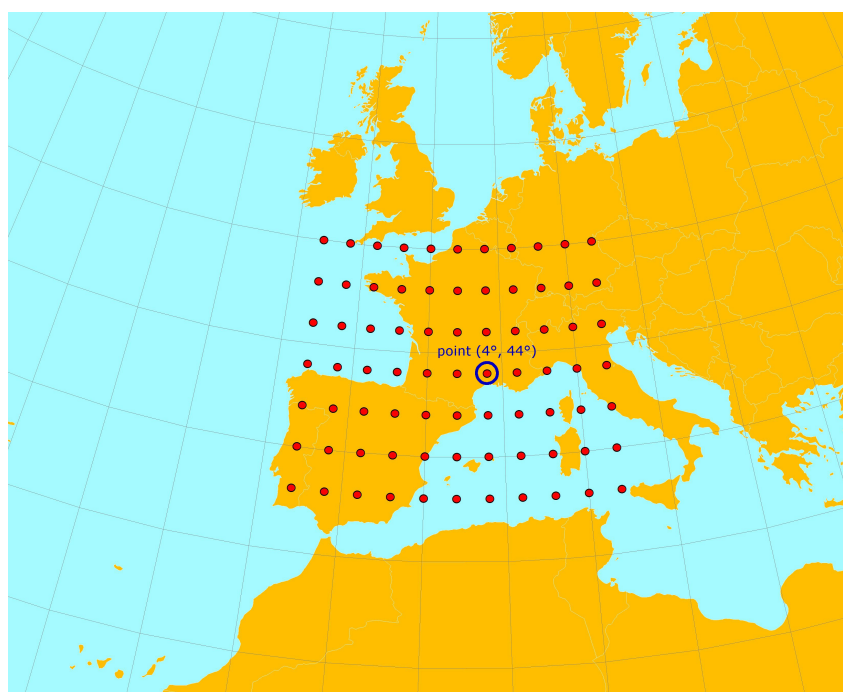


Figure 3.8 – Fenêtre spatiale des variables synoptiques utilisées pour l'analogie et points de la grille de la réanalyse 20CR.

II.2.2 | Métrique d'analogie

Une fois déterminées les variables synoptiques à utiliser, il reste à choisir une métrique permettant de qualifier les journées les plus « semblables » à la journée à reconstituer. On appelle généralement cette métrique distance d'analogie.

La distance d'analogie utilisée dans la méthode sur laquelle nous nous appuyerons est basée sur la distance de Teweles et Wobus (1954). Ce critère, qui a été initialement développé pour l'évaluation de la qualité des prévisions de géopotentiels, ne compare pas la distance entre les champs de géopotentiels mais plutôt la similitude de forme de ceux-ci en se basant sur les écarts entre les gradients de géopotentiels dans les directions Nord-Sud et Est-Ouest des deux situations pour chaque point de la grille spatiale d'analogie.

La distance de Teweles-Wobus s'écrit de la manière suivante :

$$TW = \frac{\sum_{i,j} |\Delta_{G_{i,j}^{NS}}| + \sum_{i,j} |\Delta_{G_{i,j}^{EO}}|}{\sum_{i,j} |M_{G_{i,j}^{NS}}| + \sum_{i,j} |M_{G_{i,j}^{EO}}|} \quad (3.14)$$

où $\Delta_{G_{i,j}^{NS}}$ (respectivement $\Delta_{G_{i,j}^{EO}}$) est l'écart entre les deux gradients Nord-Sud $G_{i,j}^{NS}$ (respectivement Est-Ouest $G_{i,j}^{EO}$) autour du point-grille de coordonnées $[i, j]$ du champ de la journée cible et de celui de la journée candidate et $|M_{G_{i,j}^{NS}}|$ (respectivement $|M_{G_{i,j}^{EO}}|$) est le maximum en valeur absolue des deux gradients Nord-Sud (respectivement Est-Ouest) autour du point-grille de coordonnées $[i, j]$ du champ de la journée cible et de celui de la journée candidate. Les gradients $G_{i,j}^{NS}$ et $G_{i,j}^{EO}$ sont calculés de la manière suivante :

$$G_{i,j}^{NS} = V_{i,j+1} - V_{i,j} \quad \text{et} \quad G_{i,j}^{EO} = V_{i+1,j} - V_{i,j} \quad (3.15)$$

où $V_{i,j}$ est la valeur du champ au point-grille de coordonnées $[i, j]$.

II.2.3 | Fenêtre temporelle

Pour une journée cible j à reconstituer, les analogues sont recherchés dans la chronique disponible avec une contrainte saisonnière de ± 60 jours, c'est-à-dire que, pour la reconstitution d'une journée j , seules les journées dont le jour de l'année est compris entre $JA(j) - 60$ et $JA(j) + 60$, où $JA(j)$ est le jour de l'année (de 1 à 366) correspondant à la journée j , sont considérées comme candidates.

Par ailleurs, dans le cas où la journée cible à reconstituer est incluse dans la couverture temporelle du réservoir d'analogues, par exemple dans le cadre d'une validation de la méthode, on ajoute une contrainte afin d'éviter la sélection de la journée cible comme analogue. Pour cela, la journée cible ainsi que les 15 journées qui la précèdent et les 15 journées qui la suivent sont exclues du réservoir d'analogues.

II.2.4 | Nombre d'analogues et échantillonnage

Le nombre n de journées analogues $[ANA_j^k]_{k=1\dots n}$ à rechercher pour chaque journée j à reconstituer fait partie des paramètres qui peuvent être optimisés pour la méthode des analogues. De la même manière que pour les autres paramètres, nous avons choisi ici de nous appuyer sur des travaux précédents et de fixer ce nombre d'analogues à 50. Ainsi, pour chaque journée cible, les 50 journées présentant la plus petite distance d'analogie avec la journée cible sont sélectionnées et classées par ordre croissant de distance d'analogie.

Une autre possibilité consistant à effectuer un échantillonnage pondéré de 50 analogues parmi les dix meilleurs sera également explorée (chapitre 5, section IV.1).

III | Quelles séries pour le témoin ?

Comme nous l'avons vu dans la section I, la méthode ANATEM permet de valoriser à la fois une information contenue dans des variables synoptiques telles que les champs de géopotentiels, et une information locale ou régionale appelée témoin.

L'information utilisée comme témoin doit être une série disponible au pas de temps journalier sur l'ensemble de la période de reconstitution, et dont les variations sont bien corrélées à celles de la série à reconstituer.

III.1 | Nature du témoin

Plusieurs possibilités ont été explorées quant à la nature de la série témoin. La première et la plus évidente est une série d'observations de la grandeur (pluie, température de l'air) à reconstituer à une station plus ou moins proche du point de reconstitution. Une autre possibilité consisterait à rechercher, parmi les variables produites par les réanalyses climatiques, une variable pouvant être représentative de la série à reconstituer.

III.1.1 | Séries observées

A l'heure actuelle, peu de séries climatiques continues sont disponibles numériquement au pas de temps journalier et depuis le début du XX^{ème} siècle sur le bassin de la Durance. Des travaux de recherche d'archives du même type que ceux que nous avons menés sur les séries hydrologiques (voir chapitre 2) permettraient sans aucun doute d'exhumer des données intéressantes. On peut d'ailleurs noter que, d'après (Imbeaux, 1892), on trouvait déjà en 1892 quatre stations de mesure de température de l'air et quarante stations de mesure des précipitations sur le bassin de la Durance et ses alentours.

A l'échelle européenne, la base « European Climate Assessment & Dataset » (ECA&D ; Klein Tank *et al.*, 2002; Klok et Klein Tank, 2009) regroupe des données climatiques au pas de temps journalier de plus de 2000 stations situées en Europe et sur le pourtour Méditerranéen. Il s'agit essentiellement de séries de températures de l'air et de précipitations, mais pour quelques stations on peut aussi trouver des données de pression atmosphérique, de couvert nuageux, de durée d'ensoleillement, de hauteur de neige ou d'humidité relative.

La base ECA&D ne comporte pas de séries correspondant à des stations situées sur le bassin de la Durance, mais on y trouve une série de températures de l'air à Marseille disponible de 1900 à 2002 et correspondant en fait à la station Météo-France numérotée 13055001 qui débute en 1868. Par ailleurs, une autre station Météo-France (13055025) fournit des données journalières de températures de l'air à Marseille sur la période 2000-2011. Nous avons donc pu reconstituer une série continue de températures de l'air à Marseille sur la période 1868-2011, qui nous servira de témoin régional pour la modélisation de températures de l'air sur le bassin de la Durance.

Pour la reconstitution de séries de précipitations encore une fois peu de données sont disponibles sur une aussi longue période, mais nous avons pu reconstituer une série quotidienne de précipitation à Gap. Cette série est constituée de 1883 à 1994 de la série de précipitations journalières à Gap EDF-DTG numérotée 2511, et de 2004 à 2011 de la série Météo-France n° 05061009 (Gap). Sur la période 1995-2003, nous n'avons pu retrouver de données mesurées à Gap et avons donc procédé à une reconstitution de la série à l'aide d'un modèle linéaire faisant intervenir quatre séries proches de Gap et disponibles sur cette période : les séries Météo-France n° 05046001 à Embrun et n° 05142001 à Saint-Firmin, et les séries EDF-DTG n° 2474 à Pelvoux et n° 1832 à Saint-Etienne-en-Dévoluy. Le modèle linéaire est calé au pas de temps mensuel sur la période 1959-1994 et son coefficient de détermination est de 0.96. L'équation du modèle est donnée ci-dessous (équation 3.16). La série de précipitations journalières à Gap ainsi constituée couvre finalement la période 1883-2011.

$$\widehat{P}_{Gap} = 0.40 \cdot P_{Embrun} + 0.30 \cdot P_{StFirmin} + 0.15 \cdot P_{Pelvoux} + 0.12 \cdot P_{StEtienne-en-Dévoluy} \quad (3.16)$$

III.1.2 | Séries issues de réanalyses

En raison de la difficulté que peut poser la recherche de séries quotidiennes d'observations pouvant servir de témoin, il paraît intéressant de savoir s'il est possible d'utiliser comme témoin une série quotidienne elle-même issue d'une réanalyse, mais pouvant apporter une information plus locale que celle apportée par les variables synoptiques via la méthode des analogues.

Pour la reconstitution de températures de l'air, nous avons expérimenté l'utilisation d'une série quotidienne d'épaisseur de la couche d'atmosphère entre les isopotentiels 700 et 1000 hPa (chapitre 5, section III). En effet, en raison des effets de dilatation de l'atmosphère, les variations de cette grandeur sont représentatives de celles de la température de l'air à la surface de la Terre. La série testée a été extraite de la réanalyse 20CR, au point-grille le plus proche du bassin de la Durance (4° , 44°) indiqué sur la figure 3.8.

Les réanalyses fournissent également des données reconstituées de températures au niveau du sol et de précipitations. Nous avons expérimenté l'utilisation de ces séries comme témoins pour la reconstitution des températures de l'air et des précipitations (chapitre 5, section III). Ces données ont également été extraites de la réanalyse 20CR. La grille des variables au sol de cette réanalyse étant légèrement différente de celle des variables synoptiques, le point le plus proche du bassin de la Durance est le point (3.8° , 44.8°).

III.2 | Qualité du témoin

L'un des intérêts de la méthode ANATEM réside dans le fait que les séries reconstituées localement (à l'échelle d'un sous-bassin versant de la Durance dans notre cas) s'appuient sur des informations de plus large échelle (régionale pour le témoin, synoptique pour l'apport des analogues). Cela permet de construire une série *a priori* homogène, contrairement à une série observée qui peut être dépendante des effets anthropiques ou météorologiques locaux (déplacement de station, modification des conditions de mesure, de l'environnement du pluviomètre, etc.).

Cependant, l'utilisation d'une série témoin régionale peut potentiellement amener des sources d'hétérogénéité similaires. Il est donc nécessaire de s'assurer dans un premier temps de la qualité et de l'homogénéité du témoin avant de l'utiliser. A cette fin, nous nous sommes appuyés sur une base de séries climatiques homogénéisées de référence afin de critiquer et, si besoin, d'homogénéiser les deux séries d'observations que nous souhaitons utiliser comme témoins.

III.2.1 | Méthode de critique : Analyse des résidus par rapport à un modèle linéaire

La méthode de critique de données que nous utiliserons ici est celle couramment utilisée à EDF DTG (Paquet, 2005). Il s'agit par cette méthode de détecter d'éventuelles irrégularités dans une série climatique en s'appuyant sur d'autres séries climatiques de stations plus ou moins proches. Pour cela, un modèle de régression linéaire est établi au pas de temps mensuel entre la série à analyser et un certain nombre de séries explicatives qui présentent une bonne corrélation avec la série analysée. On étudie ensuite la stabilité dans le temps de ce modèle à l'aide d'outils statistiques que sont le cumul de résidus associé aux ellipses de Bois (Bois, 1987), et le test d'Alexandersson (Alexandersson, 1986).

Dans notre cas, afin de ne pas biaiser l'interprétation des résultats par les hétérogénéités potentielles des séries explicatives, nous utiliserons pour la critique de la série de températures de l'air à Marseille des longues séries climatiques de référence homo-

générisées et fournies sur la France entière (70 séries de températures de l'air minimales et maximales disponibles sur la France) par Météo-France (Moisselin *et al.*, 2002). Pour les précipitations, nous utiliserons les séries homogénéisées dans le cadre du projet HISTALP (Auer *et al.*, 2007, 557 séries réparties sur l'ensemble des Alpes, disponibles sur www.zamg.ac.at/histalp).

Pour les séries de températures de l'air, le modèle est établi sur les séries de températures moyennes mensuelles. Pour les précipitations, on utilise les cumuls mensuels de précipitations, mais les calculs (établissement du modèle puis analyse des résidus) sont faits sur les racines carrées des cumuls mensuels. Ce choix, ainsi que celui du pas de temps mensuel permettent de se rapprocher des hypothèses à la base des ellipses de Bois et du test d'Alexandersson, à savoir que les résidus sont des variables indépendantes et identiquement distribuées (iid) suivant une loi normale.

Sélection du modèle linéaire. Pour la critique de la série climatique Y de longueur n , dont les valeurs s'écrivent $y(t), t = 1 \dots n$, un ensemble de K séries explicatives $X_{i,i=1\dots K}$ est disponible aux mêmes pas de temps $t = 1 \dots n$. Pour choisir le meilleur modèle linéaire représentant la série climatique temporelle étudiée Y à partir de ces séries explicatives, le critère BIC (« Bayesian Information Criterion », Schwarz, 1978, voir aussi Lebarbier et Mary-Huard, 2004) est utilisé. Ce critère combine la maximisation de la vraisemblance, représentant l'adaptation du modèle à la série étudiée, et la minimisation du nombre de séries explicatives utilisées (parcimonie du modèle).

Pour un nombre donné k de variables explicatives utilisées, un modèle linéaire représentant la série climatique temporelle étudiée Y à partir des séries explicatives $X_{i,i=1\dots k}$ peut s'écrire de la manière suivante :

$$\hat{y}(t) = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_i(t) \quad (3.17)$$

Les paramètres $a_{i,i=0\dots k}$ sont estimés de manière à maximiser la vraisemblance du modèle. Dans le cas de séries de précipitations, une contrainte imposant $a_0 = 0$ est ajoutée afin d'éviter l'apparition de valeurs négatives de précipitation. Les paramètres ainsi estimés sont notés $\hat{a}_{i,i=0\dots k}$.

Le BIC s'écrit de la manière suivante :

$$BIC = -2 \cdot \ln(L(\hat{a}_{i,i=0\dots k})) + k \cdot \ln(n) \quad (3.18)$$

avec

$$\ln(L(\hat{a}_{i,i=0\dots k})) = -\frac{n}{2} \cdot \ln(2\pi\sigma_\varepsilon^2) - \frac{1}{2\sigma_\varepsilon^2} \cdot \sum_{t=1}^n \left(a_0 + \sum_{i=1}^k a_i \cdot x_i(t) - y(t) \right)^2 \quad (3.19)$$

où $L(\hat{a}_{i,i=0\dots k})$ est la vraisemblance du modèle à k variables explicatives considéré, n la taille de l'échantillon (nombre d'observations), σ_ε^2 la variance des résidus du modèle, $y(t)$ la valeur observée de la série étudiée au pas de temps t , $x_i(t), i = 1 \dots k$ les valeurs des séries explicatives au même pas de temps et $\hat{a}_{i,i=0\dots k}$ les paramètres estimés du modèle.

Le meilleur modèle est celui présentant la plus faible valeur du BIC, ainsi, une forte valeur de la vraisemblance et un faible nombre de paramètres favorisent la sélection du modèle. Cela permet un compromis entre une bonne adéquation à l'observé (valeur élevée de la vraisemblance) et la parcimonie du modèle (faible nombre de paramètres).

Analyse des résidus. Les résidus du modèle 3.17 sont notés $\varepsilon(t) = y(t) - \hat{y}(t)$, $t = 1 \dots n$ et sont supposés être des variables indépendantes et identiquement distribuées (iid) selon une loi normale de moyenne nulle.

L'analyse des résidus cumulés du modèle permet de représenter l'évolution temporelle des écarts entre la série analysée Y et son estimation \hat{Y} . Dans l'hypothèse où la série étudiée est homogène, les résidus cumulés représentés en fonction du temps doivent être répartis aléatoirement autour de la droite horizontale d'ordonnée égale à la moyenne des résidus (nulle dans le cas d'une régression linéaire). Dans le cas contraire où la série étudiée n'est pas homogène, elle ne coïncide plus avec le modèle linéaire, et les résidus cumulés s'éloignent fortement de leur moyenne jusqu'au point de rupture éventuelle de la série étudiée pour s'en rapprocher à nouveau ensuite.

Les ellipses de Bois (Bois, 1987) représentent, pour un niveau de confiance donné, la limite à l'intérieur de laquelle restent les résidus cumulés, dans l'hypothèse où les résidus suivent une loi normale et adoptent un comportement aléatoire.

L'équation de l'ellipse de Bois au pas de temps t pour le degré de probabilité f et pour une série de n observations est :

$$S_\sigma(t) = \pm \alpha(f) \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{t \cdot (n - t)}{n - 1}} \quad (3.20)$$

où σ_ε est l'écart-type des résidus du modèle et $\alpha(f)$ est la valeur de la variable normale standard correspondant à l'intervalle de confiance $1 - f/2$. Pour l'ellipse de Bois correspondant à un intervalle de confiance à 90%, que nous utiliserons par la suite, on a $\alpha(f = 0.1) = 1.64$.

Test d'Alexandersson. Le test d'Alexandersson (Alexandersson, 1986) est un test d'homogénéité applicable à une série temporelle suivant une loi normale. Ce test est construit avec les mêmes hypothèses que les ellipses de Bois (résidus iid et suivant une loi normale). Il permet de compléter l'analyse graphique des résidus cumulés par une méthode plus objective et automatique de détection de ruptures.

Pour une série temporelle Z d'effectif n suivant une loi normale standard $\mathcal{N}(0, 1)$, le test T s'écrit :

$$T = \max_{k=1..n} (T_k) = \max_{k=1..n} \left[k \cdot \bar{z}_1^2 + (n - k) \cdot \bar{z}_2^2 \right] \quad (3.21)$$

$$\text{avec } \bar{z}_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k z_i \text{ et } \bar{z}_2 = \frac{1}{n - k} \sum_{i=k+1}^n z_i \quad (3.22)$$

Si le test T dépasse la valeur critique pour un niveau de confiance donné, la série peut être considérée comme non-homogène. Le moment le plus probable de rupture est alors celui correspondant à l'indice k présentant le maximum des T_k .

Ce test s'applique bien dans le cadre de la critique de données : pour un niveau de confiance donné, il permet de tester l'hypothèse d'homogénéité du résidu entre la série étudiée Y et un modèle régressif \hat{Y} basé sur des séries explicatives, et de dater les éventuelles ruptures.

Dans notre cas, il est appliqué à la série des résidus relatifs normés :

$$Z = \frac{(\varepsilon - \bar{\varepsilon})}{\sigma_\varepsilon} \quad (3.23)$$

où $\bar{\varepsilon}$ est la moyenne de la série de résidus (nulle pour une régression linéaire) et σ_ε son

écart-type.

La valeur critique T_{max} du test d'Alexandersson au-delà de laquelle on considère que la série n'est plus homogène dépend de l'effectif de la série et du niveau de confiance choisi. Alexandersson propose des graphes représentant ces valeurs critiques en fonction de l'effectif pour les niveaux de confiance 90 et 95 %. Nous utiliserons le niveau de confiance 90%, à titre d'exemple, la valeur critique indiquée pour une population de 360 valeurs (30 ans de données mensuelles) à ce niveau de confiance est 8.6.

Détection multi-ruptures. Le test d'Alexandersson décrit ci-dessus permet la détection d'une rupture dans une série climatique par l'analyse des résidus entre cette série et un modèle explicatif. La rupture est datée au point présentant la plus forte valeur du test d'Alexandersson. Afin de rendre possible la détection de ruptures multiples, lorsque qu'une rupture est détectée dans une série, celle-ci est divisée en deux au niveau du point de rupture, et la procédure de détection est à nouveau appliquée sur les deux sous-séries obtenues. Les ruptures sont hiérarchisées par ordre d'importance. Notre algorithme est cependant paramétré de manière à détecter au maximum dix ruptures dans une même série, et à ne pas créer de sous-séries de moins de deux ans.

III.2.2 | Série quotidienne de températures de l'air à Marseille

Comme nous l'avons dit dans la partie III.1, la série de températures de l'air à Marseille dont nous disposons comme témoin est constituée de deux sous-séries correspondant à deux stations Météo-France : la station 13055001 de 1868 à 2002, et la station 13055025 de 2003 à 2011.

Pour critiquer cette série, nous allons la comparer aux longues séries homogénéisées de Météo-France. Parmi ces dernières, disponibles en différents points de France, nous avons effectué un premier tri afin de ne conserver que des séries débutant au plus tard en 1883, date à laquelle débiteront nos reconstitutions climatiques (voir chapitre 4).

Un modèle linéaire permettant de représenter, au pas de temps mensuel, la série de températures de l'air à Marseille (série analysée) à partir des séries homogénéisées dont nous disposons (séries explicatives) est ensuite établi en s'appuyant sur le critère *BIC* (équation 3.18). Finalement, les séries homogénéisées suivantes sont retenues comme étant les plus explicatives : Orange, Toulouse Blagnac, Montpellier, Perpignan et Limoges. Le coefficient de détermination du modèle est de 0.99. L'utilisation de séries pouvant être situées à plusieurs centaines de kilomètres comme explicatives d'une série à reconstituer est rendue possible pour les températures de l'air par la forte corrélation spatiale de ces dernières.

A partir de ce modèle linéaire, l'algorithme utilisé pour l'analyse des résidus cumulés à l'aide des ellipses de Bois et du test d'Alexandersson met en évidence un certain nombre de ruptures. La figure 3.9 présente les résidus mensuels cumulés entre le modèle et la série de Marseille, ainsi que les valeurs du Test d'Alexandersson. La valeur critique à 90% pour l'effectif de la population étudiée (1500 valeurs mensuelles) est de 9.4. Elle est mise en évidence sur le graphique par une ligne horizontale.

On remarque que les résidus cumulés s'éloignent très fortement des ellipses de Bois à 90% pour dépasser -200°C dans les années 1940, ce qui représente finalement un biais moyen raisonnable entre 1883 et 1943 d'environ -0.3°C . La valeur T du test d'Alexandersson atteint un maximum de 337 pour le mois de juillet 1943, date de la rupture principale. Les différentes ruptures sont mises en évidence sur le graphique par des lignes bleues verticales. Ces ruptures ont été établies en divisant successivement la série en deux sous-séries au niveau de chaque rupture détectée. L'ordre d'importance des différentes ruptures est

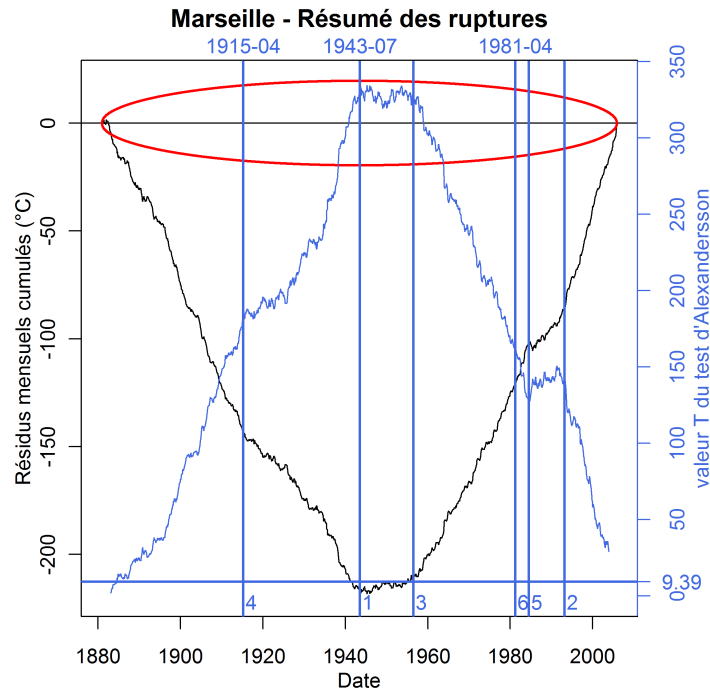


Figure 3.9 – Résultats de la critique de la série de températures de l'air à Marseille par comparaison à un modèle linéaire. Résidus cumulés du modèle linéaire en noir, valeurs du test d'Alexandersson en bleu, ellipses de Bois à 90% en rouge. Les ruptures détectées sont identifiées par une ligne verticale et hiérarchisées par un chiffre bleu en bas du graphique. 9.39 est la valeur critique du test d'Alexandersson pour un niveau de confiance à 90% pour l'effectif de la population étudiée (1500 valeurs mensuelles).

indiqué par un chiffre en bas du graphique.

L'analyse ayant mis en évidence d'importantes ruptures dans la série de Marseille en comparaison avec les séries homogénéisées Météo-France utilisées pour la critique, une homogénéisation de la série de Marseille est ensuite effectuée. Pour cela, chaque portion de la série séparée par deux ruptures est corrigée par un coefficient dépendant de la moyenne des résidus observés sur cette portion. La correction est faite en prenant comme référence la dernière période de la série qui ne sera donc pas modifiée. Les correctifs appliqués pour l'homogénéisation de la série de températures de l'air à Marseille sont reportés dans le tableau 3.1. La figure 3.10 montre la série de températures de l'air à Marseille observée et la série obtenue après homogénéisation. Les mêmes séries sont représentées en anomalie de températures annuelles sur la figure 3.11, où les différentes séries homogénéisées par Météo-France et utilisées pour la critique ont été ajoutées

III.2.3 | Série quotidienne de précipitations à Gap

Pour la critique de la série de précipitations à Gap, nous avons utilisé comme référence les séries de précipitations homogénéisées issues du projet HISTALP (Auer *et al.*, 2007).

L'optimisation du modèle linéaire selon le critère *BIC* a sélectionné cinq séries explicatives correspondant aux stations de Lyon Bron, Marseille Marignane, Nice Aéroport, Orange et Saint-Paul-les-Durance. Le coefficient de détermination de ce modèle linéaire au pas de temps mensuel est égal à 0.63. Cette valeur relativement faible s'explique en partie par le fait que l'adaptation d'un modèle linéaire expliquant une série à critiquer est plus difficile pour les précipitations que pour les températures de l'air en raison de la plus grande variabilité spatiale du phénomène. Une meilleure reconstitution pour les

Début période	Fin période	Correctif
01/1881	04/1915	+0.91°C
05/1915	07/1943	+0.79°C
08/1943	07/1956	+0.52°C
08/1956	04/1981	+0.26°C
05/1981	07/1984	+0.05°C
08/1984	03/1993	+0.42°C
04/1993	12/2011	0

Tableau 3.1 – Correctifs appliqués pour l'homogénéisation de la série de températures de l'air à Marseille.

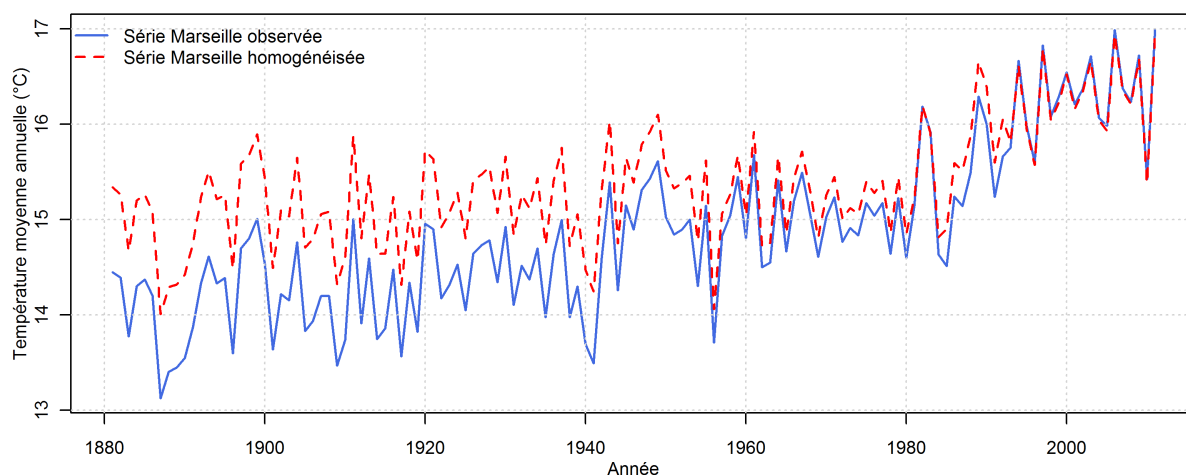


Figure 3.10 – Séries de températures de l'air annuelles à Marseille observée et homogénéisée.

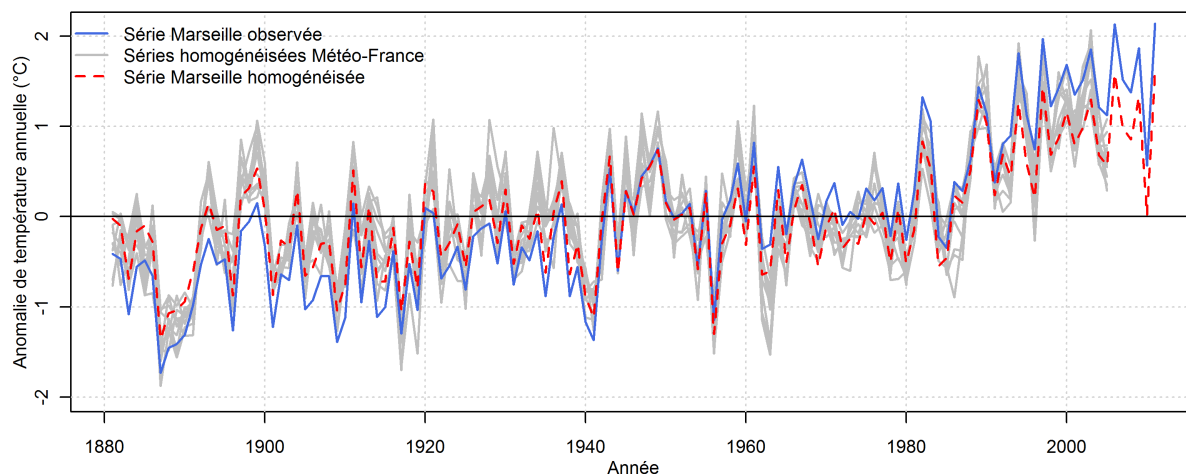


Figure 3.11 – Séries d'anomalies annuelles de températures de l'air à Marseille observée et homogénéisée, et séries Météo-France utilisées comme références. L'anomalie annuelle de température de l'air est calculée par différence entre la valeur moyenne annuelle et la moyenne interannuelle de la série.

précipitations nécessiterait donc des séries explicatives géographiquement plus proches de la série à critiquer, ce dont nous ne disposons pas pour la critique des précipitations à Gap.

L'analyse des résidus cumulés du modèle, présentée sur la figure 3.12, n'a pas révélé

d'hétérogénéités dans la série de précipitations à Gap. Celle-ci sera donc utilisée en l'état comme témoin régional pour les reconstitutions de précipitations. On peut toutefois noter que, du fait de la performance moyenne du modèle explicatif, son caractère discriminant est également plus faible. On observe à ce propos sur la figure 3.12 des périodes qui, bien que statistiquement non significatives, montrent un comportement non aléatoire des résidus. C'est le cas par exemple d'une courte période dans les années 1970 pendant laquelle les résidus cumulés décroissent continuellement.

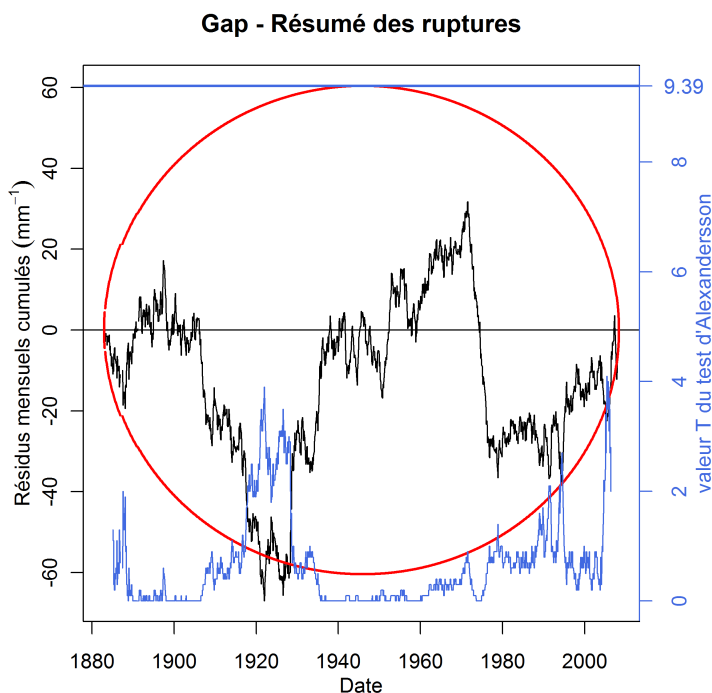


Figure 3.12 – Résultats de la critique de la série de précipitations à Gap par comparaison à un modèle linéaire. Résidus cumulés du modèle linéaire en noir, valeurs du test d'Alexandersson en bleu, ellipses de Bois à 90% en rouge. 9.39 est la valeur critique du test d'Alexandersson pour un niveau de confiance à 90% pour l'effectif de la population étudiée (1500 valeurs mensuelles).

IV | Synthèse du troisième chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre une méthode originale appelée ANATEM pour la reconstitution de séries climatiques locales (précipitations ou températures de l'air en un point donné ou à l'échelle d'un bassin versant) au pas de temps journalier. Cette méthode permet la combinaison de deux sources d'information traditionnellement utilisées individuellement pour la reconstitution, la critique ou la simulation de séries de données climatiques. Il s'agit d'une part d'une information régionale appelée témoin, généralement une série climatique observée au pas de temps journalier, et d'autre part d'une information climatique à l'échelle synoptique, exploitée au travers de la méthode de descente d'échelle statistique appelée méthode des analogues qui consiste à rechercher dans une archive climatique des journées présentant une situation atmosphérique semblable à celle de la journée cible. La méthode ANATEM fournit ainsi, pour chaque variable et chaque journée cibles, un ensemble probabiliste de reconstitutions issues de la combinaison de ces deux types d'information. On peut la résumer de la manière suivante : la température (ou précipitation) reconstituée pour la journée cible est obtenue à partir de l'information

régionale (témoin), corrigée des erreurs identifiées au travers de journées analogues.

Les paramètres utilisés pour l'utilisation de la méthode des analogues ont été décrits dans la deuxième partie de ce chapitre. Nous n'avons pas effectué d'optimisation de ces paramètres mais nous nous sommes appuyés sur des travaux menés dans le cadre du projet RIWER 2030 sur le bassin de la Durance. L'existence de la réanalyse climatique « 20CR » va permettre une application de la méthode sur une longue période puisque celle-ci débute en 1871.

En ce qui concerne le témoin régional, la principale piste exploitée est celle de l'utilisation d'une série quotidienne d'observations de précipitations ou de températures de l'air préalablement critiquée et homogénéisée. Il est également possible d'utiliser des séries quotidiennes elles-mêmes issues d'une réanalyse climatique.

L'application de cette méthode de reconstitution au cas du bassin de la Durance sera présentée dans le chapitre suivant.

Reconstitution de séries climatiques sur le bassin de la Durance

Nous présentons dans ce chapitre les reconstitutions de précipitations et de températures construites à l'aide de la méthode ANATEM sur 22 bassins versants faisant partie du bassin de la Durance. Nous rappelons dans un premier temps la démarche adoptée et les données utilisées, puis nous présentons les outils mis en place pour l'évaluation des reconstitutions par comparaison avec les données observées sur la période 1948-2010. Les résultats obtenus sont présentés en détail sur un bassin exemple, puis de manière plus globale sur l'ensemble des 22 bassins étudiés.

Sommaire

I	Méthodologie	102
II	Outils d'évaluation des reconstitutions	103
III	Exemple - Reconstitution de séries climatiques sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette	107
III.1	Reconstitution de la série de températures moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette	108
III.2	Reconstitution de la série de précipitations moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette	125
IV	Analyse sur un échantillon de 22 bassins versants	140
IV.1	Reconstitution des séries de températures de l'air	140
IV.2	Reconstitution des séries de précipitations	150
V	Synthèse du quatrième chapitre	166

I | Méthodologie

La méthode ANATEM, décrite au chapitre 3, a été utilisée pour reconstituer les séries de températures de l'air et de précipitations spatialisées sur les 22 bassins de l'échantillon de stations de débits présentés au chapitre 1 (section II.2). Les données utilisées pour ces reconstitutions sont présentées dans le chapitre 3 et résumées ci-dessous. La figure 4.1 rappelle la localisation des bassins versants concernés et des deux séries utilisées comme témoins.

Reconstitution des températures de l'air :

- **Données synoptiques** pour la recherche d'analogues : géopotentiels quotidiens 700 et 1000 hPa issus de la réanalyse « 20CR » (1871 - 2010) ;
- **Donnée régionale témoin** : série quotidienne de températures de l'air à Marseille (1868 - 2010) ;
- **Données cibles** : températures de l'air moyennes quotidiennes sur le bassin versant, issues de la réanalyse SPAZM (1948 - 2010) ;

Reconstitution des précipitations :

- **Données synoptiques** pour la recherche d'analogues : géopotentiels quotidiens 700 et 1000 hPa issus de la réanalyse « 20CR » (1871 - 2010) ;
- **Donnée régionale témoin** : série quotidienne de précipitations à Gap (1883 - 2011) ;
- **Données cibles** : précipitations moyennes quotidiennes sur le bassin versant, issues de la réanalyse SPAZM (1948 - 2010).

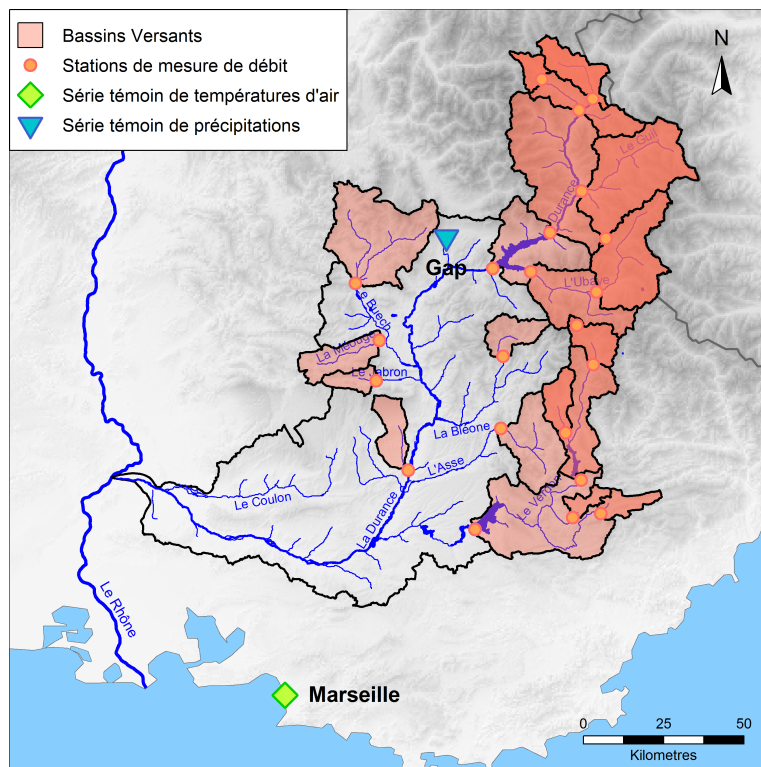


Figure 4.1 – Localisation des 22 bassins cibles et des deux séries témoin utilisées pour les reconstitutions climatiques.

Les reconstitutions sont faites sur la période de disponibilité commune de l'ensemble des données nécessaires. La période « réservoir » utilisée pour la recherche des dates analogues est la période de disponibilité des données climatiques cibles.

- **Période de reconstitution** : 1883 - 2010
- **Période de calage du modèle *Temoin*** : 1948 - 2010
- **Période de recherche de journées analogues, ou réservoir d'analogues** : 1948 - 2010

Étant donné que la période utilisée comme réservoir d'analogues est la même quel que soit la variable à reconstituer, une matrice unique de dates analogues a été établie et utilisée pour l'ensemble des applications décrites ici. Ainsi, pour chaque journée j de la période de reconstitution, un ensemble de 50 journées $[ANA_j^k]_{k=1\dots 50}$ présentant une situation synoptique similaire à celle de la journée à reconstituer a été recherché dans la période « réservoir ». Les dates de ces journées ont été consignées dans une matrice qui a été utilisée par la suite pour l'ensemble des reconstitutions. Pour chaque journée à reconstituer, les 50 dates analogues sont classées du « meilleur » analogue au moins bon.

Afin de quantifier l'apport de la méthode ANATEM par rapport aux deux méthodes de référence qu'elle combine, trois reconstitutions sont construites pour chaque bassin et chaque variable à reconstituer (température de l'air et précipitation). On nommera ces trois modèles de la manière suivante :

- **ANA** : reconstitution obtenue en utilisant l'information synoptique via la méthode des analogues décrite dans le chapitre 3, section I.2 ;
- **TEM** : reconstitution obtenue en utilisant l'information régionale via le modèle témoin décrit dans le chapitre 3, section I.1 ;
- **ANATEM** : reconstitution obtenue en combinant l'information synoptique et l'information régionale via la méthode ANATEM décrite dans le chapitre 3, section I.3 (équations 3.5 et 3.13).

On notera que les reconstitutions obtenues à partir des modèles ANA et ANATEM sont probabilistes puisque, pour chaque journée à reconstituer, on utilise 50 journées analogues qui correspondent à autant de valeurs du modèle, alors que le modèle TEM est utilisé de manière déterministe (une seule valeur modélisée par jour).

Concernant l'utilisation de l'information régionale, les modèles *Temoin* utilisés ne sont pas les mêmes selon la méthode (TEM / ANATEM) et la variable reconstituée (température / précipitations). Pour la reconstitution des séries de températures de l'air par la méthode TEM la formulation saisonnalisée (équation 3.2) a été utilisée, alors que dans le cas de la méthode ANATEM nous avons utilisé la formulation simple (équation 3.1). Pour la reconstitution des séries de précipitations la formulation simple (équation 3.3) a été utilisée à la fois pour la méthode TEM et la méthode ANATEM. L'influence de ces différentes formulations sur la qualité des reconstitutions sera discutée dans la section I du chapitre 5.

II | Outils d'évaluation des reconstitutions

Nous cherchons dans la suite de ce chapitre à qualifier les reconstitutions climatiques effectuées sur les différents sous-bassins de notre sélection, et à comparer les reconstitutions obtenues à l'aide de la méthode ANATEM avec celles obtenues via les deux méthodes de référence sur lesquelles elle s'appuie, ANA et TEM.

Pour cela, nous utiliserons comme référence les séries climatiques quotidiennes spatialisées SPAZM, disponibles sur la période 1948 - 2010. Comme écrit dans la partie I, ce sont ces mêmes séries qui sont utilisées comme données locales pour l'application de la méthode. Nous utiliserons par la suite le terme d'« observations » pour désigner ces données, bien qu'il ne s'agisse pas d'observations directes mais de données spatialisées à partir de plusieurs postes d'observations.

Il s'agit donc de comparer, sur la période 1948 - 2010, la série reconstituée à la série SPAZM considérée comme observée. Cette comparaison sera faite à la fois au pas de temps journalier, qui est le pas de temps de la reconstitution, mais aussi à des pas de temps plus agrégés (mensuel et annuel) car, dans une optique d'analyse de la variabilité hydrologique du bassin de la Durance, il est important d'évaluer la capacité de la reconstitution à reproduire correctement une variabilité plus « basse-fréquence ». Par ailleurs, pour les applications d'ingénierie dans l'évaluation des ressources en eau, les pas de temps mensuel et annuel sont généralement largement suffisants.

En ce qui concerne le pas de temps annuel, nous avons choisi d'agréger les données par année hydrologique, fixée par convention du premier octobre au 30 septembre, afin d'éviter le transfert d'un pas temps à l'autre d'une partie du bilan hydrologique (stock neigeux). On appellera « année hydrologique 2000 » l'année hydrologique courant du premier octobre 1999 au 30 septembre 2000.

Le coefficient de corrélation r entre la série observée et la série reconstituée calculé pour différents pas de temps permet de mesurer la capacité de la reconstitution à reproduire temporellement, à plus ou moins long terme, les variations de la grandeur reconstituée (alternance de périodes humides/sèches ou chaudes/froides). La capacité de la reconstitution à reproduire l'amplitude de ces mêmes variations, également importante dans le cadre d'applications pour l'étude de la variabilité climatique et hydrologique, sera évaluée à l'aide du ratio des écarts-types α . Enfin, le ratio des moyennes β permet de quantifier le biais global de la reconstitution. Ces trois critères peuvent également être compilés en un critère unique appelé Kling-Gupta Efficiency (KGE ; Gupta *et al.*, 2009). Les formulations de ces différents critères (dont la valeur optimale est de 1) sont données ci-dessous (équations 4.1 à 4.3). Le coefficient de corrélation s'exprime de la manière suivante :

$$r = \frac{\sigma_{obs \cdot mod}}{\sigma_{obs} \sigma_{mod}} \quad (4.1)$$

où $\sigma_{obs \cdot mod}$ est la covariance de l'observé et du modélisé, σ_{obs} et σ_{mod} l'écart-type des observés et l'écart-type des modélisés. Les ratios des écarts-types et des moyennes s'écrivent respectivement :

$$\alpha = \frac{\sigma_{mod}}{\sigma_{obs}} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{\mu_{mod}}{\mu_{obs}} \quad (4.2)$$

où μ_{mod} est la moyenne des modélisés et μ_{obs} la moyenne des observés. Enfin, le critère de Kling-Gupta s'exprime ainsi :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2} \quad (4.3)$$

Ce dernier critère n'est pas utilisé directement pour l'évaluation des reconstitutions mais sera utilisé dans le chapitre 6 pour la calibration du modèle hydrologique.

Afin de représenter les 50 reconstitutions faites à chaque pas de temps (issues des 50 journées analogues), ces critères seront, pour une station donnée, présentés sous forme de boxplots schématisant les quantiles 10%, 25%, 50%, 75% et 90% de la distribution des cinquante valeurs (voir figure 2.13). Nous nous intéresserons également à la valeur de ces paramètres pour la série constituée par la moyenne à chaque pas de temps des cinquante

valeurs (série modélisée moyenne ou reconstitution moyenne).

Pour les grandeurs présentant une forte saisonnalité (ex. : températures de l'air journalières ou mensuelles), on peut obtenir des valeurs de coefficient de corrélation « artificiellement » élevées, du fait qu'une partie importante de la variabilité de la série est portée par la saisonnalité. Afin de fournir un critère plus discriminant pour ces modèles, on calculera le coefficient de corrélation entre séries d'anomalies par rapport au régime moyen observé. La série d'anomalies est obtenue en soustrayant à la valeur journalière la valeur du régime interannuel lissé des observés correspondant au même jour de l'année.

Cependant, on s'intéressera également à la capacité de la reconstitution à reproduire la saisonnalité de la variable cible au travers d'un graphique représentant le régime interannuel observé et reconstitué.

Le diagramme de Taylor (Taylor, 2001) permet de synthétiser sur un graphique les performances en terme de corrélation et de ratio d'écart-type de différents modèles. Un exemple est donné à la figure 4.2. Le point optimal, représenté en rouge sur le graphique, est le point de coordonnées [1, 1]. Chacune des 50 reconstitutions individuelles est représentée par un point gris et la reconstitution moyenne est symbolisée par un losange bleu. La distance au point rouge est l'erreur quadratique moyenne normalisée (i.e. divisée par l'écart-type des observés) entre le modèle et l'observé, les arcs de cercle en trait plein vert indiquent quelques valeurs repère de ce paramètre.

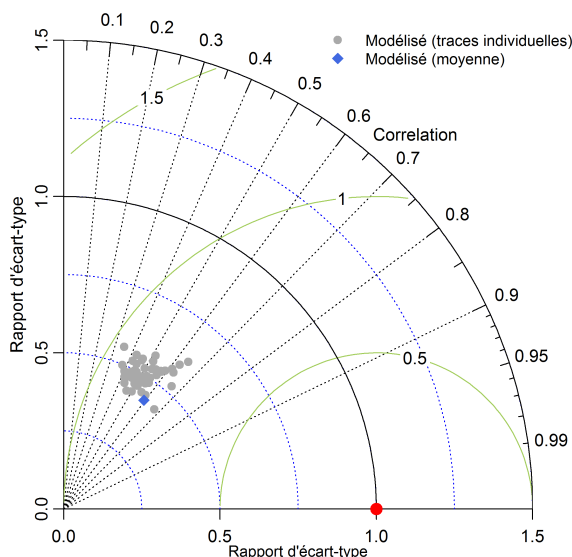


Figure 4.2 – Représentation des performances de la reconstitution sous forme d'un diagramme de Taylor.

On s'intéressera également à la capacité de la reconstitution à représenter la distribution de la grandeur modélisée. Pour cela on représente, en fonction des valeurs classées de la grandeur modélisée, leur fréquence empirique au non-dépassement calculée de la manière suivante (fréquence empirique de Weibull) :

$$F(x_{(i)}) = \frac{i}{n+1} \quad (4.4)$$

où $x_{(i)}$ est la $i^{\text{ème}}$ statistique d'ordre ($i^{\text{ème}}$ valeur classée) et n le nombre de valeurs de la série de données.

Un exemple de ce type de graphique est montré sur la figure 4.3, pour le pas de temps annuel. La distribution des valeurs observées est représentée par des points rouges, chacune des 50 reconstitutions individuelles est représentée par un trait gris et la recons-

titution moyenne par des losanges bleus. Lorsque le pas de temps est plus fin (mensuel ou journalier), les points et losanges sont remplacés par un trait continu en raison du nombre trop élevé de points. Afin de permettre la comparaison, les distributions des modélisés sont calculées sur la même période que celles des observés. Dans l'exemple présenté sur la figure 4.3, la variabilité de la grandeur à reconstituer (température annuelle) est largement sous-estimée par la reconstitution ce qui se traduit par une distribution nettement plus « resserrée » des valeurs classées de la reconstitution. Par exemple, 20% des valeurs observées sont inférieures à 3°C, alors que seulement 2 à 5% des valeurs reconstituées le sont.

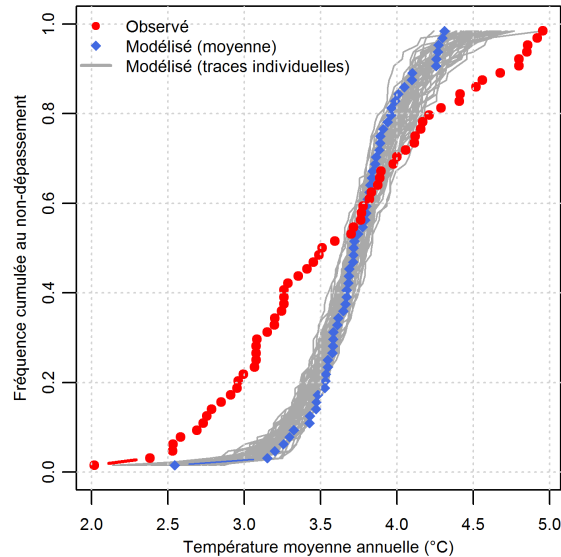
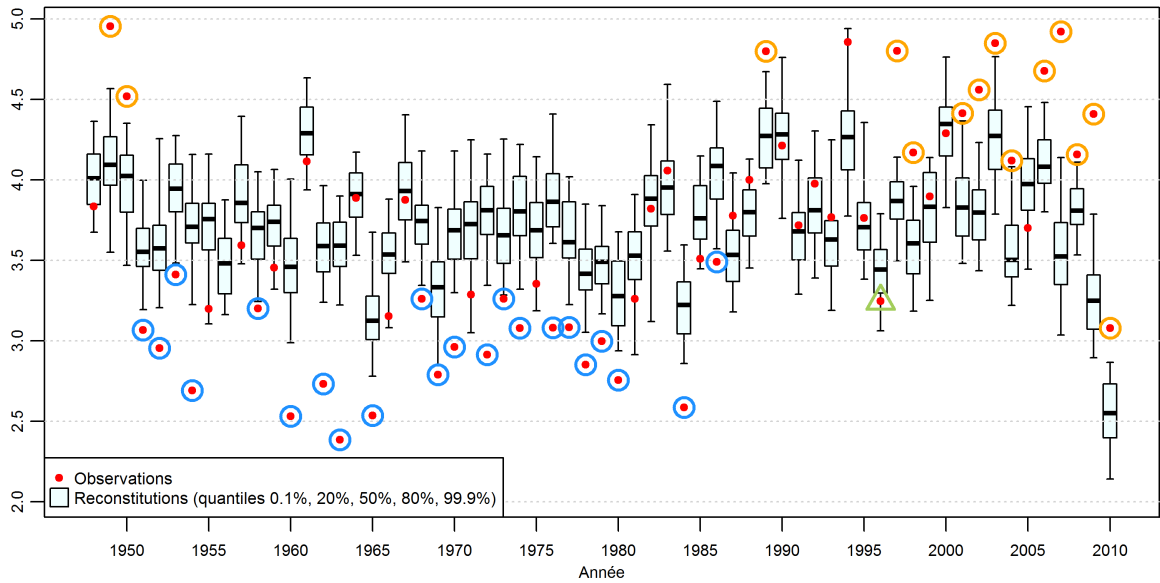


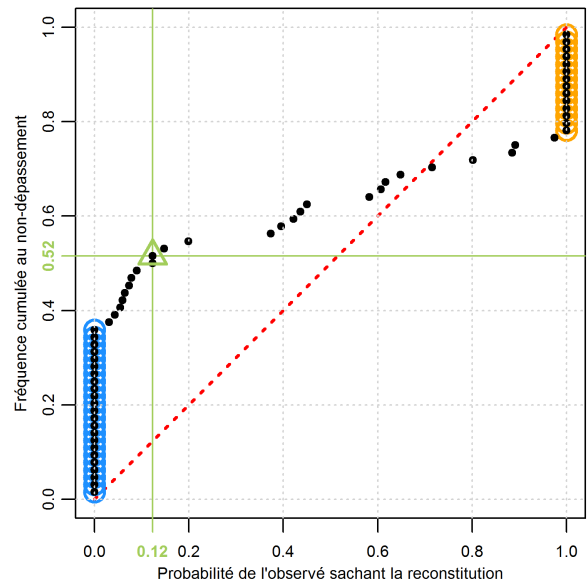
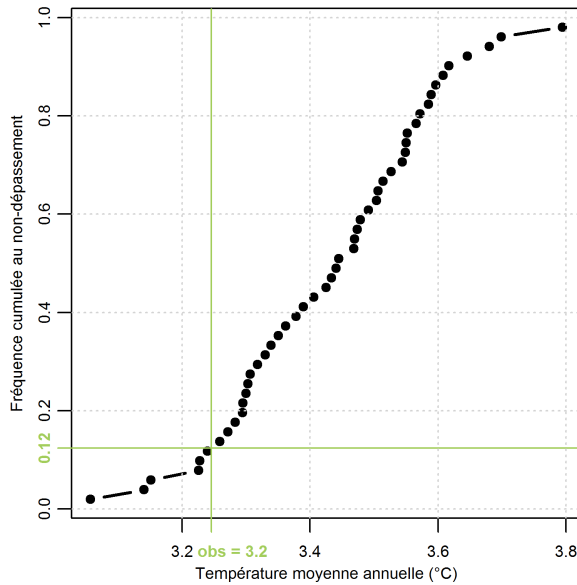
Figure 4.3 – Représentation des distributions de l'observé et des reconstitutions.

L'un des intérêts de la méthode ANATEM (comme de la méthode des analogues) étant son caractère probabiliste au travers d'une reconstitution multiple à chaque pas de temps, il paraît intéressant d'analyser les performances des reconstitutions d'un point de vue probabiliste. Pour cela, on représente pour chaque pas de temps la « probabilité de l'observé sachant la reconstitution ». Plus concrètement, cette valeur correspond à la « place » de la valeur observée d'un pas de temps donné dans la distribution des 50 valeurs reconstituées du même pas de temps. La figure 4.4 donne un exemple de construction de ce type de graphique, appelé diagramme de fiabilité et généralement utilisé pour l'évaluation des prévisions probabilistes (Wilks, 1995).

Pour l'année 1996, la valeur observée vaut 3.2 (triangle vert). Elle se trouve, dans la distribution des modélisés schématisée par un boxplot sur la figure 4.4a, entre le quantile 0.1% et le quantile 20%. La distribution des modélisés de l'année 1996 est présentée sur la figure 4.4b et on peut y lire la probabilité de non-dépassement de la valeur observée sachant la reconstitution, qui est de 0.12. C'est l'ensemble de ces probabilités pour chacun des pas de temps qui sont reportées en fonction de leur fréquence empirique sur la figure 4.4c. On peut lire ce graphique de la manière suivante : pour 52% des pas de temps, l'observé se trouve sous le quantile 12% de la distribution des modélisés. Lorsque la valeur observée se trouve sous le minimum des valeurs reconstituées on a une probabilité nulle (cercles bleus), tandis que la probabilité vaut 1 quand l'observé est supérieur au maximum des reconstitués (cercles oranges). Dans notre exemple, 38% des valeurs observées ont une probabilité de non-dépassement nulle et 22% ont une probabilité de 1. Dans le cas d'une reconstitution probabiliste bien calibrée, les points du diagramme de fiabilité (figure 4.4c) devraient être répartis selon la première bissectrice : une probabilité de non-dépassement



(a) Chronique annuelle des reconstitutions (boxplots des 50 valeurs) et des observations (points rouges)



(b) Distribution des valeurs modélisées pour l'année 1996 (c) Diagramme de fiabilité (pas de temps annuel)

Figure 4.4 – Construction d'un diagramme de fiabilité. L'année 1996 est prise comme exemple et indiquée sur les graphes (a) et (c) par un triangle vert.

de l'observé sachant la reconstitution de 20% par exemple devrait être observée pour 20% des pas de temps.

III | Exemple - Reconstitution de séries climatiques sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette

Afin de présenter dans le détail les performances des reconstitutions ANA, TEM et ANATEM de températures de l'air et de précipitations, nous avons choisi de nous focaliser dans un premier temps sur un seul bassin : celui de l'Ubaye à Barcelonnette. Nous

présentons donc dans cette partie les résultats obtenus pour chacune des deux séries à reconstituer (températures de l'air et précipitations spatiales sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette) avec les trois méthodes introduites dans le chapitre 3 : ANA, TEM et ANATEM. Pour chaque reconstitution, l'analyse se fera sur les différents critères présentés dans la section II et pour les trois pas de temps journalier, mensuel et annuel.

III.1 | Reconstitution de la série de températures moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette

III.1.1 | Modèle ANA

Les graphiques présentant les performances de la reconstitution de la série de températures de l'air spatiales sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette par la méthode des analogues sont donnés sur la figure 4.5 pour le pas de temps journalier, la figure 4.6 pour le pas de temps mensuel et la figure 4.7 pour le pas de temps annuel.

Intéressons-nous dans un premier temps au pas de temps journalier. La figure 4.5a permet une première évaluation subjective, pour l'année 2003, de la reconstitution. La moyenne des modélisés semble reproduire de manière relativement fidèle la variabilité de la température d'un jour à l'autre, mais peut parfois être biaisée en moyenne à l'échelle de deux à trois mois, comme de mi-juin à mi-septembre où la température est sous-estimée par le modèle. Ces périodes présentant les erreurs les plus importantes correspondent aux mois les plus froids et aux mois les plus chauds de l'année, et d'une manière générale on observe une certaine difficulté de la reconstitution moyenne à représenter les valeurs extrêmes des températures journalières.

Si l'on regarde les scores calculés sur la période 1948-2010 (figure 4.5b), on constate que la corrélation entre observé et modélisé est correcte : de l'ordre de 0.8 pour chacune des reconstitutions prises individuellement, et environ 0.92 pour la reconstitution moyenne. Du fait de la forte saisonnalité de la température de l'air, la corrélation de la série des anomalies par rapport au régime est nettement moins bonne : elle varie de moins de 0.3 à environ 0.37 pour chacune des reconstitutions, et vaut 0.58 pour la reconstitution moyenne. Les biais de moyenne des différentes reconstitutions individuelles comme de la reconstitution moyenne sont relativement faibles, de l'ordre de +3% (ratio de moyenne 1.03). Les biais d'écart-type des reconstitutions prises individuellement sont quasiment nuls, alors que la reconstitution moyenne sous-estime l'écart-type de près de 15% (ratio de variance 0.85).

Ces différentes observations mettent en évidence des performances qui peuvent être significativement différentes entre les reconstitutions prises individuellement et la moyenne des reconstitutions. Cela se traduit sur le diagramme de Taylor (figure 4.5c) par l'éloignement entre le point représentant le modèle moyen et le nuage des points représentant les modèles individuels. La reconstitution moyenne présente à la fois une meilleure corrélation avec l'observé et un biais d'écart-type plus important. Cela peut s'expliquer par le fait que prendre la moyenne à chaque pas de temps a tendance à « lisser » le signal en limitant l'apparition de valeurs extrêmes, ce qui amène une diminution de l'écart-type, et une augmentation de la corrélation.

Sur la distribution des températures journalières classées (figure 4.5d), on remarque également une différence de comportement entre le modèle moyen et les modèles individuels. En effet, les distributions de chaque modèle individuel se superposent parfaitement avec celle des observations, tandis que le modèle moyen présente une distribution plus resserrée. Cela coïncide avec les remarques précédentes qui mettaient en évidence un biais de variance négatif de la reconstitution moyenne.

La répartition des probabilités de l'observé sachant la reconstitution (figure 4.5e) montre une légère sur-dispersion des reconstitutions, c'est-à-dire que les différentes valeurs des modélisés couvrent une gamme de température trop large.

Au pas de temps mensuel, le modèle ANA montre des performances légèrement meilleures sur le plan de corrélation, mais plutôt moins bonnes en variance.

Le régime interannuel (figure 4.6a) n'est pas parfaitement reproduit : globalement, le régime modélisé est légèrement "écrasé" par rapport au régime des observés : les températures mensuelles les plus basses (décembre, janvier, février) sont sur-estimées alors que les températures mensuelles les plus élevées (juillet, août) sont sous-estimées.

Concernant les scores (figure 4.6b), l'effet de « lissage » de la moyenne observé au pas de temps journalier est nettement moins présent au pas de temps mensuel. La corrélation entre observé et modélisé est bonne (environ 0.98) à la fois pour chaque reconstitution prise individuellement et pour la reconstitution moyenne. Cette valeur diminue significativement si l'on s'intéresse à la série des anomalies par rapport au régime moyen : entre 0.48 et 0.56 pour les reconstitutions individuelles, et 0.6 pour la reconstitution moyenne. Le biais de moyenne est logiquement le même que celui observé au pas de temps journalier (de l'ordre de +3%), mais le biais d'écart-type des reconstitutions individuelles est cette fois non négligeable puisqu'il atteint environ -11 à -13%, ce qui peut sans doute être expliqué par la difficulté du modèle à représenter les températures les plus froides et les plus chaudes, déjà observée sur le régime.

Sur le diagramme de Taylor (figure 4.6c), le nuage de points est très regroupé : les différents modèles, ainsi que le modèle moyen, présentent des performances similaires. On retrouve les observations précédentes, à savoir une bonne corrélation mais un ratio d'écart-type de l'ordre de 0.9.

La reproduction de la distribution des températures mensuelles classées (figure 4.6d) montre une légère sous-dispersion de la distribution des reconstitutions, à la fois individuelles et moyenne.

Sur le graphe des probabilités de l'observé sachant la reconstitution (figure 4.6e), on constate le phénomène inverse à celui observé au pas de temps journalier : l'observation a tendance à se trouver trop souvent hors des bornes des reconstitutions, qui sont cette fois sous-dispersives. Cette observation rejoint celles faites sur le régime et le biais d'écart-type : globalement la reconstitution par la méthode des analogues a des difficultés, au pas de temps mensuel, à représenter les valeurs les plus faibles et les valeurs les plus élevées de températures.

En observant les chroniques annuelles de la température observée et reconstituée (figure 4.7a) sur leur période commune, on constate que, si la méthode ANA est capable de reproduire correctement la variabilité des températures à des pas de temps infra-annuels, il en va différemment pour la variabilité plus « basse-fréquence ». En effet, les températures moyennes observées sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette présentent une tendance marquée à l'augmentation entre les années 1950 et les années 2000, qui n'est pas reproduite par les reconstitutions.

Cette observation se traduit également sur les autres graphiques de la figure 4.7. Concernant les scores, la corrélation entre observés et modélisés est faible (0.6 pour la reconstitution moyenne), mais du même ordre que celle observée sur les séries d'anomalies au pas de temps mensuel. Le ratio des écarts-types montre un important biais de variance des reconstitutions, de l'ordre de -45% à -55% pour les modèles individuels, et environ -58% pour le modèle moyen. Le nuage de points représentant les différents modèles sur le diagramme de Taylor (figure 4.7c) est plus dispersé que ceux observés aux

pas de temps journalier et mensuel.

La distribution des températures annuelles classées (figure 4.7d) est également assez mal reproduite, trop resserrée du fait que la tendance observée sur la chronique des observés n'est pas reproduite. Les distributions des modélisés sont également légèrement décalées vers la droite par rapport à celle des observés, mettant en évidence le léger biais de moyenne observé pour les reconstitutions ANA.

Enfin, le graphique des probabilités classées de l'observé sachant la reconstitution montre de nombreuses valeurs à zéro et à un. Cela s'explique encore une fois en analysant la chronique annuelle : en début de période la température observée est faible et elle est sur-estimée par l'ensemble des modèles (probabilité de non-dépassement nulle), et en fin de période la température observée est élevée et sous-estimée par l'ensemble des modèles (probabilité de non-dépassement de 1). La distribution des probabilités de l'observé sachant la reconstitution est disymétrique : la température observée est plus souvent sous-estimée que sur-estimée, ce qui s'observe aussi sur la chronique.

Finalement la méthode des analogues (décrite au chapitre 3) utilisée seule (modèle ANA) montre des performances correctes pour la reconstitution des variabilités journalière et mensuelle des températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette mais ne parvient pas à reproduire leur variabilité plus « basse fréquence » à l'échelle inter-annuelle. À tous les pas de temps, mais de manière amplifiée au pas de temps annuel, ces reconstitutions ANA montrent des difficultés à reproduire les valeurs extrêmes des températures, ce qui se traduit par des biais d'écart-type pouvant être importants et par une sous-dispersion des distributions classées. On remarque aussi des différences de performances importantes entre la reconstitution moyenne et les différentes reconstitutions individuelles, en particulier au pas de temps journalier, ce qui s'explique par l'effet de lissage de la moyenne qui diminue l'écart-type et augmente la corrélation.

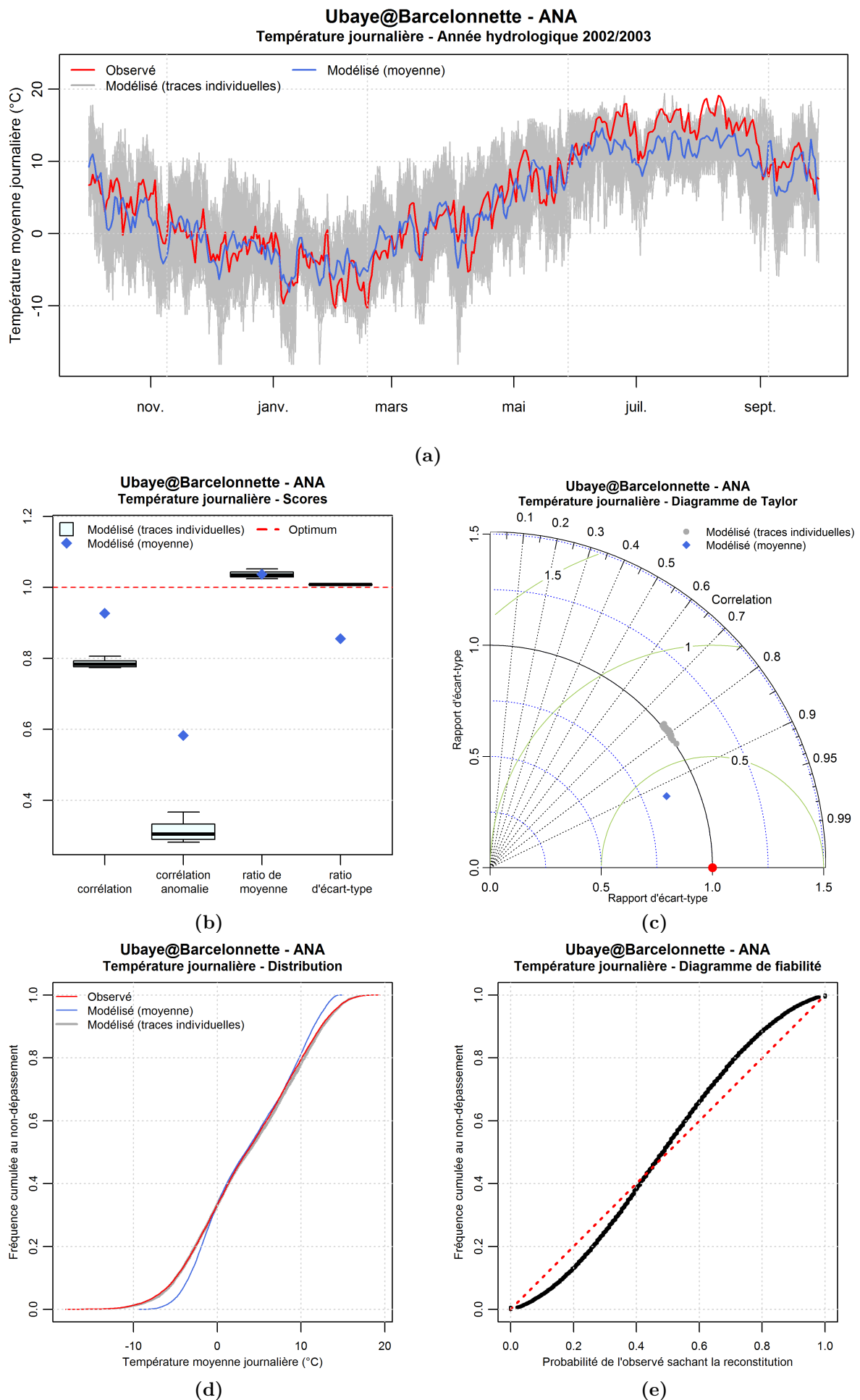


Figure 4.5 – Performances du modèle ANA de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.

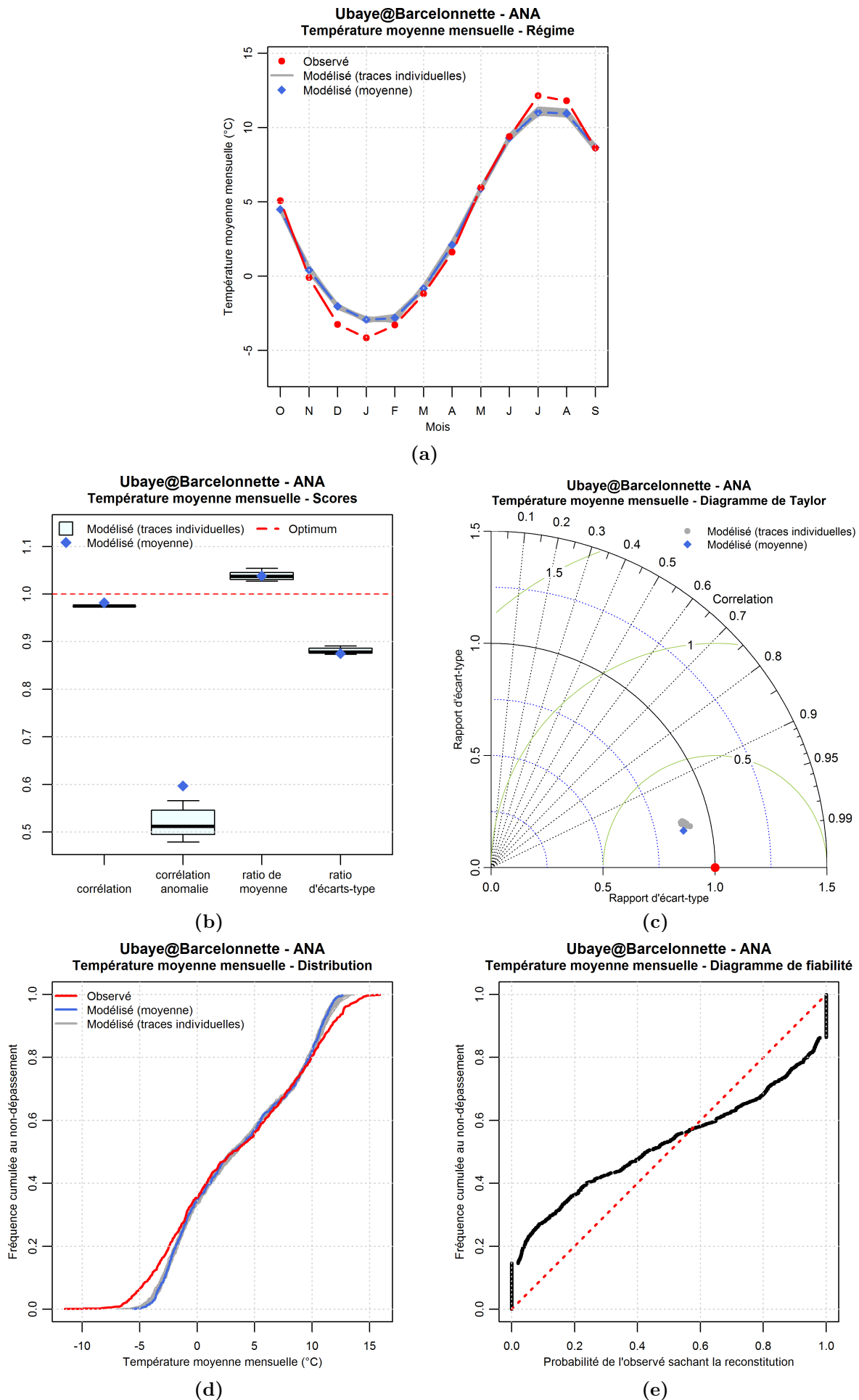


Figure 4.6 – Performances du modèle ANA de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.

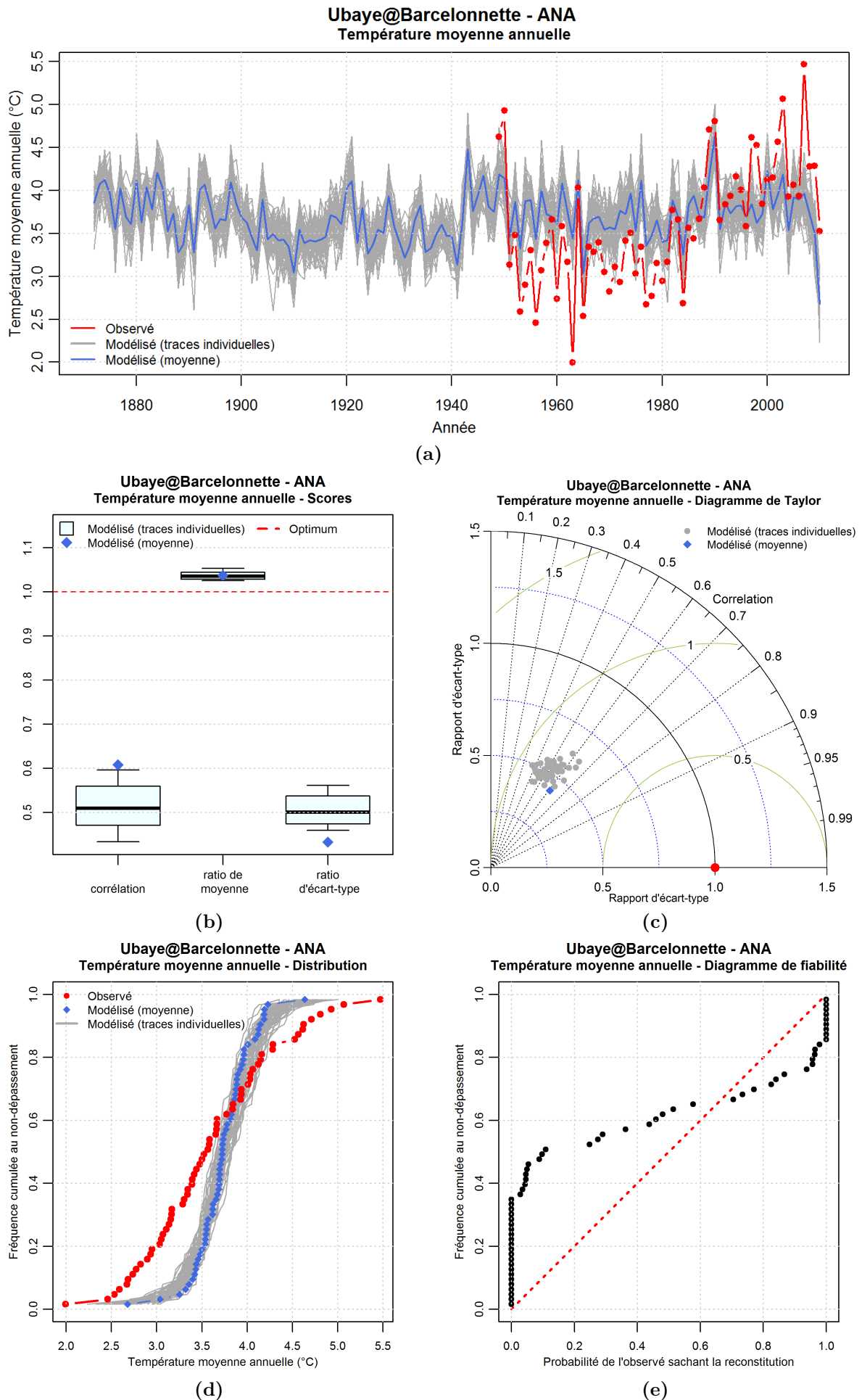


Figure 4.7 – Performances du modèle ANA de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).

III.1.2 | Modèle TEM

Les figures 4.8 à 4.10 montrent les performances de la reconstitution de la série de températures de l'air moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette. Les mêmes graphiques que ceux utilisés pour la présentation du modèle ANA sont donnés ici, excepté le diagramme de fiabilité qui n'a pas lieu d'être dans le cas d'une reconstitution déterministe.

Au pas de temps journalier, on observe sur la chronique de l'année hydrologique 2003 (figure 4.8a) une bonne représentation de la série observée en ce qui concerne la moyenne à l'échelle de quelques jours, et une représentation correcte de la variabilité journalière, avec toutefois quelques erreurs qui peuvent être relativement importantes sur des périodes de quelques jours, comme une surestimation des températures journalières au milieu du mois de novembre, ou une sous-estimation de certains pics de température comme au début du mois de mars ou à la mi-septembre. Un minimum de température journalière apparaît sur la série modélisée pendant la deuxième semaine de janvier environ, alors qu'il n'est pas présent sur les observations.

En termes de scores (figures 4.8b et 4.8c), les résultats obtenus avec le modèle TEM sont globalement bien meilleurs que ce que l'on pouvait observer pour le modèle ANA. Le coefficient de corrélation vaut 0.96, ramené à environ 0.79 lorsqu'on s'intéresse à la série d'anomalies par rapport au régime. Le ratio de moyenne vaut un, c'est-à-dire que le biais de moyenne est nul, par construction du modèle TEM. Le ratio d'écart-type est proche de 0.98 révélant une légère sous-estimation de l'écart-type de la série.

La distribution des valeurs de températures journalières (figure 4.10d) est presque parfaitement représentée par le modèle TEM.

D'après la figure 4.9c, le régime interannuel de températures sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette est parfaitement reproduit par le modèle TEM.

Les scores (figures 4.9a et 4.9b) obtenus au pas de temps mensuel par la reproduction TEM sont meilleurs qu'au pas de temps journalier : on trouve une corrélation de 0.99 entre les deux séries de températures mensuelles, et de 0.87 entre les séries d'anomalies par rapport au régime. Le ratio d'écart-type est lui aussi légèrement amélioré avec une valeur de 0.99.

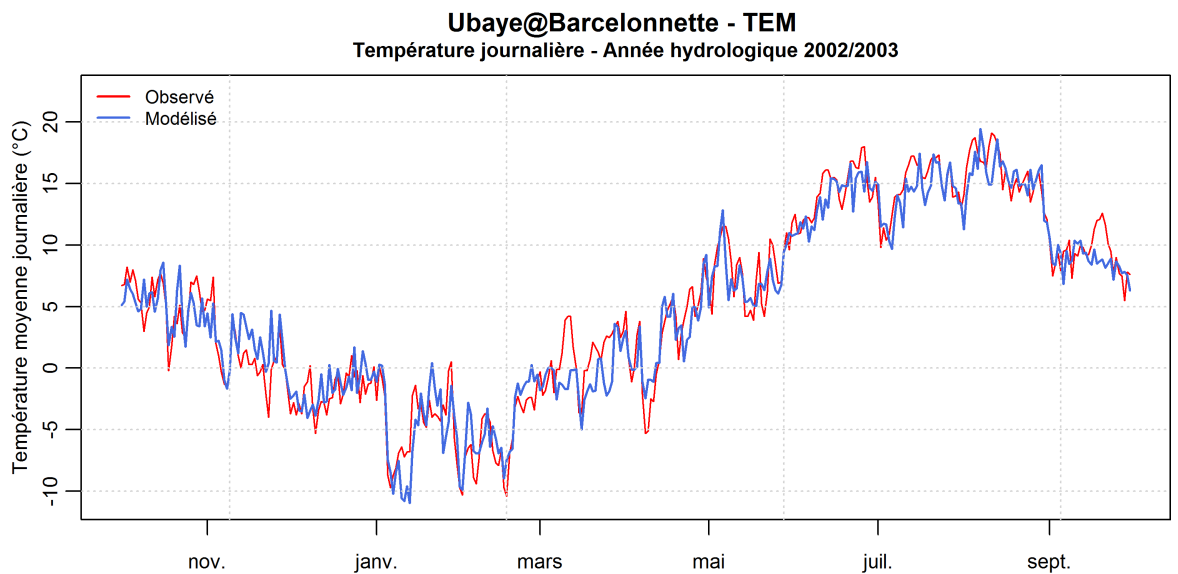
À nouveau, la représentation de la distribution des températures est très bonne au pas de temps mensuel (figure 4.9d).

La chronique annuelle des températures (figure 4.10a) montre une bonne qualité de la reconstitution par le modèle TEM. Contrairement à ce que l'on observait avec le modèle ANA, la variabilité « basse-fréquence » est ici bien reproduite, déduite de celle de la série témoin. Seules deux valeurs de températures moyennes annuelles observées sont largement sous-estimées : il s'agit des deux premières de la chronique, soit les années hydrologiques 1949 et 1950.

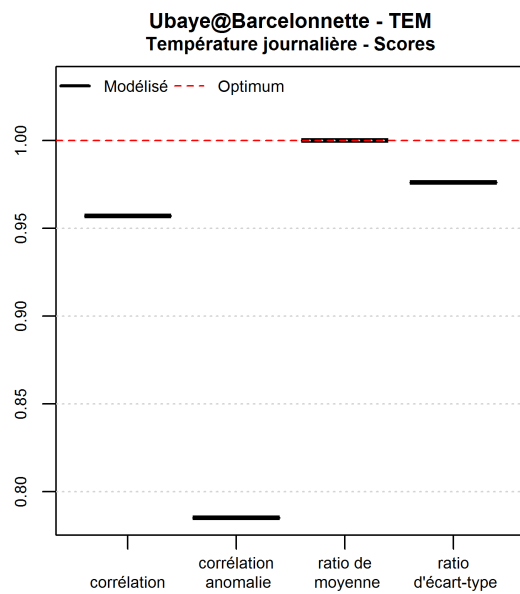
Comme c'était le cas pour le modèle ANA, les performances du modèle TEM sur le plan de la corrélation et du ratio d'écart-type (figures 4.10b et 4.10c) sont moins bonnes au pas de temps annuel, cependant cette diminution est nettement moins marquée dans le cas du modèle TEM qui conserve au pas de temps annuel des performances correctes. La corrélation au pas de temps annuel (0.92) est en effet supérieure à la corrélation des séries d'anomalies au pas de temps mensuel (0.87), et le biais d'écart-type au pas de temps annuel est de -12%, alors qu'il pouvait atteindre -50% pour le modèle ANA.

La figure 4.10d montre qu'au pas de temps annuel la reconstitution par le modèle TEM permet à nouveau une bonne représentation de la distribution des températures moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette.

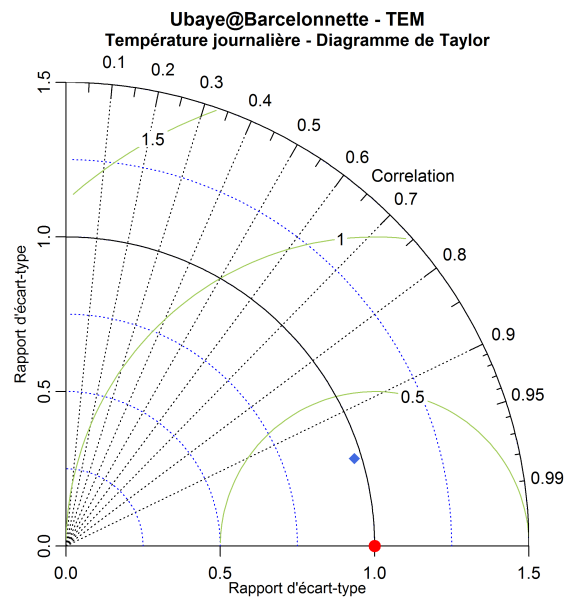
Le modèle TEM, reproduisant la température de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette à partir de la série témoin de températures de l'air à Marseille, montre donc de très bonnes performances. Quelques défauts ponctuels observables sur les chroniques journalières et annuelles pourraient être en partie liés au fait que le modèle TEM amène à transférer à la reconstitution d'éventuels effets météorologiques présents sur la série utilisée comme témoin, ainsi que des variations thermiques locales à l'emplacement de cette dernière. Pour autant, la reproduction de la saisonnalité des températures de l'air et de leurs distributions cumulées est presque parfaite, malgré un biais de variance non négligeable au pas de temps annuel.



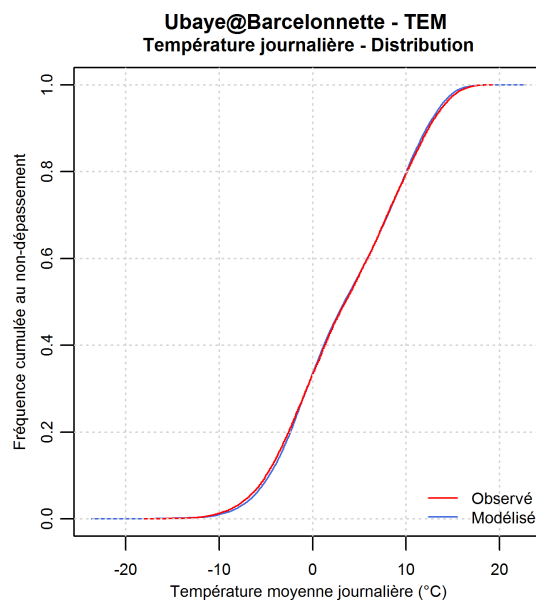
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.8 – Performances du modèle TEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.

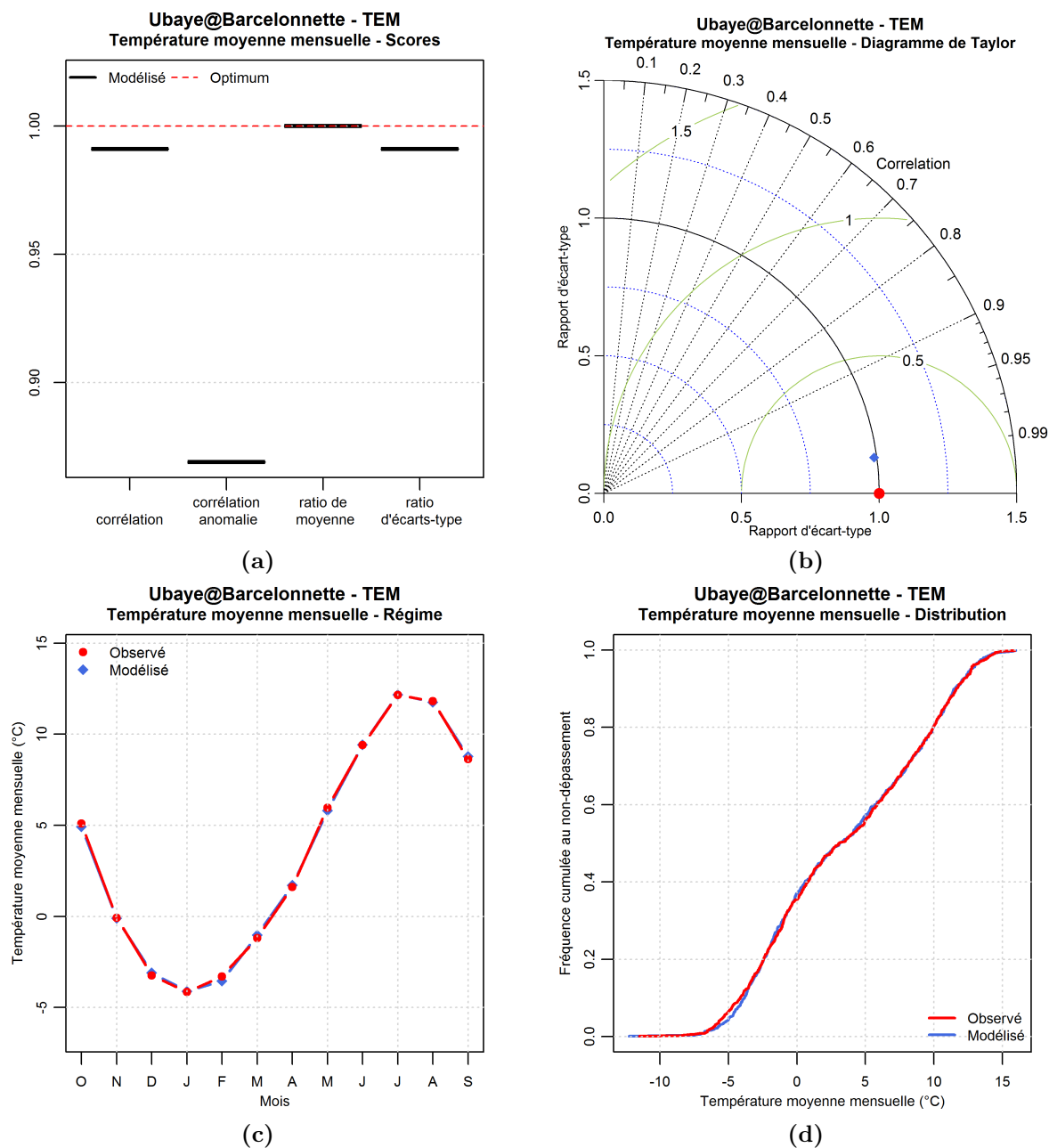
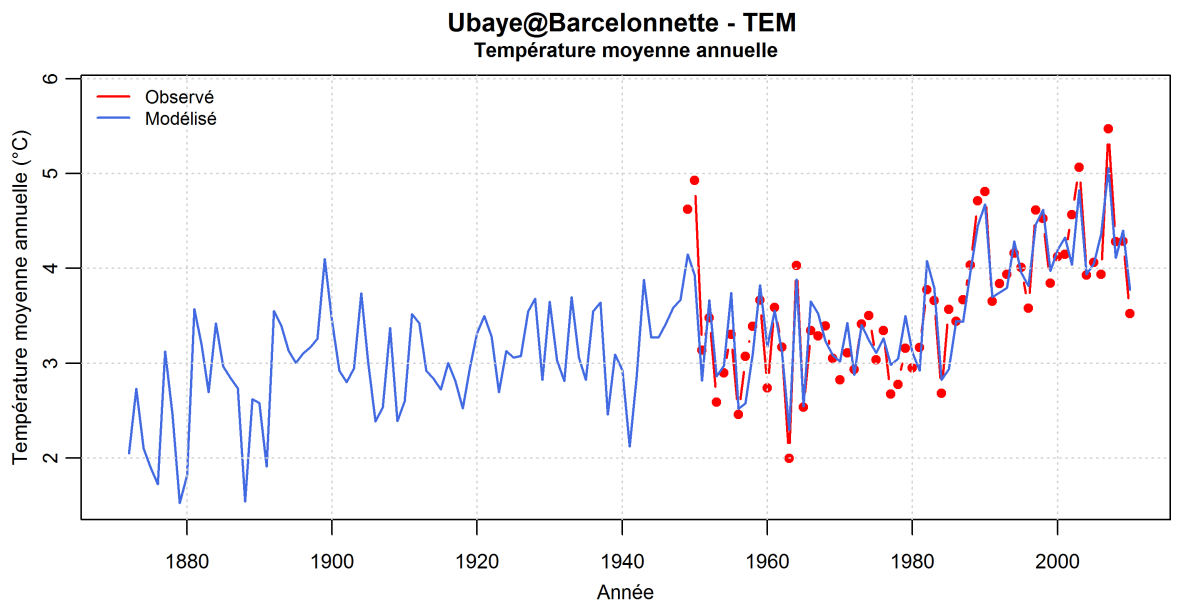
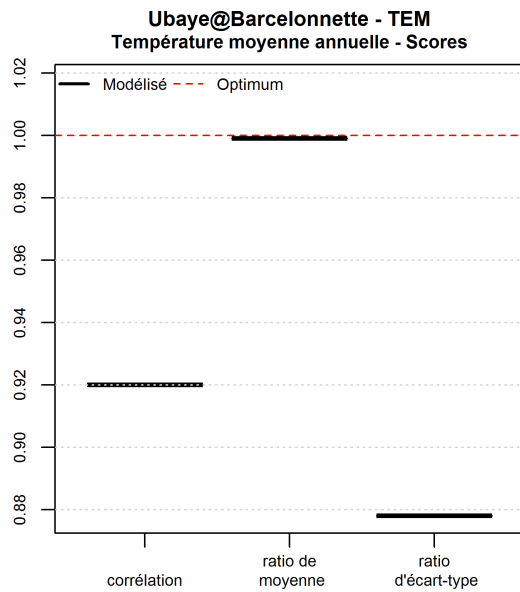


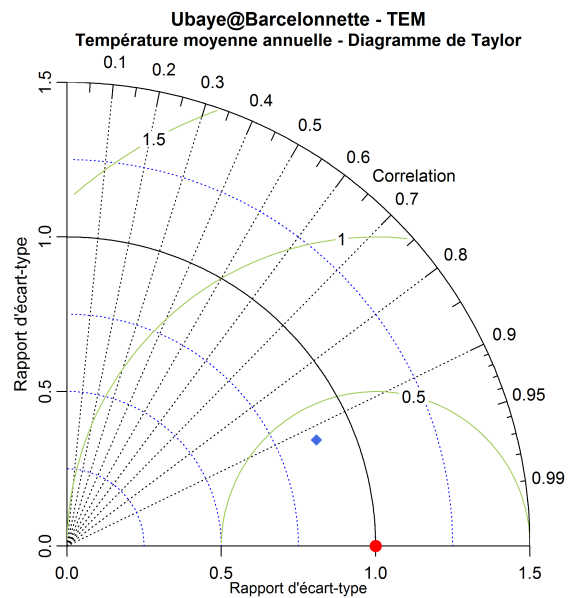
Figure 4.9 – Performances du modèle TEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.



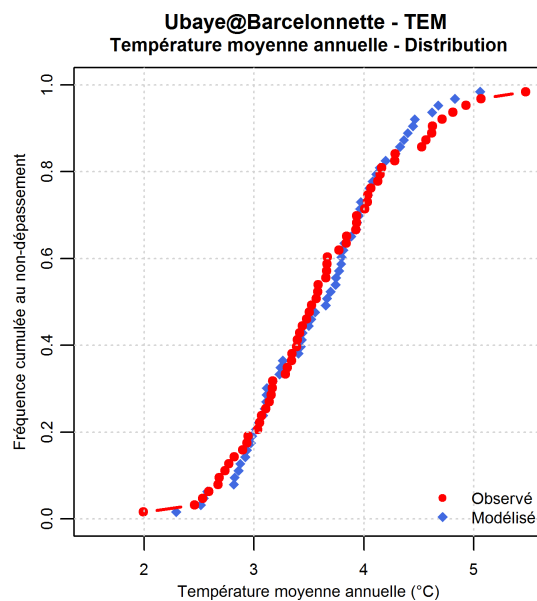
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.10 – Performances du modèle TEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).

III.1.3 | Modèle ANATEM

Intéressons-nous maintenant aux performances du modèle ANATEM combinant les informations du modèle ANA et du modèle TEM. Les graphiques présentant les résultats obtenus avec cette méthode sur la série de températures de l'air moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette sont présentés sur les figures 4.11 à 4.13.

La chronique journalière de l'année hydrologique 2003 (figure 4.11a) montre que le modèle ANATEM offre une reconstitution de qualité de la série de températures de l'air journalières. La variabilité journalière, mais aussi à l'échelle de quelques jours ou du mois, est bien représentée et les quelques défauts observés sur le modèle TEM sont en partie corrigés par l'addition de l'information synoptique : le biais positif qui apparaissait à la mi-novembre n'est plus présent sur le modèle ANATEM, le minimum de température qui apparaissait au mois de janvier est atténué et la représentation des pics de début mars et mi-septembre est légèrement améliorée.

Concernant les scores, on observe sur la figure 4.11b une corrélation au pas de temps journalier proche de celle obtenue avec le modèle TEM : 0.94 pour les reconstitutions individuelles, 0.97 pour le modèle moyen. La corrélation des séries d'anomalies par rapport au régime est autour de 0.75 pour les modèles individuels, et 0.86 pour le modèle moyen. Contrairement au modèle TEM, le modèle ANATEM présente en revanche un léger biais de moyenne, de l'ordre de -3%. Le biais d'écart-type est très légèrement positif (+2%) pour les reconstitutions individuelles, et très légèrement négatif (-2%) pour la reconstitution moyenne.

On retrouve ces informations sur le diagramme de Taylor au pas de temps journalier (figure 4.11c), où l'on voit aussi que les différentes reconstitutions individuelles sont très regroupées et également assez proches de la reconstitution moyenne, ce qui n'était pas le cas avec le modèle ANA.

Comme cela était déjà le cas pour le modèle TEM, la distribution des températures journalières (figure 4.11d) est très bien reproduite par la reconstitution ANATEM.

La figure 4.11e montre enfin une bonne fiabilité au pas de temps journalier de la reconstitution ANATEM. La distribution des probabilités de l'observé sachant la reconstitution est légèrement disymétrique ce qui met en évidence une légère majorité de journées où l'observé se trouve dans la moitié supérieure de la distribution des reconstitutions.

En ce qui concerne le régime interannuel des températures moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette, on observe sur la figure 4.12a que celui-ci est parfaitement reproduit par le modèle ANATEM, comme cela était déjà le cas avec le modèle TEM.

Les scores obtenus avec la méthode ANATEM au pas de temps mensuel (figure 4.12b) sont légèrement supérieurs à ceux du modèle TEM. La corrélation entre modélisés et observés est comprise entre 0.99 et 1 pour l'ensemble des reconstitutions individuelles ainsi que pour la reconstitution moyenne. En ce qui concerne les séries d'anomalies par rapport au régime, les corrélations obtenues sont d'environ 0.90 à 0.91 pour les reconstitutions individuelles, et de 0.92 pour la reconstitution moyenne, alors que la valeur obtenue avec le modèle TEM était de 0.87. Le biais d'écart-type est quant-à-lui compris entre 0 et -1% pour l'ensemble des reconstitutions ANATEM.

Sur le diagramme de Taylor (figure 4.12c), les points correspondant aux différentes reconstitutions sont quasiment superposés et très proches du point optimal, montrant de très bonnes performances pour la reconstitution via la méthode ANATEM.

Les distributions des températures mensuelles (figure 4.12d) reconstituées par ANATEM recouvrent presque parfaitement celle des températures observées, ce qui était déjà le cas pour la méthode TEM, mais pas pour la méthode ANA qui était légèrement sous-

dispersive.

En matière de fiabilité, les résultats obtenus au pas de temps mensuel (figure 4.12e) sont moins bons qu'au pas de temps journalier : la distribution des probabilités de l'observé sachant la reconstitution est à la fois disymétrique et relativement éloignée de la première bissectrice. Les valeurs observées se trouvent un peu trop souvent aux extrémités de la distribution des modélisés, avec une majorité pour la partie haute de cette distribution.

Au pas de temps annuel, l'observation de la chronique (figure 4.13a) met en évidence une très bonne qualité de reconstitution du modèle ANATEM : la variabilité interannuelle est très bien reproduite, tout comme la variabilité plus « basse fréquence » consistant ici essentiellement en une tendance marquée à l'augmentation de la température depuis les années 1980. Les quelques défauts observés sur la même chronique avec la reconstitution TEM sont ici légèrement atténués : par exemple, la température modélisée pour les années 1949 et 1950 est légèrement supérieure, donc plus proche de l'observé, avec le modèle ANATEM moyen qu'avec le modèle TEM.

Ces bonnes performances observées sur la chronique annuelle se traduisent également dans les critères de performance représentés sur les figures 4.13b et 4.13c : la corrélation au pas de temps annuel est comprise entre 0.91 et 0.95 pour les reconstitutions individuelles et celle de la reconstitution moyenne est proche de 0.94. Cette dernière valeur était de 0.6 pour le modèle ANA, et 0.92 pour le modèle TEM. Le ratio d'écart-type est également très proche de 1 (0.94 pour la série moyenne) alors qu'il était inférieur à 0.5 dans le cas du modèle ANA, et valait 0.88 pour le modèle TEM. Le biais de moyenne (-3% pour le modèle moyen) en revanche est légèrement supérieur à celui du modèle TEM puisque ce dernier est nul par construction. Le diagramme de Taylor montre une variabilité des performances entre les différentes reconstitutions individuelles légèrement plus importante au pas de temps annuel que ce que l'on observait aux pas de temps journalier et mensuel. Par contre, le modèle moyen présente cette fois des performances identiques à celles des reconstitutions individuelles.

La distribution des températures annuelles (figure 4.13d) modélisées par la méthode ANATEM est légèrement décalée par rapport à celle des températures observées : on retrouve ici le léger biais négatif (-3%) mis en évidence par le ratio de moyennes.

Enfin, on peut faire sur le diagramme de fiabilité (figure 4.13e) des observations similaires à celles faites au pas de temps mensuel, mais le phénomène est ici amplifié. La valeur observée se trouve trop souvent aux extrémités de la distribution des modélisés, et en particulier au-delà de l'ensemble des valeurs modélisées (nombreuses valeurs de probabilité au non-dépassement de l'observé sachant la reconstitution égales à 1).

Finalement, l'analyse des reconstitutions de températures de l'air moyennes sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette montre que la méthode ANATEM permet, en combinant l'information régionale constitutive du modèle TEM et l'information synoptique utilisée par la méthode ANA, d'obtenir des performances globalement supérieures à celles de l'une ou l'autre de ces deux méthodes prises isolément.

Dans cet exemple, le modèle *Temoin* utilisé fournit déjà une bonne reconstitution de la série de températures de l'air, l'apport des données synoptiques au travers de la méthode ANATEM est donc faible mais néanmoins existant, en particulier au pas de temps annuel où à la fois la corrélation et la reproduction de la variance de la série (ratio d'écart-type) sont améliorées. Par rapport à la méthode ANA, les performances de la méthode ANATEM sont nettement supérieures, et on peut également remarquer que les différentes reconstitutions individuelles sont plus semblables entre elles qu'elles ne l'étaient avec la méthode ANA.

En ce qui concerne la reproduction de la distribution et de la variabilité interannuelle, on constate que l'utilisation du témoin régional est un apport considérable pour une bonne reconstitution des températures de l'air sur ce bassin, le modèle ANA utilisé ici s'étant révélé assez largement sous-dispersif, et incapable de reproduire la variabilité « basse-fréquence » visible sur la série de températures observées.

Enfin, on a pu remarquer que la forte saisonnalité qui caractérise la température de l'air amène l'ensemble des reconstitutions à présenter aux pas de temps journalier et mensuel des corrélations bien plus élevées qu'au pas de temps annuel. L'analyse en corrélation des séries d'anomalies par rapport au régime interannuel permet de confirmer l'explication de cette différence puisque les corrélations au pas de temps annuel sont généralement du même ordre que celles des séries d'anomalies aux pas de temps inférieurs.

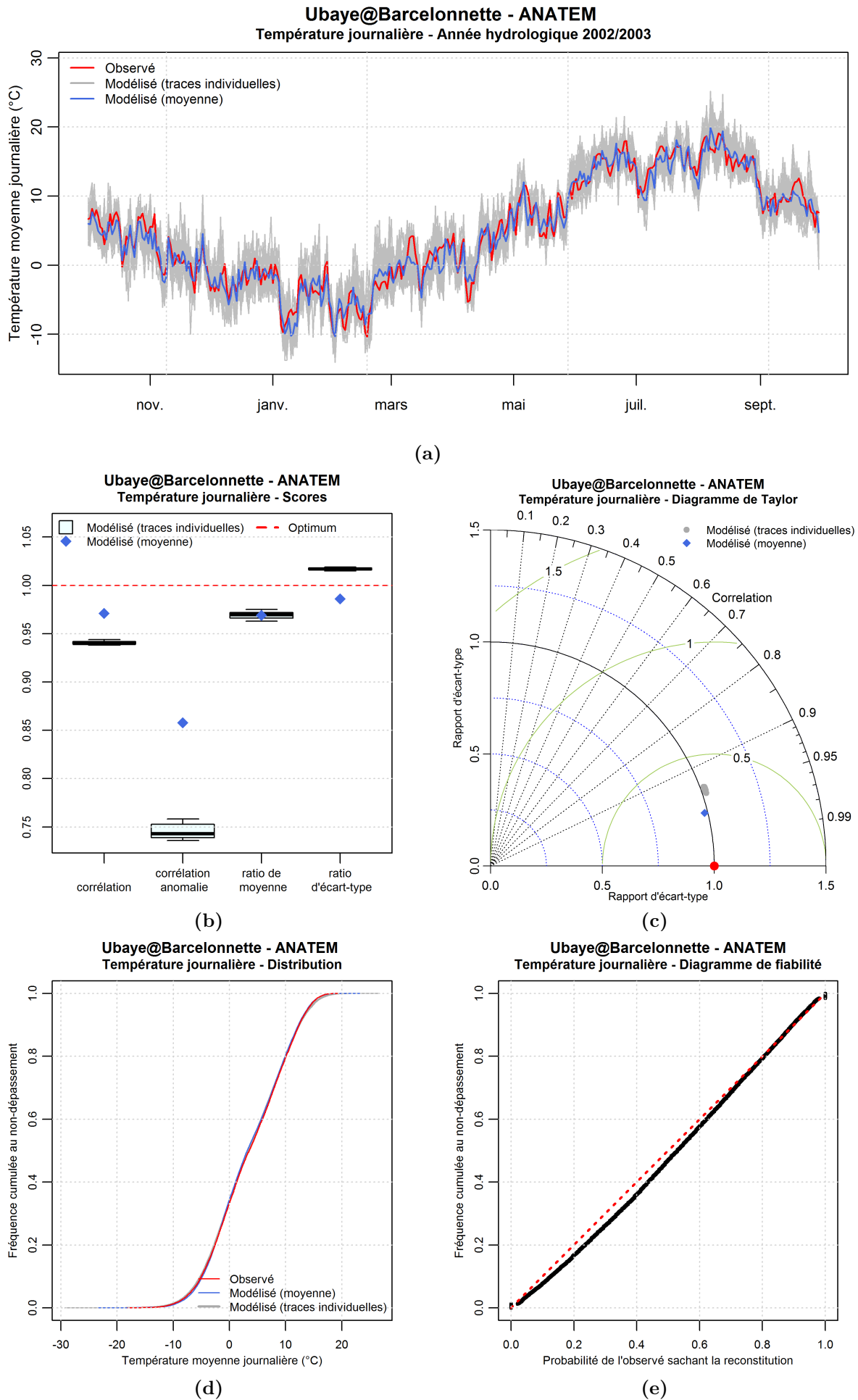


Figure 4.11 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.

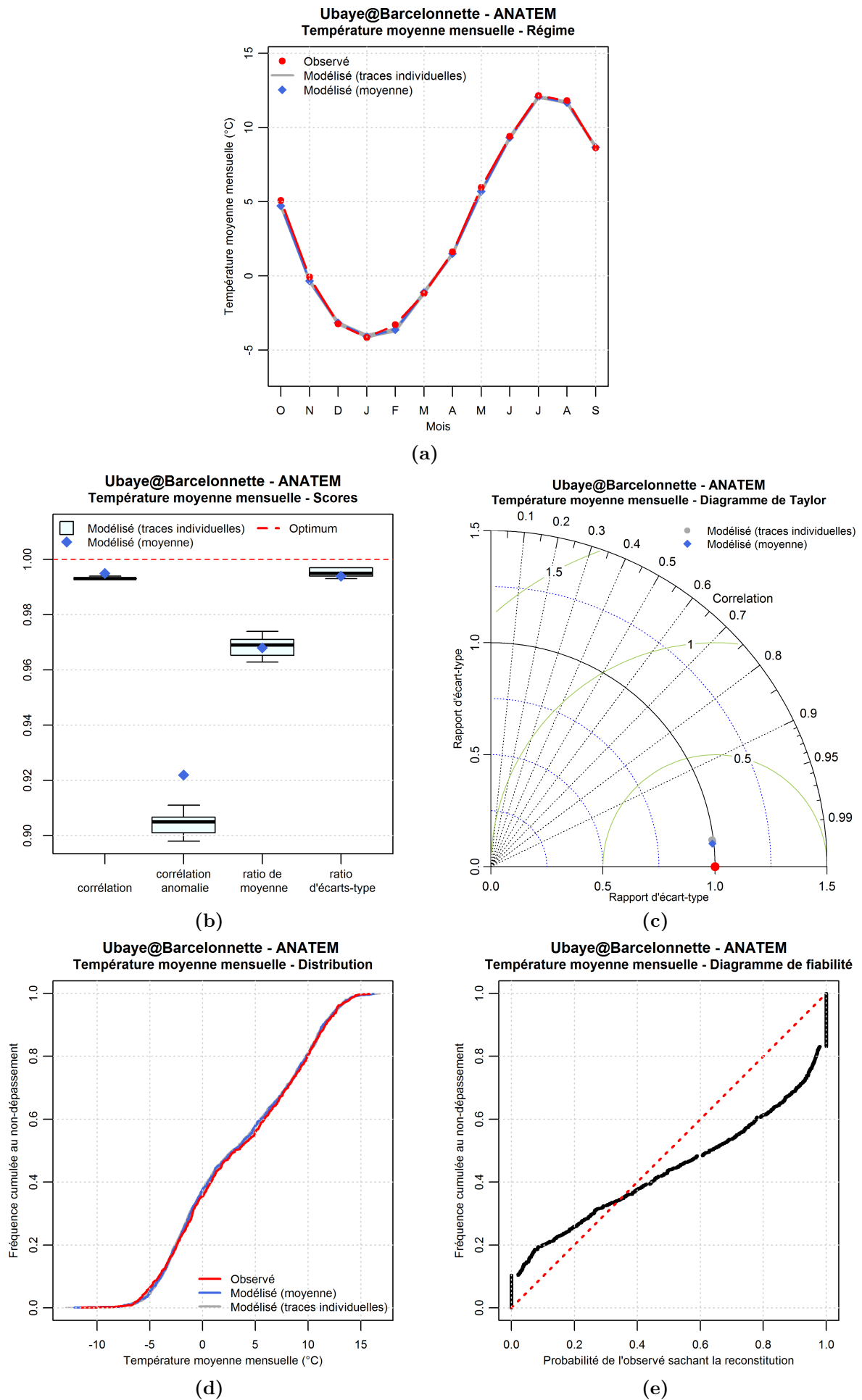


Figure 4.12 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.

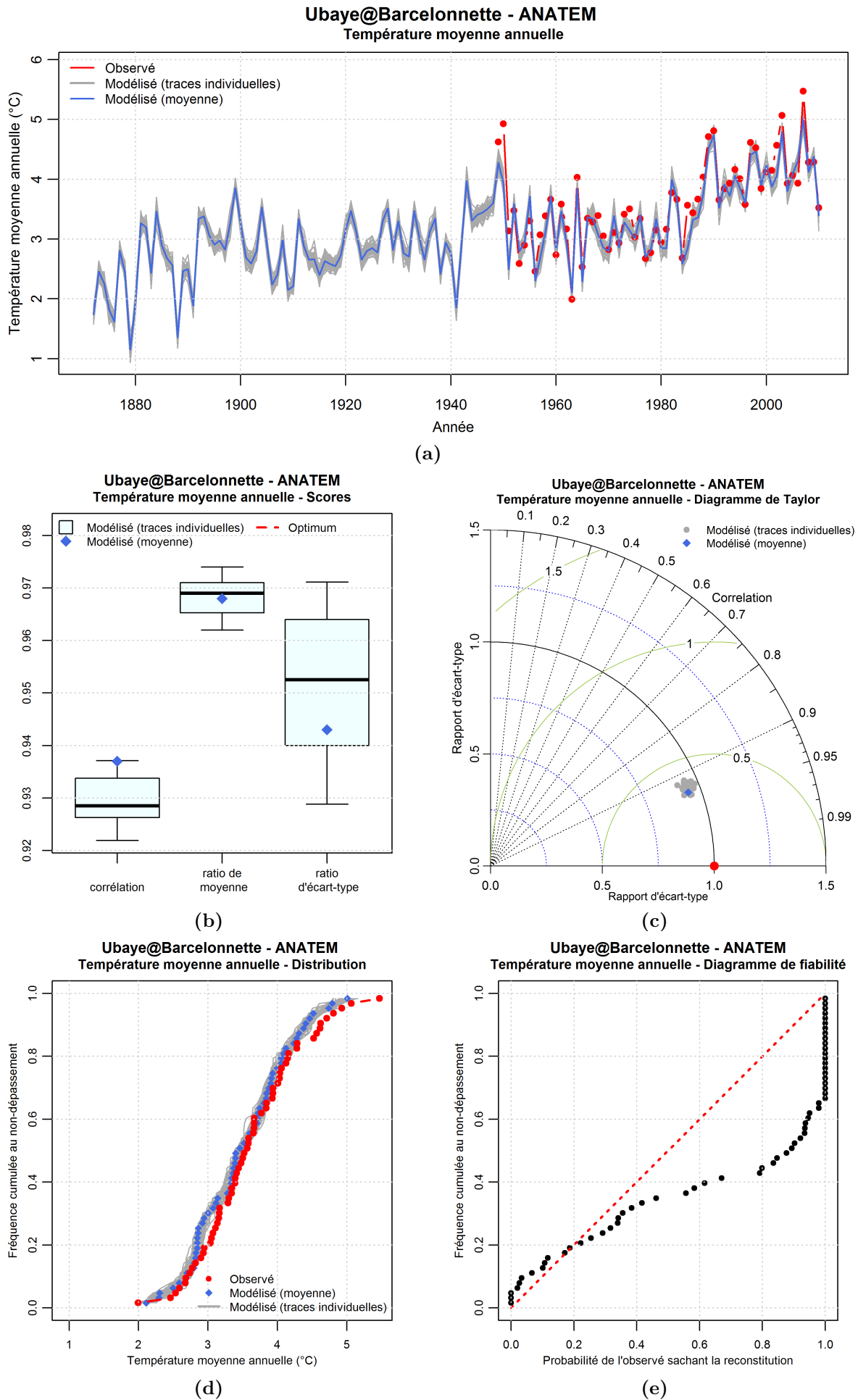


Figure 4.13 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution de la température de l'air spatiale du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).

III.2 | Reconstitution de la série de précipitations moyennes du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette

III.2.1 | Modèle ANA

Les graphiques présentant les performances de la reconstitution de la série de précipitations spatiales sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette par la méthode des analogues sont donnés sur la figure 4.14 pour le pas de temps journalier, la figure 4.15 pour le pas de temps mensuel et la figure 4.16 pour le pas de temps annuel.

La chronique journalière de précipitations de l'année hydrologique 2002/2003 (figure 4.14a) montre que la variabilité journalière est relativement bien représentée par le modèle ANA, mais que la reconstitution moyenne reproduit mal les valeurs élevées de précipitations.

Sur la figure 4.14b, on constate, comme c'était le cas pour les températures de l'air au même pas de temps, que la reconstitution moyenne présente des performances significativement différentes de celles des reconstitutions individuelles : en corrélation, on trouve 0.65 environ pour la moyenne, et autour de 0.4 pour les modèles individuels. *A contrario*, comme pour les températures de l'air mais de manière plus marquée, le biais d'écart-type est très important (-45% environ) pour le modèle moyen alors qu'il est de l'ordre de 0 à -5% pour les modèles individuels. La corrélation des séries d'anomalies par rapport au régime moyen des précipitations est inférieure d'environ 0.10 à celle des séries brutes. Cet écart est moins important que celui constaté sur les reconstitutions de températures de l'air (0.30 environ), ce qui peut s'expliquer par le fait que les précipitations sont moins caractérisées par leur saisonnalité que les températures de l'air. En ce qui concerne la moyenne, les modèles sont légèrement biaisés négativement, d'environ -5%.

On retrouve sur le diagramme de Taylor (figure 4.14c) le nuage de points correspondant aux reconstitutions individuelles, avec une corrélation assez faible et un ratio d'écart-type proche de un, alors que la reconstitution moyenne est meilleure en corrélation mais beaucoup plus biaisée en écart-type.

La distribution des précipitations journalières (figure 4.14d) est parfaitement reproduite par les modèles individuels, alors que le modèle moyen s'en éloigne légèrement, montrant une plus faible fréquence d'apparition de précipitations journalières supérieures à 10 mm environ. Cela rejoint l'observation faite sur la chronique journalière de la difficulté du modèle moyen à représenter les précipitations élevées. On retrouve également ici une constatation similaire à celle qui avait été faite sur la reconstitution des températures de l'air par la méthode ANA.

Le graphique des probabilités de l'observé sachant la reconstitution au pas de temps journalier (figure 4.14e) montre une très bonne fiabilité du modèle ANA pour ce pas de temps.

Au pas de temps mensuel, la figure 4.15a montre la saisonnalité des précipitations observées et reconstituées. On peut voir que les reconstitutions sous-estiment globalement les précipitations de juin à octobre et les sur-estiment de décembre à février. Contrairement à ce que l'on avait observé sur les températures de l'air, on ne voit pas ici de lien direct entre ces biais et la valeur des précipitations moyennes mensuelles correspondantes.

En termes de scores (figure 4.15b), on trouve globalement de meilleures performances au pas de temps mensuel qu'au pas de temps journalier, avec des corrélations comprises entre 0.60 et 0.75 pour les modèles individuels, et proche de 0.80 pour le modèle moyen. La série d'anomalies par rapport au régime présente une corrélation inférieure (0.64 environ pour la reconstitution moyenne). On voit sur le diagramme de Taylor (figure 4.15c) que

la reconstitution moyenne est légèrement moins éloignée des reconstitutions individuelles qu'elle ne l'était au pas de temps journalier, mais son ratio d'écart-type par rapport à l'observé reste faible, d'environ 0.75 (soit un biais d'écart-type de -25%).

La reproduction de la distribution des précipitations mensuelles (figure 4.15d) reste correcte, avec encore une fois une légère sous-dispersion observée pour le modèle moyen.

La fiabilité de la reconstitution (figure 4.15e) est bonne bien que très légèrement disymétrique : l'observé a tendance à se trouver légèrement plus souvent dans la gamme haute de la distribution des modélisés.

Au pas de temps annuel, on voit sur la chronique de cumuls de précipitations (figure 4.16a) une certaine irrégularité dans la capacité du modèle à reproduire la variabilité des cumuls annuels. Ainsi, entre 1948 et 1961, la reconstruction moyenne recouvre presque parfaitement les observés alors que pendant la quinzaine d'années qui suit, la corrélation entre observés et modélisés paraît assez mauvaise. D'une manière plus générale, les valeurs les plus élevées de cumuls annuels de précipitations sont souvent sous-estimées.

Les corrélations entre observés et modélisés au pas de temps annuel (figures 4.16b et 4.16c) sont légèrement inférieures à celles observées au pas de temps mensuel : entre 0.4 et 0.7 pour les modèles individuels, et 0.68 environ pour le modèle moyen. Le nuage de points du diagramme de Taylor est assez dispersé, avec des ratios d'écart-type entre 0.75 et 1.1 (0.75 pour la reconstitution moyenne).

Sur la figure 4.16d, on voit apparaître le léger biais de moyenne qui affecte l'ensemble des reconstitutions individuelles : décalage des distributions des précipitations annuelles classées par rapport à la distribution des observés. La difficulté du modèle moyen à représenter les cumuls élevés se traduit également dans cette distribution, qui est relativement bonne pour les faibles valeurs mais s'éloigne de celle des observés pour les valeurs plus élevées.

Enfin, le diagramme de fiabilité au pas de temps annuel est assez fortement disymétrique, l'observé apparaissant trop souvent dans la partie haute de la distribution des modélisés, ce qui peut s'expliquer en partie par le léger biais négatif de moyenne observé sur la majeure partie des reconstitutions.

Finalement, le modèle ANA permet d'obtenir une reproduction correcte de la série de précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette. La variabilité interannuelle des précipitations est nettement mieux reproduite que ne l'était celle des températures de l'air avec la même méthode. On remarque aussi pour les précipitations une bien meilleure reproduction des distributions cumulées. En revanche, des différences de performances relativement importantes apparaissent entre la reconstitution moyenne et les reconstitutions individuelles, en particulier aux pas de temps journalier et mensuel. Pour finir, la saisonnalité des précipitations présente quelques défauts difficiles à expliquer simplement (contrairement au cas des températures de l'air).

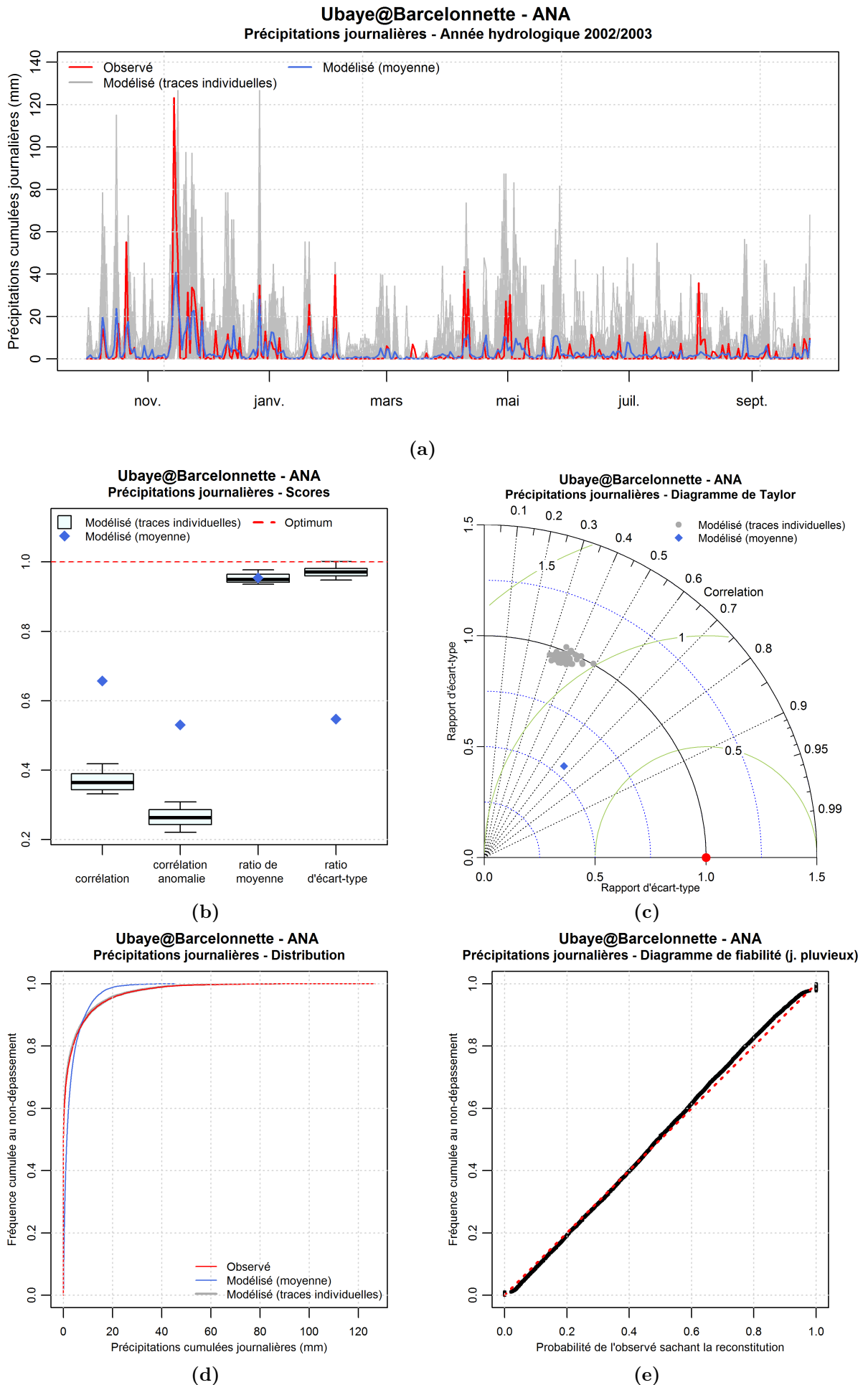


Figure 4.14 – Performances du modèle ANA de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.

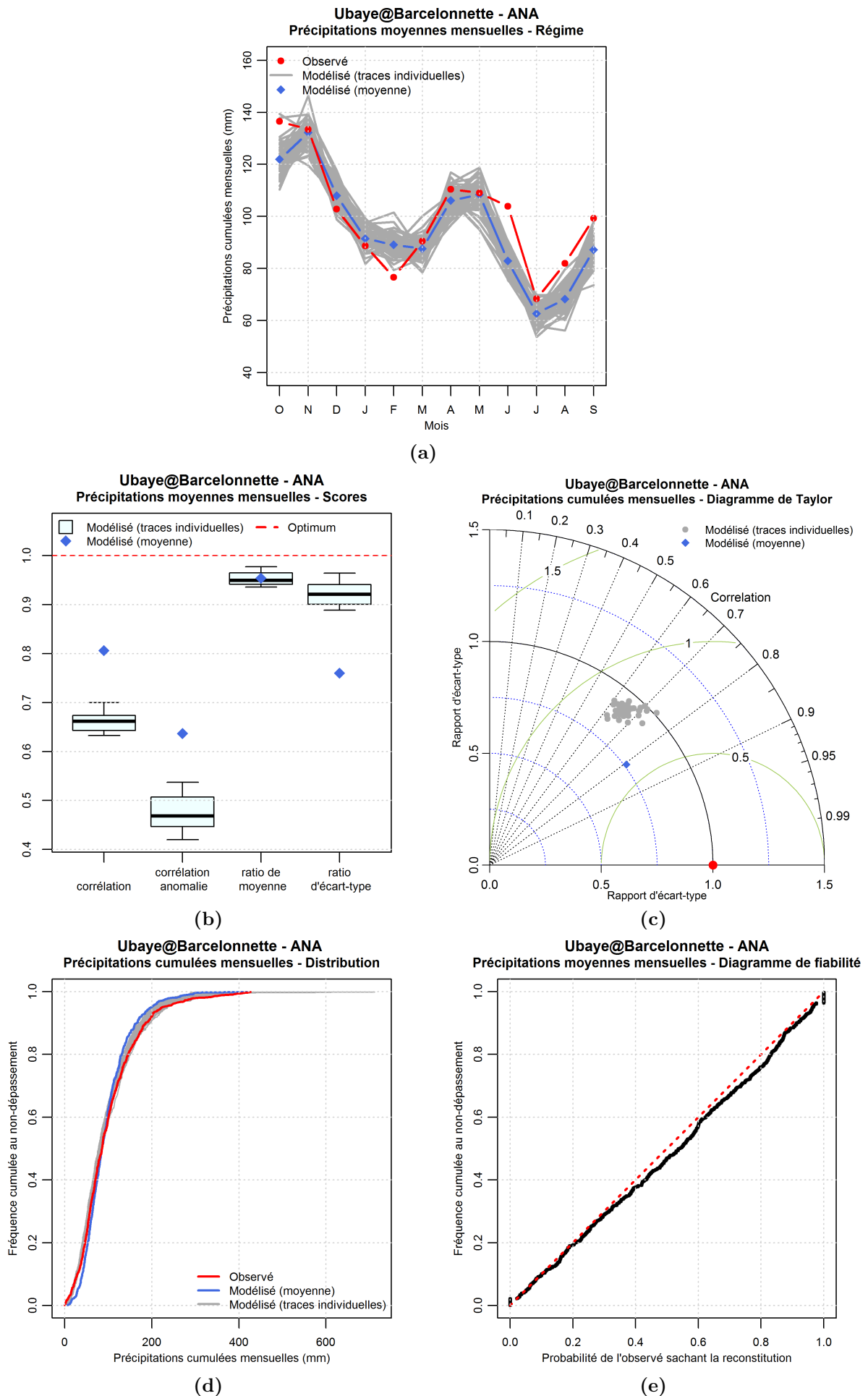


Figure 4.15 – Performances du modèle ANA de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.

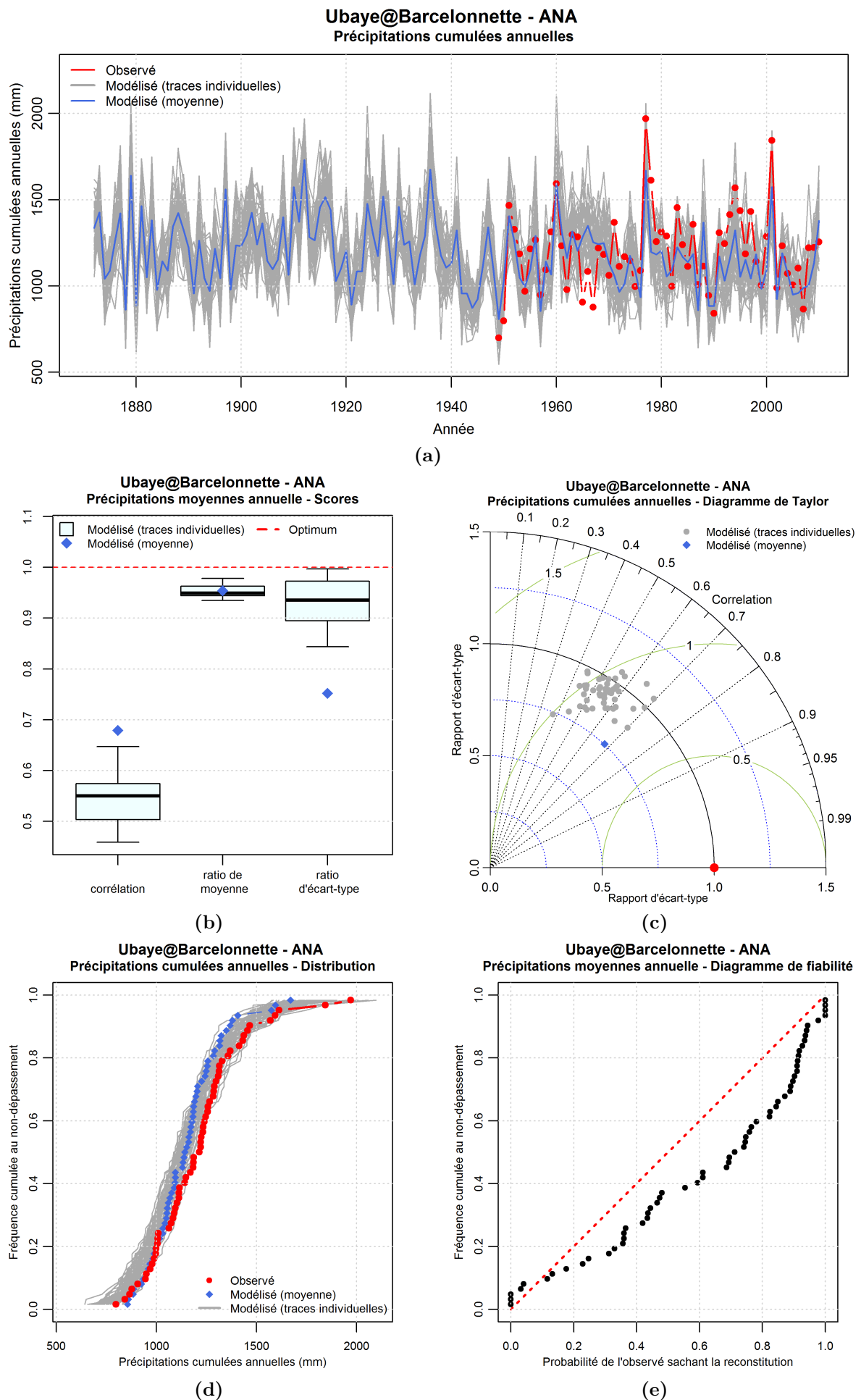


Figure 4.16 – Performances du modèle ANA de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).

III.2.2 | Modèle TEM

Les figures 4.17, 4.18, 4.19 présentent, respectivement pour les pas de temps journalier, mensuel et annuel, les résultats obtenus avec le modèle TEM pour la reconstitution de la série de précipitations journalières du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette.

L'observation de la chronique journalière de précipitations de l'année hydrologique 2003 (figure 4.17a) met en évidence une bonne qualité de reconstitution par le modèle TEM. Sauf quelques exceptions, l'alternance des jours pluvieux et non pluvieux est bien reproduite. Les valeurs les plus élevées, bien que nettement mieux représentées qu'avec le modèle ANA, sont cependant sous-estimées ici aussi.

La corrélation entre observés et modélisés (0.79, figures 4.17b et 4.17c) est nettement meilleure à ce pas de temps que celle du modèle ANA (0.65 pour le modèle moyen) mais bien inférieure aux résultats obtenus en températures de l'air. En ce qui concerne les séries d'anomalies, la corrélation entre observés et reconstitués est inférieure à celle des séries brutes, mais cette différence est nettement moins importante que celle constatée lors de l'analyse des reconstitutions de températures de l'air, ce qui s'explique par le fait que l'importance de la saisonnalité est plus grande pour les températures que pour les précipitations. Le biais de moyenne de la reconstitution TEM est nul par construction, comme nous l'avons observé sur les reconstitutions de températures. En revanche, son biais d'écart-type est relativement important, d'environ +9%. Cette sur-évaluation de l'écart-type s'explique certainement par le fait que la série utilisée comme témoin est une série de précipitations ponctuelles (un pluviomètre) alors que la série cible est une pluie spatiale, c'est-à-dire une série de précipitations moyennes sur l'ensemble du bassin versant de l'Ubaye à Barcelonnette, ayant donc une variabilité moins grande.

La reconstitution de la distribution des précipitations journalières par la méthode TEM est très bonne (figure 4.18d).

La représentation de la saisonnalité des précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette par le modèle TEM (figure 4.18c) est moyenne : les précipitations moyennes des mois de décembre à février sont sur-estimées tandis que celles des mois d'avril à juin sont sous-estimées par le modèle.

Concernant les scores (figures 4.18a et 4.18b), on a une corrélation moyenne (0.88) et un biais d'écart-type qui, contrairement à ce que l'on observait au pas de temps journalier, est ici négatif, d'environ -2%. La corrélation calculée entre les séries d'anomalies par rapport à la climatologie moyenne est de 0.79 environ.

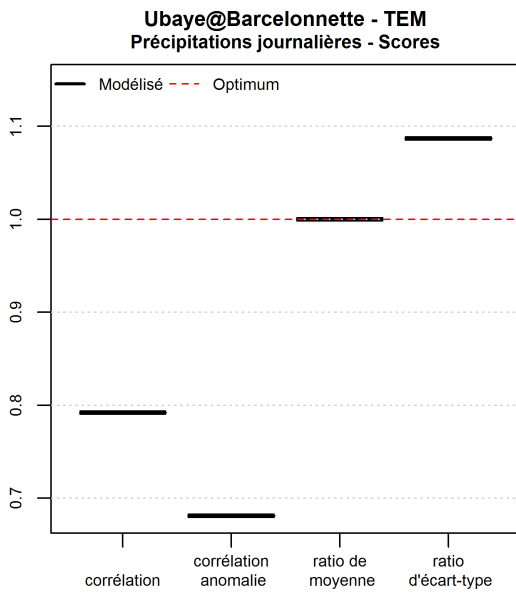
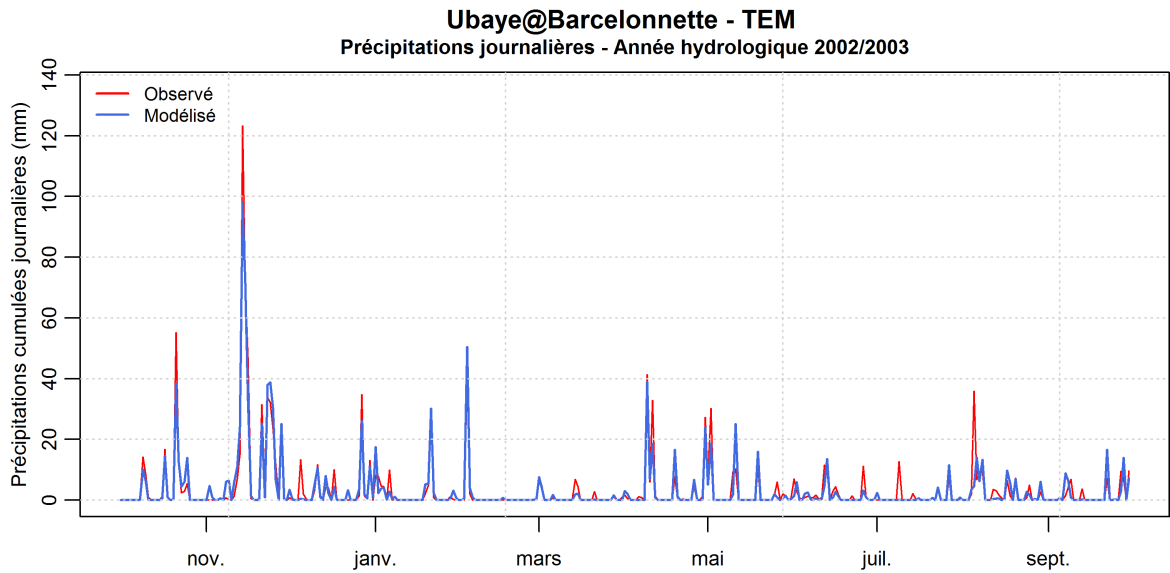
À nouveau, la distribution des précipitations mensuelles est très bien reproduite par le modèle TEM : sur la figure 4.18d, les courbes correspondant aux distributions des observés et des modélisés se superposent presque parfaitement.

Au pas de temps annuel, l'observation de la chronique de précipitations (figure 4.19a) montre que la variabilité interannuelle est relativement bien reconstituée par le modèle TEM. Les pics de précipitations annuelles ont cependant tendance à être sur-estimés au début de la chronique (1950-1970) et sous estimés entre 1975 et 1990 environ.

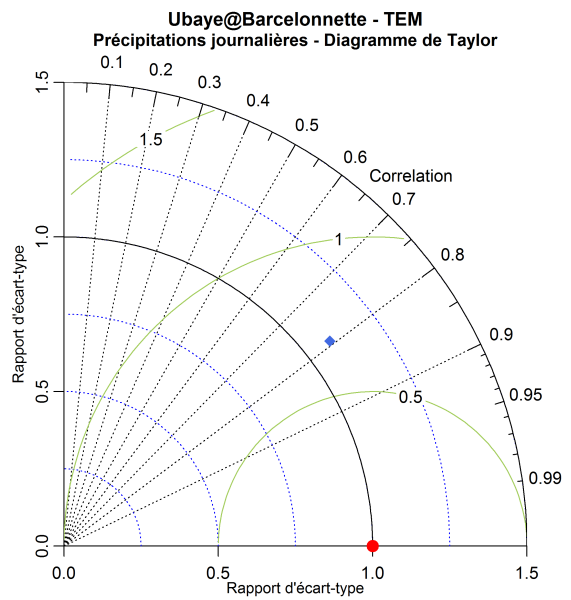
En termes de scores (figures 4.19b et 4.19c), en comparaison avec les résultats obtenus pour la reconstitution de la série de températures de l'air, on trouve ici une corrélation moins bonne (0.82 environ contre 0.92 en températures de l'air), mais une meilleure estimation de l'écart-type de la série, le ratio d'écart-type étant de 0.97 environ alors qu'il valait 0.88 pour la reconstitution des températures. Ces performances au pas de temps annuel sont légèrement moins bonnes qu'au pas de temps mensuel.

La distribution des températures annuelles (figure 4.19d) est globalement bien reproduite par le modèle TEM, comme cela était déjà le cas aux pas de temps mensuel et journalier.

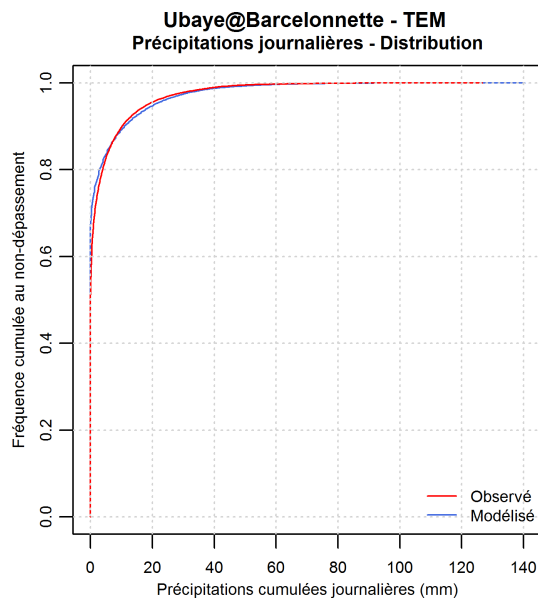
Ces observations faites à différents pas de temps montrent que la reconstitution de la série de précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette à partir de la série témoin de précipitations à Gap est bonne, à la fois en termes de corrélations, d'écart-type ou de reproduction des distributions cumulées. Les performances en corrélation obtenues avec ce modèle sont toutefois légèrement en deçà de celles observées avec la même méthode sur les températures de l'air, y compris en ce qui concerne les séries d'anomalies. Cela est particulièrement vrai au pas de temps annuel. La saisonnalité est également moins bien reproduite dans le cas des précipitations.



(b)



(c)



(d)

Figure 4.17 – Performances du modèle TEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.

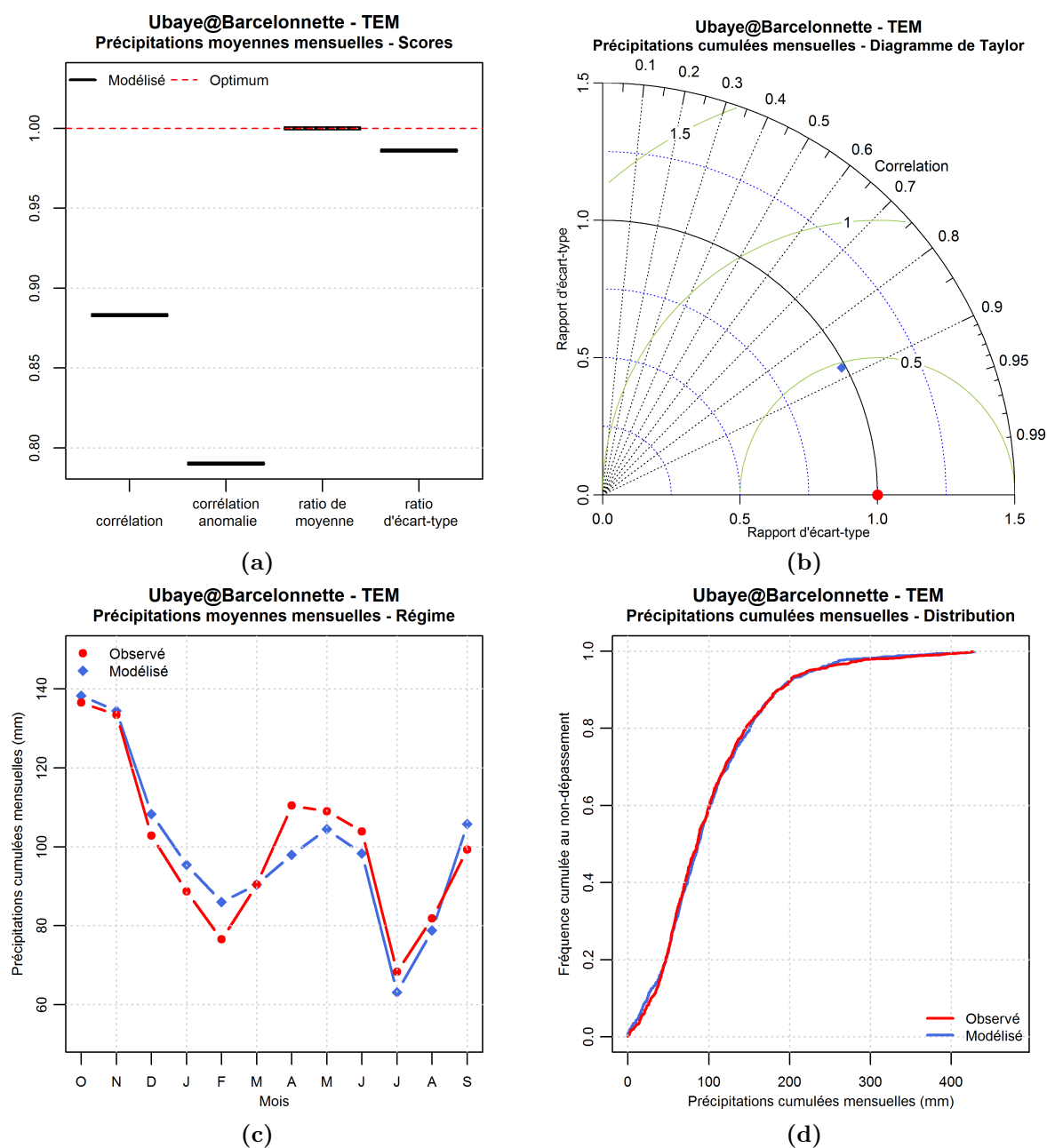
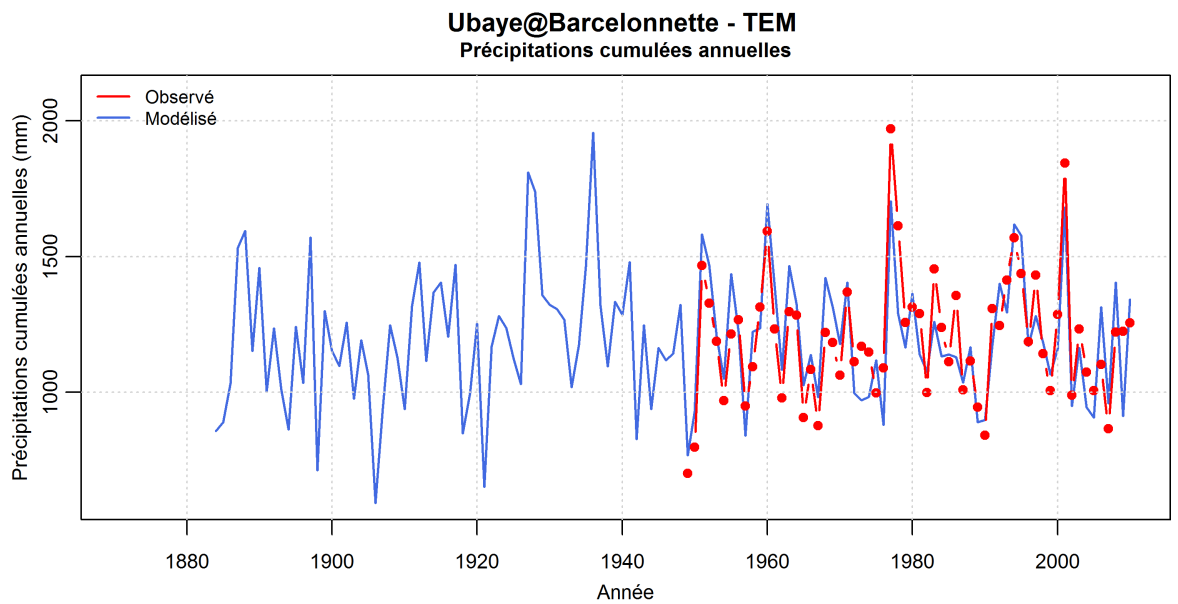
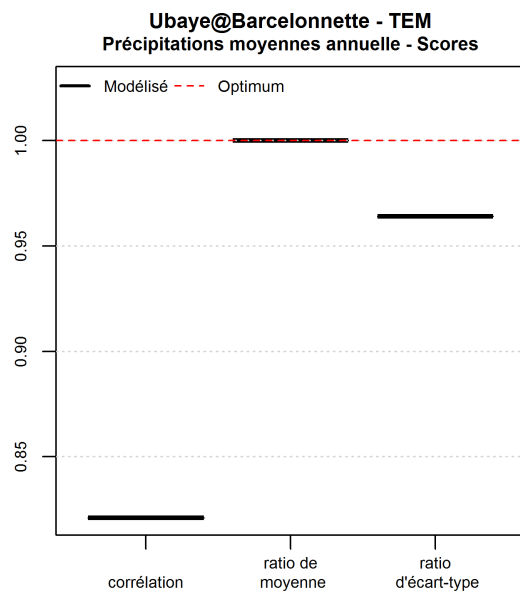


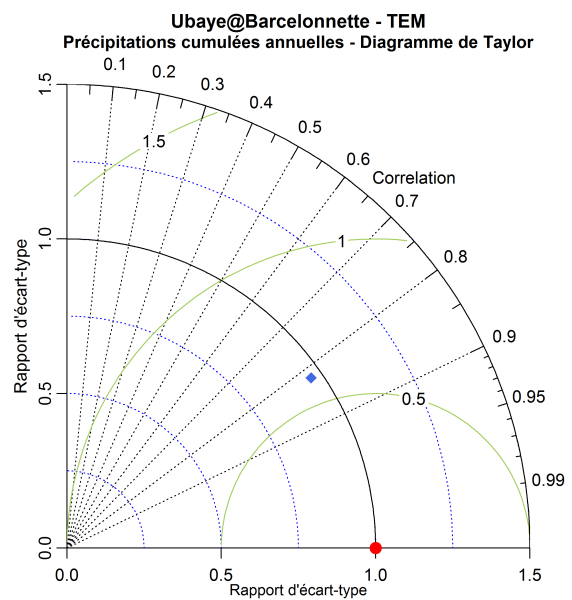
Figure 4.18 – Performances du modèle TEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.



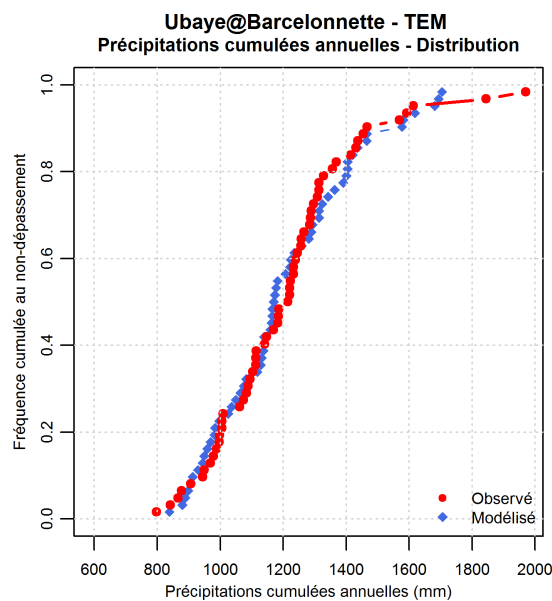
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4.19 – Performances du modèle TEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l’Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).

III.2.3 | Modèle ANATEM

Les graphiques présentant les performances du modèle ANATEM pour la reconstitution de la série de précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette sont présentés aux figures 4.20 pour le pas de temps journalier, 4.21 pour le pas de temps mensuel et 4.22 pour le pas de temps annuel.

On observe sur la chronique journalière (figure 4.20a) que la reconstitution moyenne des précipitations de l'année hydrologique 2003 obtenue par ANATEM est assez similaire à celle obtenue avec le modèle TEM : la variabilité journalière est globalement bien reproduite avec néanmoins une tendance à sous-estimer les valeurs les plus élevées de précipitations journalières.

En ce qui concerne les scores (figure 4.21b), on observe de légères différences de performances entre la reconstitution moyenne et les reconstitutions individuelles. La corrélation est d'environ 0.78 pour les reconstitutions individuelles et de 0.80 pour la reconstitution moyenne. La corrélation des séries d'anomalies par rapport au régime moyen de précipitations est inférieure d'environ 0.10 à celle des séries brutes. Un léger biais négatif de moyenne apparaît, du même ordre que celui observé sur les reconstitutions ANA (-5%). Le ratio d'écart-type est compris entre 1.1 pour les reconstitutions individuelles et 1.03 environ pour la reconstitution moyenne. On retrouve ces informations sur le diagramme de Taylor (figure 4.20c) où l'on voit que les différentes reconstitutions individuelles sont très groupées en termes de corrélation et de ratio d'écart-type, et que la reconstitution moyenne est légèrement meilleure que ces dernières sur les deux critères représentés.

La distribution des précipitations journalières (figure 4.20d) modélisées par les modèles ANATEM (individuels ou moyen) est très semblable à celle des modélisés de la méthode TEM et recouvre très bien celle des observations.

Le diagramme de fiabilité (figure 4.20e) montre une légère sous-dispersion de la méthode ANATEM au pas de temps journalier. Pour 40% des journées environ, la valeur observée se trouve sous le quantile 10% ou au dessus du quantile 90% des valeurs modélisées.

La représentation du régime interannuel des précipitations (figure 4.21a) est légèrement meilleure sur les mois de décembre à février avec le modèle ANATEM qu'avec le modèle TEM qui sur-estimait les valeurs moyennes de ces mois. En revanche, la précipitation moyenne des mois de mars à août est sous-estimée par le modèle ANATEM alors qu'avec le modèle TEM cette sous-estimation n'était observable que d'avril à juillet.

Les corrélations (figures 4.21b et 4.21c) obtenues avec le modèle ANATEM au pas de temps mensuel sont légèrement supérieures pour la reconstitution moyenne, et légèrement inférieures pour les reconstitutions individuelles, à celles observées sur le modèle TEM. Pour la reconstitution moyenne, la corrélation entre série observée et modélisée est de 0.90, et la corrélation entre les séries d'anomalies est d'environ 0.81. On retrouve le biais de moyenne d'environ -5% déjà observé au pas de temps journalier, mais le biais d'écart-type est cette fois négatif (environ -5% pour la reconstitution moyenne), comme cela avait déjà été observé pour le modèle TEM.

Les observations faites sur la distribution et le diagramme de fiabilité au pas de temps journalier sont valables également au pas de temps mensuel : la reproduction de la distribution (figure 4.21d) des cumuls mensuels de précipitations par le modèle ANATEM est quasi-parfaite et le diagramme de fiabilité (figure 4.21e) montre que le modèle ANATEM est légèrement sous-dispersif également au pas de temps mensuel.

Au pas de temps annuel (figure 4.22a), la reconstitution ANATEM ressemble fortement à celle obtenue avec la méthode TEM en ce qui concerne la variabilité interannuelle. Le modèle moyen ANATEM semble toutefois très légèrement inférieur en moyenne au modèle TEM, l'amenant à être plus proche des observations sur certaines périodes comme la période allant de 1950 à 1965. Du fait de l'apport de l'information régionale, le faisceau des différentes reconstitutions est nettement plus serré qu'il ne l'était avec la méthode ANA.

La figure 4.22b montre une corrélation légèrement meilleure (0.84) entre la reconstitution moyenne et les observations qu'avec le modèle TEM. Le biais d'écart-type en revanche est légèrement plus important (-6% pour le modèle moyen ANATEM). Comme pour le modèle ANA, les points représentant les différentes reconstitutions individuelles sur le diagramme de Taylor (figure 4.22c) sont légèrement plus dispersés qu'ils ne l'étaient aux pas de temps mensuel et journalier, mais également plus proches de celui représentant la reconstitution moyenne.

Le léger biais de moyenne observé sur la figure 4.22b se traduit dans la distribution des cumuls annuels de précipitations (figure 4.22d) par un léger décalage du modèle par rapport à l'observé. Sur le diagramme de fiabilité (figure 4.22e), l'apparition de nombreuses valeurs à 1 reflète le fait que pour un certain nombre d'années, aucune des reconstitutions individuelles ne parvient à produire une valeur suffisamment élevée pour atteindre l'observé, ce qui peut également s'expliquer en partie par le léger biais négatif de moyenne des modèles ANATEM sur ce bassin.

Finalement, la reconstitution de la série de précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette par la méthode ANATEM montre de très bonnes performances. Comme pour la reconstitution ANA, il existe des différences assez fortes entre les performances de la reconstitution moyenne et celles des reconstitutions individuelles, mais celles-ci sont moins marquées que pour le modèle ANA.

Outre l'apport de l'aspect probabiliste, l'amélioration apportée par les données synoptiques au sein de la méthode ANATEM par rapport à la méthode TEM est relativement faible ici, mais on peut noter que le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette est parmi les plus proches de la série témoin de Gap, et nous verrons par la suite que sur d'autres bassins cette amélioration peut être plus nette.

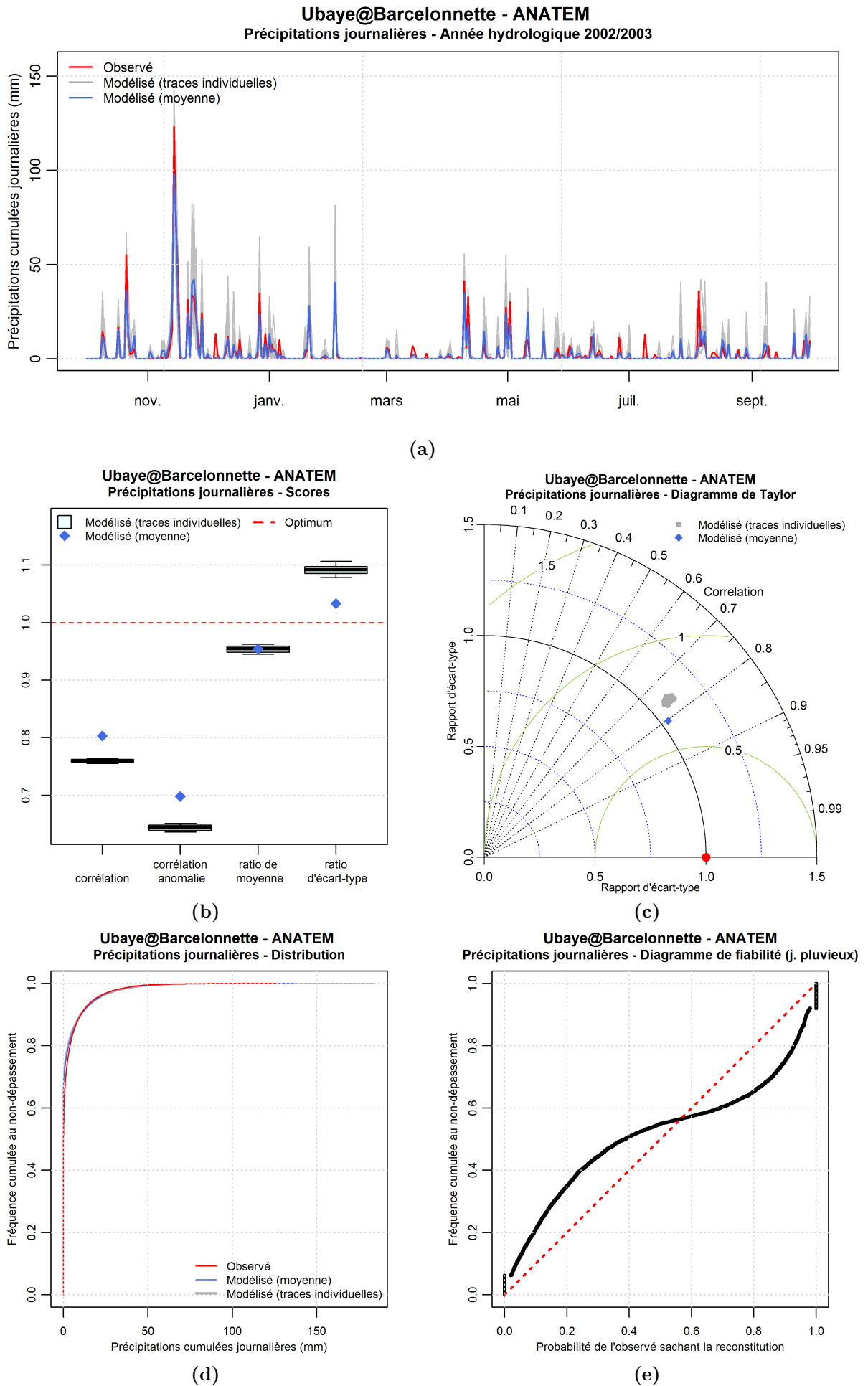


Figure 4.20 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.

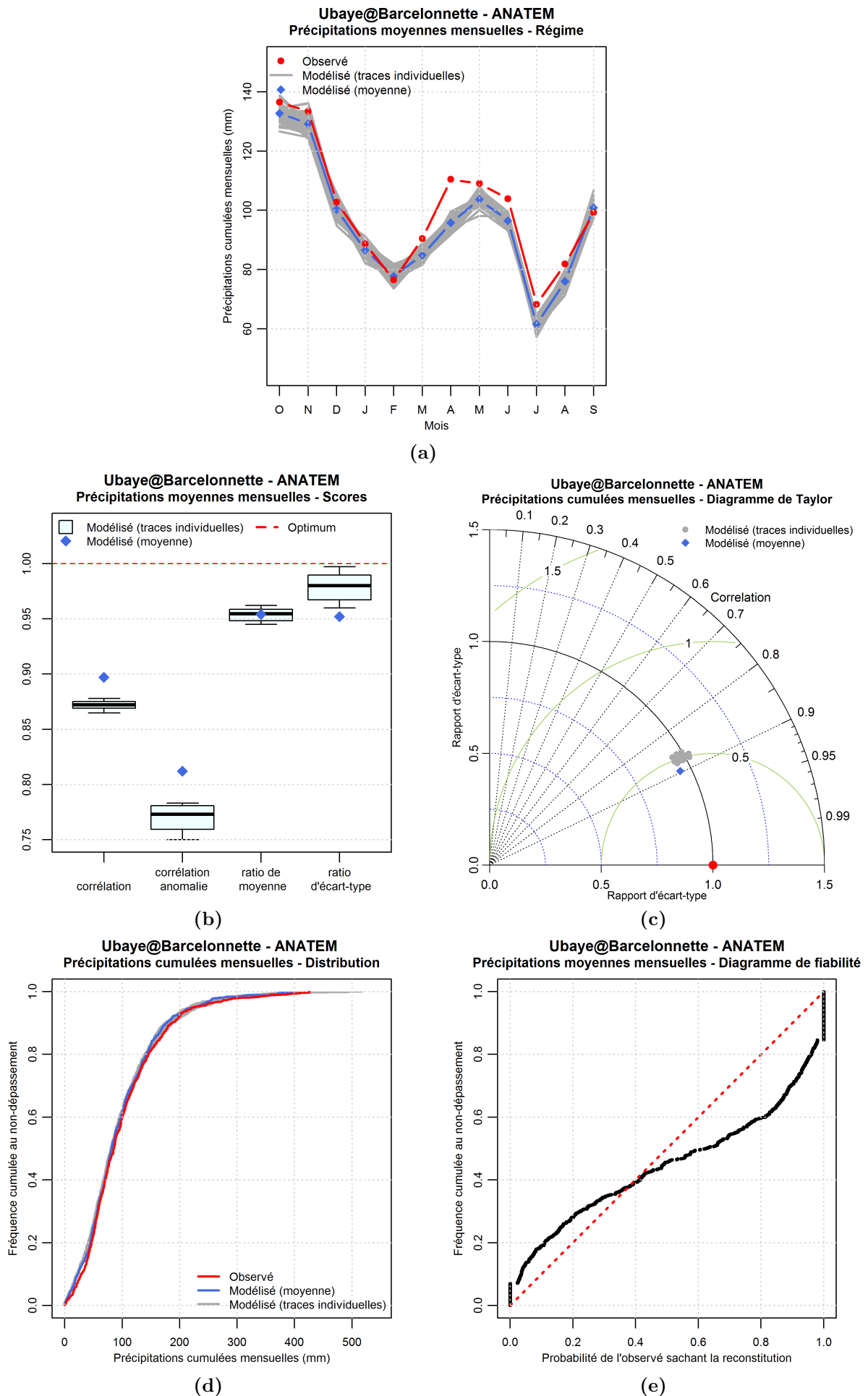


Figure 4.21 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.

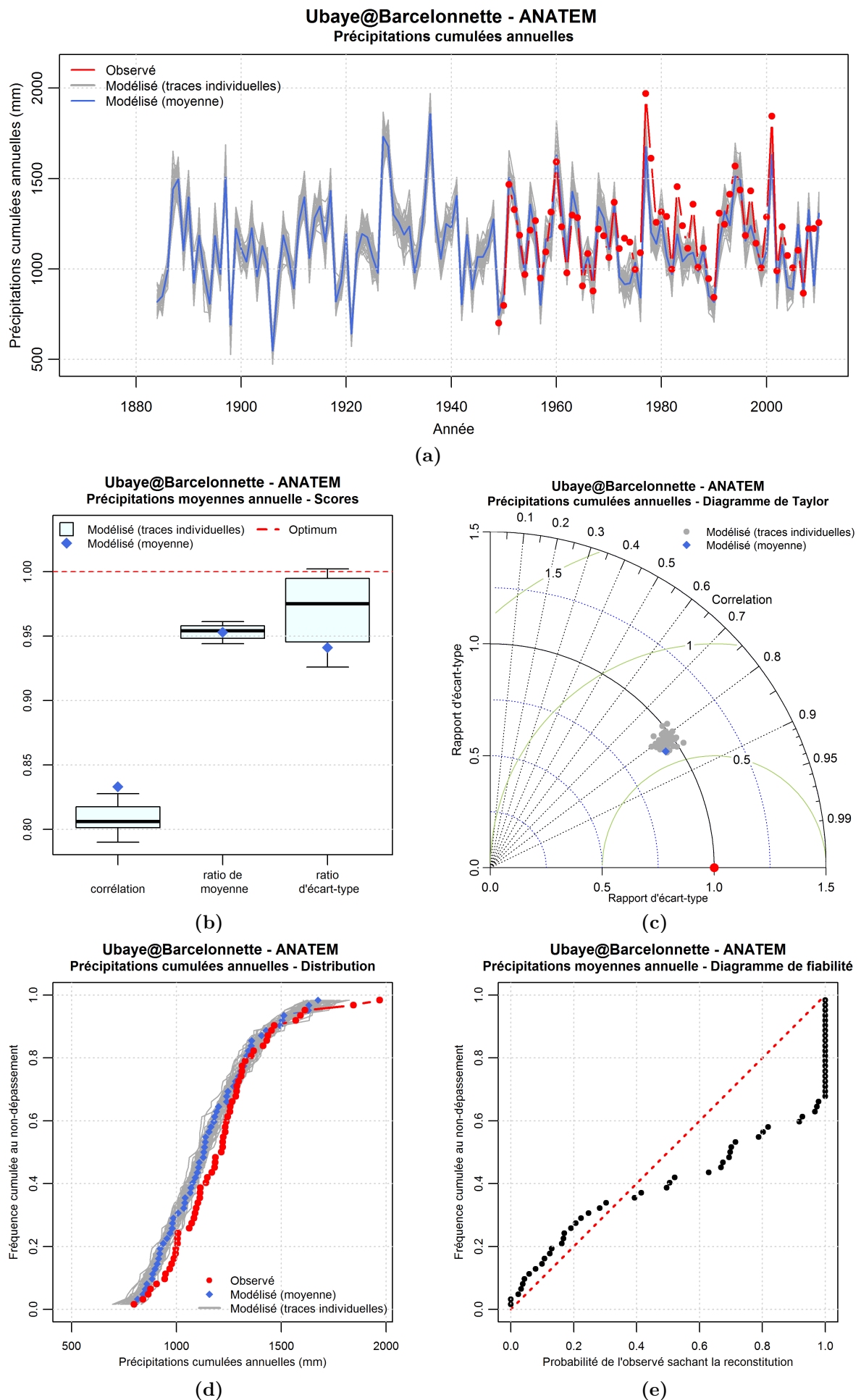


Figure 4.22 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution des précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel (années hydrologiques).

IV | Analyse sur un échantillon de 22 bassins versants

IV.1 | Reconstitution des séries de températures de l'air

IV.1.1 | Performances des modélisations sur les 22 bassins versants

L'analyse des reconstitutions par les méthodes ANA, TEM et ANATEM de la série de températures de l'air sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette a montré que la combinaison des deux sources d'informations, l'information régionale contenue dans le modèle TEM et l'information synoptique contenue dans le modèle ANA, permet une meilleure reconstitution que l'utilisation de l'une ou l'autre de ces deux sources d'information prise séparément.

Nous nous proposons ici d'élargir la comparaison entre les trois méthodes à l'échantillon de 22 bassins versants présenté dans le chapitre 1. Dans cette optique, nous avons représenté sur les figures 4.23 à 4.30 les valeurs de scores obtenues sur chaque bassin par chacune des trois méthodes ANA, TEM et ANATEM. Pour les méthodes ANA et ANATEM, la distribution des valeurs obtenues pour les 50 reconstitutions (issues de l'échantillonnage des 50 journées analogues) est représentée par un boxplot (quantiles 10%, 25%, 50%, 75%, 90%, voir figure 2.13), et la valeur correspondant à la reconstitution moyenne (moyenne à chaque pas de temps des 50 reconstitutions) est représentée par un point. Les valeurs des scores du modèle TEM sont marquées par un trait horizontal vert.

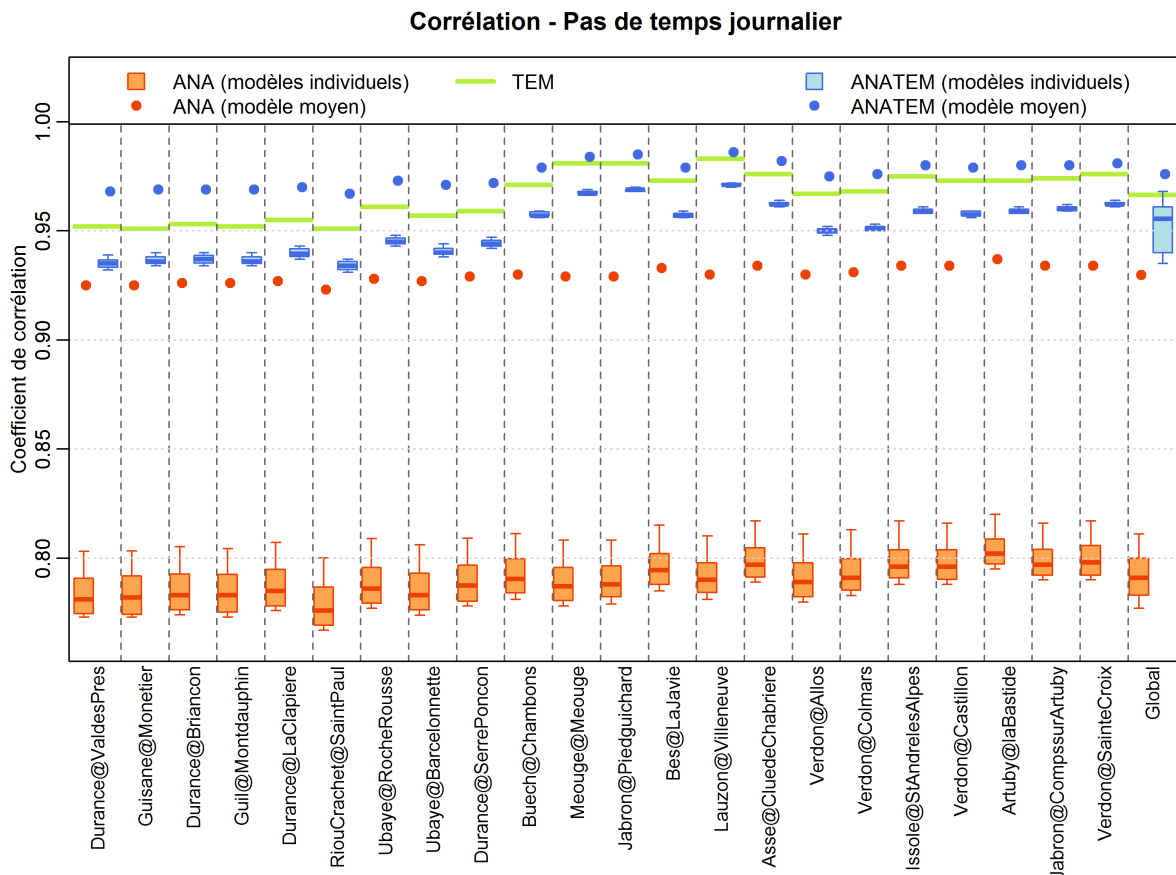


Figure 4.23 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps journalier.

À la vue de ces différents graphiques, une première constatation est que les observations faites à propos de la série de températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette

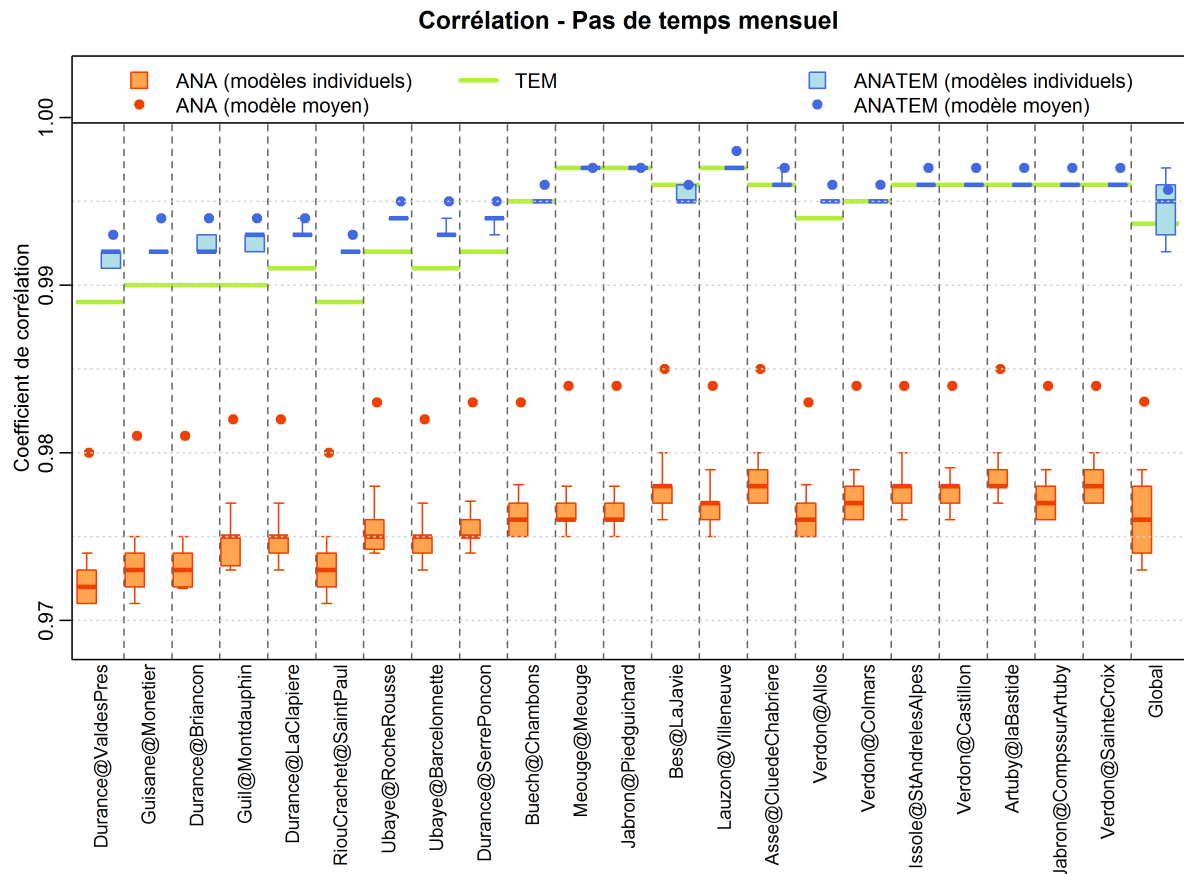


Figure 4.24 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps mensuel.

semblent pour la plupart généralisables à l'ensemble des autres bassins modélisés. Si les performances des reconstitutions peuvent varier d'un bassin à l'autre, la hiérarchisation entre les trois types de reconstitution (ANA, TEM, ANATEM) est souvent la même pour presque tous les bassins, sauf en ce qui concerne les ratios d'écart-type aux pas de temps journalier et mensuel.

Concernant les coefficients de corrélation, on observe que quelque soit le pas de temps, les reconstitutions ANA sont assez largement en dessous des deux autres méthodes. Cela est particulièrement vrai au pas de temps annuel où les coefficients de corrélation des reconstitutions moyennes ANA varient entre 0.4 et 0.6 alors qu'ils sont proches de 0.9 pour les modèles TEM et ANATEM.

Au pas de temps journalier (figure 4.23), la différence, pour les modèles ANA et ANATEM, entre le coefficient de corrélation de la reconstitution moyenne et des reconstitutions individuelles est marquée : pour le modèle ANA on passe d'environ 0.80 à environ 0.93, et pour le modèle ANATEM les valeurs des reconstitutions individuelles varient entre 0.93 et 0.97 environ, alors que celles des reconstitutions moyennes varient de 0.97 à 0.99. Pour tous les bassins, les reconstitutions individuelles ANATEM ont une corrélation inférieure à celle de la reconstitution TEM alors que la reconstitution moyenne ANATEM est mieux corrélée à l'observé que la reconstitution TEM.

Au pas de temps mensuel (figure 4.24), excepté pour le bassin du Bes à La Javie, les corrélations des reconstitutions ANATEM (à la fois individuelles et moyenne) sont égales ou légèrement supérieures à celles des modèles TEM. Dans l'ensemble, ces reconstitutions ANATEM sont très bien corrélées avec l'observé au pas de temps mensuel puisque leur coefficient de corrélation est toujours supérieur à 0.99.

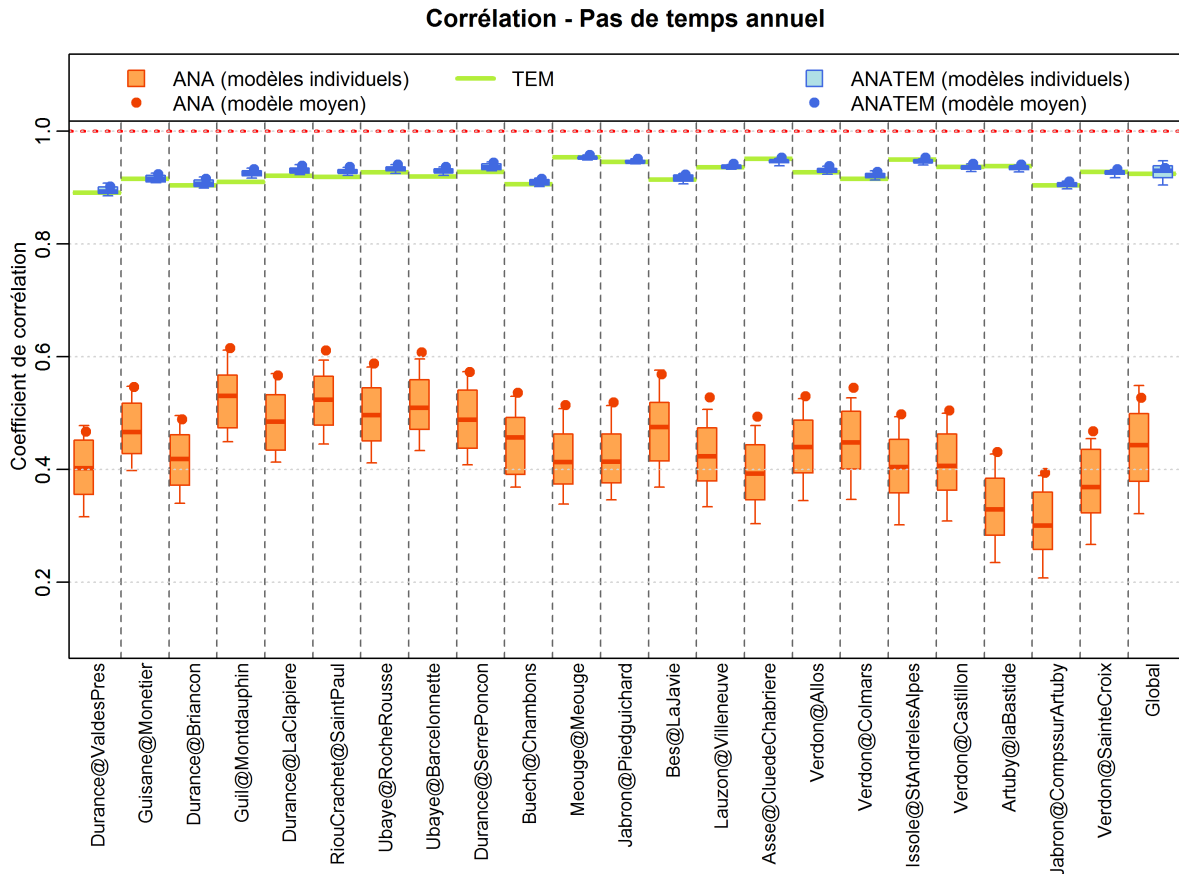


Figure 4.25 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps annuel.

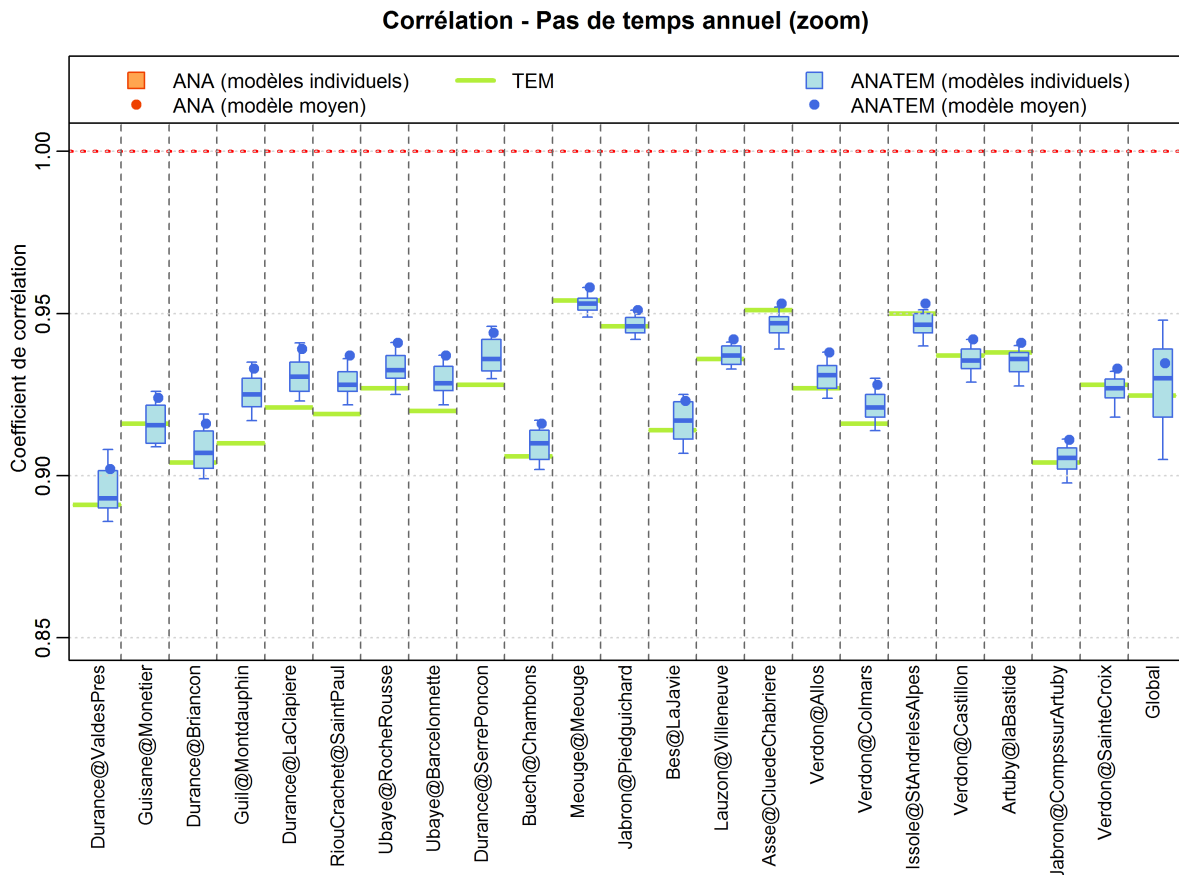


Figure 4.26 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps annuel (zoom).

Au pas de temps annuel (figure 4.25), comme nous l'avons observé sur l'Ubaye à Barcelonnette, les corrélations de l'ensemble des modèles sont moins bonnes qu'aux pas de temps journalier et mensuel où elles étaient particulièrement bonnes du fait de la forte saisonnalité de la variable température de l'air. On observe néanmoins à ce pas de temps de bonnes performances à la fois du modèle TEM et du modèle ANATEM. Ces deux méthodes sont très proches sur le plan de la corrélation, mais on voit sur la figure 4.26 que la reconstitution moyenne ANATEM est systématiquement supérieure au modèle TEM.

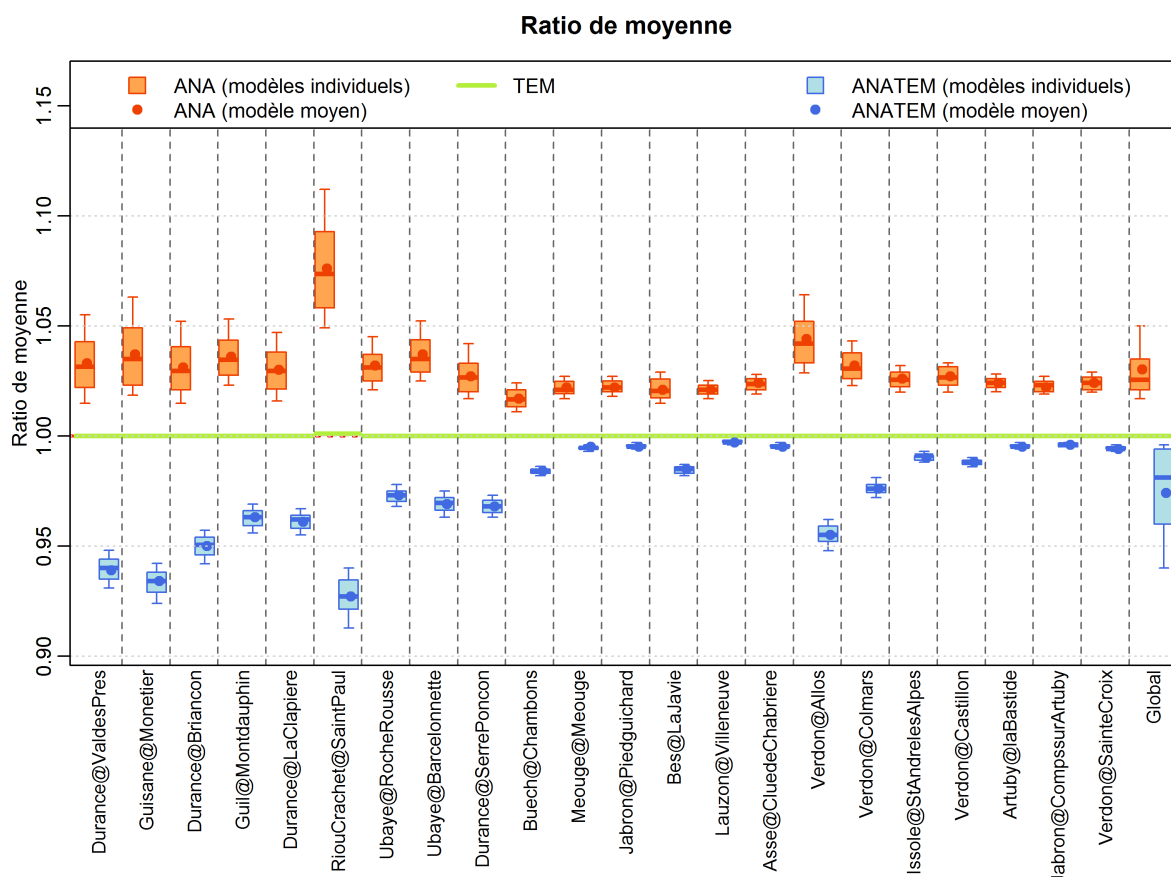


Figure 4.27 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : ratio de moyenne.

La figure 4.27 présente les ratios de moyenne obtenus sur chacun des bassins avec les trois méthodes de reconstitution des séries de températures de l'air. La méthode TEM est construite de manière à ce que la reconstitution ait la même moyenne que la série d'observés, le ratio de moyenne obtenu avec cette méthode est donc égal à un pour tous les bassins. En revanche, la méthode ANA produit des reconstitutions légèrement biaisées en moyenne, ce biais est compris entre +2% et +7% environ pour la reconstitution moyenne. On trouve des biais du même ordre de grandeur au niveau des reconstitutions produites à l'aide du modèle ANATEM, mais cette fois négatifs : le biais de la reconstitution moyenne ANATEM est compris entre 0 et -7% environ. En valeur absolue, les biais de moyenne des reconstitutions ANATEM semblent être plus importants sur les bassins les plus en altitude.

Sur le plan de la reproduction de l'écart-type de la série de températures, la méthode ANA montre sur tous les bassins des performances correctes au pas de temps journalier pour les reconstitutions individuelles, mais un biais négatif important (-15% environ)

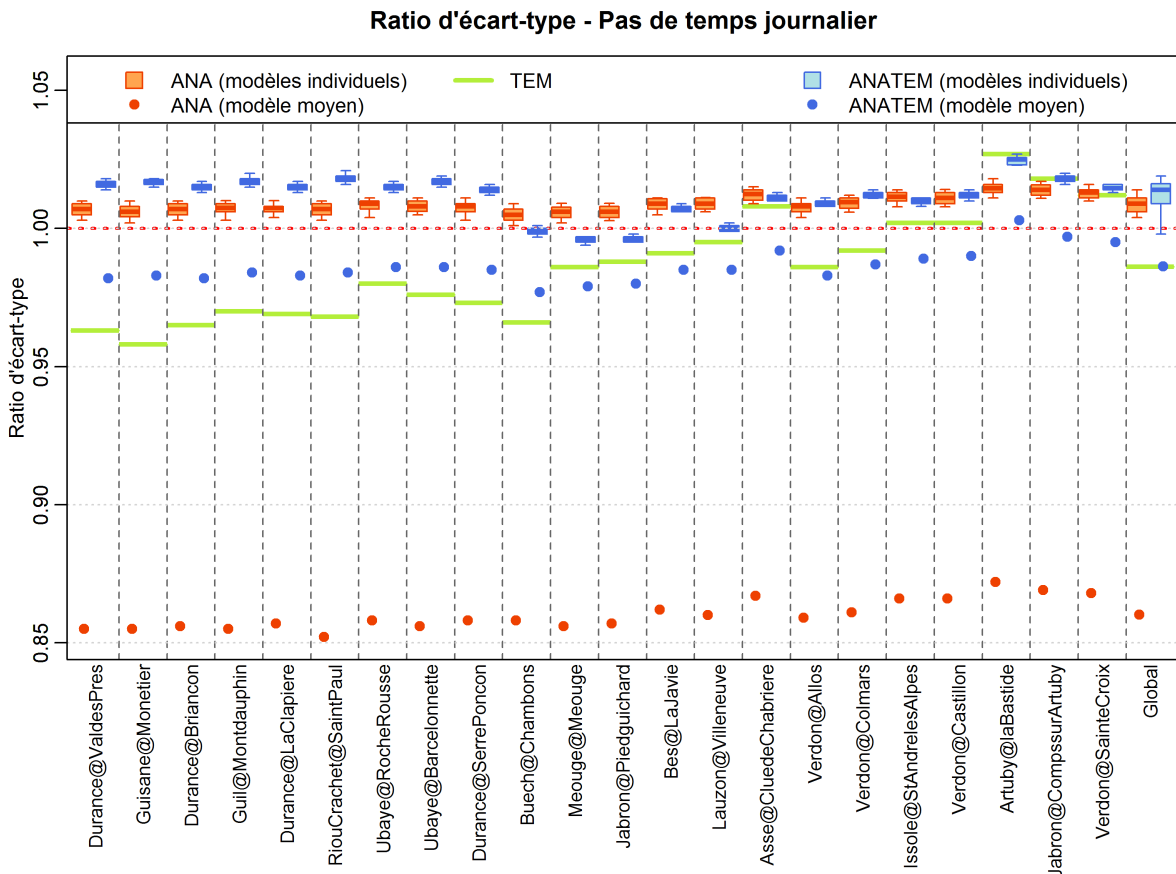


Figure 4.28 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.

pour la reconstitution moyenne. Aux pas de temps mensuel et annuel, les biais d'écart-type observés sur les reconstitutions ANA sont nettement plus importants que ceux des reconstitutions TEM et ANATEM.

La comparaison, au pas de temps journalier (figure 4.28), entre les méthodes TEM et ANATEM est un peu plus complexe. Notons en premier lieu que pour l'une ou l'autre des deux méthodes, la reproduction de l'écart-type de la série est globalement bonne, puisque les ratios d'écart-type sont compris entre 0.96 et 1.03. Au pas de temps journalier les biais d'écart-type du modèle TEM sont assez variables : de -4% à +3% environ. Pour le modèle ANATEM, ces biais sont, à quelques exceptions près, négatifs pour les reconstitutions moyennes (de 0 à -2%), et positifs pour les reconstitutions individuelles (jusqu'à +3%). En valeur absolue, le biais d'écart-type du modèle moyen de la méthode ANATEM est inférieur à celui de la méthode TEM dans 13 cas sur les 22.

Au pas de temps mensuel (figure 4.29), les reconstitutions moyennes du modèle ANATEM ont un comportement semblable en ce qui concerne l'écart-type à celui des reconstitutions individuelles. Les ratios d'écart-type de ces reconstitutions par rapport aux observés sont compris entre 0.97 et 1 selon les bassins. Le modèle TEM présente cette fois un biais d'écart-type légèrement inférieur à celui du modèle ANATEM pour 13 bassins sur les 22 étudiés.

Au pas de temps annuel, on observe globalement des biais d'écart-type plus importants qu'aux pas de temps journalier et mensuel. Avec la méthode TEM, ces biais peuvent atteindre -16% et sont dans une large majorité des cas supérieurs, en valeur absolue, à ceux obtenus par la méthode ANATEM, lesquels sont compris entre -10% et +5% environ.

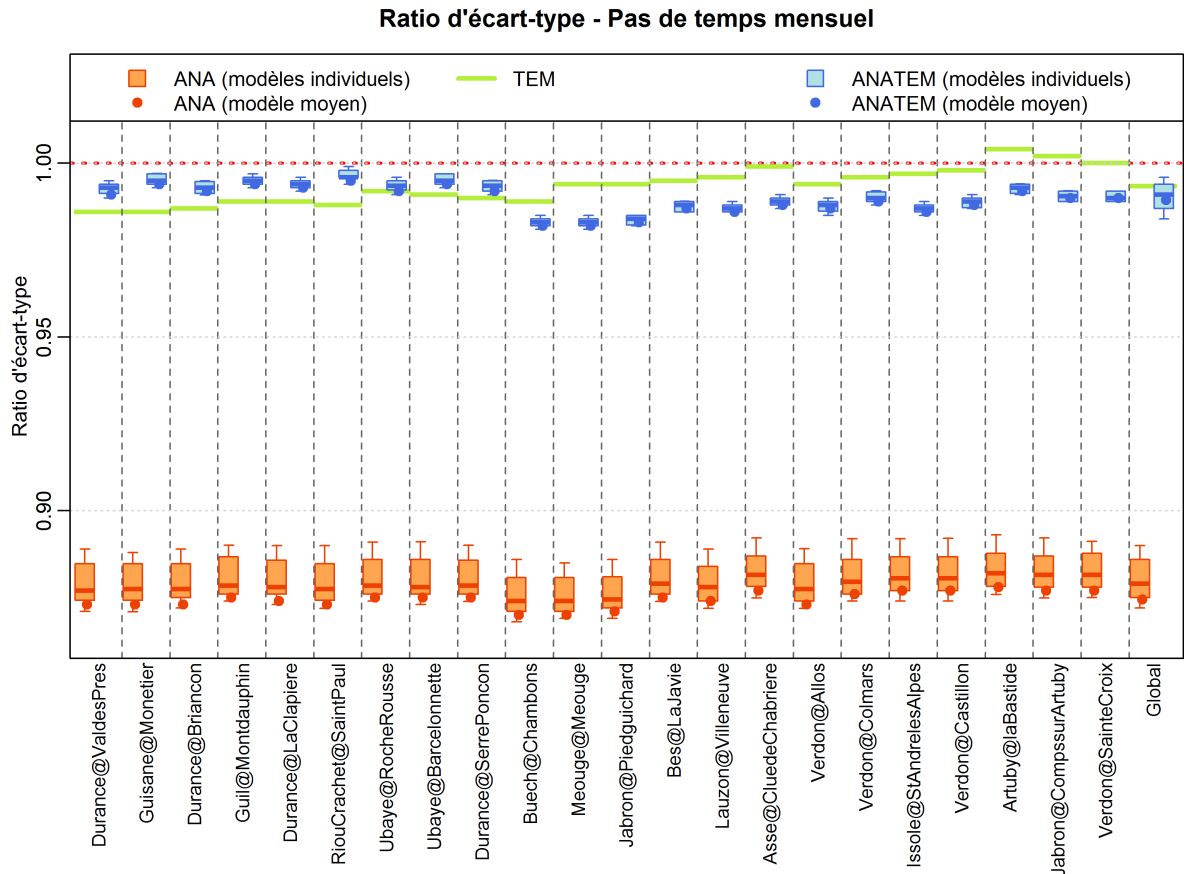


Figure 4.29 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps mensuel.

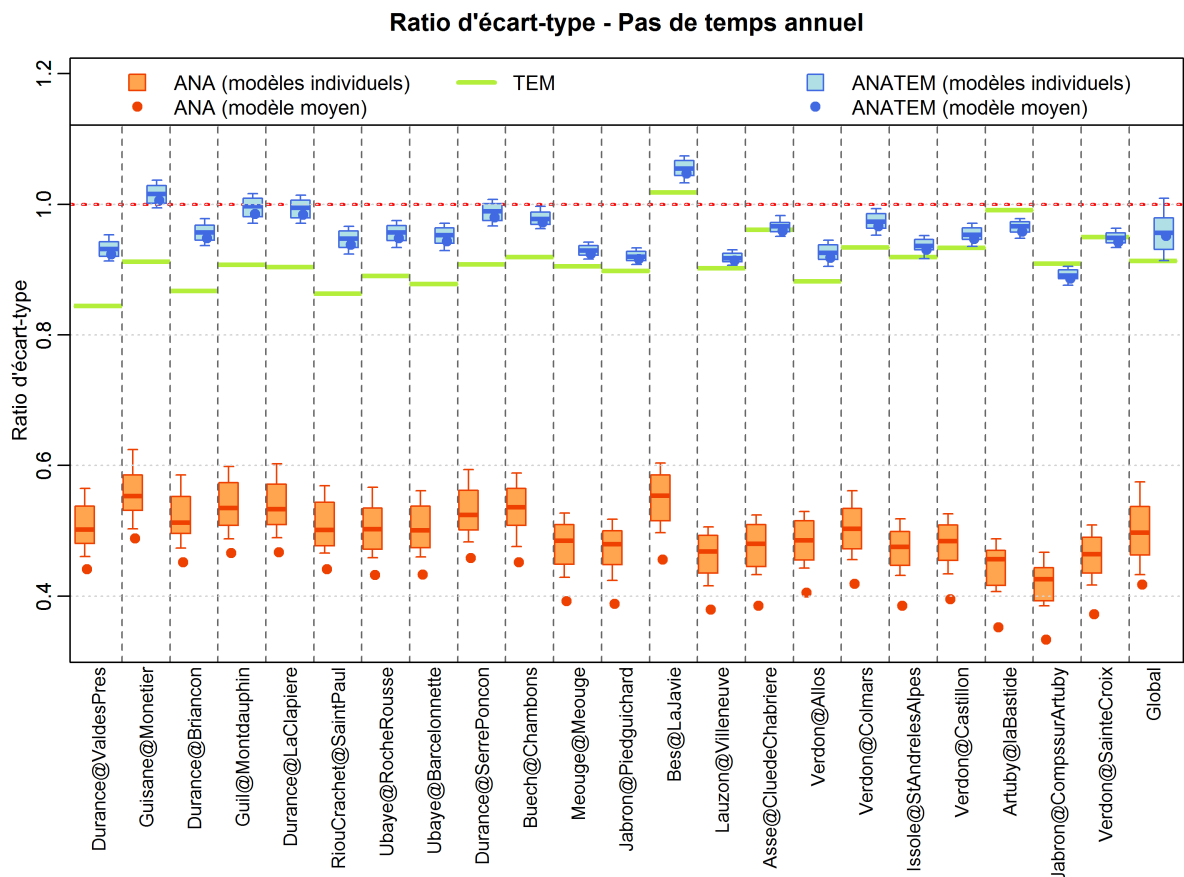


Figure 4.30 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps annuel.

IV.1.2 | Analyse régionale

Afin d'étudier d'un point de vue spatial les différences de corrélation entre les reconstitutions obtenues via les méthodes ANA, TEM et ANATEM, nous avons reporté sur les figures 4.31a à 4.31b les coefficients de corrélation obtenus au pas de temps journalier par chacune des trois méthodes pour les 22 bassins étudiés. Pour les méthodes ANA et ANATEM, le coefficient de corrélation indiqué correspond à celui de la reconstitution moyenne. La même échelle de couleur est utilisée pour ces trois figures afin de faciliter les comparaisons. L'emplacement de la série de températures de l'air servant de témoin régional (Marseille) est également indiqué.

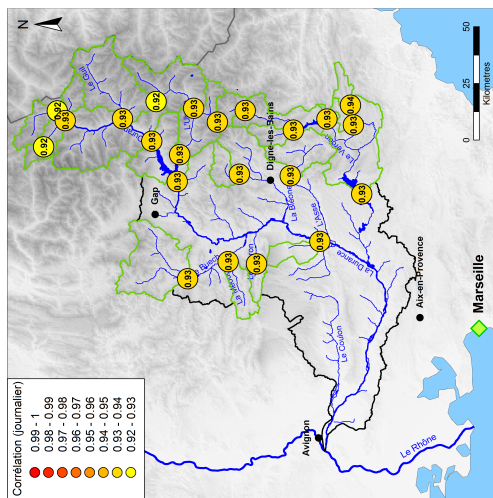
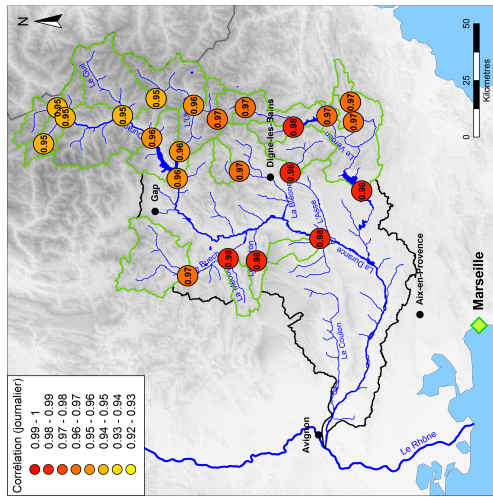
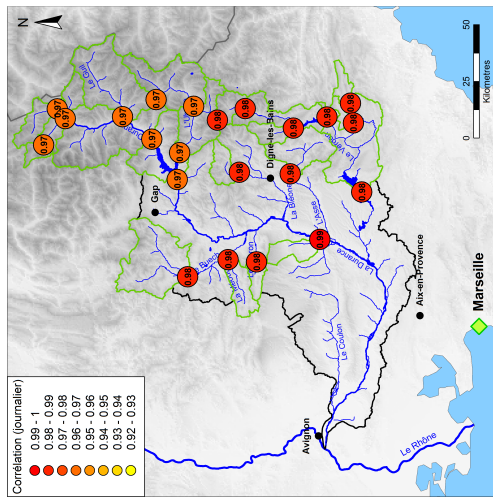
On peut remarquer que lorsque la méthode ANA est utilisée, outre le fait que les coefficients de corrélation sont plus faibles qu'avec les autres méthodes, leur valeur varie très peu d'un bassin à l'autre (figure 4.31a). En effet, de l'amont à l'aval du bassin, les coefficients de corrélation sont compris entre 0.92 et 0.94, et la valeur de 0.93 se retrouve sur 18 bassins sur 22. Trois reconstitutions ont un coefficient de corrélation de 0.92 et il s'agit des séries de températures de trois bassins parmi les plus élevés en altitude : ceux de la Durance à Val-des-Près (altitude médiane 2270 m), de la Guisane au Monétier-les-Bains (altitude médiane 2360 m) et du Riou de Crachet à Saint-Paul (station à 2460 m).

Les performances en matière de corrélation des reconstitutions obtenues avec la méthode TEM (figure 4.31b) présentent une variabilité légèrement plus importante d'un bassin à l'autre. Les coefficients de corrélation pour les différents bassins varient entre 0.95 et 0.98, et on observe assez nettement un gradient de ces corrélations du nord-est vers le sud-ouest du bassin, c'est-à-dire globalement au fur et à mesure que l'on se rapproche de Marseille. Bien que cette observation ne soit pas réellement surprenante, il est intéressant de constater que la proximité du témoin utilisé pour la reconstitution influe sur la qualité de celle-ci.

On retrouve ce gradient, mais de manière atténuée, sur la carte présentant les coefficients de corrélation au pas de temps journalier obtenus avec la méthode ANATEM : dans toute la haute-Durance on trouve une corrélation de 0.97, et celle-ci vaut 0.98 sur tous les autres bassins, excepté celui du Lauzon à Villeneuve (0.99).

Pour mieux visualiser l'apport de chacune des deux sources d'information (régionale et synoptique) combinées dans la méthode ANATEM, nous avons représenté sur la figure 4.31d (respectivement 4.31e) la différence de corrélation, toujours au pas de temps journalier, entre la reconstitution obtenue via la méthode ANATEM et celle construite par la méthode ANA (respectivement TEM).

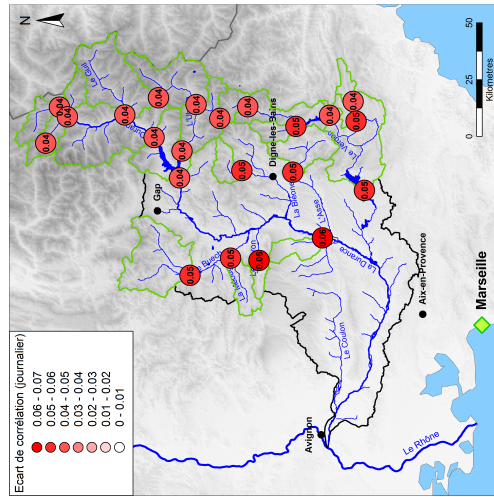
La première de ces deux cartes (figure 4.31d) met en évidence, par la différence de corrélation entre ANATEM et ANA, l'apport de l'information régionale portée par le modèle TEM. On peut observer que cet apport est globalement d'autant plus important que l'on se rapproche de Marseille, lieu de la série témoin. Au contraire, la figure 4.31d montre que, lorsque le modèle TEM est très performant, l'apport en corrélation des données synoptiques est très faible voire nul, alors que ces données se révèlent être un complément intéressant lorsque l'on s'éloigne de Marseille et que le modèle TEM devient moins performant.



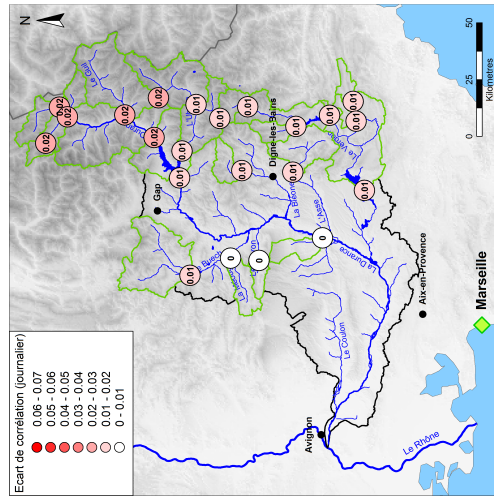
(a) ANA

(b) TEM

(c) ANATEM



(d) ANATEM - ANA



(e) ANATEM - TEM

Figure 4.31 – Comparaison des performances en corrélation au pas de temps journalier des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM selon l'emplacement du bassin.

Les observations faites sur la figure 4.31 mettent en évidence une relation assez nette entre le coefficient de corrélation au pas de temps journalier de la reconstitution ANATEM des températures de l'air et la distance entre l'emplacement de la série à reconstituer et celui de la série témoin. Afin d'élargir cette analyse, nous avons représenté sur la figure 4.32 les valeurs des coefficients de corrélation (première ligne), des ratios de moyenne (troisième ligne) et des ratios d'écart-type (quatrième ligne) obtenues au pas de temps journalier sur chacun des 22 bassins versants avec les trois méthodes de reconstitution de températures de l'air en fonction de trois caractéristiques des bassins versants : leur distance à la série témoin (première colonne), leur surface (deuxième colonne) et leur altitude médiane (troisième colonne). Les figures 4.32d à 4.32f (deuxième ligne) sont construites de la même manière, mais ici la grandeur représentée est la différence de corrélation entre la reconstitution ANATEM et les reconstitutions ANA et TEM. Sur tous les graphiques, les points représentant les méthodes ANA et ANATEM correspondent aux performances de la reconstitution moyenne.

On retrouve logiquement les observations précédentes concernant la corrélation au pas de temps journalier (figure 4.32a), qui a tendance pour les modèles TEM et ANATEM à décroître lorsque la distance au témoin augmente. On voit également sur la figure 4.32d que l'apport en corrélation du modèle TEM diminue lorsque l'on s'éloigne du témoin, tandis que l'apport du modèle ANA augmente. Ce même critère d'éloignement entre la série à reconstituer et la série témoin semble également avoir une légère influence sur le ratio de moyenne des reconstitutions ANATEM (figure 4.32g) : le biais de moyenne de ces reconstitutions, toujours négatif, paraît plus important lorsque la série à reconstituer est éloignée du témoin. En revanche, le ratio d'écart-type ne semble pas impacté par ce critère.

On n'observe pas de relation nette entre la surface du bassin versant de reconstitution et les performances des différentes reconstitutions des séries de températures de l'air. L'altitude médiane du bassin versant, en revanche, paraît impacter légèrement la corrélation et le ratio de moyenne de ces reconstitutions. Les comportements observés en relation à ce critère sont semblables à ceux observés avec la distance au témoin (diminution de la corrélation et augmentation du biais de moyenne lorsque l'altitude médiane augmente). Étant donné l'emplacement de la série témoin (Marseille) au sud de la zone d'étude et au niveau de la mer, on peut imaginer que ces deux critères sont liés, puisque les bassins versants les plus élevés sont également, de manière générale, les plus au nord du bassin de la Durance, et donc les plus éloignés de Marseille. Cependant, cela n'est probablement pas l'unique explication puisqu'on peut observer également sur les reconstitutions ANA une légère augmentation du biais de moyenne lorsque l'altitude médiane du bassin versant de reconstitution augmente (figure 4.41i).

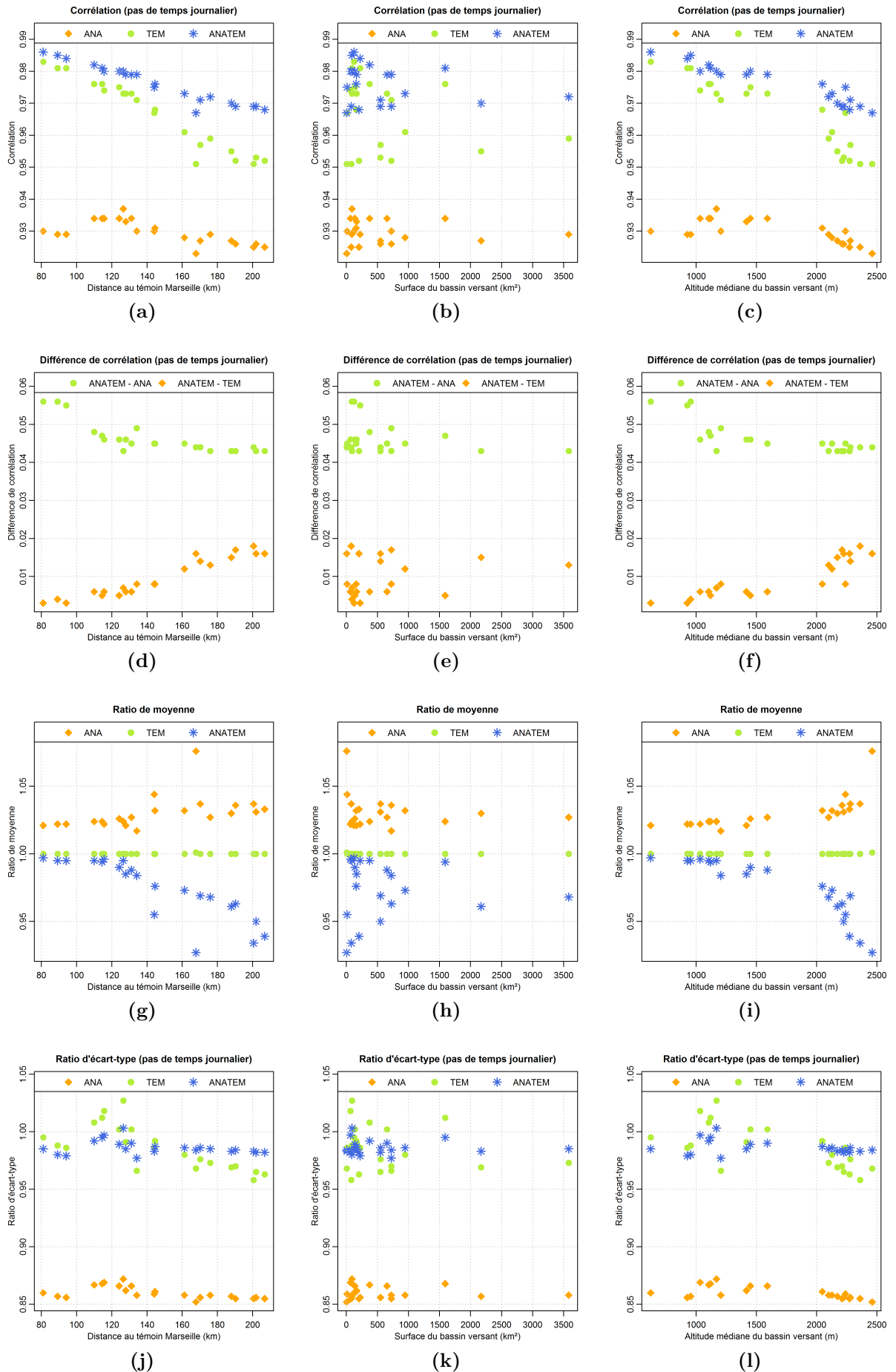


Figure 4.32 – Comparaison des performances au pas de temps journalier des reconstitutions de températures de l'air ANA, TEM et ANATEM selon la distance au témoin, la surface, et l'altitude moyenne du bassin versant. Pour les méthodes ANA et ANATEM, les points correspondent aux reconstitutions moyenne.

IV.2 | Reconstitution des séries de précipitations

IV.2.1 | Performances des modélisations sur les 22 bassins versants

De la même manière que ce qui a été présenté précédemment sur les reconstitutions de températures de l'air, nous donnons dans ce paragraphe quelques éléments de comparaison, sur les 22 bassins versants de notre échantillon d'étude, entre les reconstitutions de précipitations par les méthodes ANA, TEM et ANATEM.

Les figures 4.33 à 4.39 sont construites de la même manière que les figures 4.23 à 4.30, c'est-à-dire que pour un critère de performance donné (une figure), on a représenté, pour chacun des 22 bassins, les distributions de ce critère pour les 50 reconstitutions ANA et les 50 reconstitutions ANATEM sous forme de boxplot, et les valeurs de ce critère pour la reconstitution moyenne ANA et la reconstitution moyenne ANATEM sous forme de points et pour la reconstitution TEM sous forme d'un trait horizontal.

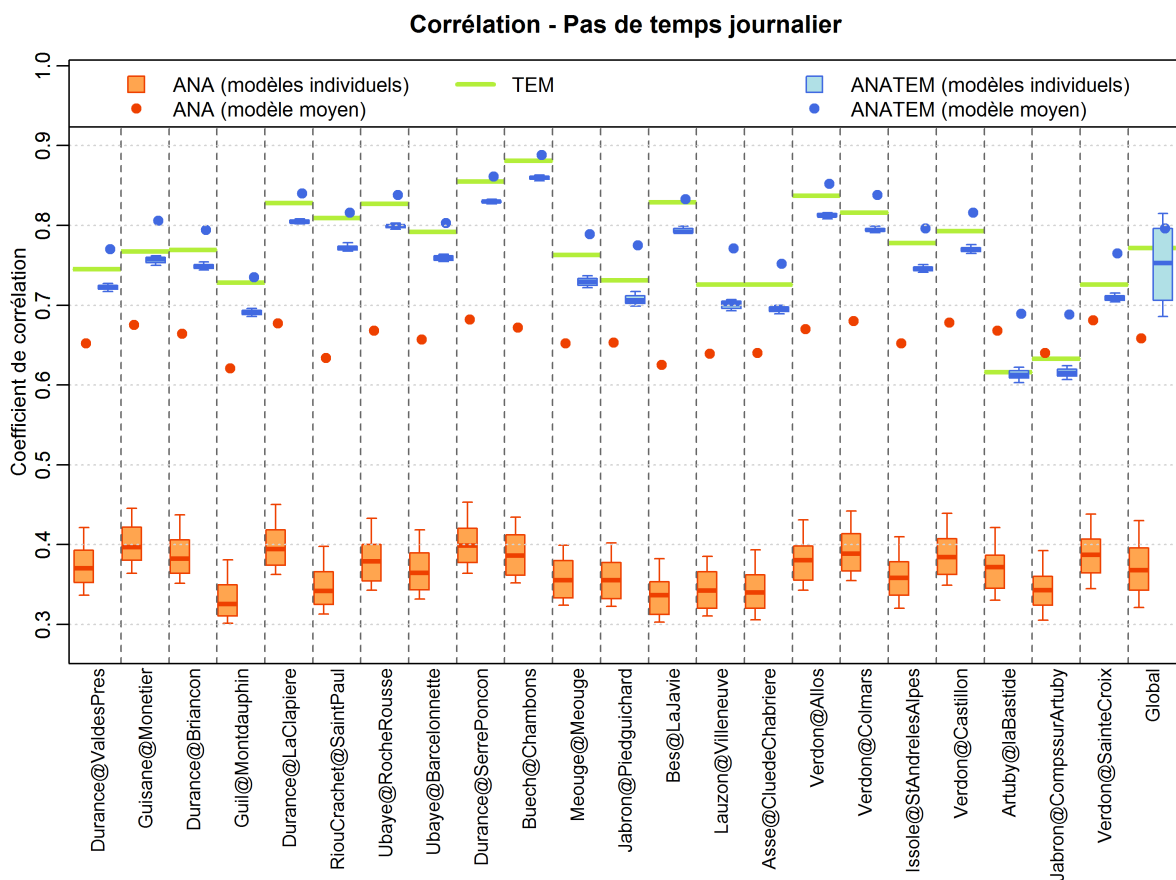


Figure 4.33 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps journalier.

Les coefficients de corrélation au pas de temps journalier sont représentés sur la figure 4.33. On y observe dans un premier temps que l'ensemble des reconstitutions individuelles ANA ont une corrélation avec l'observé variant autour de 0.4, bien inférieure à celle des reconstitutions TEM et ANATEM. Cependant, la reconstitution moyenne ANA montre des performances en corrélation bien supérieures à celles des séries individuelles qui la constituent : son coefficient de corrélation est pour tous les bassins compris entre 0.6 et 0.7, et dépasse ainsi celui de la reconstitution TEM sur les deux bassins sur lesquels cette dernière est la moins bonne, à savoir ceux de l'Artuby à la Bastide et du Jabron

à Comps-sur-Artuby. Pour le reste des bassins, la reconstitution TEM et les différentes reconstitutions ANATEM ont une corrélation supérieure à celle des reconstitutions ANA,

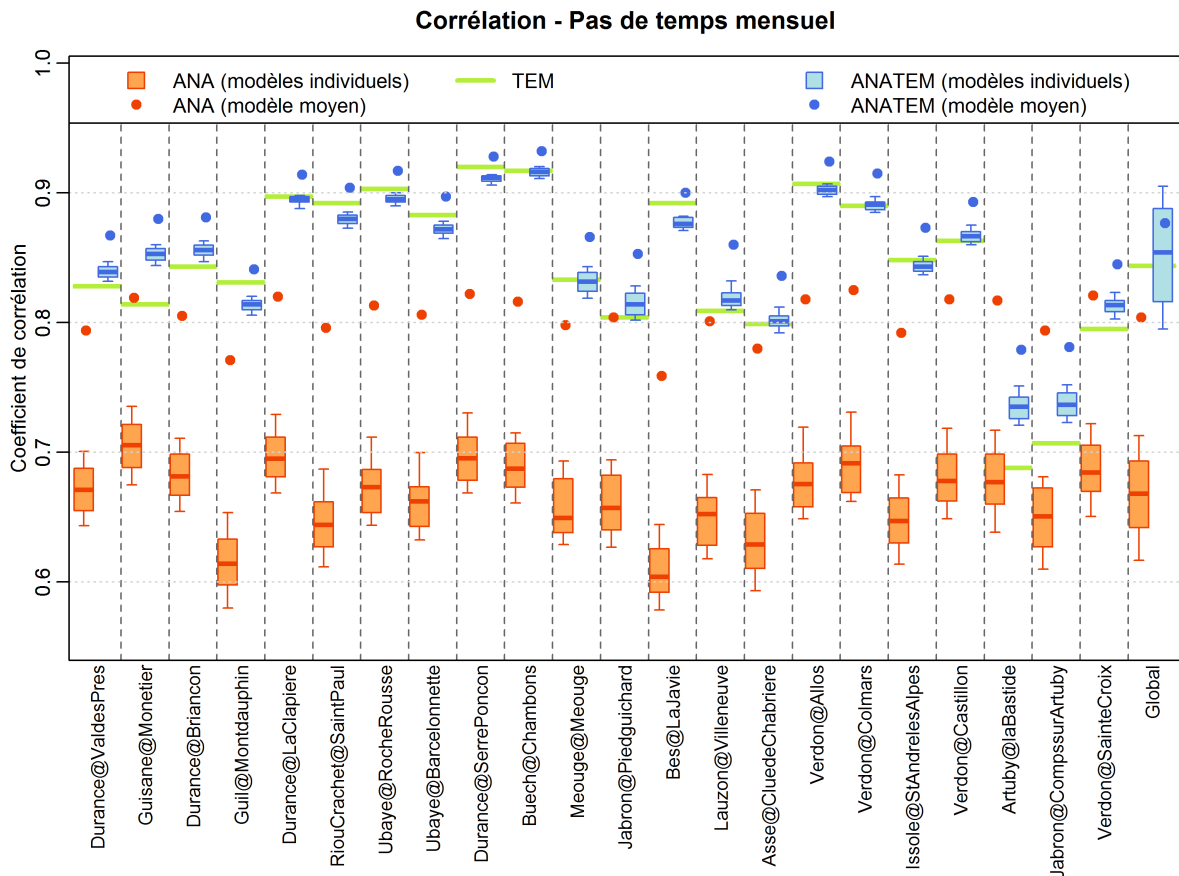


Figure 4.34 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps mensuel.

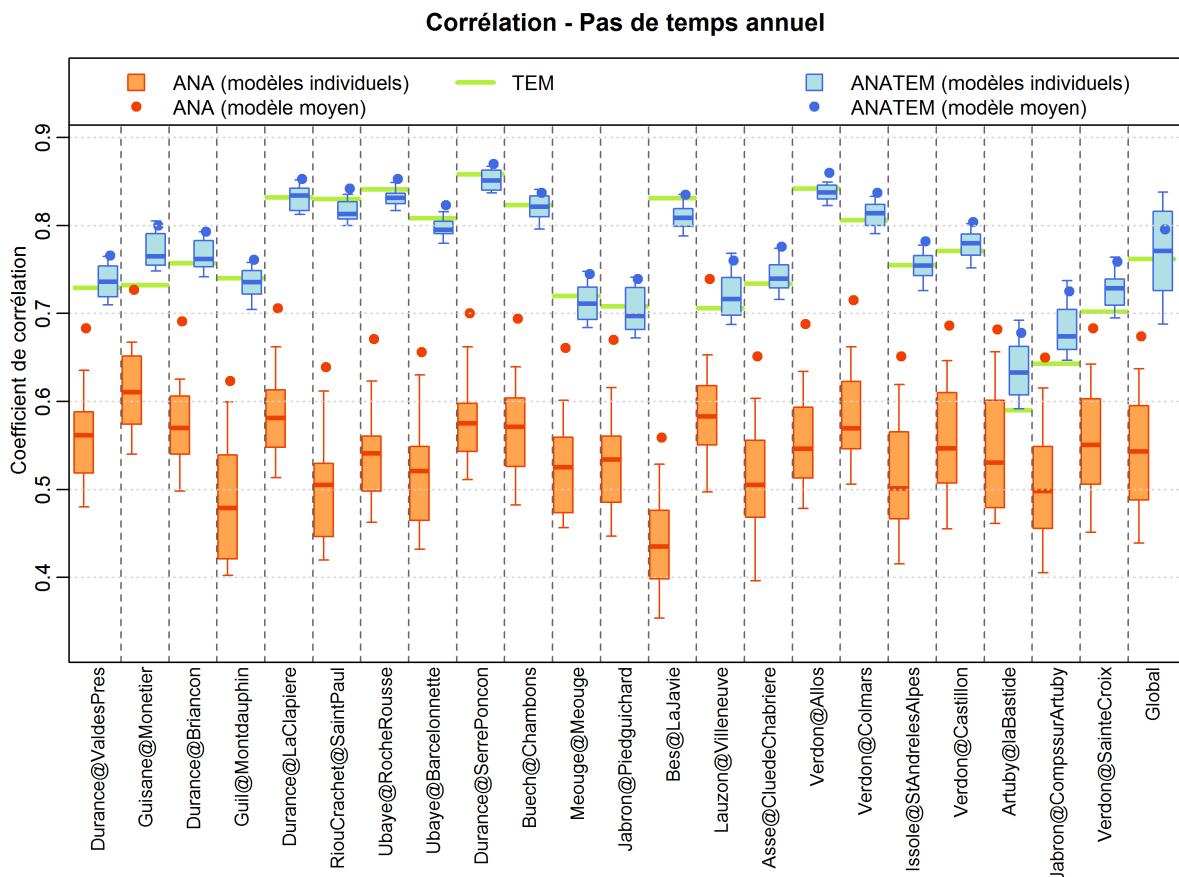


Figure 4.35 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : corrélation au pas de temps annuel.

y compris la reconstitution moyenne. Les coefficients de corrélation obtenus avec la méthode TEM varient entre 0.61 et 0.88. Concernant la méthode ANATEM, on observe également une différence de performance entre les reconstitutions individuelles et la reconstitution moyenne, mais celle-ci est moins marquée que dans le cas des modèles ANA. La reconstitution moyenne ANATEM est systématiquement mieux corrélée à l'observé que le modèle TEM, tandis que les reconstitutions individuelles sont pour la plupart légèrement en deçà du modèle TEM.

Au pas de temps mensuel (figure 4.34), les performances du modèle ANA sont légèrement plus proches de celles des modèles TEM et ANATEM, et sur le bassin de l'Artuby à la Bastide, certaines reconstitutions individuelles ANA sont mieux corrélées à l'observé que la reconstitution TEM. Plus généralement, on retrouve pour beaucoup de bassins la même configuration qu'au pas de temps journalier, c'est-à-dire que du moins bien corrélé au mieux corrélé, les modèles apparaissent dans l'ordre ANA (modèles individuels), ANA (modèle moyen), ANATEM (modèles individuels), TEM, ANATEM (modèle moyen). Cependant, sur une dizaine de bassins, en majorité ceux pour lesquels le modèle TEM est le moins bon, on constate que tout ou partie des reconstitutions individuelles ANATEM sont meilleures que le modèle TEM.

Au pas de temps annuel (figure 4.35), la supériorité en corrélation des modèles ANATEM par rapport aux modèles TEM s'amplifie légèrement. En revanche, pour l'ensemble des modèles, les corrélations sont globalement moins élevées qu'au pas de temps mensuel. Elles sont par exemple comprises entre 0.6 et 0.85 pour le modèle TEM alors qu'elles vont de 0.7 à 0.92 environ au pas de temps mensuel.

La figure 4.36 montre les ratios de moyenne entre les séries modélisées par chacune des trois méthodes et les séries observées de chaque bassin versant. La méthode TEM étant non biaisée par construction, les ratios de moyenne obtenus avec cette méthode sont de 1 sur tous les bassins. Pour les méthodes ANA et ANATEM, on trouve des ratios de moyenne relativement proches et compris entre 0.87 et 1.05 environ, pour la plupart inférieurs à un. Pour 16 bassins sur les 22 étudiés, le biais de moyenne est moins important avec le modèle ANATEM qu'avec le modèle ANA.

En ce qui concerne les ratios d'écart-type, on remarque qu'au pas de temps journalier (figure 4.37) ceux des reconstitutions individuelles ANA sont globalement les plus proches de la valeur optimale de 1, alors que ceux des reconstitutions moyennes ANA en sont les plus éloignés (entre 0.5 et 0.6 environ). Pour les modèles TEM et ANATEM, ces ratios sont compris entre 0.9 et 1.2 environ, révélant des biais de variance qui peuvent être importants. En moyenne, la reconstitution moyenne ANATEM semble, hors ANA, être le modèle reproduisant le mieux l'écart-type des séries journalières de précipitations, mais elle peut tout de même être biaisée en écart-type de $\pm 15\%$ environ.

Sur les cumuls mensuels de précipitations, la hiérarchisation entre les biais d'écart-type des différentes reconstitutions (figure 4.38) est assez variable d'un bassin à l'autre, sauf pour la reconstitution moyenne ANA qui est systématiquement la plus biaisée, bien qu'elle le soit moins qu'au pas de temps journalier. Sur la plupart des bassins, les trois méthodes ont un biais d'écart-type négatif, c'est-à-dire que la gamme de variation des cumuls mensuels de précipitations est sous-estimée.

On peut faire les mêmes observations au pas de temps annuel : la figure 4.39 ne permet pas réellement de qualifier l'une des méthodes comme étant globalement meilleure, en revanche, les reconstitutions moyenne de la méthode ANA sont encore une fois les plus biaisées.

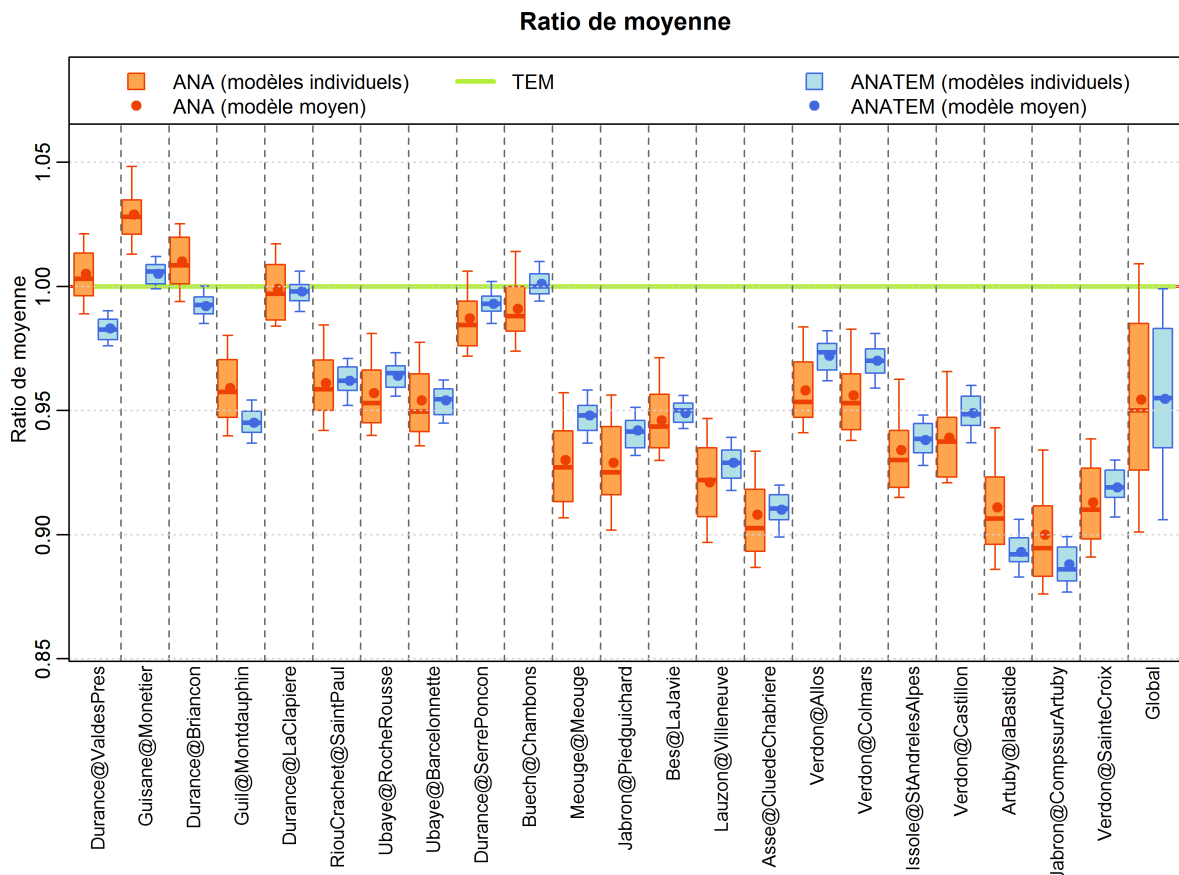


Figure 4.36 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : ratio de moyenne.

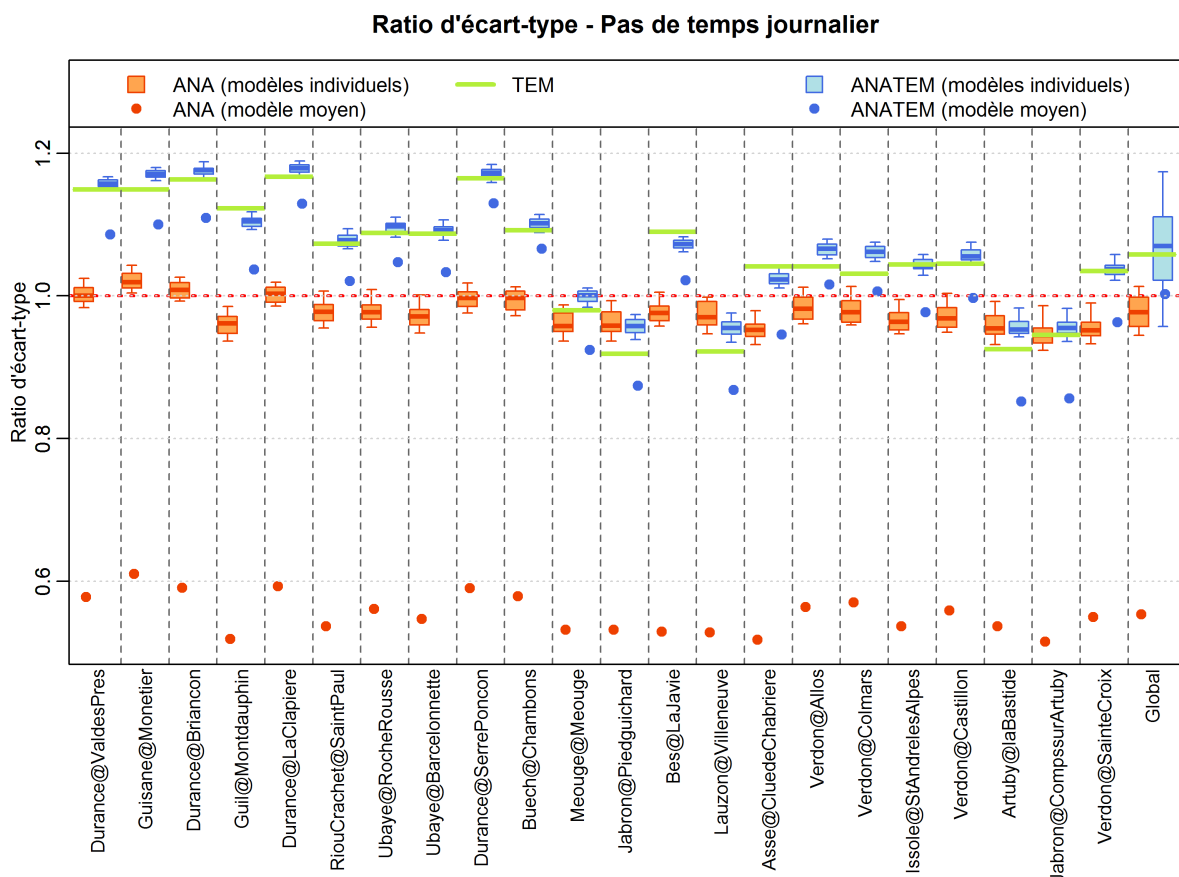


Figure 4.37 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.

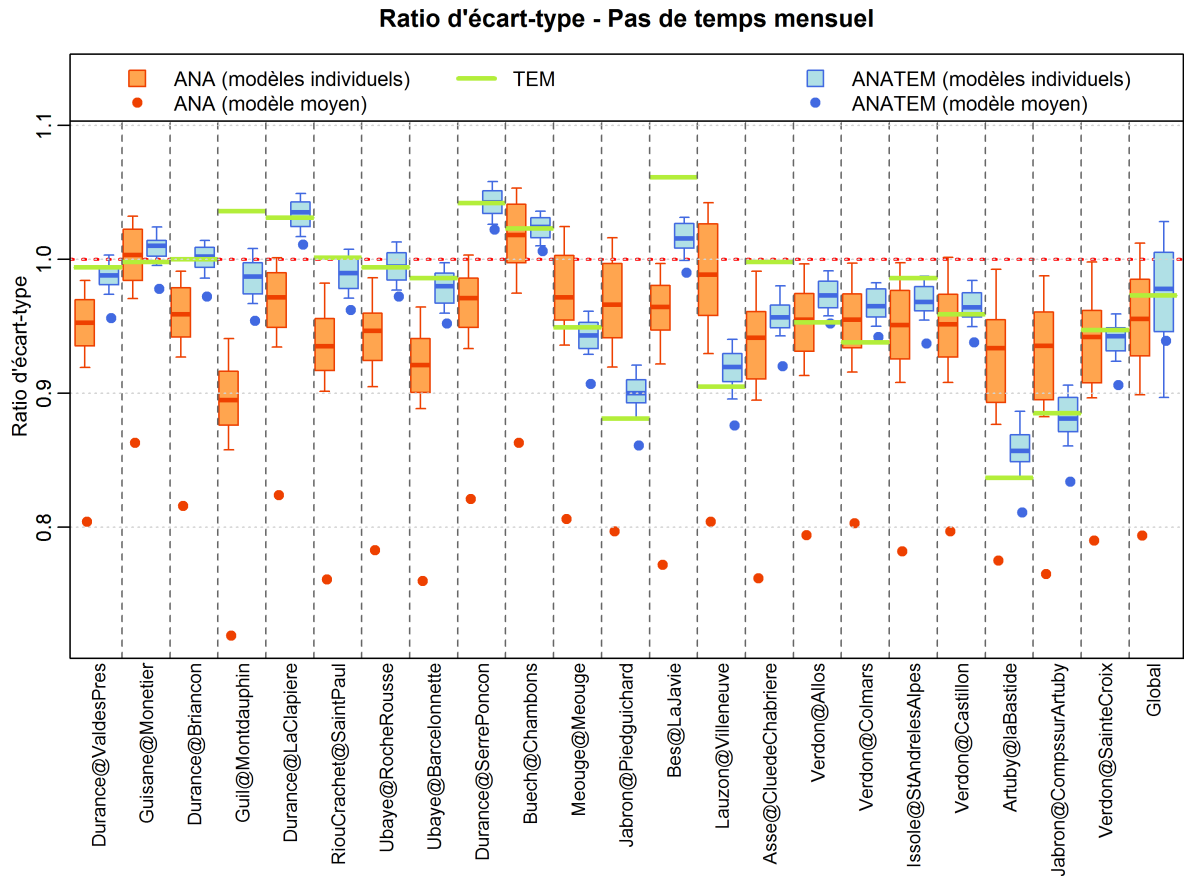


Figure 4.38 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps mensuel.

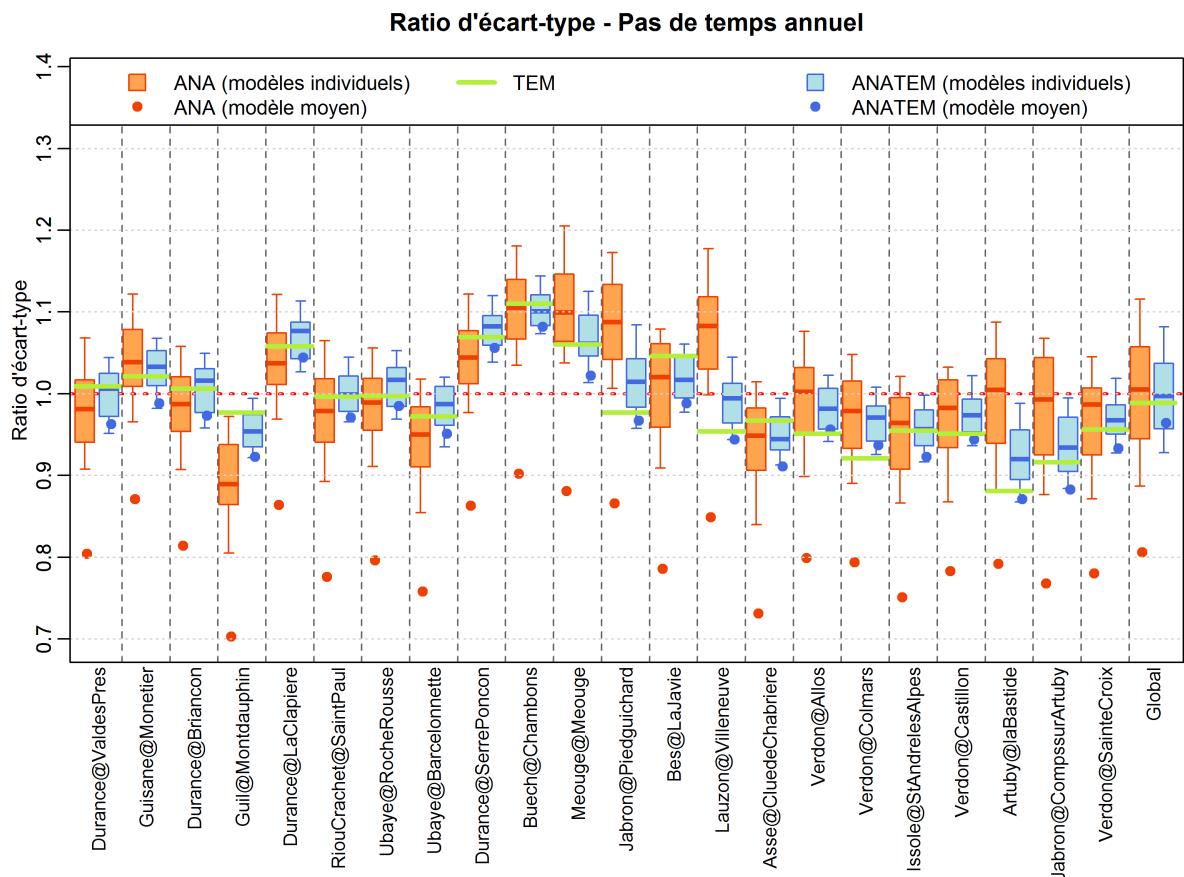


Figure 4.39 – Comparaison sur l'échantillon de 22 bassins des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM : ratio d'écart-type au pas de temps annuel.

IV.2.2 | Analyse régionale

De la même manière que nous l'avons fait pour la reconstitution de séries de températures de l'air, nous présentons ici d'un point de vue spatial les corrélations au pas de temps journalier entre observés et modélisés pour les reconstitutions ANA (figure 4.40a), TEM (figure 4.40b) et ANATEM (figure 4.40c). Pour les modèles ANA et ANATEM, seule la valeur obtenue pour la reconstitution moyenne est représentée. L'échelle de couleurs utilisée est différente de celle de la figure 4.31 (températures de l'air), mais est identique pour les trois méthodes représentées ici. La série utilisée comme témoin pour les précipitations (Gap) est mise en évidence par un triangle bleu.

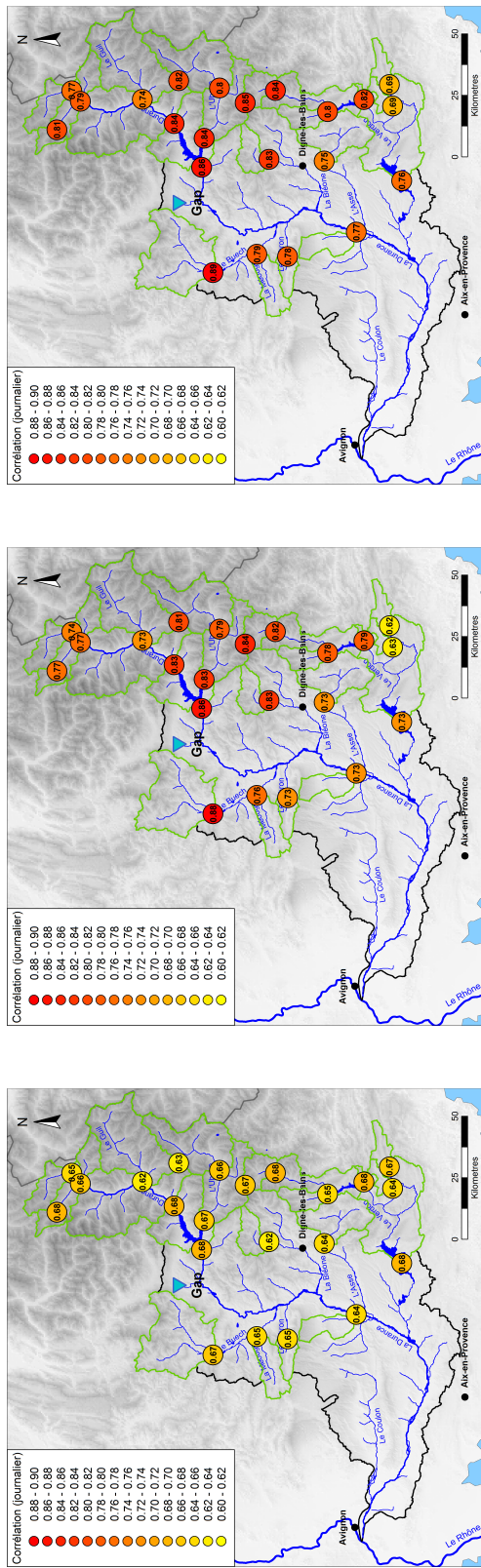
On observe sur la figure 4.40a que la corrélation au pas de temps journalier des reconstitutions ANA varie d'un bassin à l'autre de 0.62 à 0.68. Cette variabilité ne semble pas être liée à l'emplacement du bassin versant ni à ses caractéristiques (altitude, taille...).

Les corrélations journalières observées sur les différents bassins sont nettement plus variables lorsque la méthode TEM est utilisée (figure 4.40b). Celles-ci varient en effet de 0.62 au Sud-Est du bassin à 0.88 sur le bassin du Buech aux Chambons. On remarque ici une forte détermination géographique dans la valeur des coefficients de corrélation : les bassins les plus proches de l'emplacement de la série utilisée comme témoin sont ceux dont la reconstitution est la mieux corrélée à l'observé. *A contrario*, les coefficients de corrélation les plus faibles sont observés sur les bassins éloignés de Gap, au Nord et au Sud-Est du bassin de la Durance.

Avec la méthode ANATEM, la proximité des bassins avec Gap joue également sur la valeur du coefficient de corrélation journalier, mais cette variabilité est légèrement atténuée puisque les coefficients de corrélations obtenus avec ANATEM varient de 0.69 à 0.89.

En s'intéressant aux différences de coefficient de corrélation entre les méthodes ANATEM et ANA (figure 4.40d) et entre les méthodes ANATEM et TEM (figure 4.40e), on peut faire des observations similaires à ce que l'on voyait sur les températures de l'air. L'apport de l'information régionale (témoin) visible sur la carte 4.40d est d'autant plus grand que l'on est proche de Gap, alors que les données synoptiques « complètent » bien le modèle TEM sur les bassins où il est le moins performant, c'est à dire les plus éloignés de Gap.

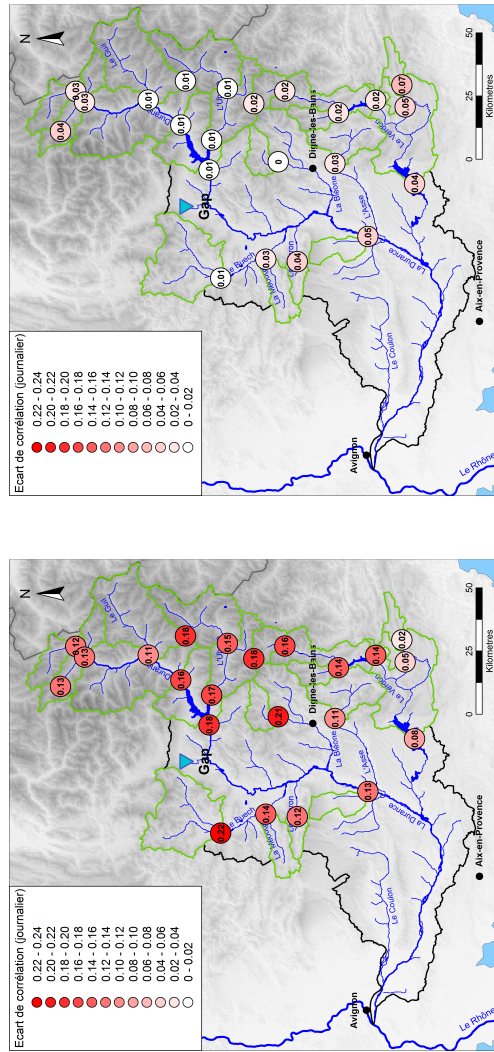
Plus globalement, l'apport de la « part ANA » dans le modèle ANATEM semble en moyenne plus important dans le cas de la reconstitution de précipitations que pour les reconstitutions de températures de l'air. On peut expliquer cette observation d'une part par le fait que la variable précipitation est globalement mieux reproduite par le modèle ANA que la variable température, car elle est plus dépendante de la circulation atmosphérique représentée par les données synoptiques utilisées. D'autre part, le modèle TEM est au contraire plus performant pour la reconstitution des températures de l'air que des précipitations, pour lesquelles les influences locales peuvent avoir une grande importance, ce qui rend plus difficile la reconstitution par comparaison à une autre station même si celle-ci est relativement proche de la série à reconstituer.



(c) ANATEM

(b) TEM

(a) ANA



(e) ANATEM - TEM

(d) ANATEM - ANA

Figure 4.40 – Comparaison des performances en corrélation au pas de temps journalier des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM selon l'emplacement du bassin.

À la manière de ce qui a été présenté sur les températures de l'air, la figure 4.41 montre les performances, constatées sur les 22 bassins versants, des reconstitutions de précipitations construites par les méthodes ANA, TEM et ANATEM en fonction de trois caractéristiques géographiques des bassins versants. Les critères de performances représentés sont la corrélation au pas de temps journalier, le ratio d'écart-type au pas de temps journalier et le ratio de moyenne. Les différences de corrélation au pas de temps journalier observées entre les reconstitutions ANATEM et TEM et entre les reconstitutions ANATEM et ANA sont également représentées. Ces critères sont représentés en fonction de la distance entre le bassin versant de reconstitution et la série témoin de Gap, de la surface du bassin versant et de son altitude médiane.

A nouveau, on retrouve la décroissance du coefficient de corrélation des reconstitutions TEM et ANATEM lorsque la série à reconstituer s'éloigne de la série témoin (figure 4.32a). Comme pour les températures de l'air, on constate également que l'écart de corrélation entre les reconstitutions ANATEM et ANA, représentatif de l'apport du témoin régional, diminue lorsque la distance entre la série à reconstituer et la série témoin augmente. Au contraire, l'apport des données synoptiques au travers de l'utilisation des journées analogues, représenté par la différence de corrélation entre les reconstitutions ANATEM et TEM, augmente légèrement lorsqu'on s'éloigne de la série témoin, ce qui confirme les observations faites précédemment : c'est dans les cas où la reconstitution à partir du témoin régional seul est la moins bonne que l'apport de l'information synoptique au travers des journées analogues est le plus important, ce qui montre l'intérêt de combiner les deux sources d'information. Bien que de manière moins nette que pour la corrélation, le ratio de moyenne semble également pouvoir être relié à la distance au témoin : les biais de moyenne les plus importants correspondent aux stations les plus éloignées du témoin. Le graphique 4.41j montre un nuage de points relativement dispersé qui ne permet pas d'établir de relation nette entre les ratios d'écart-type des reconstitutions et la distance au témoin.

D'après les graphiques présentés sur la deuxième colonne de la figure 4.41, la surface du bassin versant ne semble pas être un critère explicatif de la performance des reconstitutions ANA, TEM ou ANATEM. En ce qui concerne l'altitude médiane du bassin versant, elle ne semble pas avoir d'influence sur la corrélation des différentes reconstitutions mais paraît être en partie explicative de la valeur du ratio de moyenne des reconstitutions ANA et ANATEM (figures 4.41g et 4.41i). Au contraire de ce qui avait été observé sur les températures de l'air, les reconstitutions de précipitations semblent globalement plus biaisées en moyenne sur les bassins versants les moins élevés en altitude.

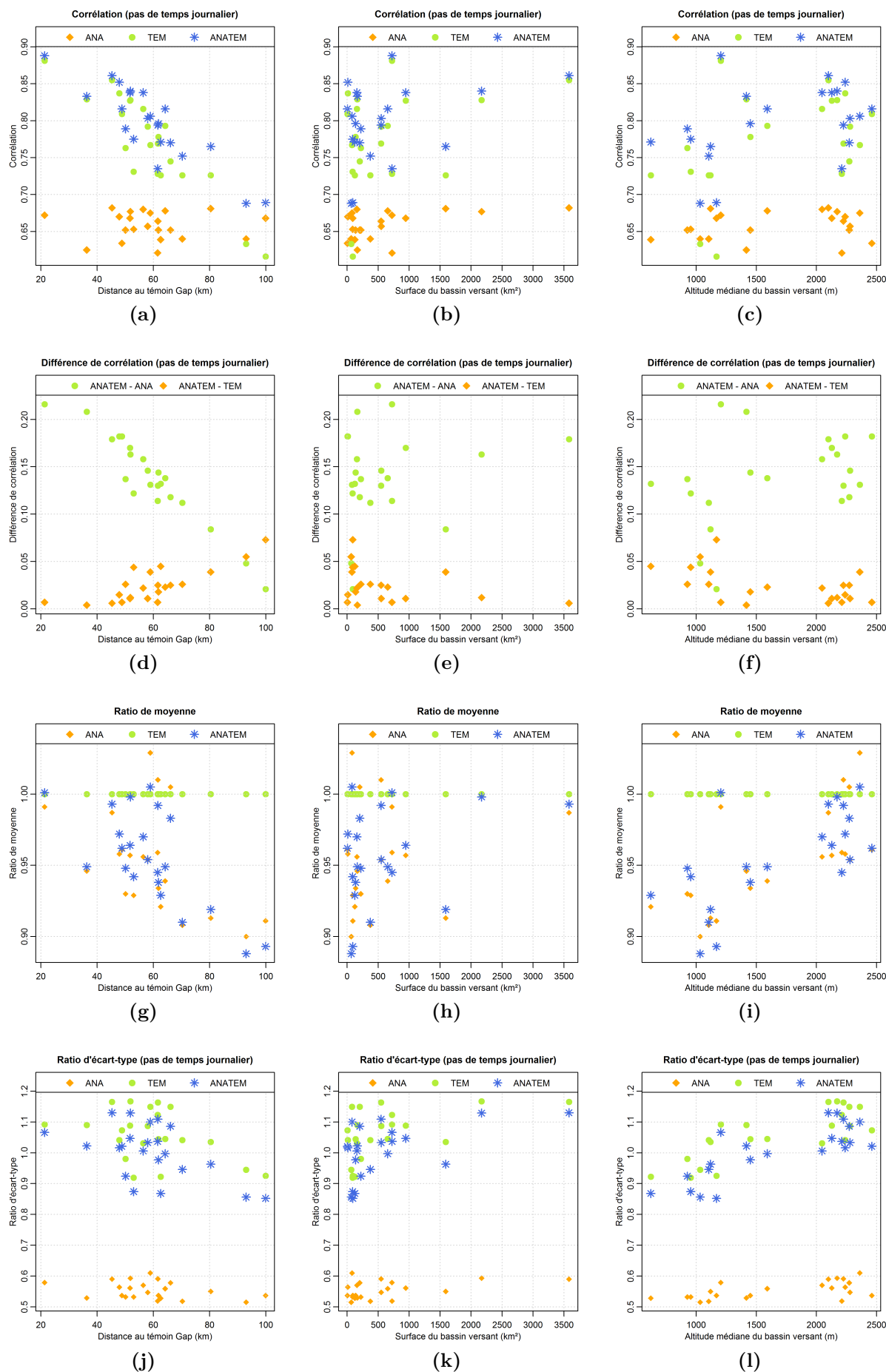


Figure 4.41 – Comparaison des performances au pas de temps journalier des reconstitutions de précipitations ANA, TEM et ANATEM selon la distance au témoin, la surface, et l'altitude moyenne du bassin versant. Pour les méthodes ANA et ANATEM, les points correspondent aux reconstitutions moyenne.

IV.2.3 | Analyse par type de temps

Nous avons montré dans le chapitre 1 (section III.2) que les processus météorologiques dominants sur le bassin versant de la Durance sont variables dans l'espace et dans le temps. Les 22 bassins versants étudiés ici présentent des régimes saisonniers de précipitations différents, et ne sont pas exposés de la même manière aux différentes influences atmosphériques. Ainsi, par exemple, les précipitations apportées par un flux de Sud arrosent essentiellement les bassins du Verdon et de la moyenne-Durance (Jabron, Lauzon) alors que les bassins de montagne de la haute-Durance (Guisane au Môtetier-les Bains, Durance à La Clapière) et du haut-Verdon (Verdon à Allos ou à Colmars) sont les plus arrosés lors des journées dominées par une circulation atmosphérique de type « onde atlantique ».

Par ailleurs, la méthode ANA étant basée sur une analyse des formes des champs de pression, ses performances pourraient être variables selon le type de circulation atmosphérique. En effet, chaque type de circulation atmosphérique présente des caractéristiques propres et pour un type de circulation donné les précipitations peuvent-être plus ou moins faciles à reconstituer. De même, la capacité du modèle TEM à reproduire les précipitations d'un bassin versant donné peut varier d'un type de circulation atmosphérique à l'autre, selon la répartition spatiale des précipitations provoquées par celui-ci (Gottardi *et al.*, 2012; Messié, 2012).

Ces deux remarques amènent à penser que les performances des reconstitutions de précipitations pourraient varier à la fois d'un type de temps à l'autre et, pour un même type de temps, d'un bassin à l'autre en fonction de la façon dont ces bassins sont exposés à cette influence atmosphérique. Afin d'évaluer ces effets, nous avons représenté sur les figures 4.42 à 4.45 les diagrammes de Taylor présentant les performances des reconstitutions ANA, TEM et ANATEM pour les 22 bassins versants et pour chacun des huit types de temps décrits au chapitre 1. Sur chaque graphique, neuf bassins ayant des caractéristiques géographiques variées sont mis en évidence par des points de couleurs différentes. En ce qui concerne les modèles ANA et ANATEM, seule la valeur correspondant à la reconstitution moyenne est représentée pour chaque bassin et chaque type de temps.

Une première observation pouvant être faite à la vue de ces différents graphiques est que, pour un type de temps donné, les performances observées sur les différents bassins sont bien plus proches pour les reconstitutions ANA que lorsqu'il s'agit des reconstitutions TEM et ANATEM. À la manière de ce qui avait été observé pour tous les types de temps confondus sur la figure 4.40, la hiérarchisation des performances du modèle TEM entre les différents bassins se retrouve, légèrement atténuée, sur les reconstitutions ANATEM.

Les performances des reconstitutions ANA varient d'un type de temps à l'autre : leur corrélation avec les observations peut dépasser 0.7 en type de temps 2 (océanique stationnaire) alors qu'elle est comprise entre 0.4 et 0.5 pour les journées de type de temps 5 (Nord-Est). Le type de temps amenant les moins bonnes reconstitutions est la classe « anticyclonique » (8), ce qui s'explique par le fait que les précipitations de ce type de journées sont souvent localisées (orages...).

En ce qui concerne les modèles TEM et ANATEM, les bassins pour lesquels la reconstitution est la mieux corrélée aux observations sont pour la majorité des types de temps les bassins du Buech aux Chambons et de la Durance à Serre-Ponçon, qui sont les plus proches de la série témoin de Gap. Cependant, les résultats obtenus sont également variables d'un type de temps à l'autre. Par exemple, la « dépression centrale » (type de temps 7), qui affecte le bassin de la Durance dans sa globalité, figure parmi les mieux reconstitués sur l'ensemble des bassins. Pour les journées de type « retour d'Est » (type

de temps 6) en revanche, on observe une grande disparité de performances entre les différents bassins, et les bassins les moins bien reconstitués correspondent aux bassins les plus affectés par les épisodes de retour d'Est (Jabron à Comps-sur-Artuby, Guil à Montdauphin, Durance à Val-des-Près) alors que la région de Gap est relativement protégée des précipitations apportées par ce type d'évènements (voir chapitre 1, figure 1.14b et tableau 1.2). En ce qui concerne les journées de flux de Sud (type de temps 4), le diagramme de Taylor du modèle TEM montre que la reconstitution sous-estime l'écart-type des observés sur certains bassins comme le Lauzon à Villeneuve ou le Jabron à Comps-sur-Artuby qui sont fortement arrosés lors de ce type de journées. À l'inverse, le biais d'écart-type est positif sur d'autres bassins (Durance à Val-des-Près, Guil à Montdauphin, Durance à Serre-Ponçon) qui sont parmi les moins pluvieux lors de ce type de journées. On peut imaginer que cela est lié au fait que, Gap étant moyennement arrosé lors des épisodes de Sud, l'utilisation de cette série comme témoin amène à reproduire des pluies trop faibles sur les bassins les plus arrosés, et trop importantes sur les bassins les moins arrosés. À nouveau, l'utilisation de journées analogues permet de corriger ces biais d'écart-type dans le bon sens (diminution des biais en valeur absolue), bien que le résultat final soit encore imparfait.

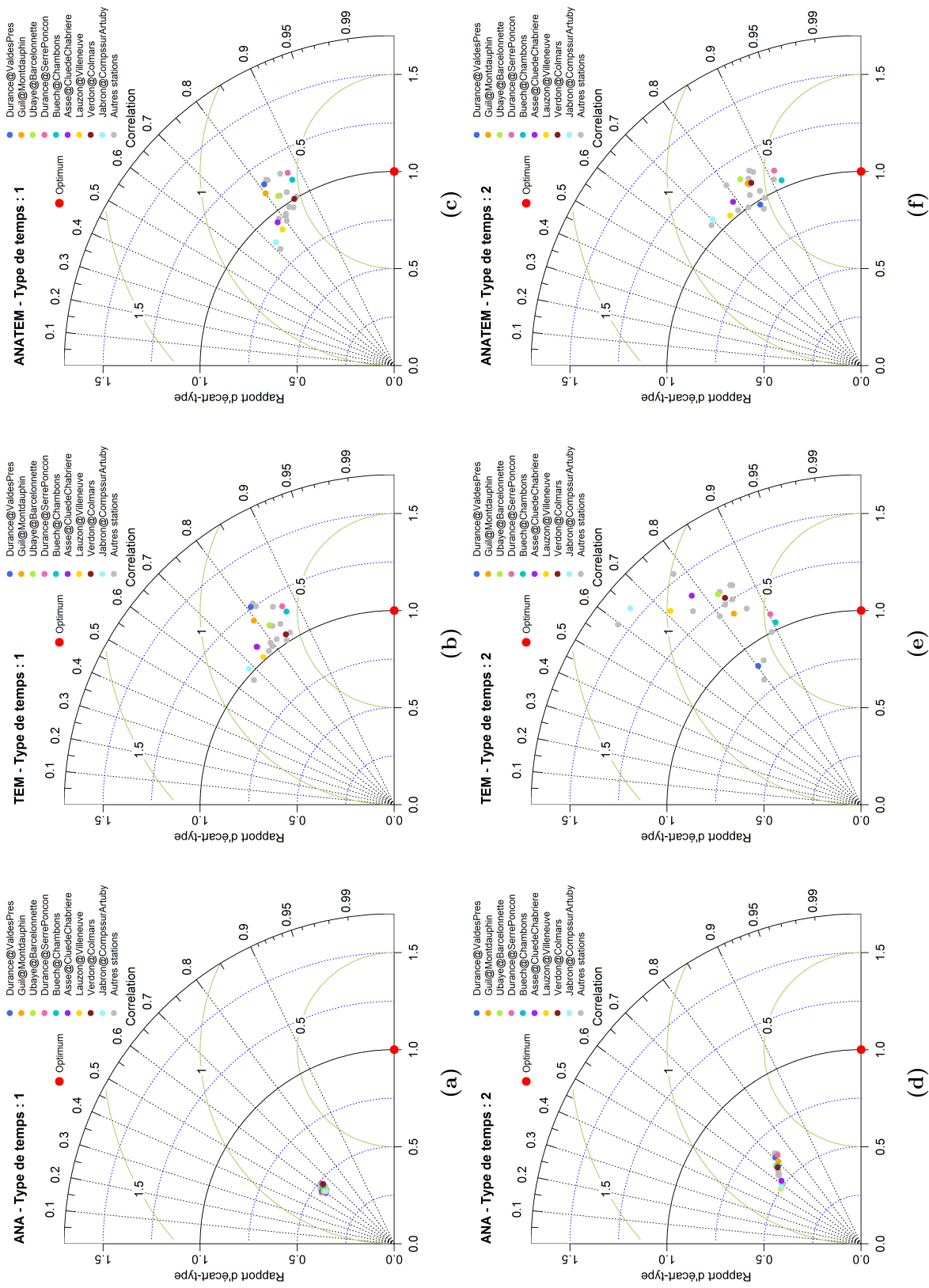


Figure 4.42 – Diagrammes de Taylor au pas de temps journalier par type de temps (types de temps 1 et 2) et par méthode (ANA, TEM et ANATEM), pour les 22 bassins versants d'étude.

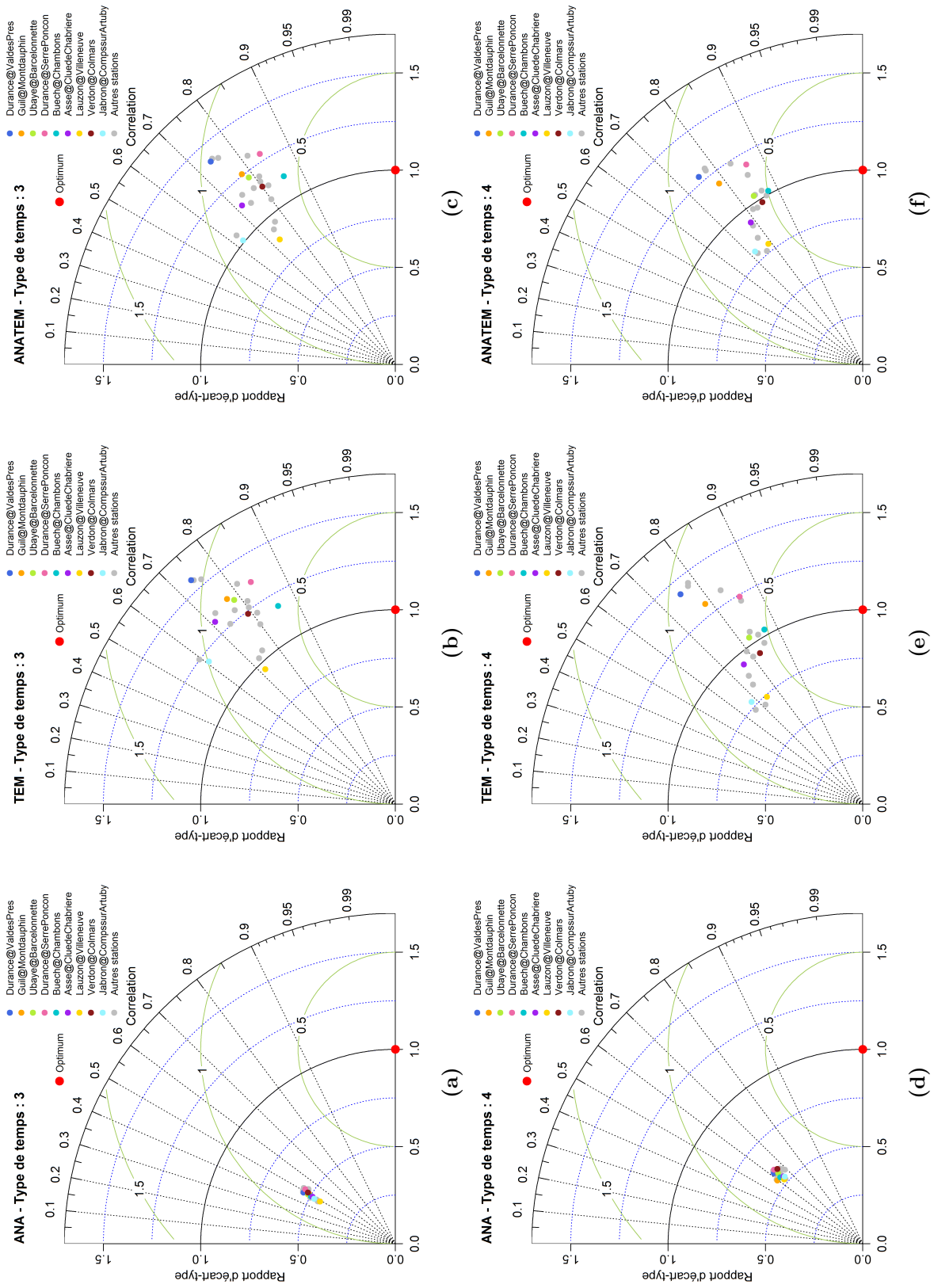


Figure 4.43 – Diagrammes de Taylor au pas de temps journalier par type de temps (types de temps 3 et 4) et par méthode (ANA, TEM et ANATEM), pour les 22 bassins versants d'étude.

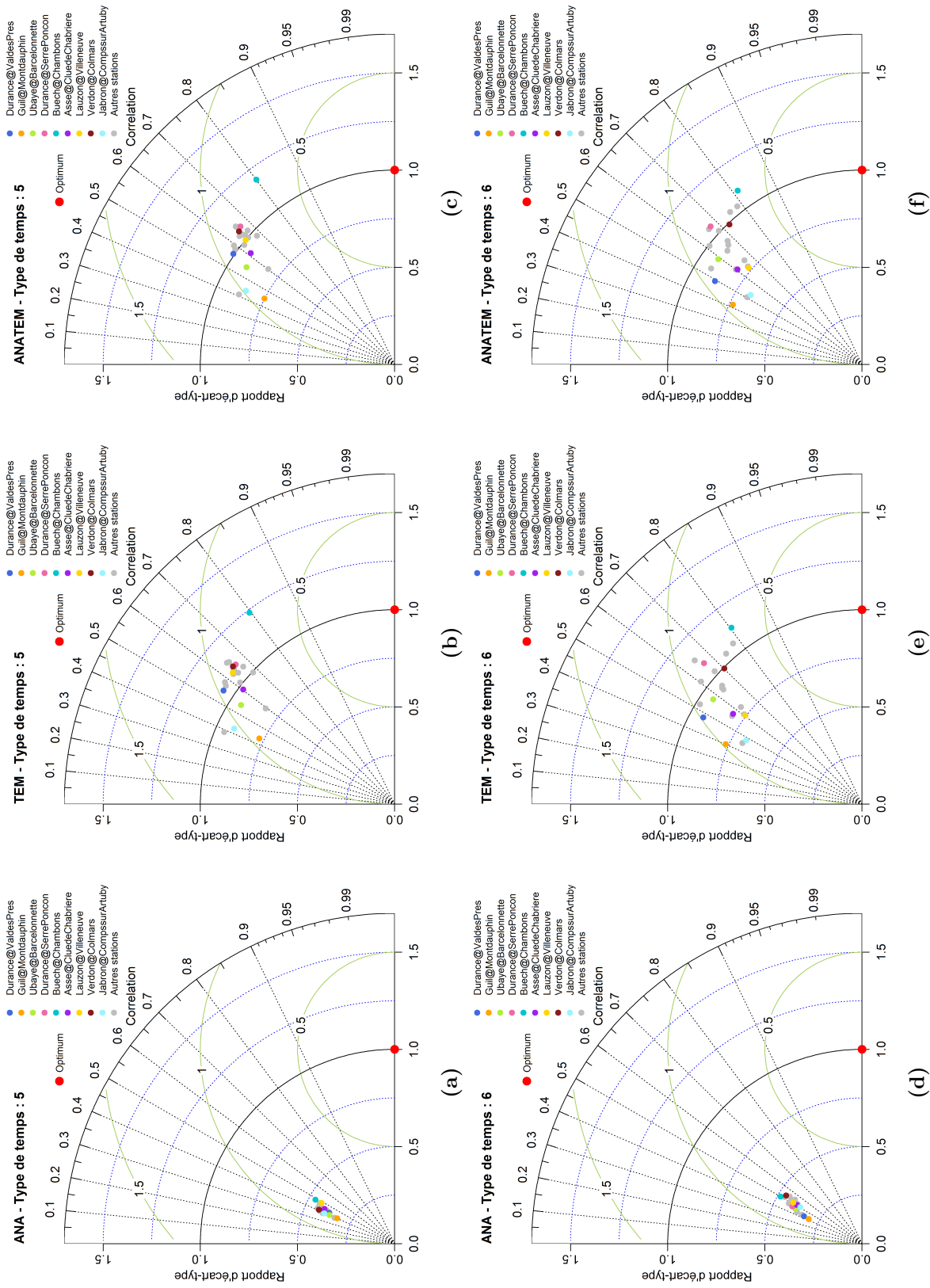


Figure 4.44 – Diagrammes de Taylor au pas de temps journalier par type de temps (types de temps 5 et 6) et par méthode (ANA, TEM et ANATEM), pour les 22 bassins versants d'étude.

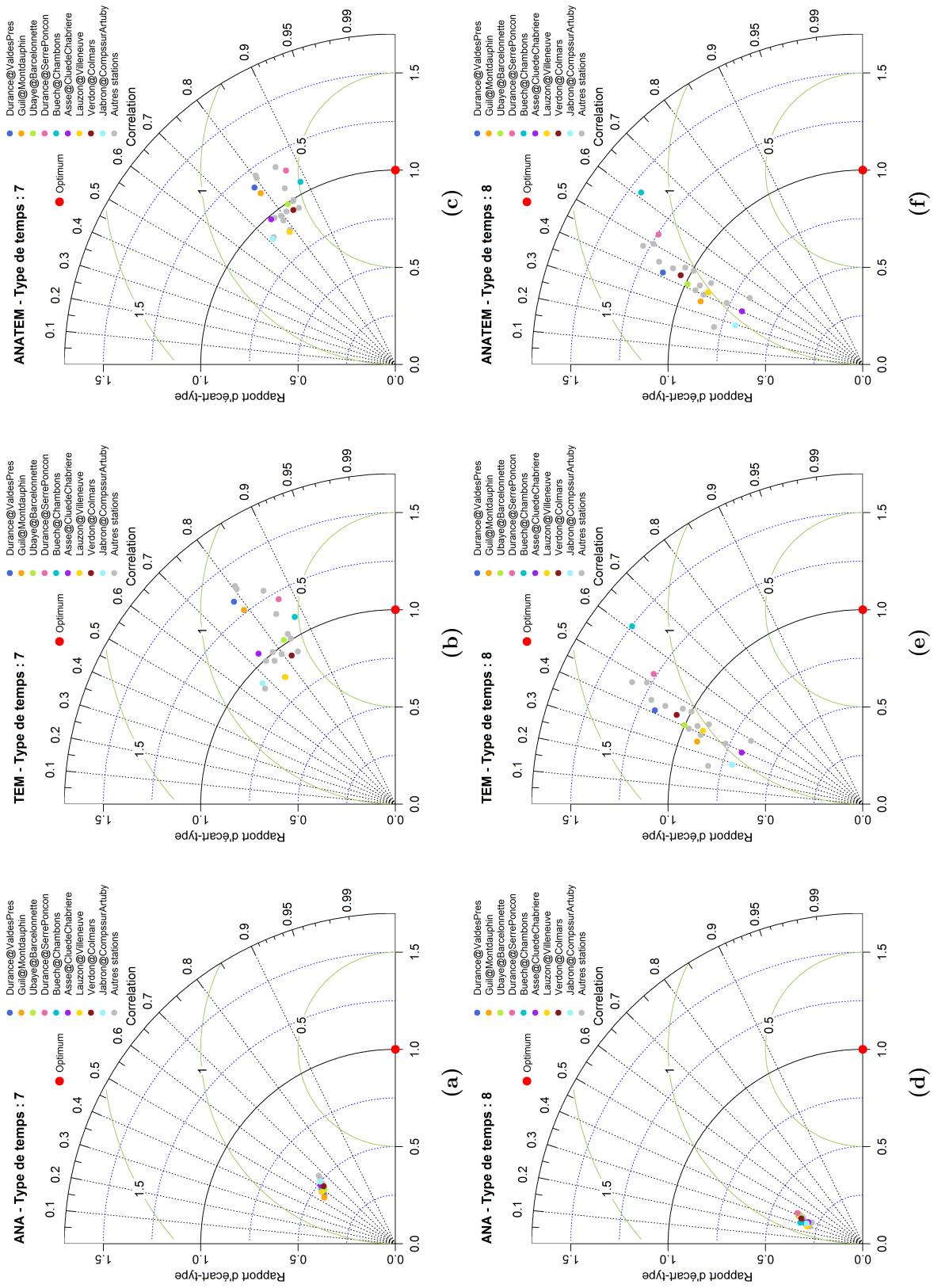


Figure 4.45 – Diagrammes de Taylor au pas de temps journalier par type de temps (types de temps 5 et 6) et par méthode (ANA, TEM et ANATEM), pour les 22 bassins versants d'étude.

V | Synthèse du quatrième chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats de l'application de la méthode ANATEM à la reconstitution des séries quotidiennes de précipitations et de températures de l'air spatiales de 22 bassins versants. La réanalyse climatique 20CR, ainsi que les séries de températures quotidiennes à Marseille et de précipitations quotidiennes à Gap ont été utilisées pour ces reconstitutions couvrant la période 1883-2010.

Les reconstitutions obtenues à l'aide de la méthode ANATEM ont été comparées aux deux autres types de reconstitutions construites à partir de l'information régionale seule (**TEM**oin) d'une part, et de l'information synoptique seule (méthode des **ANA**logues) d'autre part. Les performances de chaque reconstitution ont été évaluées par comparaison aux données climatiques SPAZM utilisées comme référence. Une analyse multi-critères et multi-pas-de-temps a été mise en place : les critères de corrélation, mais aussi de reproduction de la variance et de la moyenne de la série ont été évalués aux pas de temps journalier, mensuel et annuel. Sur l'exemple de l'Ubaye à Barcelonnette, la qualité de reproduction de la distribution des valeurs classées et du régime interannuel, ainsi que la fiabilité des reconstitutions ont également été étudiées au travers d'un ensemble de graphiques.

Il ressort de cette analyse que la combinaison, au travers de la méthode ANATEM, d'informations climatiques à l'échelle régionale et synoptique permet de produire des reconstitutions de bonne qualité, et dont les performances sont significativement supérieures à celles des reconstitutions obtenues par les méthodes ANA ou TEM.

En ce qui concerne la reconstitution des températures de l'air, les reconstitutions ANATEM sont globalement de très bonne qualité tant sur le plan de la corrélation que sur celui des biais d'écart-type et de moyenne, cela quel que soit le pas de temps d'analyse. Quelques faibles biais de moyenne ou d'écart-type apparaissent néanmoins sur un petit nombre de bassins versants.

Les reconstitutions de précipitations sont légèrement moins performantes que celles des températures de l'air. Au pas de temps annuel, des biais d'écart-type compris entre -10% et +10% sont constatés sur une partie des bassins versants, et le biais de moyenne peut également atteindre -10%.

Une analyse régionale a mis en évidence une certaine variabilité dans les performances des reconstitutions, plus marquée pour les précipitations que pour les températures de l'air. La distance entre série cible et série témoin semble être le principal facteur explicatif de cette variabilité : pour les précipitations comme pour les températures de l'air, les reconstitutions sur les bassins versants les plus proches de la série témoin sont les mieux corrélées aux observations. Nous avons mis en évidence le fait que, au sein de la méthode ANATEM, la part d'information apportée par la composante « témoin » diminue avec la distance série cible - série témoin, tandis que la part d'information apportée par la composante « analogues » augmente avec cette distance. En d'autres termes, c'est sur les bassins où le modèle TEM est le moins performant que l'intérêt de le compléter par une information synoptique est le plus grand. La combinaison des deux sources d'information permet une légère uniformisation des performances entre les différents bassins versants.

Pour finir, une analyse des performances des reconstitutions de précipitations en fonction du type de circulation atmosphérique a montré que celles-ci varient à la fois d'un type de temps à l'autre et, pour un type de temps donné, d'un bassin versant à l'autre en fonction de la façon dont ces bassins sont exposés à cette influence atmosphérique.

Analyses complémentaires sur la reconstitution des séries climatiques

Ce chapitre regroupe un certain nombre d'analyses menées en complément de celles présentées dans le chapitre précédent sur la méthode ANATEM. Ces analyses concernent le choix de la formulation du modèle ANATEM, le choix des séries quotidiennes utilisées comme témoin, et le choix de certains paramètres de la méthode des analogues. Elles ont pour objectifs principaux l'exploration de pistes d'amélioration de la méthode ANATEM ou l'étude de possibilités d'alternatives à l'utilisation de données régionales observées comme série témoin.

Sommaire

I	Sensibilité des modèles TEM et ANATEM au choix de la formulation saisonnalisée ou non pour le témoin	168
I.1	Reconstitution de séries de températures	168
I.2	Reconstitution de séries de précipitations	172
II	Sensibilité au choix du témoin : analyse « multi-témoins » sur une période restreinte	177
II.1	Reconstitution de séries de températures	177
II.2	Reconstitution de séries de précipitations	182
III	Que peut-on faire à l'aide de « témoins » issus des réanalyses climatiques ?	187
III.1	Reconstitution de séries de températures	187
III.2	Reconstitution de séries de précipitations	190
IV	Sensibilité des modèles ANA et ANATEM à différents paramètres de la méthode des analogues	193
IV.1	Échantillonnage des analogues	193
IV.2	Choix des données synoptiques	194
V	Synthèse du cinquième chapitre	196

I | Sensibilité des modèles TEM et ANATEM au choix de la formulation saisonnalisée ou non pour le témoin

Nous avons présenté dans le chapitre 3 (section I.1) deux versions possibles de modèles *Témoin* établis à partir d'une série observée. Nous nous intéressons dans cette partie à la sensibilité des résultats de reconstitution au choix de l'une ou l'autre de ces deux versions, appelées « témoin » et « témoin saisonnalisé ».

Cette analyse de sensibilité se fera à la fois sur le modèle « témoin seul » (noté TEM pour la version simple, ou TEM* pour la version saisonnalisée) et sur le modèle ANATEM (noté respectivement ANATEM ou ANATEM*) obtenu à partir de l'une ou l'autre des deux formulations associées aux données synoptiques. Signalons que ces notations TEM, TEM*, ANATEM et ANATEM* ne seront utilisées que dans cette section : dans le reste du document, les notations non étoilées désignent la formulation (saisonnalisée ou non) qui aura été choisie à l'issue de cette comparaison.

L'un des objectifs de la version saisonnalisée du modèle *Témoin* est d'améliorer la reproduction du régime interannuel. Afin d'évaluer spécifiquement cet aspect, nous introduisons ici un critère supplémentaire que nous appellerons « biais sur le régime » dont la formulation est la suivante :

$$BR = 1 - \frac{\text{Moyenne}(|M_{i,mod} - M_{i,obs}|)_{i=1...12}}{\text{Moyenne}(M_{i,obs})_{i=1...12}} \quad (5.1)$$

où $M_{i,obs}$ (respectivement $M_{i,mod}$) est la moyenne interannuelle du mois i pour la série observée (respectivement la reconstitution). La valeur optimale de ce score est 1.

I.1 | Reconstitution de séries de températures

I.1.1 | Modèle TEM ou TEM*

Les figures 5.1 à 5.3 présentent trois critères de performance des reconstitutions de températures de l'air pour les 22 bassins de l'échantillon d'étude et pour les deux formulations proposées du modèle *Témoin* lorsqu'il est utilisé seul : la formulation simple (équation 3.1) que nous noterons TEM et la formulation saisonnalisée (équation 3.2) notée ici TEM*.

On observe sur la figure 5.1 que la formulation TEM* améliore légèrement, par rapport à la formulation TEM, la corrélation au pas de temps journalier sur l'ensemble des bassins analysés. Cette amélioration reste faible puisqu'elle varie entre +0.001 et +0.006 environ.

Concernant les biais sur le régime interannuel (figure 5.2), on voit une plus nette amélioration : en moyenne, ce biais est réduit d'environ 0.008, mais cette réduction n'est jamais inférieure à 0.004 et peut atteindre 0.015 pour le Verdon à Allos.

On peut également s'intéresser au ratio d'écart-type au pas de temps journalier (figure 5.3), sur lequel on voit finalement l'amélioration la plus importante. Les variations de ce critère entre les deux versions du modèle *Témoin* sont d'ailleurs supérieures aux variations observées d'un bassin à l'autre. Les reconstitutions construites à partir de la formulation TEM présentent un biais d'écart-type qui peut être important (-12% environ pour le Buech aux Chambons, -9% pour le Bes à La Javie), alors que ce biais négatif reste inférieur à 5% sur tous les bassins lorsque la formulation TEM* est utilisée. On observe en revanche

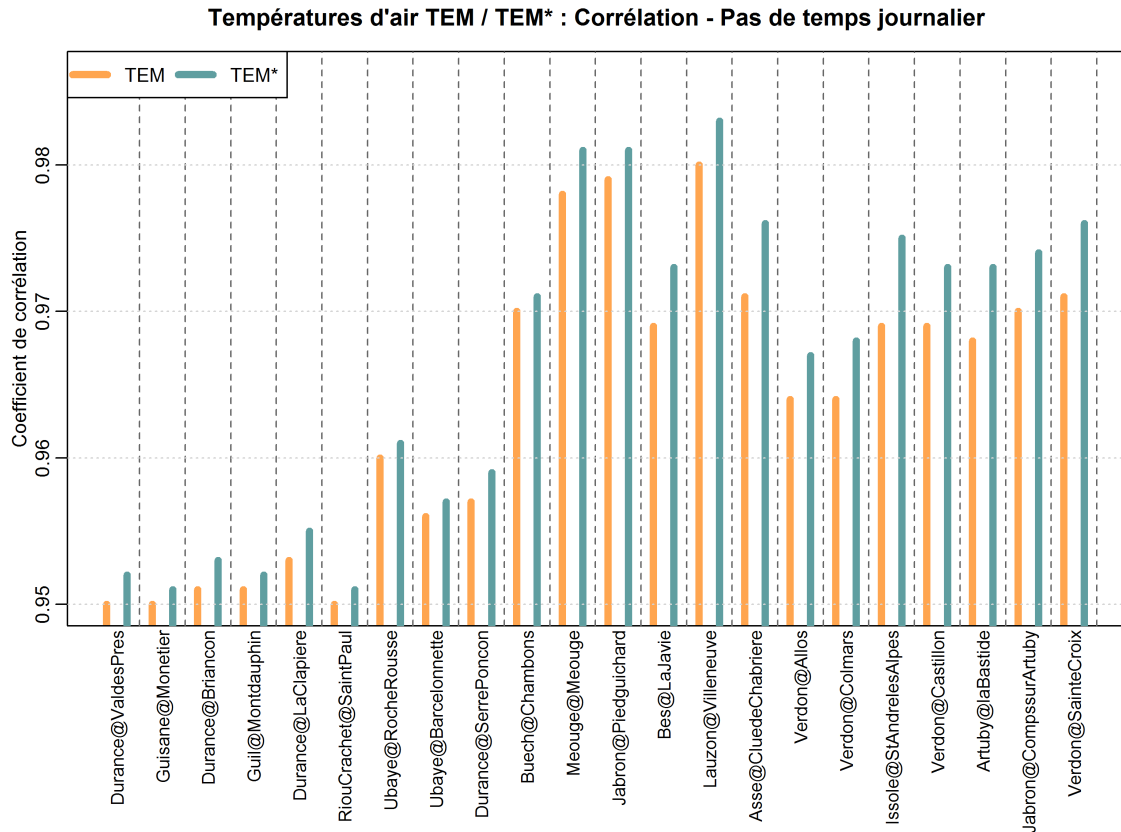


Figure 5.1 – Sensibilité des reconstitutions de température de l’air au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : corrélation au pas de temps journalier.

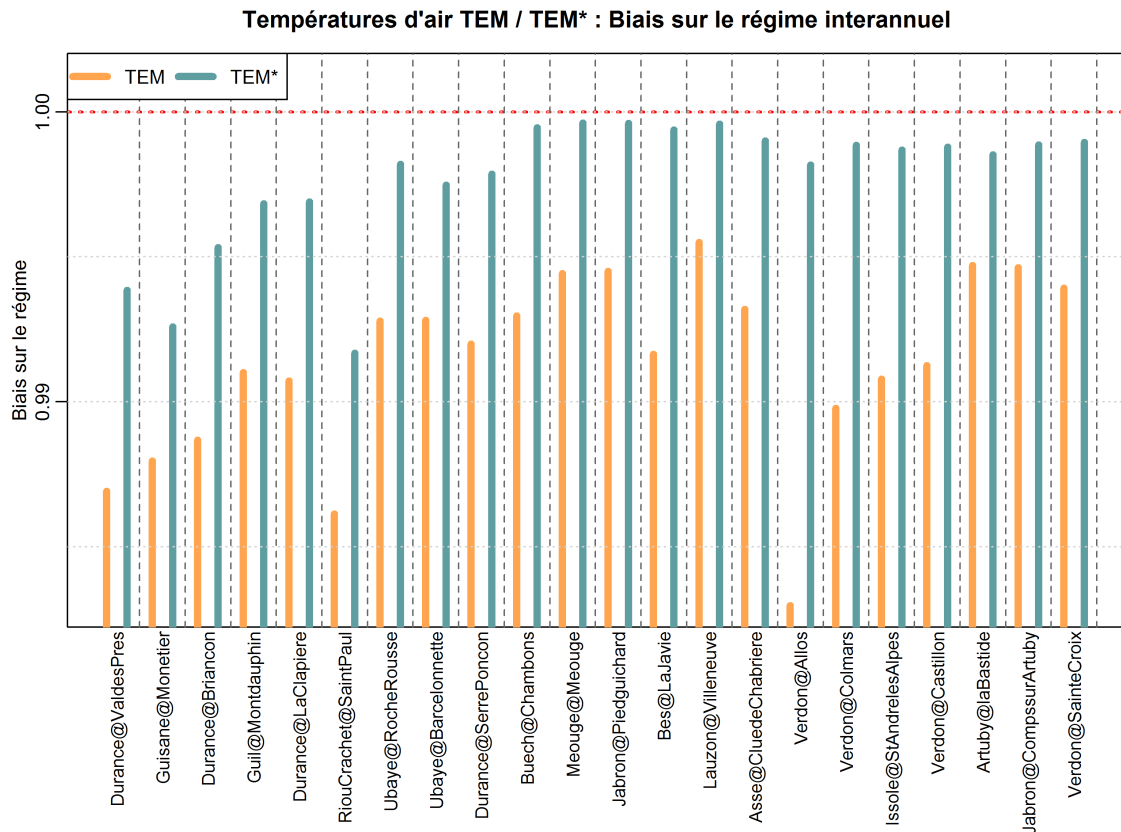


Figure 5.2 – Sensibilité des reconstitutions de température de l’air au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : biais sur le régime interannuel.

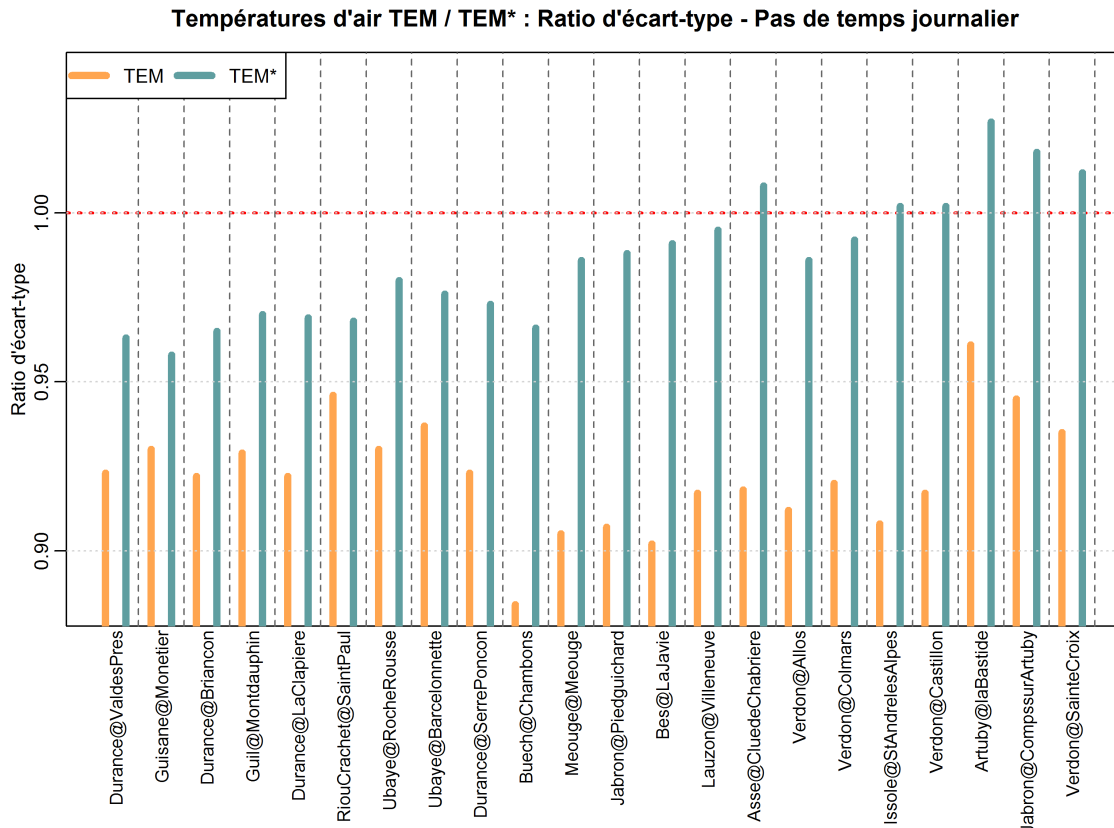


Figure 5.3 – Sensibilité des reconstitutions de température de l'air au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.

sur quelques bassins (l'Asse à la Clue de Chabrières, l'Artuby à la Bastide) l'apparition d'un biais positif, mais celui-ci reste inférieur à 3%.

Finalement, si l'amélioration apportée par la saisonnalité sur le modèle *Temoin* utilisé seul est relativement faible en matière de corrélation et de biais sur le régime, celle-ci est toujours positive et peut-être non négligeable sur certains bassins. Par ailleurs, le ratio d'écart-type est sensiblement amélioré par cette légère complexification de la formulation. Nous avons donc choisi d'utiliser la formulation saisonnalisée (équation 3.2) pour le modèle *Temoin* lorsqu'il est utilisé seul pour la reconstitution de séries de températures de l'air.

I.1.2 | Modèles ANATEM et ANATEM*

Le modèle *Temoin* est également utilisé dans la formulation de la méthode ANATEM en complément de l'information liée aux données synoptiques. Il paraît donc intéressant d'évaluer la sensibilité des reconstitutions construites par la méthode ANATEM au choix de la formulation du modèle *Temoin* qu'elle utilise. La méthode ANATEM utilisant le modèle *Temoin* saisonnalisé (équation 3.2) sera notée ANATEM*, et on écrira ANATEM lorsque la formulation simple (équation 3.1) est utilisée.

Les mêmes critères de performances que ceux utilisés dans le paragraphe précédent sont reportés sur les figures 5.4 à 5.6. Pour chaque bassin versant et chacune des deux formulations, la distribution des valeurs obtenues pour les 50 reconstitutions (basées sur 50 journées analogues) est schématisée par un boxplot représentant les quantiles 10%, 25%, 50%, 75% et 90%, et la valeur obtenue pour la reconstitution moyenne (moyenne des 50 reconstitutions) est représentée par un point.

On constate que l'amélioration apportée par la saisonnalité sur la corrélation des reconstitutions avec l'observé (figure 5.4) peut-être considérée comme négligeable : elle varie entre 0 et +0.002 environ. La même constatation peut être faite en ce qui concerne

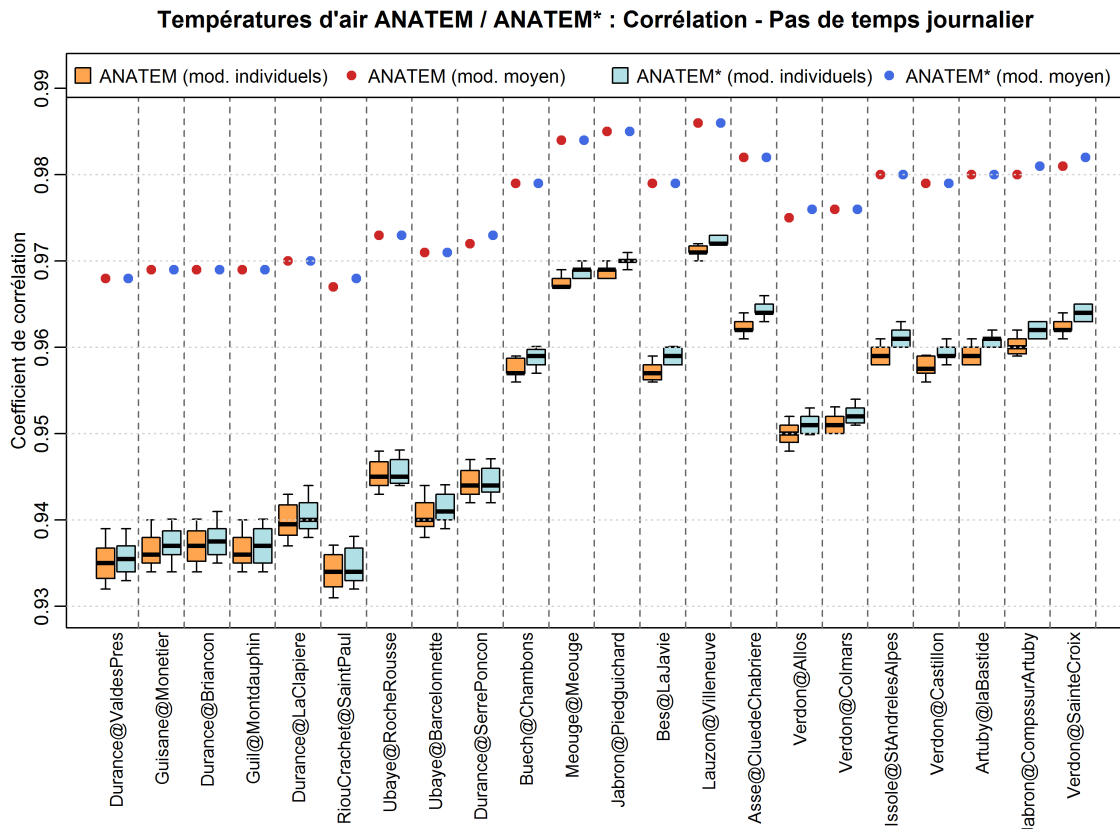


Figure 5.4 – Sensibilité des reconstitutions de température de l'air au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : corrélation au pas de temps journalier.

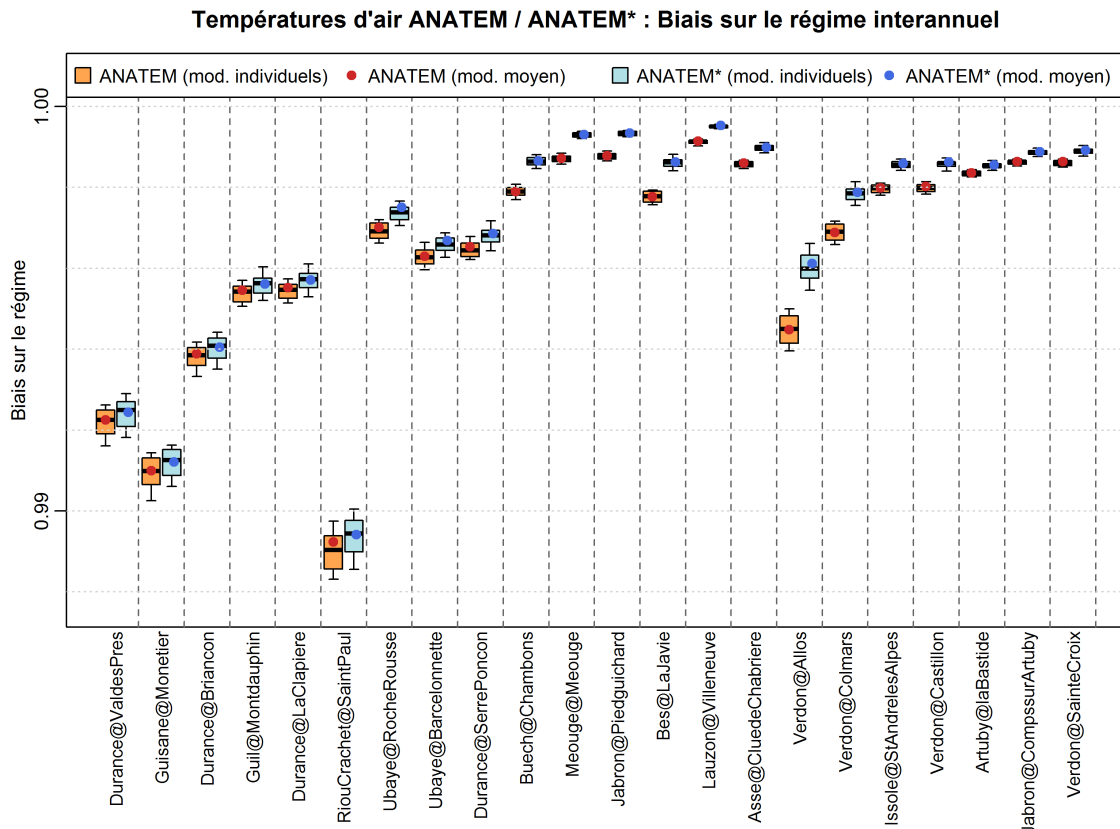


Figure 5.5 – Sensibilité des reconstitutions de température de l'air au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : biais sur le régime interannuel.

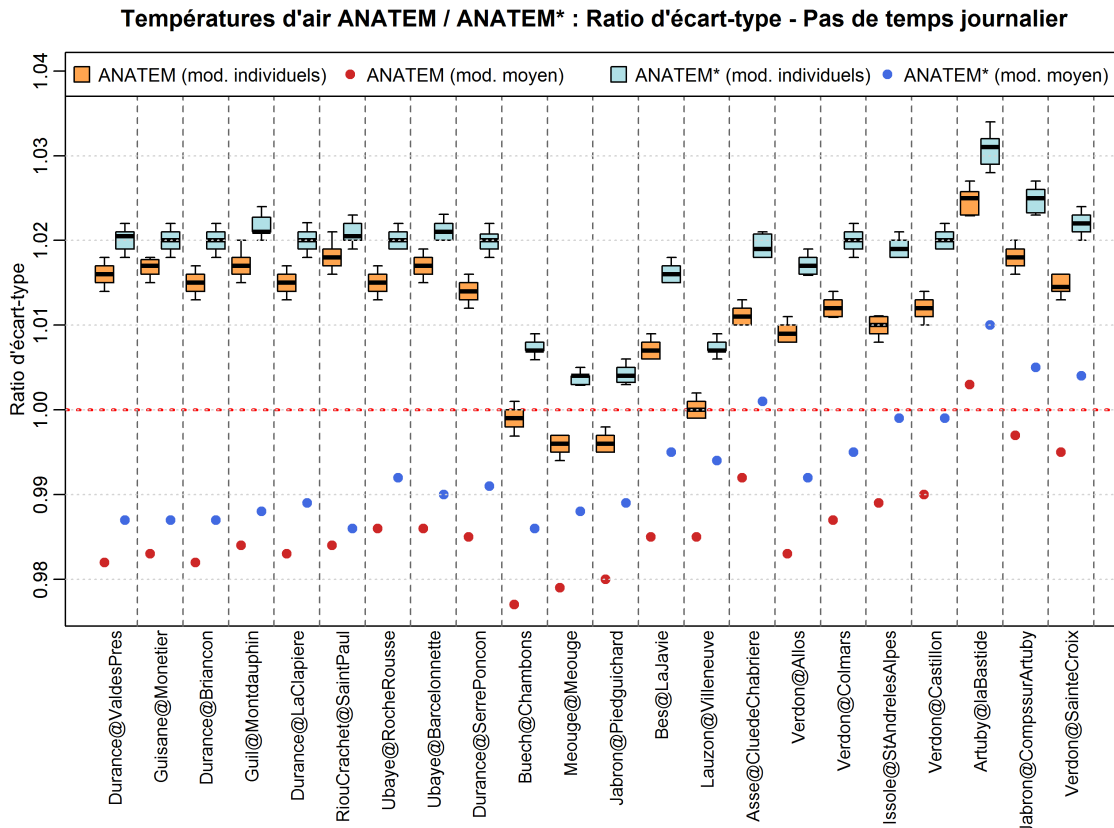


Figure 5.6 – Sensibilité des reconstitutions de température de l’air au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : ratio d’écart-type au pas de temps journalier.

le biais sur le régime interannuel : sur la figure 5.5, la différence la plus importante entre les résultats obtenus avec la formulation ANATEM et ceux obtenus par ANATEM* est de 0.002 pour le bassin du Verdon à Allos.

Les biais d’écart-type des reconstitutions obtenues à partir des méthodes ANATEM ou ANATEM* (figure 5.6) sont nettement moins importants que ceux observés sur les reconstitutions par le témoin seul. De ce fait, l’augmentation du ratio d’écart-type entre la version saisonnalisée et la version simple apparaît également négligeable (moins de 1%) comparé à ce qui était observé entre les modèles TEM et TEM*. De plus, cette augmentation du ratio d’écart-type conduit à une augmentation du biais d’écart-type lorsque celui-ci est positif, ce qui est le cas de la plupart des reconstitutions individuelles.

Ces observations nous amènent à conclure que, quoique la version saisonnalisée du modèle *Témoin* puisse constituer une amélioration non négligeable lorsque celui-ci est utilisé seul (TEM / TEM*), ce n’est plus le cas lorsqu’il est combiné avec d’autres informations comme les données synoptiques utilisées dans la méthode ANATEM. On peut considérer que l’information concernant la saisonnalité de la température apportée par la version TEM* est déjà portée par les journées analogues dans la méthode ANATEM. Pour ces raisons, la version de la méthode ANATEM utilisée dans nos applications pour la reconstitution de séries de températures de l’air est la version basée sur la formulation simple du modèle *Témoin* (équation 3.1).

I.2 | Reconstitution de séries de précipitations

I.2.1 | Modèles TEM et TEM*

On a reporté sur les figures 5.7 à 5.9 les résultats obtenus en termes de corrélation au pas de temps journalier, de biais sur le régime et de ratio d’écart-type au pas de temps

journalier pour chacune des deux formulations du modèle *Temoin* utilisé seul pour la reconstitution de séries de précipitations sur les 22 bassins versants étudiés. La version simple, notée TEM correspond à l'équation 3.3 tandis que la version saisonnalisée, notée TEM* est donnée par l'équation 3.4.

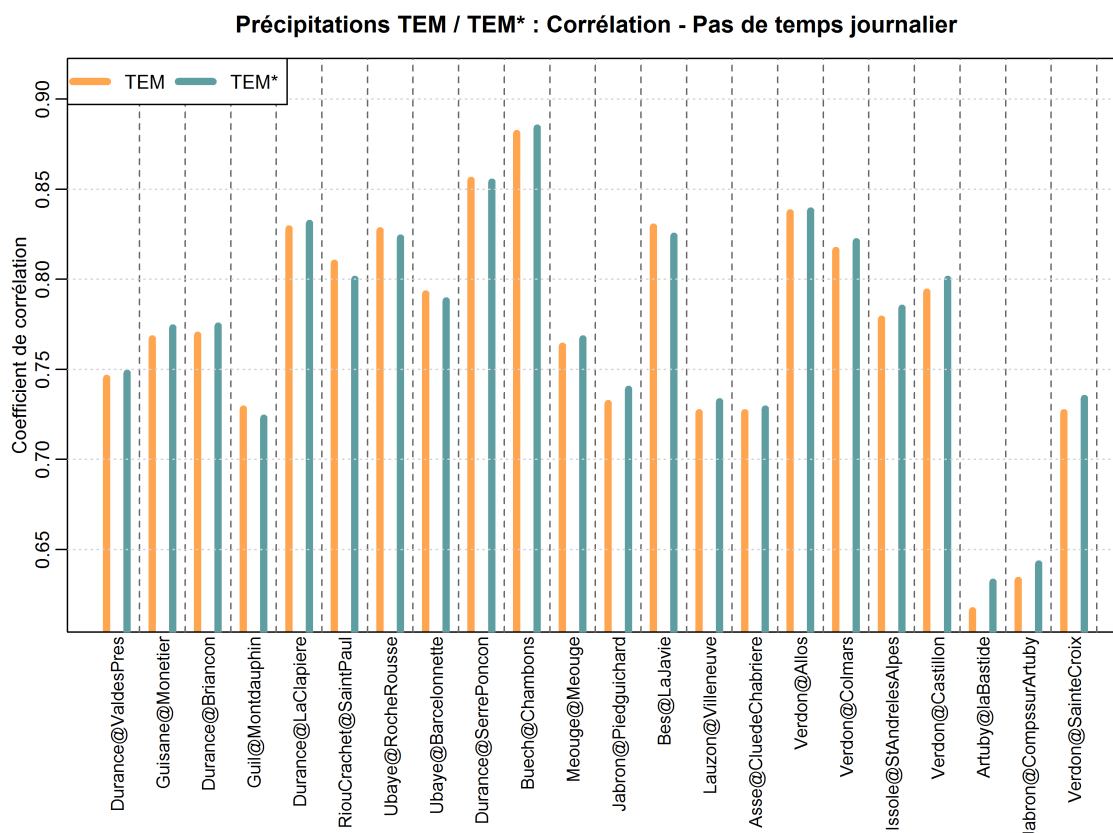


Figure 5.7 – Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : corrélation au pas de temps journalier.

Nous avons vu précédemment que l'utilisation de correctifs dépendant de la période de l'année pouvait améliorer assez significativement les performances de la reconstitution de séries de températures de l'air, cependant, il paraît légitime de s'interroger sur l'intérêt d'une telle méthode pour la reconstitution de précipitations sachant que l'aspect saisonnier de cette variable est nettement moins important que pour la température de l'air.

La figure 5.7 montre qu'en ce qui concerne la corrélation il n'existe que de très légères différences entre le modèle TEM et le modèle TEM* et que, si dans la majorité des cas la corrélation obtenue avec le modèle TEM* est supérieure à celle obtenue avec le modèle TEM, l'inverse arrive également pour une partie des bassins comme ceux du Guil à Montdauphin ou de l'Ubaye à Roche-Rousse.

On peut faire des constatations similaires à propos du biais sur le régime interannuel (figure 5.8). En effet, sur la plus grande partie des bassins, l'utilisation de la version saisonnalisée TEM* améliore ce critère, mais cette amélioration ne dépasse jamais 0.005 alors qu'elle atteignait 0.015 pour la reconstitution de séries de températures de l'air. De plus, on trouve à nouveau quelques bassins (Durance à Briançon, Verdon à Allos) où le biais sur le régime est plus faible avec la version non saisonnalisée TEM.

Enfin, les ratios d'écart-type au pas de temps journalier (figure 5.9) montrent à nouveau que l'amélioration apportée par la saisonnalisation du modèle *Temoin* pour la reconstitution de séries de précipitations est nettement moins importante que celle observée sur les reconstitutions de températures de l'air.

Suite à ces différentes observations, il apparaît que la version saisonnalisée TEM* n'est pas réellement plus performante, et peut occasionnellement être légèrement moins

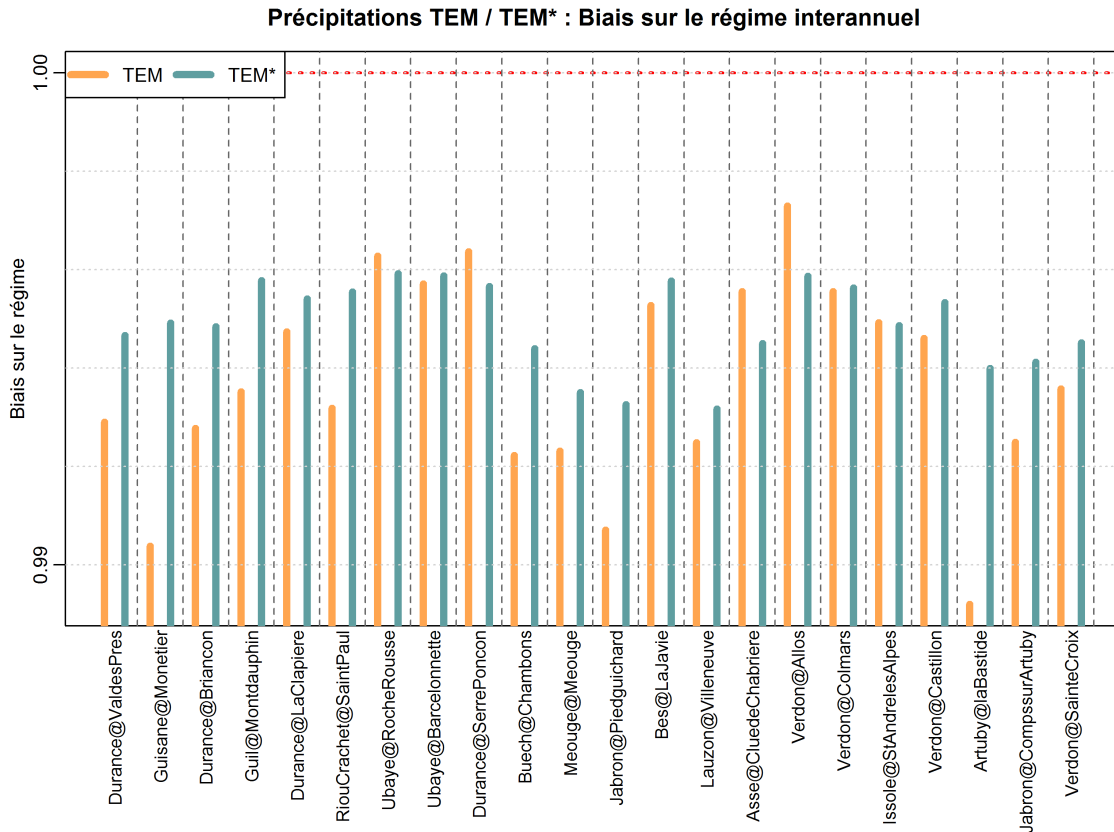


Figure 5.8 – Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : biais sur le régime interannuel.

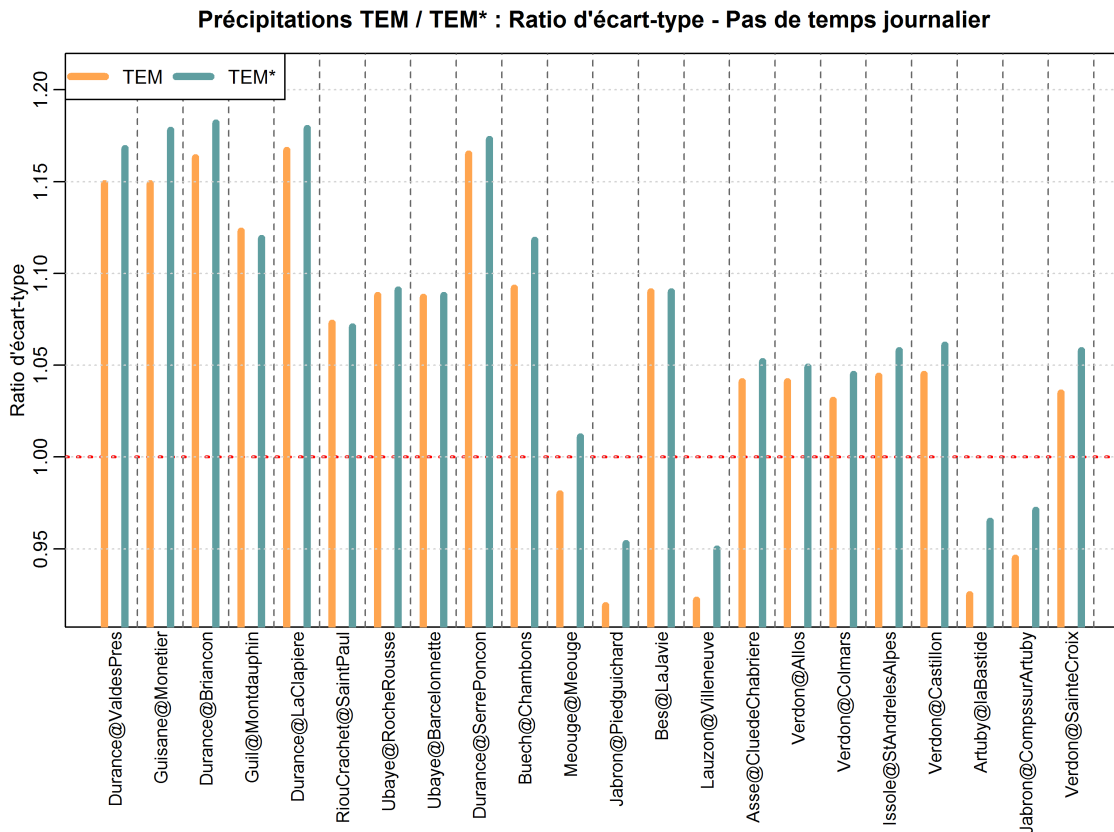


Figure 5.9 – Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle TEM (saisonnalisé ou non) : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.

performante, que la version simple TEM du modèle *Temoïn* lorsqu'il est utilisé seul pour la reconstitution de séries de précipitations. De ce fait, il nous a paru préférable de conserver la formulation simple (équation 3.3) pour nos applications.

I.2.2 | Modèles ANATEM et ANATEM*

Suite aux observations faites sur les reconstitutions de séries de températures, on peut imaginer que si l'utilisation de la version saisonnalisée n'apporte pas de réelle amélioration au modèle *Temoïn* lorsqu'il est utilisé seul, on ne devrait pas en trouver non plus lorsqu'il est utilisé de manière combinée avec des données synoptiques au sein de la méthode ANATEM.

Nous donnons néanmoins sur les figures 5.10 à 5.12 les résultats obtenus avec les deux versions du modèle *Temoïn* pour les précipitations dans le cadre de l'utilisation de la méthode ANATEM, notée dans cette partie ANATEM lorsque la version simple du témoin est utilisée et ANATEM* lorsque l'on utilise la version saisonnalisée. Ces graphiques montrent effectivement que l'amélioration apportée par la formulation saisonnalisée est très faible voir inexistante, et qu'en ce qui concerne la corrélation au pas de temps journalier, on trouve quelques cas où la formulation simple est plus performante que la formulation saisonnalisée.

C'est donc la formulation simple du modèle *Temoïn*, (équation 3.3) qui a été retenue pour nos reconstitutions de séries de précipitations par la méthode ANATEM.

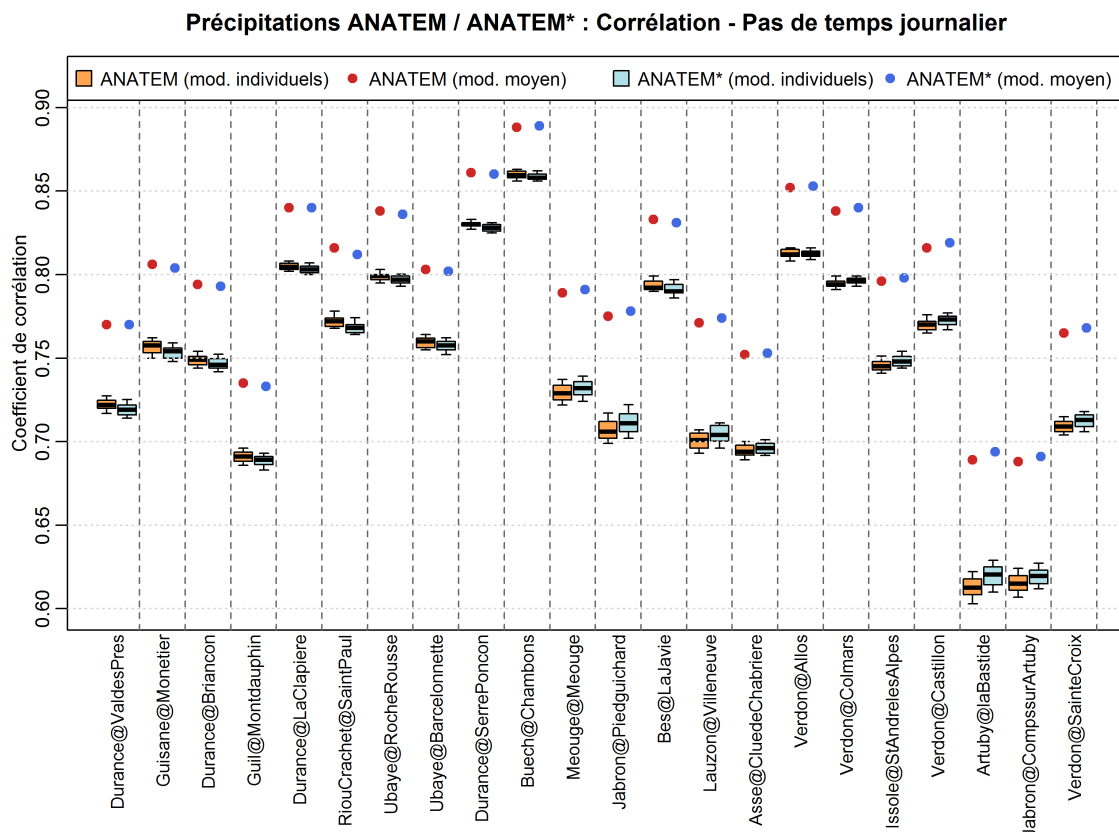


Figure 5.10 – Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : corrélation au pas de temps journalier.

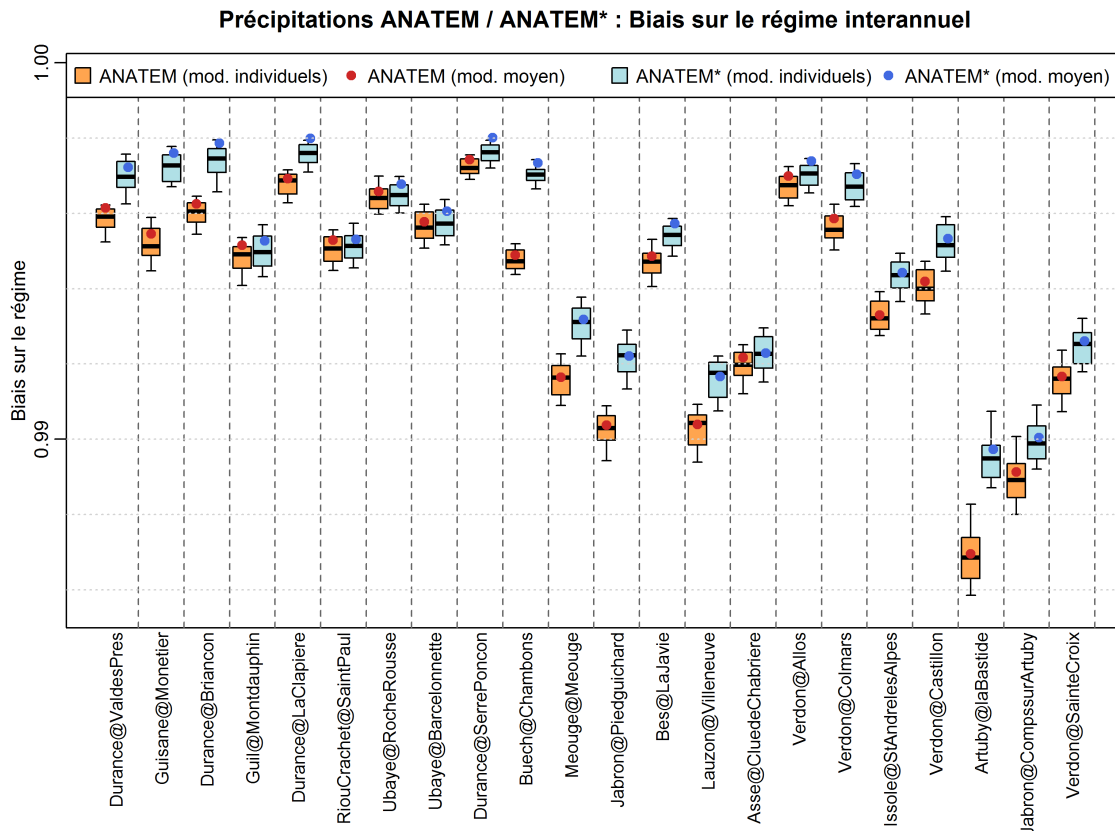


Figure 5.11 – Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : biais sur le régime interannuel.

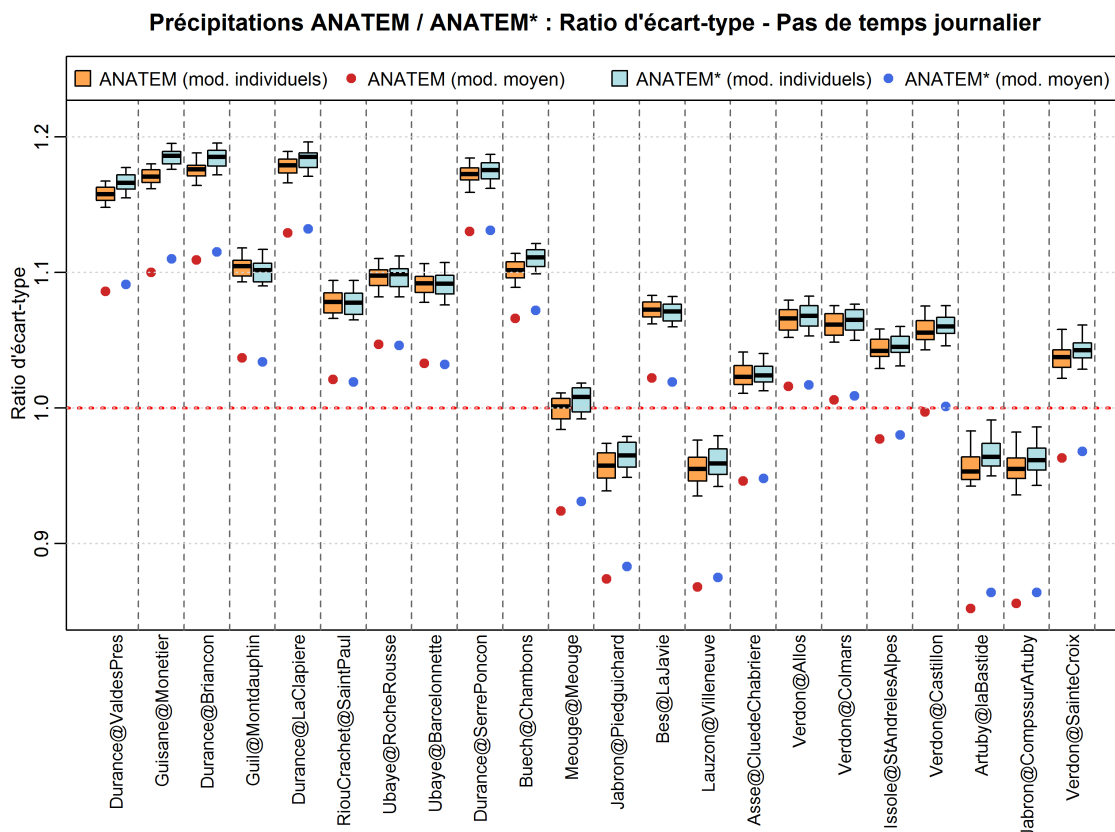


Figure 5.12 – Sensibilité des reconstitutions de précipitations au choix de la formulation du modèle ANATEM (saisonnalisé ou non) : ratio d'écart-type au pas de temps journalier.

II | Sensibilité au choix du témoin : analyse « multi-témoins » sur une période restreinte

Nous avons montré dans le chapitre 4 (section IV) que l'emplacement de la série à modéliser par rapport à la série utilisée comme témoin dans la méthode ANATEM pouvait avoir une influence sur les performances de la reconstitution. D'une manière générale, la reconstitution d'une série située à proximité de la série témoin montrait des performances supérieures à celles d'une reconstitution plus éloignée de celle-ci. Cet effet, particulièrement présent sur les reconstitutions TEM, est atténué mais néanmoins toujours présent sur les reconstitutions ANATEM.

Dans le cas de nos applications de la méthode ANATEM, à savoir la reconstitution de longues séries historiques, nous n'avons pu utiliser, pour des raisons de disponibilité de données, qu'une seule série témoin observée pour chaque type de reconstitution : la série de précipitations à Gap pour les reconstitutions de précipitations, et la série de températures de l'air à Marseille pour les reconstitutions de températures de l'air.

Cependant, dans le cadre d'applications légèrement différentes, par exemple pour la reconstitution de données manquantes sur une période récente (panne de station...), il serait envisageable d'utiliser d'autres séries observées comme témoin pour la mise en place de la méthode ANATEM.

Nous présentons dans cette section quelques analyses effectuées sur une période restreinte en « multi-témoins ». À partir d'une sélection de séries témoin disponibles sur le bassin de la Durance, nous avons reconstitué les séries de précipitations et de températures spatiales de chacun des 22 bassins versants de notre échantillon d'étude et nous présentons ci-après les résultats obtenus pour ces différentes reconstitutions. Les formulations des méthodes ANATEM et TEM, ainsi que les données synoptiques et locales utilisées sont les mêmes que pour les reconstitutions longues présentées dans le chapitre 4 (section I). En ce qui concerne la méthode ANATEM, seule la reconstitution moyenne (moyenne des 50 journées analogues) est utilisée ici.

II.1 | Reconstitution de séries de températures

Pour la reconstitution de séries de températures de l'air, nous avons utilisé un échantillon de 21 séries témoin de températures de l'air observées. Les stations de cet échantillon ont été sélectionnées en fonction de leur disponibilité temporelle et de leur répartition géographique sur et autour du bassin de la Durance. La série témoin de Marseille utilisée dans nos reconstitutions longues a été incluse dans l'échantillon. Les stations de l'échantillon retenu sont localisées sur la figure 5.13 et nommées dans le tableau 5.1. La période de reconstitution des séries de températures à partir de ces différentes séries témoin est 1964-2005, soit une durée de plus de 40 ans qui confère une bonne robustesse à cette analyse.

Pour chacun des 22 bassins versants de notre échantillon d'étude (présenté au chapitre 1, section II), nous avons reconstitué 21 séries de températures spatiales journalières à l'aide de la méthode ANATEM et autant avec la méthode TEM, en utilisant tour à tour les 21 séries témoin de températures de l'air présentées ci-dessus. Les corrélations au pas de temps journalier entre les reconstitutions ainsi obtenues et les observations sont présentées sur la figure 5.14. Pour chaque station, la distribution des résultats obtenus avec les 21 séries témoin est représentée par un boxplot (quantiles 10%, 25%, 50%, 75% et 90%) pour le modèle TEM et un autre pour le modèle ANATEM.

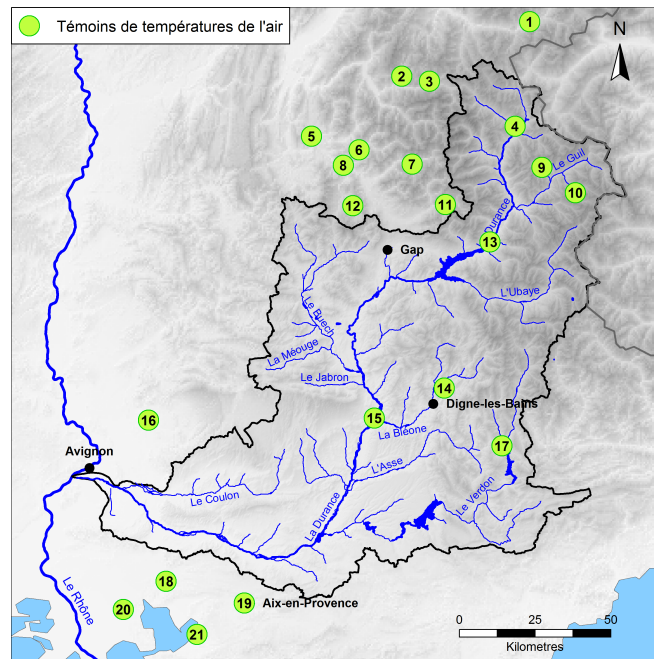


Figure 5.13 – Localisation des séries utilisées comme témoin pour les températures de l'air.

Num.	Nom Station	Nom sur les graphes
1	Avrieux Villarodin	AVRIEUXVILLAR
2	Besse	BESSE
3	La Grave	LAGRAVE
4	Briançon	BRIANCON
5	La Mure	LAMURE
6	La Salette-Fallavaux	LASALLETTE
7	La Chapelle-en-Valgaudemar	LACHVALGAU
8	Pellafol (le Sautet)	PELLAFOL
9	Arvieux	ARVIEUX
10	Saint-Véran	STVERAN
11	Orcières	ORCIERES
12	Saint-Étienne-en-Dévoluy	STETDEVOLUY
13	Embrun	EMBRUN
14	Marcoux Saint-Martin	MARCOUX
15	Château-Arnoux Saint-Auban	CHARSTAUBAN
16	Carpentras	CARPENTRAS
17	Saint-André-les-Alpes	STANDLSALPE
18	Salon-de-Provence	SALONDEPROV
19	Aix-en-Provence	AIXENPROV
20	Istres	ISTRES
21	Marseille (Marignane)	MARSEILLE

Tableau 5.1 – Noms des séries utilisées comme témoin pour les températures de l'air.

On remarque sur la figure 5.14 une certaine variabilité dans les performances des reconstitutions construites pour un même bassin versant avec différents témoins. Cette variabilité est plus importante avec le modèle TEM qu'avec le modèle ANATEM, ce qui rejoint les remarques qui ont été faites dans le chapitre 4 (section II) à propos de l'apport des données synoptiques dans la méthode ANATEM, qui permet en quelque sorte de « compenser » l'apport du témoin lorsque celui-ci est plus faible. Cependant, si le modèle

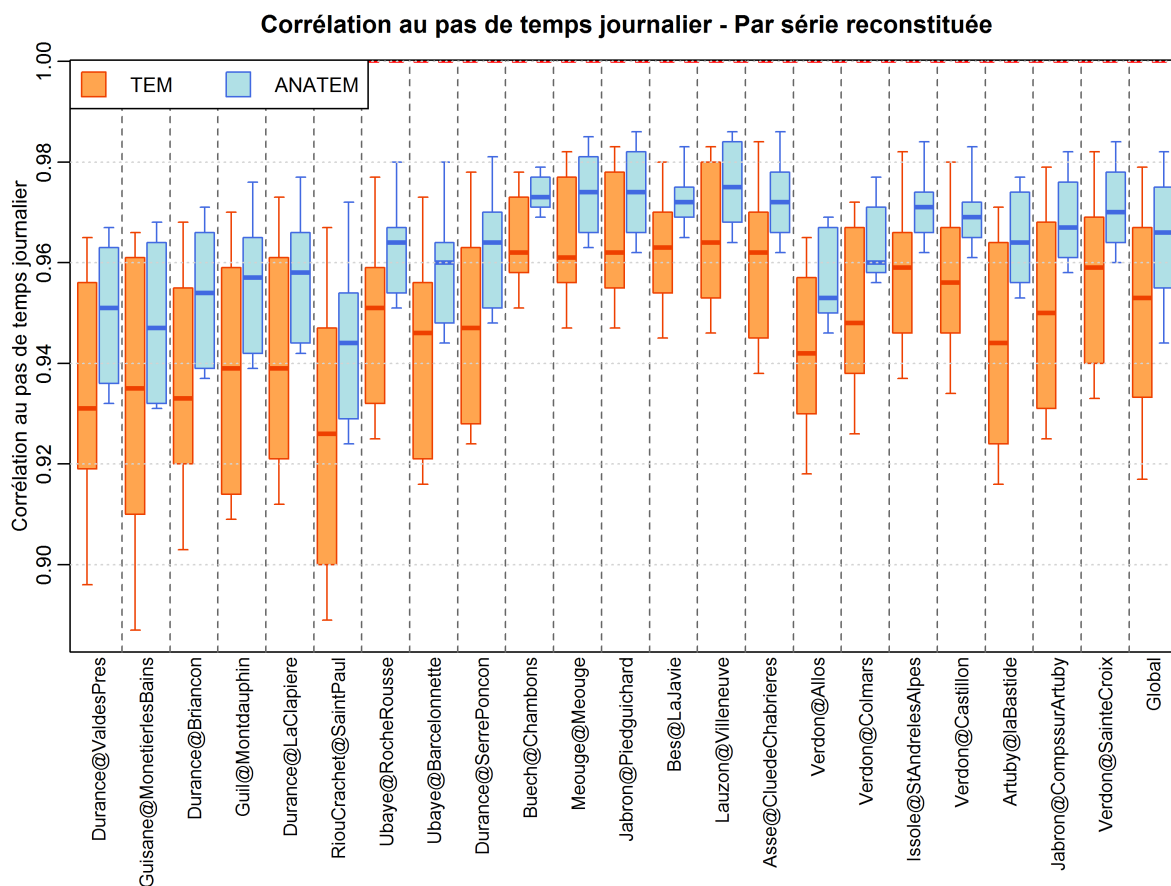


Figure 5.14 – Corrélations au pas de temps journalier obtenues pour chaque station avec les différents témoins de température de l'air (méthodes TEM et ANATEM).

ANATEM atténue la variabilité des coefficients de corrélation r observée lorsque l'on passe d'une série témoin à l'autre, il ne la supprime pas, celle-ci restant approximativement du même ordre de grandeur que la variabilité observée d'un bassin versant de reconstitution à l'autre.

A titre d'exemple, pour le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette, 80% des reconstitutions obtenues avec les différents témoins ont une corrélation avec l'observé comprise entre 0.94 et 0.98 soit une gamme de variation de 0.04. On note que malgré cette variabilité, l'ensemble des reconstitutions ANATEM montrent de bonnes performances puisque leur corrélation avec l'observé est toujours supérieure à 0.94.

Suite à ces remarques, il paraît intéressant d'analyser, pour un bassin versant de reconstitution donné, les performances obtenues avec l'utilisation de chacun des 21 témoins. C'est ce que nous présentons sur la figure 5.15, pour trois bassins versants de reconstitution pris comme exemples : La Durance à Val-des-Près, l'Ubaye à Barcelonnette, et le Lauzon à Villeneuve. Les valeurs représentées sont les coefficients de corrélation au pas de temps journalier obtenus pour la reconstitution moyenne ANATEM de la série de températures de l'air du bassin versant représenté en vert à l'aide de chaque témoin.

De la même manière que nous l'avions observé sur les cartes présentant les résultats d'un témoin donné au chapitre 4, on constate ici encore que la proximité spatiale entre le témoin utilisé pour la reconstitution ANATEM et l'emplacement de la série à reconstituer (ici le bassin versant) a visiblement une influence sur la qualité de la reconstitution.

Ainsi, pour la reconstitution de la série de température de l'air spatiale du bassin de la Durance à Val-des-Près, les séries témoin donnant les meilleures corrélations (supérieures à 0.97) sont celles de Besse, Briançon, Arvieux et Embrun. Les stations les plus éloignées

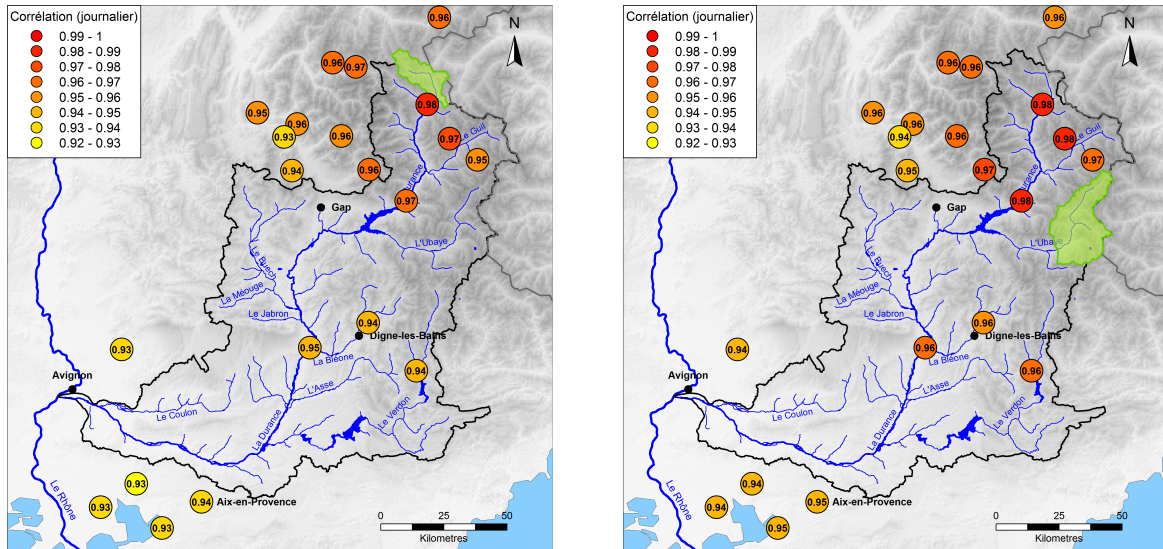
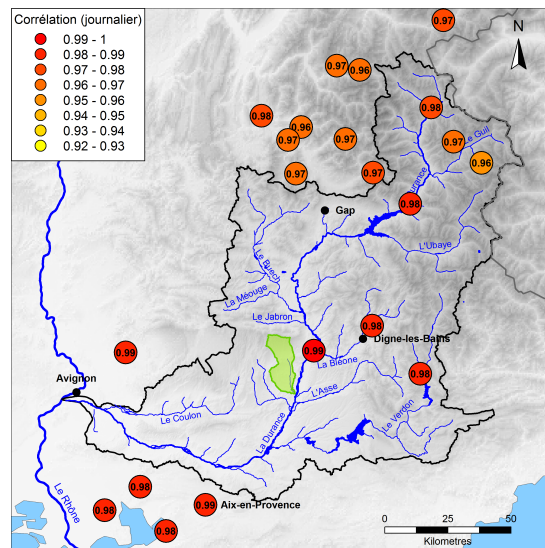
(a) *La Durance à Val-des-près*(b) *L'Ubaye à Barcelonnette*(c) *Le Lauzon à Villeneuve*

Figure 5.15 – *Corrélations au pas de temps journalier obtenues pour un bassin versant de reconstitution donné avec les différents témoins de température de l'air (méthode ANATEM).*

du bassin (Carpentras, Salon-de-Provence, Aix-en-Provence, Istres et Marseille) amènent à des reconstitutions légèrement moins performantes mais restant cependant très bonnes, avec une corrélation au pas de temps journalier de 0.93.

On peut faire le même genre d'analyse pour la reconstitution des températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette, où les corrélations au pas de temps journalier varient de 0.94 lorsque les séries de Carpentras, Salon de Provence ou Istres sont utilisées comme témoin à 0.98 lorsque l'on utilise les séries d'Embrun, Briançon ou Arvieux. On peut noter cependant que la série la plus proche du bassin, celle de Saint-Véran, amène une reconstitution très légèrement moins corrélée à l'observé que les trois stations citées précédemment.

Concernant le Lauzon à Villeneuve, la gamme des coefficients de corrélation journaliers

obtenus à partir des différentes séries témoin est légèrement plus restreinte, puisque ceux-ci varient entre 0.96 avec les séries de Saint Véran, La Grave et La Salette et 0.99 lorsque l'on utilise les séries de Saint-Auban, Carpentras ou Aix-en-Provence.

Ces trois cartes montrent finalement que la distance entre le lieu de la reconstitution et la série témoin utilisée pour celle-ci est un facteur influent de la performance, en termes de corrélation au pas de temps journalier, de la reconstitution d'une série de température de l'air. Il ne s'agit cependant pas de l'unique facteur entrant en jeu puisque l'on observe que dans certains cas, un témoin légèrement plus éloigné du bassin à reconstituer peut donner une reconstitution légèrement mieux corrélée. D'autres facteurs influant sur ces résultats pourraient être l'altitude ou des effets climatiques locaux. La qualité de la série d'observations peut également jouer un rôle important.

Il apparaît également sur la figure 5.15 que certaines séries témoin comme celle d'Embrun amènent à une bonne reconstitution pour les trois bassins représentés, alors que d'autres comme celle de Pellafol amènent globalement de moins bons résultats. On peut donc se demander s'il existe des séries témoin plus « universelles » que d'autres, qui permettraient d'obtenir de bonnes performances sur l'ensemble des bassins versants de notre échantillon d'étude. Pour répondre à ce questionnement, nous avons représenté sur la figure 5.16 les distributions des corrélations au pas de temps journalier obtenues pour chaque témoin sur les 22 bassins de reconstitutions, avec les méthodes TEM et ANATEM. Le même type de représentation que pour la figure 5.14 est utilisé ici, mais cette fois chaque boxplot représente, pour un témoin donné, la distribution des 22 valeurs de r obtenues sur chacun des bassins de reconstitutions. Les boxplots sont ici présentés par ordre croissant de la médiane des valeurs obtenues avec la méthode ANATEM.

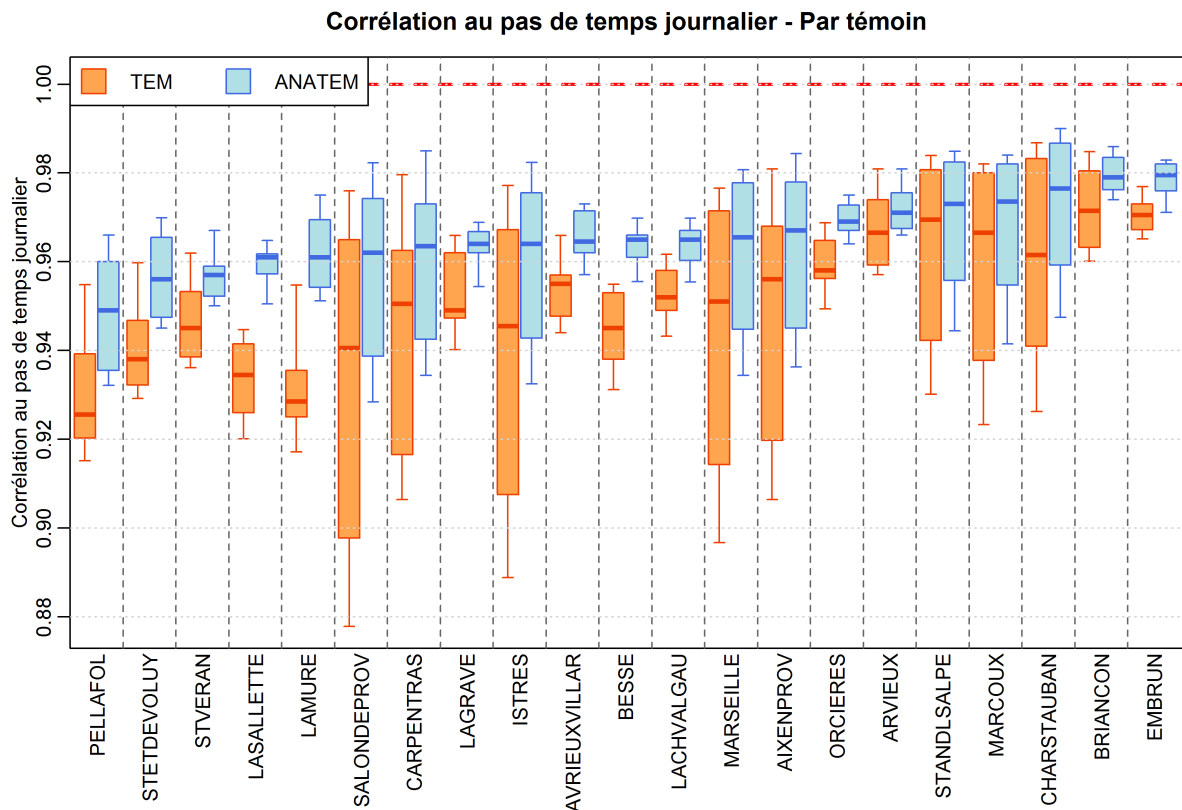


Figure 5.16 – Corrélations au pas de temps journalier obtenues avec chaque témoin de température de l'air, tous bassins versants de reconstitution confondus (méthodes TEM et ANATEM).

A nouveau on remarque que la méthode ANATEM permet, outre l'amélioration globale

des corrélations, d'atténuer la variabilité des performances d'un bassin à l'autre pour une même série témoin utilisée. La valeur médiane des reconstitutions obtenues via la méthode ANATEM pour un témoin donné sur les différents bassins de reconstitution varie entre 0.95 pour la série témoin de Pellafol et 0.98 lorsque l'on utilise la série d'Embrun. Cette dernière semble particulièrement intéressante car, en plus d'avoir la valeur médiane la plus élevée, sa distribution est peu dispersée et sur 90% des bassins la reconstitution obtenue avec la station d'Embrun a une corrélation avec l'observé supérieure à 0.97.

Cette figure nous permet également de positionner le témoin que nous utilisons pour nos longues reconstitutions, à savoir la série de Marseille-Marignane, par rapport aux autres séries disponibles sur la période récente. On remarque qu'en ce qui concerne la valeur médiane sur les 22 bassins de reconstitution, cette série est relativement bien placée avec une valeur légèrement inférieure à 0.97. La distribution des 22 valeurs correspondant aux 22 bassins de reconstitutions est relativement dispersée, mais les performances obtenues avec ce témoin sont globalement bonnes puisque, pour 90% d'entre elles, la corrélation entre reconstitués et observés est supérieure à 0.93.

II.2 | Reconstitution de séries de précipitations

L'échantillon utilisé pour la comparaison des témoins entrant dans la reconstitution de séries de précipitations est légèrement plus important que celui utilisé pour les températures de l'air. Cela est principalement dû au fait qu'il existe sur le bassin de la Durance plus de pluviomètres que de stations enregistrant la température de l'air. Nous avons regroupé pour cette analyse 36 séries de précipitations disponibles sur la période 1948-2010 et, dans la mesure du possible, réparties sur l'ensemble du bassin versant de la Durance et de ses proches alentours. Une durée de reconstitution de plus de 60 ans rend cette analyse particulièrement robuste. La série de Gap, utilisée pour nos reconstitutions fait également partie de l'échantillon. L'emplacement de ces différentes séries est présenté sur la figure 5.17, à relier avec le tableau 5.2 qui en donne les noms.

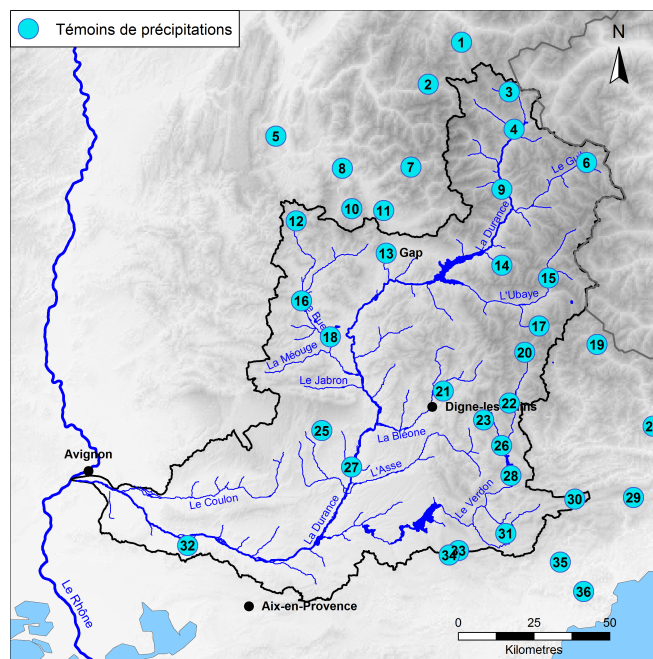


Figure 5.17 – Localisation des séries utilisées comme témoin pour les précipitations.

Num.	Nom Station	Nom sur les graphes	Num.	Nom Station	Nom sur les graphes
1	Valloire	VALLOIRE	19	Saint-Étienne-de-Tinée	STETTINEE
2	La Grave (Le Chazelet)	LAGRAVE	20	Allos	ALLOS
3	Névache (Sale)	NEVACHE	21	Marcoux Saint-Martin	MARCOUX
4	Briançon	BRIANCON	22	Thorame	THORAME
5	Monestier-de-Clermont	MOCLERMONT	23	Lambruisse	LAMBRUISSE
6	Abries Ristolas	ABRIES	24	Clans-Bancairon	CLANSBANC
7	La Chapelle-en-Valgaudemar	LACHVALGAU	25	Saint-Étienne-les-Orgues	STETLSORGUE
8	Pellafol (le Sautet)	PELLAFOL	26	Saint-André-les-Alpes	STANDLSALPE
9	Champcella	CHAMPCELLA	27	La Brillanne	LABRILLANNE
10	Saint-Étienne-en-Dévoluy	STETDEVOLUY	28	Castillon Demandolx	CASTILLON
11	Saint-Bonnet	STBONNET	29	Coursegoules	COURSEGOULES
12	Lus-la-Croix-Haute	LUSLACRXHTE	30	Bas-Thorenc (Andon)	BASTHORENC
13	Gap	GAP	31	Comps sur Artuby	COMPSSRARTU
14	Les Orres (le Melezet)	LESORRES	32	Mallemort	MALLEMORT
15	La Condamine	LACONDAMINE	33	Plan-de-Canjuers	PLCANJUERS
16	Serres	SERRES	34	Verignon	VERIGNON
17	Fours-Saint-Laurent	FRSSTLAURENT	35	Tourrettes	TOURRETTES
18	Laragne	LARAGNE	36	Les-Adrets-de-l'Estérel	LSADRESTEREL

Tableau 5.2 – *Noms des séries utilisées comme témoin pour les précipitations.*

De la même manière que ce qui a été présenté pour les températures de l'air, la figure 5.18 regroupe les distributions des valeurs de corrélation au pas de temps journalier entre observations et reconstitutions des précipitations obtenues pour chacun des bassins de reconstitution en utilisant tour à tour les 36 séries témoins de précipitations, avec les méthodes TEM et ANATEM. Les quantiles représentés par les boxplots sont à nouveau les quantiles 10%, 25%, 50%, 75% et 90% des distributions concernées, la période de reconstitution en revanche est modifiée puisqu'il s'agit cette fois de la période 1948-2010.

En comparaison avec la figure 5.14, on remarque ici que la variabilité des coefficients de corrélation, pour un bassin de reconstitution donné, entre les reconstitutions utilisant les différentes séries témoins de précipitations est nettement plus importante pour les précipitations que pour les températures de l'air. Pour le bassin versant de l'Ubaye à Barcelonnette, 80% des reconstitutions moyennes ANATEM utilisant les différents témoins disponibles admettent des valeurs de r variant entre 0.64 et 0.87 environ. Cette gamme de variation est nettement supérieure aux variations observées sur les valeurs médianes des distributions ANATEM d'un bassin de reconstitution à l'autre.

Afin d'observer d'un point de vue spatial cette variabilité des coefficients de corrélation observée entre les reconstitutions des séries de précipitations d'un bassin versant à partir de différentes séries témoins, nous avons représenté sur la figure 5.15 les valeurs de corrélations obtenues pour la reconstitution ANATEM des précipitations de trois bassins versants à partir de chacune des séries témoins disponibles. De la même manière que pour les températures de l'air, on a indiqué à l'emplacement de chaque série témoin la corrélation entre les observés et la reconstitution moyenne ANATEM obtenue avec ce témoin. Les trois bassins versants présentés dans cet exemple sont les mêmes que pour les températures de l'air, à savoir la Durance à Val-des-Près, l'Ubaye à Barcelonnette et le Lauzon à Villeneuve.

On remarque à nouveau que la variabilité des coefficients de corrélation est plus grande entre les différentes reconstitutions de précipitations qu'elle ne l'était pour les reconstitutions de températures de l'air. Pour la reconstitution de la série de précipitations spatiales du bassin de la Durance à Val-des-Près, le coefficient de corrélation des reconstitutions varie entre 0.39 lorsque la série des Adrets-de-l'Estérel est utilisée à 0.94 lorsque l'on utilise

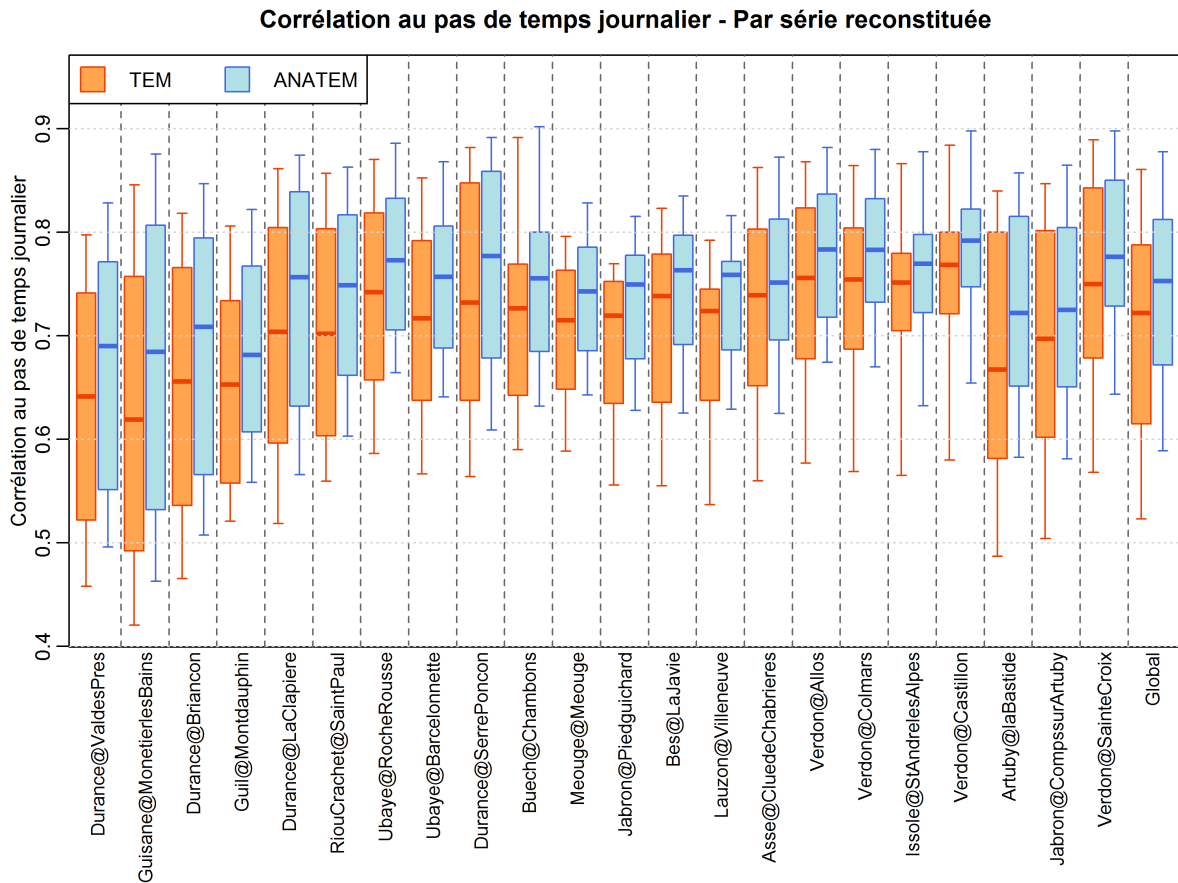


Figure 5.18 – Corrélations au pas de temps journalier obtenues pour chaque station avec les différents témoins de précipitations (méthodes TEM et ANATEM).

la série de Névache, qui se trouve sur le bassin de reconstitution. On observe assez nettement la dégradation des coefficients de corrélation au fur et à mesure que l'on descend vers le sud du bassin de la Durance.

Pour la reconstitution de la série de précipitations spatiales du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette, il existe également une série témoin sur le bassin, qui donne encore une fois la meilleure reconstitution, avec une corrélation avec les observés de 0.94 au pas de temps journalier. Les corrélations les plus faibles sont obtenues en utilisant les séries de Mallemort et des Adrets-de-l'Esterel.

Concernant le bassin versant du Lauzon à Villeneuve, la meilleure reconstitution (coefficient de corrélation 0.97) de la série de précipitations spatiales est à nouveau obtenue avec un pluviomètre situé sur le bassin, à Saint-Etienne-les-Orgues. La décroissance des coefficients de corrélation avec l'augmentation de la distance de la série témoin au bassin est ensuite très rapide puisque déjà en utilisant la série de La Brillanne, qui se trouve juste à l'aval du bassin, on n'obtient plus qu'une corrélation de 0.89. Les plus faibles coefficients de corrélation sont ceux des reconstitutions construites à partir des séries de Valloire et Abriès-Ristol.

Pour finir, nous présentons sur la figure 5.20, pour chaque témoin possible de précipitations, les distributions des valeurs de corrélation au pas de temps journalier obtenues pour les reconstitutions des 22 séries de précipitations spatiales des bassins versants de notre échantillon d'étude. Les différents témoins sont classés par ordre croissant de la valeur médiane des corrélations obtenues avec la méthode ANATEM.

On remarque à nouveau une variabilité plus grande que celle observée pour les reconstitutions de températures de l'air, à la fois pour un même témoin entre les différents

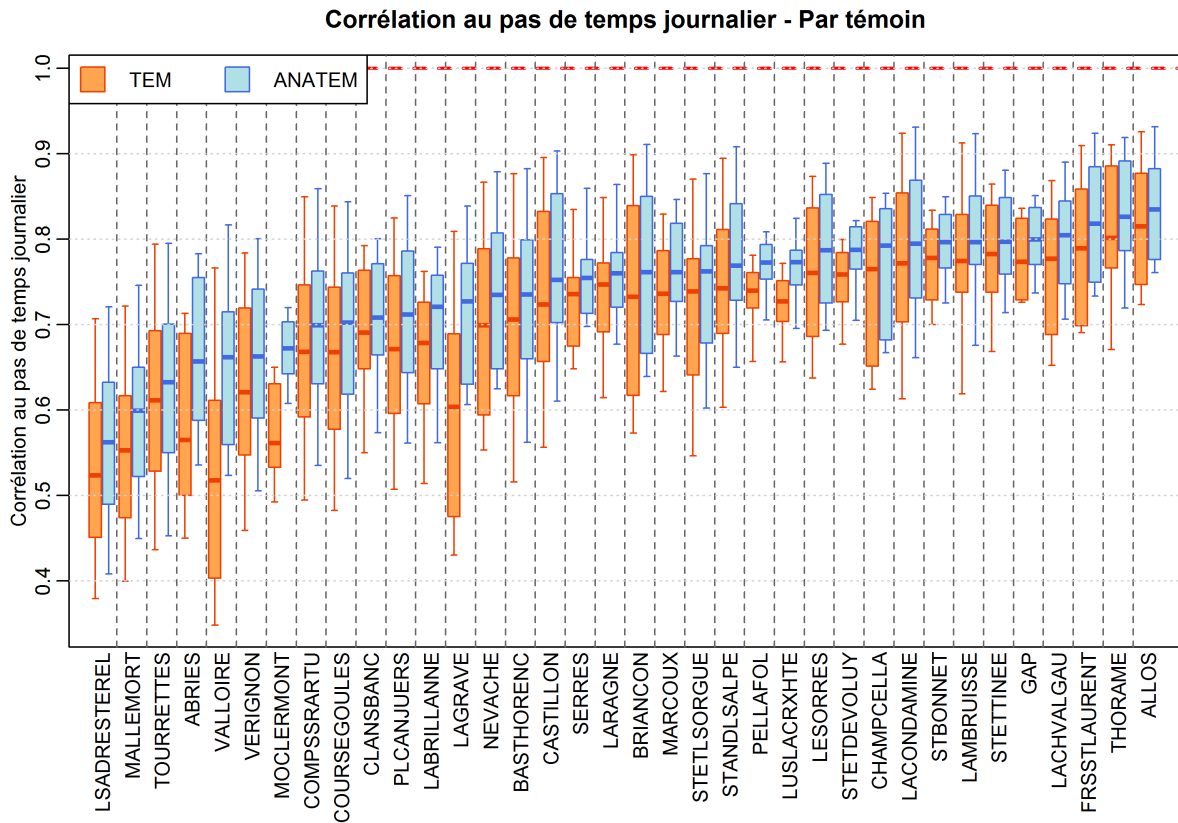


Figure 5.20 – *Corrélations au pas de temps journalier obtenues avec chaque témoin de précipitations, tous bassins versants de reconstitution confondus (méthodes TEM et ANATEM).*

Cette analyse « multi-témoins » menée à la fois sur les reconstitutions de températures de l'air et de précipitations a permis de mettre en évidence l'intérêt, pour construire une bonne reconstitution, de disposer d'une série témoin située à proximité de la série à reconstituer. Dans un cas idéal de disponibilité de multiples séries d'observations journalières, la méthode ANATEM pourrait donc être optimisée en adaptant le témoin utilisé à chaque série à reconstituer.

La variabilité observée d'un témoin à l'autre pour une même série à reconstituer est nettement plus importante lorsqu'il s'agit de reconstituer des séries de précipitations que dans le cas des températures de l'air. Cette constatation rejoint certaines conclusions des analyses du chapitre 4 et s'explique par le fait que la variable température de l'air a un caractère plus régional que les précipitations qui sont bien plus variables d'un endroit à l'autre du bassin de la Durance et peuvent être influencées par des effets climatiques locaux. L'utilisation d'une série témoin relativement éloignée de la série à reconstituer est donc moins gênante pour la reconstitution de températures de l'air que pour les précipitations.

Nous avons également pu remarquer que d'une manière générale, la gamme de variation des corrélations observées au pas de temps journalier pour une même série reconstituée entre les reconstitutions utilisant différents témoins est plus importante pour les modèles TEM que pour les modèles ANATEM. Cela met en évidence l'intérêt d'ajouter une source d'information, en l'occurrence les données synoptiques, pour compléter l'information régionale portée par la série témoin, et ce particulièrement lorsque la reconstitution via la série témoin est imparfaite.

Par ailleurs, ces résultats mettent en évidence l'existence de séries témoin globalement

plus explicatives que d'autres sur l'ensemble des bassins. Cela amène à s'interroger sur les raisons qui, au delà de la simple distance témoin - série reconstituée, font d'une série de précipitations un « bon » ou un « mauvais » témoin pour la reconstitution des précipitations ou des températures de l'air. La station d'Allos apparaît comme le « meilleur » témoin pour la reconstitution des précipitations sur les 22 bassins d'étude. On peut se demander s'il s'agit par exemple de la station la plus stable du point de vue de la mesure (emplacement, environnement, type de pluviomètre), ou la moins sensible à des effets climatiques locaux, ou si simplement sa situation par rapport à l'ensemble du bassin constitue un « bon compromis ». Un autre élément intéressant est le fait que les trois « meilleurs » témoins de précipitations, Allos, Thorame (haut-Verdon) et Fours-Saint-Laurent (Ubaye), sont situés dans le même secteur au centre-est du bassin.

Cette analyse a enfin été l'occasion de comparer les séries témoin de Gap et Marseille, utilisées dans le cadre de nos reconstitutions climatiques sur la période 1883-2010 (chapitre 4), à d'autres séries qui pourraient être utilisées sur une période plus restreinte. Cette comparaison a montré qu'à la fois la série de Marseille pour les températures de l'air et la série de Gap pour les précipitations montrent des performances tout à fait acceptables en comparaison aux autres séries témoin.

III | Que peut-on faire à l'aide de « témoins » issus des réanalyses climatiques ?

Nous avons montré dans le chapitre 4 que l'utilisation d'une série d'observations journalières comme « témoin » en complément de l'information synoptique portée par la méthode des analogues permettait une nette amélioration des reconstitutions climatiques. De telles séries d'observations ne sont cependant pas toujours disponibles pour reconstituer des données climatiques. Il paraît donc intéressant d'étudier la possibilité de remplacer ces données par d'autres types de « témoins » pouvant être extraits des réanalyses climatiques déjà utilisées pour la recherche des journées analogues.

III.1 | Reconstitution de séries de températures

Pour la reconstitution de séries de températures de l'air, comme indiqué dans le chapitre 3, nous avons expérimenté l'utilisation comme témoin d'une série d'épaisseurs de la couche d'atmosphère entre les isopotentiels 700 et 1000 hPa (appelée par la suite « épaisseur ») d'une part, et d'autre part une série de températures de l'air au sol modélisée par la réanalyse. Ces deux séries sont issues de la réanalyse 20CR, également utilisée pour la recherche des journées analogues. Il s'agit des séries modélisées par cette réanalyse au point de grille ($4^{\circ}, 44^{\circ}$) pour l'épaisseur et au point ($3.8^{\circ}, 44.8^{\circ}$) pour la température au sol (voir chapitre 3).

L'ensemble des graphiques présentant les performances de ces deux nouvelles reconstitutions de la température de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette sur la période 1948-2010 sont reportés annexe A. La figure 5.22 regroupe les diagrammes de Taylor au pas de temps journalier et annuel des reconstitutions obtenues avec pour témoin la série d'observations à Marseille, et les séries d'épaisseur et de températures au sol issues de la réanalyse NOAA.

Globalement, les performances aux pas de temps journalier et mensuel sont équivalentes à celles rencontrées lorsque la série de températures de l'air à Marseille était utilisée. La reconstitution à partir de la série d'épaisseurs est légèrement meilleure que celle utili-

sant la série de températures de l'air au sol 20CR. Au pas de temps annuel en revanche, on constate une légère dégradation des performances sur les reconstitutions basées sur un témoin issu de la réanalyse, à la fois en termes de corrélation et de ratio d'écart-type.

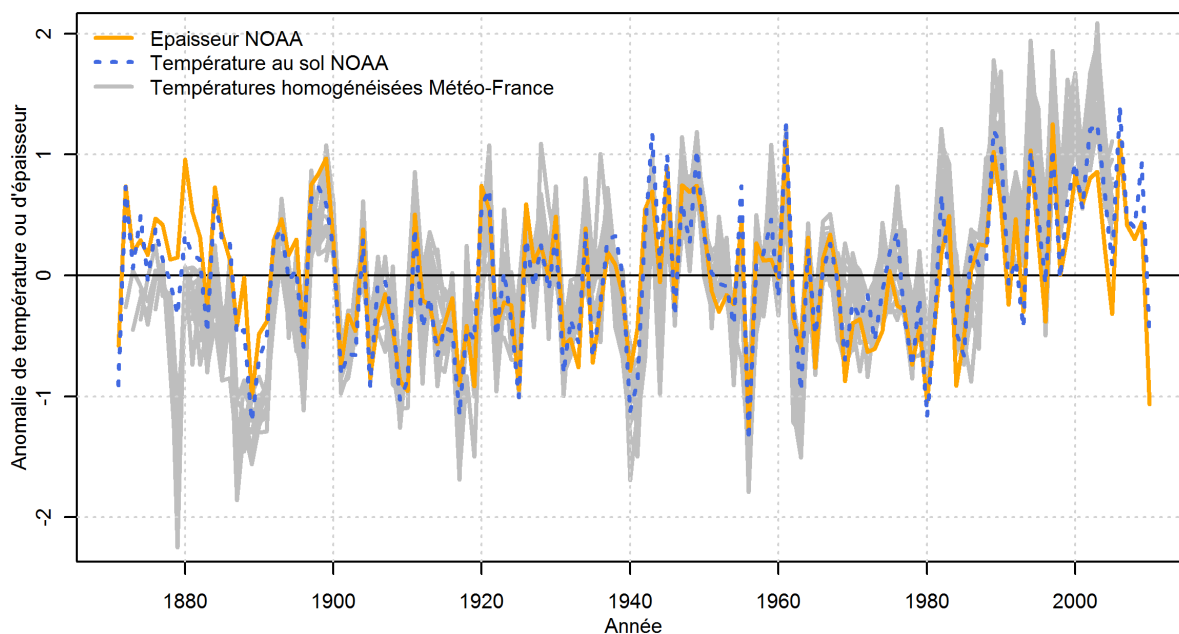


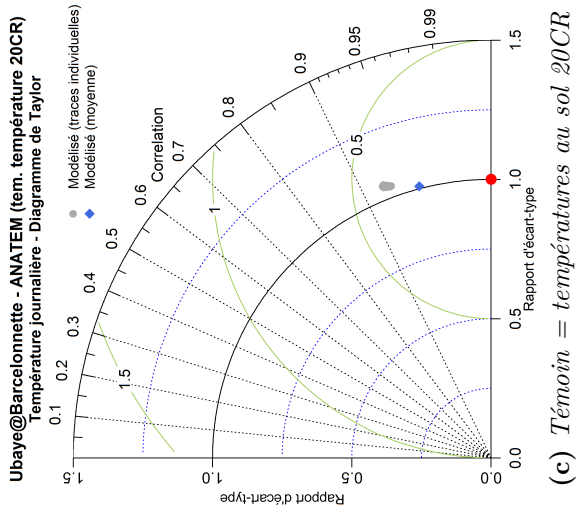
Figure 5.21 – Chroniques annuelles des anomalies d'épaisseur et de température de l'air au sol au point-grille ($4^{\circ},44^{\circ}$) de la réanalyse NOAA, et de 19 séries de températures de l'air homogénéisées de Météo-France.

Par ailleurs, nous avons représenté sur la figure 5.21 l'évolution au pas de temps annuel des deux séries issues de la réanalyse 20CR (en anomalie, c'est-à-dire après avoir retranché la moyenne interannuelle), l'épaisseur (en décimètres) de la couche d'atmosphère entre 700 et 1000 hPa, et la température au sol pour la période 1871-2010. Sur le même graphique ont été portées plusieurs séries de températures de l'air homogénéisées de Météo-France (Moisselin *et al.*, 2002), à savoir les séries de Foix (09), Saint-Flour (15), Besançon (25), Montélimar (26), Toulouse - Blagnac (31), Montpellier (34), Rennes - Saint-Jacques (35), Grenoble - Saint-Martin-d'Hères (38), Orléans (45), Clermont-Ferrand (63), Bagnères-de-Bigorre (65), Perpignan (66), Strasbourg (67), Lyon-Bron (69), Cran-Gevrier (74), Paris-Montsouris (75), Cap-Camarat (83), Orange (84) et Limoge - Bellegarde (87).

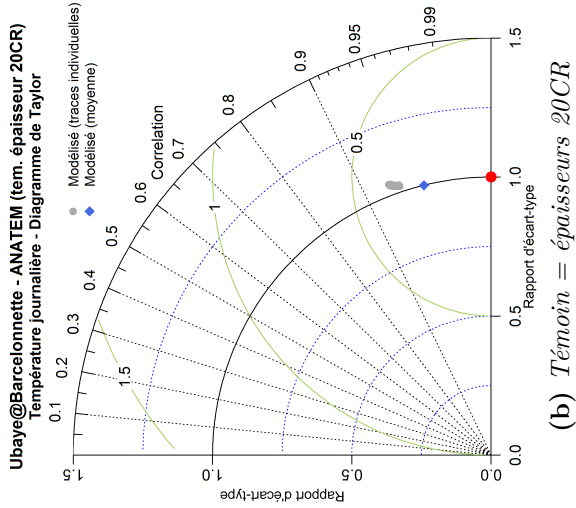
Cette figure met en évidence un défaut assez net de représentation de la variabilité basse fréquence des séries issues de la réanalyse. En effet, toutes les séries homogénéisées de Météo-France présentent une période relativement froide entre 1871 et les années 1890, ainsi qu'une nette augmentation des températures depuis les années 1980, or ces variations ne se retrouvent pas (ou de manière moins marquée) sur les séries issues de la réanalyse.

Ces observations expliquent en partie la diminution de performances observée au pas de temps annuel entre la reconstitution utilisant la série d'observations à Marseille et les reconstitutions basées sur les séries issues de la réanalyse, mais au delà de ces performances en corrélation et ratio d'écart-type, se pose la question de l'aptitude d'une reconstitution basée sur ces variables à représenter la variabilité climatique basse fréquence de la série à reconstituer.

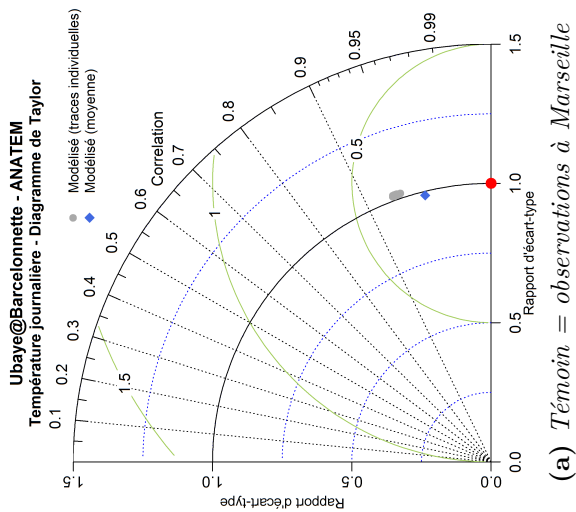
Finalement, les variables épaisseur et température au sol de la réanalyse 20CR paraissent suffisamment représentatives pour permettre une reconstitution acceptable à des pas de temps relativement courts de la série de températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette, mais leur fiabilité à l'échelle pluri-annuelle semble devoir être interrogée.



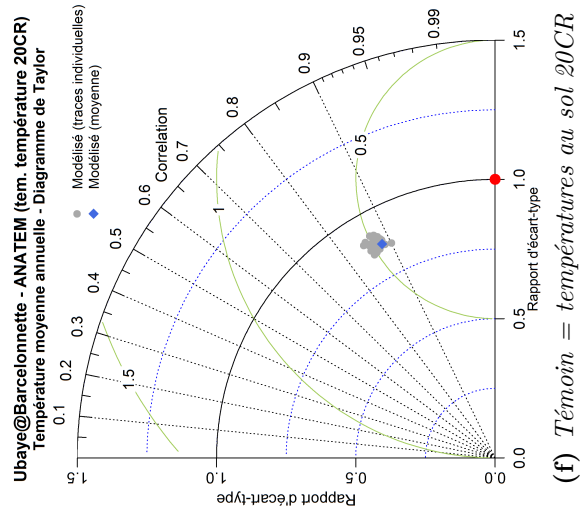
(c) *Témoin = températures au sol 20CR*



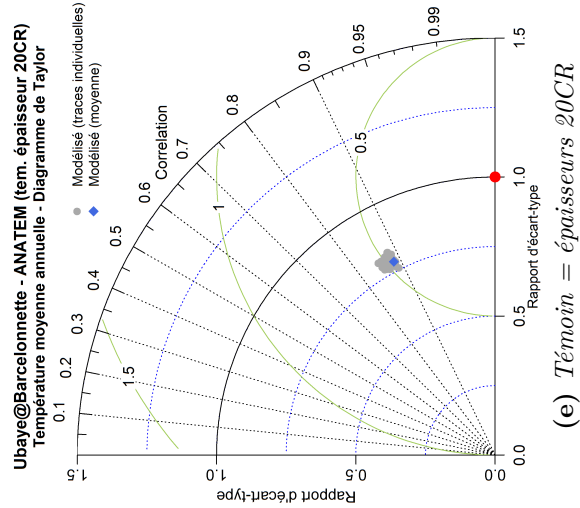
(b) *Témoin = épaisseurs 20CR*



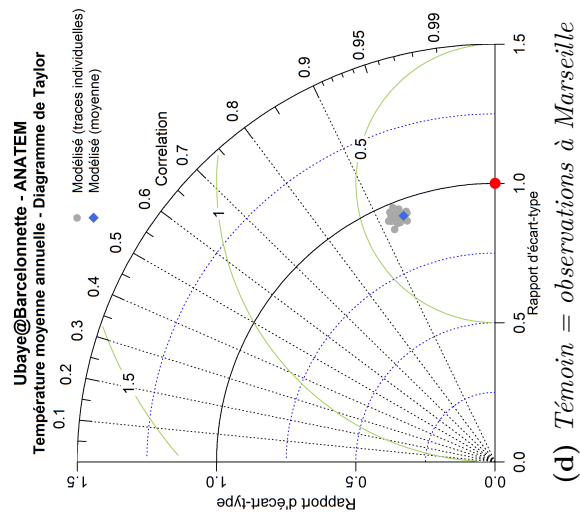
(a) *Témoin = observations à Marseille*



(f) *Témoin = températures au sol 20CR*



(e) *Témoin = épaisseurs 20CR*



(d) *Témoin = observations à Marseille*

Figure 5.22 – Diagrammes de Taylor aux pas de temps journalier et mensuel obtenus pour les reconstitutions des températures du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette à partir de différents types de séries témoin.

III.2 | Reconstitution de séries de précipitations

III.2.1 | Reconstitution des précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette

Pour la reconstitution de séries de précipitations, nous avons expérimenté l'utilisation comme témoin d'une série de précipitations modélisée par la réanalyse 20CR, au même point-grille que pour les températures, c'est-à-dire le point (3.8°,44.8°).

Les graphes présentant les résultats obtenus pour la reconstitution de la série des précipitations sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette sont reportés en annexe B. Nous avons reproduit sur la figure 5.23 les diagrammes de Taylor aux pas de temps journalier et annuel correspondant à la reconstitution basée sur le modèle ANA (analogues seuls), et aux modèles ANATEM utilisant comme série témoin la série de précipitations 20CR d'une part, et la série de précipitations observées à Gap d'autre part.

Globalement, l'apport d'un témoin issu de la réanalyse 20CR par rapport au modèle ANA n'utilisant pas de témoin est nettement plus faible que ce qui a pu être constaté sur les températures de l'air. Ainsi, les résultats obtenus par la reconstitution ANATEM utilisant le témoin de précipitations 20CR sont plus proches de ceux du modèle ANA que du modèle ANATEM s'appuyant sur la série d'observations à Gap.

Au pas de temps journalier, l'utilisation du témoin de précipitations 20CR permet, par rapport au modèle ANA, d'augmenter la corrélation des reconstitutions individuelles et de réduire les écarts de corrélation entre ces différentes reconstitutions. La corrélation de la reconstitution moyenne n'est pas améliorée, mais son biais d'écart-type, qui est très important dans le cas du modèle ANA, est réduit par l'utilisation du témoin. Les résultats obtenus restent cependant nettement en deçà de ceux du modèle ANATEM basé sur la série d'observations à Gap. À titre de comparaison, la corrélation au pas de temps journalier de la reconstitution ANATEM avec témoin issu de la réanalyse est, d'après la figure 5.19, du même ordre de grandeur que celle obtenue avec un témoin situé à plus de 100 km du bassin versant de l'Ubaye à Barcelonnette.

Les mêmes remarques peuvent être faites au pas de temps annuel : sur le diagramme de Taylor correspondant au modèle ANATEM avec témoin 20CR (figure 5.23e), les points correspondant aux reconstitutions individuelles sont plus regroupés et légèrement plus proches de l'optimum que pour le modèle ANA. Le ratio d'écart-type de la reconstitution moyenne est également plus proche de 1. Les corrélations obtenues avec le témoin 20CR, comprises entre 0.5 et 0.7, restent néanmoins inférieures à celles obtenues lorsque la série d'observations à Gap est utilisée comme témoin, qui sont proches de 0.8.

En conclusion, l'utilisation comme série témoin de la série de précipitations issue de la réanalyse 20CR permet, par rapport à la méthode ANA, une légère amélioration des performances des reconstitutions qui restent néanmoins largement inférieures à celles constatées lors que la série d'observations à Gap est utilisée. Il pourrait néanmoins subsister des marges d'amélioration dans l'exploitation des réanalyses (avec notamment l'utilisation des variables liées à l'humidité des masses d'air : Bontron *et al.* 2002; Ben Daoud *et al.* 2010). Cependant ces marges d'améliorations sont certainement limitées du fait que les seules variables assimilées par les réanalyses 20CR sont les pressions au niveau de la mer (Compo *et al.*, 2011) ce qui laisse penser qu'*a priori* les variables liées à la thermodynamique produites par cette réanalyse ont peu de raison d'être pertinentes au jour le jour. On peut noter d'ailleurs que l'amélioration liée à l'ajout de la série de précipitation issue du modèle reste relativement modeste, ce qui traduit le fait qu'il n'y a pas véritablement d'apport d'information supplémentaire.

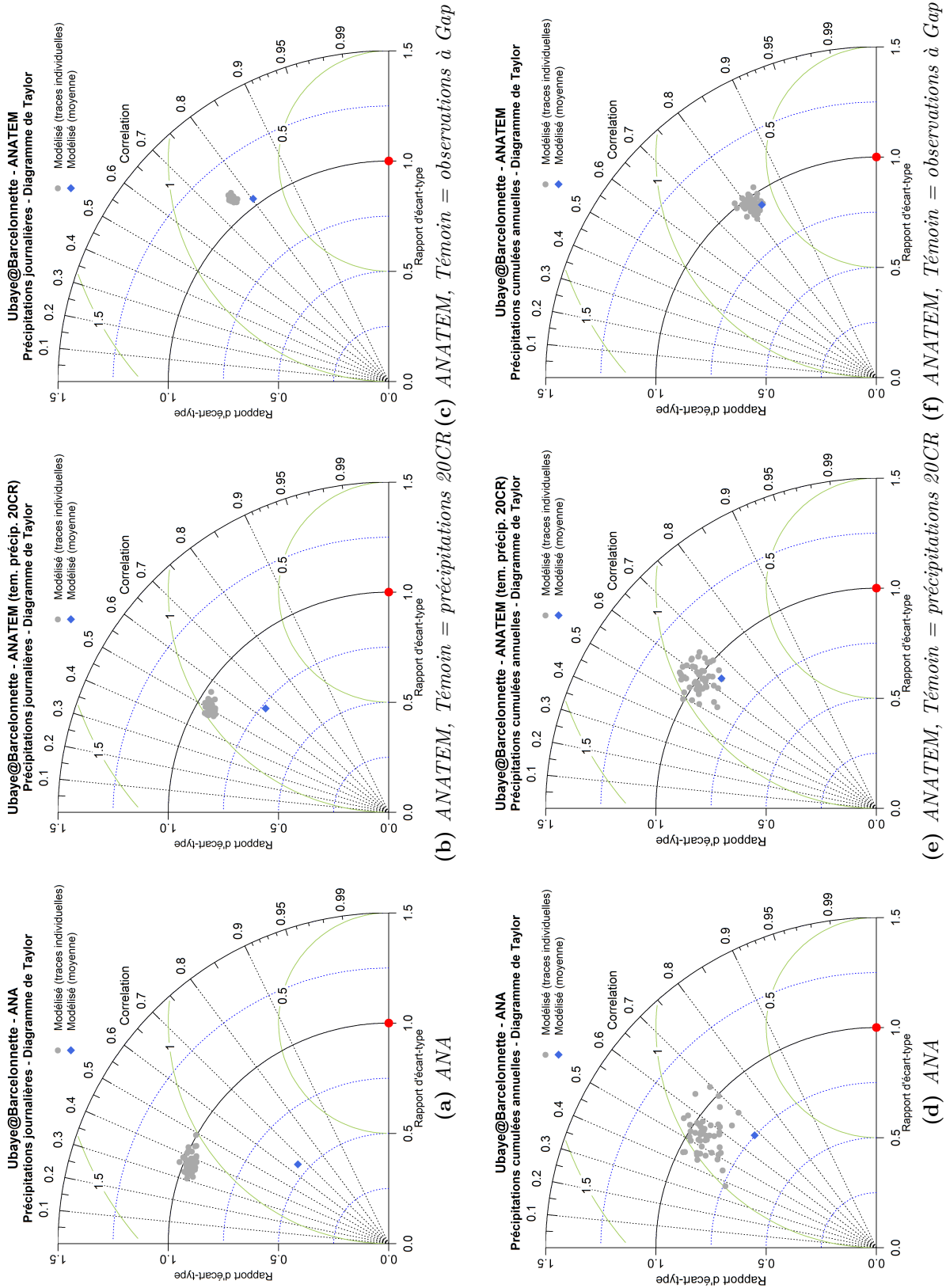


Figure 5.23 – Diagrammes de Taylor aux pas de temps journalier et mensuel obtenus pour les reconstitutions des températures des bassins de l'Ubaye à Barcelonnette à partir de différents types de séries témoin.

III.2.2 | Analyse sur le long terme

On a vu précédemment à propos des températures de l'air que la composante basse fréquence de la réanalyse 20CR pouvait être problématique. Qu'en est-il pour les précipitations ? Pour répondre à cette question on propose d'utiliser dans un premier temps la série de Gap (*a priori* homogène, voir chapitre 3, section III.2.3), ainsi que de la série homogénéisée de Météo-France des précipitations à Marseille. Cette série homogénéisée est disponible au pas de temps mensuel, mais on dispose également d'une « série quotidienne de référence » (SQR Météo-France) au mêmes point de mesure sur une période suffisante pour permettre l'application de la méthode ANATEM.

Pour chacune de ces deux stations, nous avons produit une reconstitution ANATEM à partir des données quotidiennes disponibles (Gap / SQR Météo-France) et en utilisant comme série témoin la série de précipitations au sol issue de la réanalyse 20CR au point de grille le plus proche de la série à reconstituer, c'est-à-dire :

- pour la série de Gap (Hautes-Alpes), le point de grille (3.8° , 44.8°) numéroté P036 ;
- pour la série de Marseille (Bouches-du-Rhône), le point de grille (3.8° , 42.9°) numéroté P026 ;

Les séries reconstituées sont ensuite comparées à la série homogénéisée de Météo-France correspondante (ou à la longue série quotidienne pour Gap). Les chroniques des moyennes glissantes sur 9 ans des anomalies de précipitations de la série observée et des reconstitutions ANA et ANATEM sont présentées sur les figures 5.24 et 5.25. Ces anomalies sont calculées pour les précipitations en divisant la valeur annuelle par la moyenne interannuelle. Les corrélations au pas de temps annuel entre les précipitations observées et reconstituées sont indiquées dans la légende.

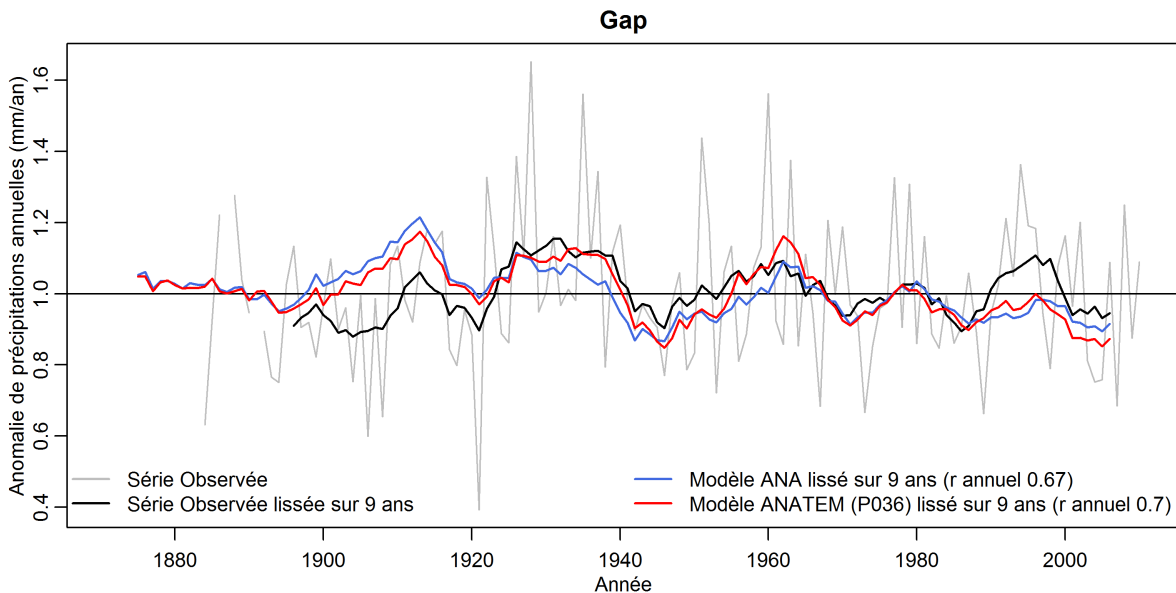


Figure 5.24 – Chroniques annuelles des anomalies de précipitations observées et des précipitations lissées sur 9 ans observées et reconstituées par ANA et ANATEM (témoin : P036) pour la station de Gap.

On constate à nouveau que l'apport en termes de corrélation au pas de temps annuel de la série témoin de précipitations issue de la réanalyse est minime. En ce qui concerne la basse fréquence, sur les deux séries la reproduction de la variabilité à l'échelle de la décennie est correcte, les périodes plus humides et plus sèches sont globalement respectées, sauf sur la partie la plus récente des chroniques. En ce qui concerne la série de Gap, il

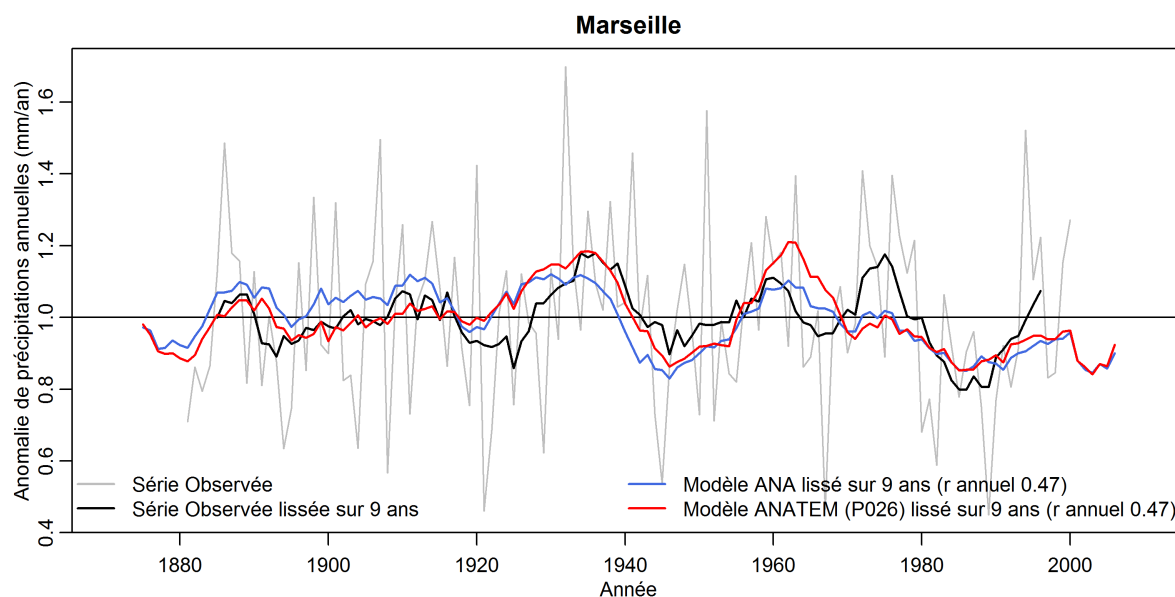


Figure 5.25 – Chroniques annuelles des anomalies de précipitations de la série homogénéisée de Météo-France et des précipitations lissées sur 9 ans de la série homogénéisée de Météo-France et des reconstitutions par ANA et ANATEM (témoin : P026) pour la station de Marseille.

existe également un écart entre les reconstitutions et les observations sur la période 1900 - 1920.

IV | Sensibilité des modèles ANA et ANATEM à différents paramètres de la méthode des analogues

Nous avons décrit dans le chapitre 3 la méthode des analogues utilisée dans le cadre de la méthode ANATEM pour la reconstitution des séries climatiques sur le bassin de la Durance. Comme nous l'avons expliqué dans ce chapitre, au vu de l'apport important de la série témoin de Gap, le propos n'était pas d'explorer dans les détails l'optimisation de la méthode des analogues seules. En effet la méthode des analogues est ici utilisée conjointement à la série témoin, l'idée étant de faire une adaptation statistique de la série témoin conditionnellement au type de circulation atmosphérique (cf. chapitre 3 paragraphe I.3). Une piste d'amélioration a néanmoins été explorée pour la reconstitution de précipitations : celle d'un échantillonnage différent des journées analogues. Par ailleurs, nous avons également expérimenté l'utilisation d'une archive climatique différente pour la sélection des journées analogues.

IV.1 | Échantillonnage des analogues

Nous avons indiqué dans le chapitre 3 que les reconstitutions climatiques ANATEM présentées dans le chapitre 4 étaient construites en utilisant pour chaque journée 50 journées analogues. Ces 50 analogues correspondent aux 50 journées du « réservoir de dates analogues » présentant la distance d'analogie la plus faible avec la journée cible. Pour chaque journée cible, les 50 journées analogues sont classées du meilleur analogue au moins bon analogue.

Il existe une multitude d'autres possibilités pour construire un ensemble de 50 analogues et le choix d'une de ces possibilités fait partie des « leviers » pouvant être actionnés

pour l'optimisation de la méthode des analogues. L'une d'entre elle consiste à se focaliser sur les dix meilleurs analogues et à effectuer un tirage aléatoire de 50 journées parmi ces 10 de manière à conserver 50 trajectoires.

Nous proposons ici d'analyser les résultats obtenus avec une méthode dérivée de cette dernière et complétée d'un « rééchantillonnage conditionnel » (« Conditional Resampling »). Cette méthode, développée par J. Gailhard dans le cadre du projet RIWER 2030 et présentée dans Hingray *et al.* (2013, Annexe A2), part du constat que certaines journées candidates sont plus souvent que d'autres sélectionnées comme faisant partie des dix meilleurs analogues d'une journée cible. Ceci peut introduire des biais dans la reconstitution car les journées les moins sélectionnées présentent souvent des caractéristiques communes (typiquement : dépressions très creusées, en limite de domaine lors de la recherche de journées analogues, comme c'est le cas par exemple des épisodes cévenols d'automne dans le sud-est de la France).

La méthode de « conditionnal resampling » vise à éviter ce déséquilibre en pondérant chaque date analogue candidate en fonction du nombre de fois où elle a été sélectionnée sur une période donnée. Plus concrètement, un premier échantillonnage aléatoire de 50 analogues parmi les dix meilleurs est effectué, puis un comptage du nombre de tirage de chaque journée candidate permet de définir les poids à attribuer à chacune de ces journées pour le rééchantillonnage.

Les graphiques présentant les résultats obtenus avec cette méthode pour la reconstitution de la série de précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette avec les méthodes ANA et ANATEM (témoin : série observée à Gap) sont reportés en annexe C. Nous avons reproduit sur la figure 5.26 les diagrammes de Taylor au pas de temps annuel des reconstitutions ANA et ANATEM avec la méthode d'échantillonnage « de base » de 50 analogues (ANA 50 et ANATEM 50) d'une part, et la méthode de tirages et de « Conditionnal Resampling » parmi les dix meilleurs analogues (ANA 10+CR et ANATEM 10+CR) d'autre part.

Les résultats obtenus mettent en évidence une amélioration sur la reconstitution par les analogues seuls et notamment une diminution du biais de variance, une légère augmentation de la corrélation et une meilleure aptitude à reproduire les valeurs fortes, y compris sur les cumuls annuels.

En revanche, en ce qui concerne les reconstitutions ANATEM, aucune amélioration notable n'est constatée, ce qui nous conforte dans l'idée d'utiliser la version « de base » (50 analogues) dans le cas où la méthode des analogues est couplée avec une série témoin.

IV.2 | Choix des données synoptiques

Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre 3, il existe plusieurs sources possibles de données climatiques permettant d'appliquer la méthode des analogues. Les reconstitutions climatiques présentées dans le chapitre 4 ont été construites à partir de la réanalyse 20CR (Compo *et al.*, 2011). Des interrogations sur la représentabilité en basse fréquence de cette réanalyse (voir section III) nous ont amené à explorer la possibilité d'utiliser une source de données climatiques différente, à savoir l'archive EMULATE de pressions quotidiennes au niveau de la mer spatialisées sur la zone Europe et Nord-Atlantique pour la période 1850-2003, présentée dans le chapitre 3.

Nous avons reconstitué à partir de cette archive et à l'aide de la méthode des analogues (ANA) la série de précipitations du bassins de l'Ubaye à Barcelonnette. Les graphiques présentant les résultats obtenus sont reportés en annexe D. Les performances aux pas de temps journalier, mensuel et annuel de cette reconstitution sont globalement inférieures à celles obtenues à partir de la réanalyse NOAA, ce qui s'explique par le fait que, dans

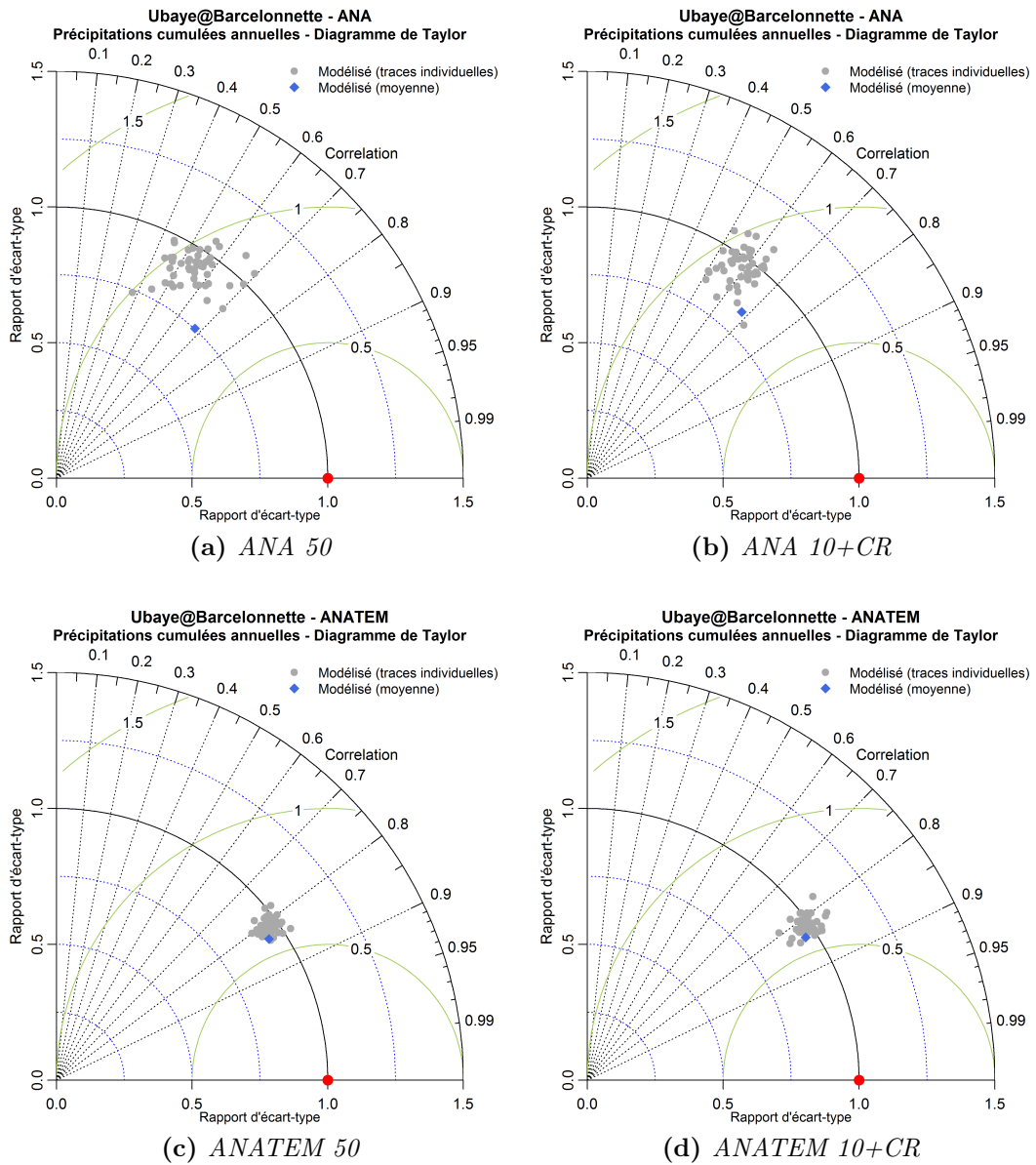


Figure 5.26 – Diagrammes de Taylor au pas de temps annuel obtenus pour les reconstitutions des précipitations du bassin de l’Ubaye à Barcelonnette à partir de deux méthodes d’échantillonnage des journées analogues.

le cas de l'archive EMULATE, seules les pressions au niveau de la mer sont disponibles et utilisées pour la sélection des journées analogues. La caractérisation des situations synoptiques analogues est donc nettement moins précise, ce qui se ressent sur les résultats de la reconstitution.

Du fait de l'absence de données observées avant 1948, la reconstitution de la série de l'Ubaye à Barcelonnette ne permet pas de juger de la capacité de l'archive climatique utilisée à reproduire, sur le long terme, la variabilité basse fréquence des précipitations. Pour pouvoir effectuer une comparaison sur ce point entre les deux réanalyses, nous avons construit une reconstitution de la série de précipitations à Gap. La figure 5.27 présente les séries d'anomalies par rapport à leur moyenne interannuelle des précipitations observées à Gap, et des moyennes glissantes sur 9 ans de ces précipitations observées et des reconstitutions ANA basées sur la réanalyse 20CR d'une part et sur l'archive de pressions EMULATE d'autre part.

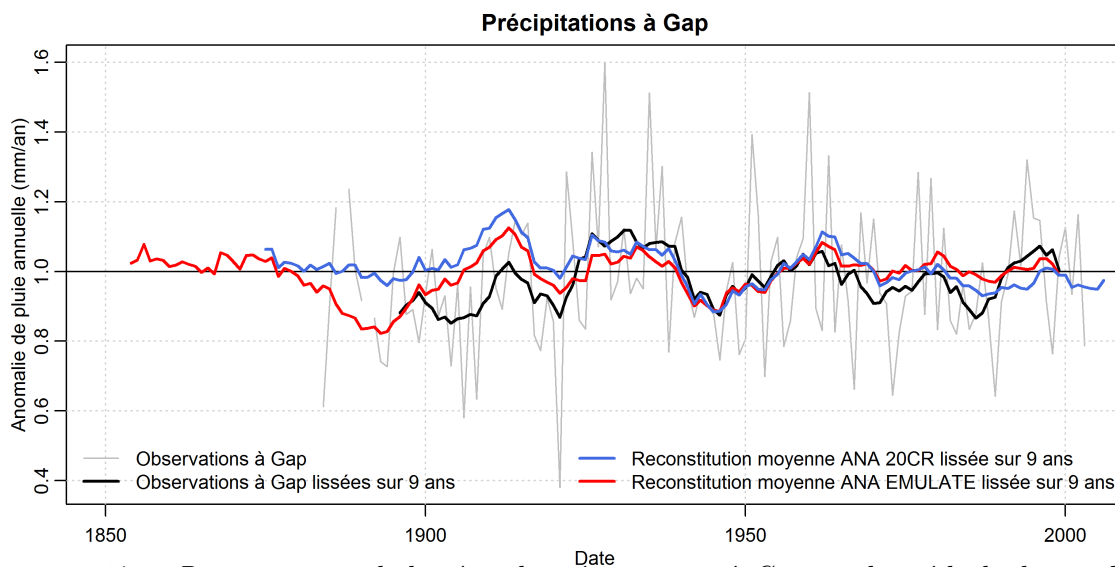


Figure 5.27 – Reconstitution de la série de précipitations à Gap par la méthode des analogues et deux archives climatiques différentes.

Cette figure montre une bonne corrélation entre les deux reconstitutions et les observations avec une reproduction correcte des oscillations à l'échelle de la dizaine d'années. Il existe en revanche des écarts entre les deux reconstitutions dans l'amplitude de ces oscillations, en particulier sur la période antérieure à 1920. Entre 1900 et 1920 environ, on constate également que la série d'observations lissées sur 9 ans est nettement inférieure aux deux reconstitutions, qui sont entre elles légèrement décalées mais ont une forme similaire. Il est difficile de conclure à ce stade de nos travaux sur l'origine de cet écart : l'anomalie négative observée sur la série de Gap pourrait être mal reproduite par les deux reconstitutions, mais on peut également imaginer que la série de Gap, bien qu'ayant été considérée *a priori* comme homogène (voir chapitre 3, paragraphe III.2.3) présente à cet endroit une hétérogénéité d'origine non climatique.

V | Synthèse du cinquième chapitre

Nous avons exploré dans ce chapitre un certain nombre d'alternatives à différents aspects de la méthode ANATEM telle qu'elle a été utilisée dans le chapitre précédent.

Dans un premier temps, nous avons analysé la sensibilité des performances des reconstitutions TEM et ANATEM à la formulation saisonnalisée ou non du modèle *Temoin*,

les deux types de formulations ayant été présentées dans le chapitre 3. La conclusion de cette analyse est que l'utilisation d'une formulation saisonnalisée est intéressante pour la reconstitution de températures de l'air avec le modèle TEM. Pour les reconstitutions ANATEM ou pour la reconstitution de précipitations, l'apport de la version saisonnalisée n'est pas significatif.

Ensuite, une analyse « multi-témoins » a consisté à comparer les reconstitutions des températures de l'air et des précipitations des 22 bassins versants d'étude obtenues par les méthodes TEM et ANATEM en utilisant différentes séries observées comme témoin. Cette analyse, menée avec 21 séries observées de températures de l'air et 36 séries observées de précipitations sur une durée de plus de 40 ans a confirmé l'intérêt, pour obtenir une bonne reconstitution, de disposer d'une série témoin située à proximité de la série à reconstituer. Ce résultat est plus marqué pour la reconstitution des précipitations que pour les températures de l'air, car la variabilité spatiale des précipitations est plus grande que celle des températures de l'air dont les variations se font à une échelle plus régionale. L'utilisation au sein de la méthode ANATEM des données synoptiques en complément de la série témoin permet cependant une légère atténuation de ce phénomène : les performances des reconstitutions d'une série cible avec différents témoins sont plus proches avec la méthode ANATEM qu'avec la méthode TEM. Au delà de l'influence de la distance entre série témoin et série cible, il est apparu que, toutes séries-cibles confondues, certaines séries témoin amènent globalement des performances meilleures que d'autres. C'est notamment le cas de la série d'Embrun pour les températures de l'air ou de celle d'Allos pour les précipitations. Cette comparaison multi-témoins a également révélé de bonnes performances des séries témoin de Gap pour les précipitations et Marseille pour les températures de l'air, que nous utilisons pour les reconstitutions sur la période 1883-2010, en comparaison aux autres séries testées.

Imaginant cette fois un contexte où aucune série climatique observée au pas de temps journalier ne serait disponible pour remplir le rôle de témoin, nous avons étudié la possibilité d'utiliser en remplacement une série produite par la réanalyse climatique 20CR. Pour les températures de l'air, les essais ont montré qu'il est possible d'obtenir de bonnes performances aux pas de temps journalier et mensuel en utilisant comme témoin une série d'épaisseurs de la couche d'atmosphère entre 700 et 1000 hPa produite par la réanalyse 20CR. Cependant, la comparaison de la variabilité interannuelle de cette série à celle de séries de températures de l'air homogénéisées par Météo-France a montré que la fiabilité à l'échelle pluri-annuelle de la série d'épaisseurs 20CR pouvait être remise en question. Pour les précipitations, l'utilisation d'une série de précipitations fournie par la réanalyse 20CR n'a pas semblé apporter véritablement d'information supplémentaire.

En ce qui concerne la méthode utilisée pour la recherche et la prise en compte des journées analogues, nous avons expérimenté un échantillonnage différent des journées analogues, basé sur l'utilisation des 10 « meilleurs analogues » au lieu des 50 utilisées dans nos applications précédentes. Si l'apport d'une telle modification sur des reconstitutions ANA peut être significatif, il ne l'est pas sur les reconstitutions ANATEM, ce qui nous conforte dans l'idée de conserver la version utilisée jusqu'alors.

Enfin, nous avons comparé les résultats des reconstitutions ANA obtenues avec deux sources de données synoptiques différentes : d'une part la réanalyse 20CR et d'autre part l'archive climatique EMULATE. Les performances obtenues avec l'archive EMULATE se sont révélées moins bonnes ce qui s'explique par l'absence de certaines variables climatiques dans cette archive, rendant moins précise la sélection des journées analogues. Une comparaison sur le plan de la variabilité basse fréquence et sur le long terme (reconstitution de la série de Gap disponible à partir de 1883) a révélé une bonne corrélation des deux types de reconstitutions à partir de 1920 environ mais également des écarts importants

sur la période antérieure à 1900.

Le chapitre suivant portera sur reconstitutions hydrologiques construites sur le bassin de la Durance à partir des reconstitutions climatiques présentées dans le chapitre 4.

Reconstitution de séries hydrologiques sur le bassin de la Durance

Ce chapitre a pour objet la présentation des reconstitutions hydrologiques construites sur le bassin de la Durance. Celles-ci ont été obtenues à partir des reconstitutions climatiques présentées dans le chapitre 4 via une étape de modélisation hydrologique. Une rapide description des caractéristiques de la modélisation hydrologique utilisée est suivie de la présentation des résultats obtenus par comparaison aux séries de débits observés, d'abord sur la période 1948-2010 pour l'ensemble des bassins, puis sur l'ensemble du XX^{ème} siècle pour 8 bassins sur lesquels nous disposons de longues séries hydrométriques. Enfin, une validation croisée avec une reconstitution dendrochronologique est proposée.

Sommaire

I	Méthodologie	200
I.1	Modélisation hydrologique	200
I.2	Mise en place de la modélisation probabiliste	203
I.3	Qualité des modèles hydrologiques utilisés	203
I.4	Évaluation en deux temps des reconstitutions hydrologiques . . .	204
II	Reconstitution de la série hydrologique de l'Ubaye à Barcelonnette	205
II.1	Performances du modèle hydrologique	206
II.2	Reconstitution à partir des séries climatiques ANATEM	210
II.3	Reconstitution à partir des données issues de la réanalyse uniquement	222
III	Résultats obtenus sur l'échantillon de 20 bassins versants (1948-2010)	227
III.1	Chroniques annuelles	227
III.2	Scores numériques relativement à la simulation de référence et aux observations	233
IV	Évaluation sur le long terme pour 8 bassins versants	238
IV.1	Chroniques annuelles des reconstitutions hydro-climatiques sur 8 bassins versants	238
IV.2	Performances en comparaison aux débits observés	243
V	Validation croisée avec la dendrochronologie	246
VI	Synthèse du sixième chapitre	247

I | Méthodologie

L'objectif de la démarche décrite dans ce chapitre est la reconstitution de longues séries hydrologiques au niveau des 22 stations de notre échantillon d'étude. Pour cette reconstitution, nous avons utilisé le modèle hydrologique MORDOR avec pour données d'entrée les séries climatiques reconstituées par la méthode ANATEM décrite dans le chapitre 3, et illustrée dans le chapitre 4.

I.1 | Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique a été utilisée dans le cadre de cette thèse pour la transformation des reconstitutions climatiques (précipitations et températures de l'air) construites à l'aide des méthodes décrites dans le chapitre 3 en reconstitutions hydrologiques (débits). La modélisation hydrologique ne constituant pas le thème central de ce travail, nous ne donnerons dans cette section qu'une description rapide des outils utilisés. Il va de soi cependant qu'un travail plus approfondi d'optimisation de cette étape de modélisation hydrologique irait dans le sens d'une amélioration de la qualité des reconstitutions.

I.1.1 | Modélisation hydrologique au sein du projet R²D² 2050

En ce qui concerne la modélisation hydrologique, nous nous sommes appuyés pour nos applications de reconstitutions sur des travaux menés dans le cadre du projet R²D² 2050 (voir chapitre 1, section VII). Différents modèles hydrologiques sont utilisés dans ce projet pour la production de scénarios hydrologiques à l'horizon 2050. Afin de qualifier le niveau de fiabilité de ces différents modèles, un processus d'intercomparaison des modèles hydrologiques en « temps présent » a été mis en place au sein du projet.

Ce processus d'intercomparaison des modèles hydrologiques est basé sur des tests de type *split-sample test* (Klemes, 1986), c'est-à-dire de calage-contrôle : le modèle hydrologique est calibré sur une période différente de celle sur laquelle il est évalué. Dans le cadre du projet R²D² 2050, la période complète de simulation choisie est 1980-2009. Cette période a été divisée en deux sous-périodes pour les *split-sample tests* : du 01/08/1980 au 31/07/1994 et du 01/08/1994 au 31/07/2009. Le modèle est calé distinctement sur chacune des deux sous-périodes puis évalué sur l'autre sous-période.

Un second test, appelé *differential split-sample test* a également été mis en place. Il s'agit cette fois encore d'une procédure de type calage-contrôle, mais dans ce cas les périodes de calage et de contrôle sont choisies de manière à présenter des caractéristiques très contrastées. On peut par exemple choisir de caler le modèle sur une période particulièrement humide puis de l'évaluer sur une période sèche. Dans le cadre du projet R²D² 2050, les critères utilisés pour la différenciation des sous-périodes sont les moyennes mobiles sur cinq ans des précipitations, de la température de l'air, et du stock de neige. Les sous-périodes finalement retenues sont : du 01/08/1983 au 31/07/1988, du 01/08/1988 au 31/07/1993, du 01/08/1993 au 31/07/1998, du 01/08/1999 au 31/07/2004 et du 01/07/2004 au 31/07/2009.

I.1.2 | Modèle hydrologique utilisé : le modèle MORDOR

Le modèle hydrologique MORDOR (MOdèle à Réservoirs de Détermination Objective du Ruissellement ; Garçon, 1996; Paquet et Garçon, 2000; Paquet, 2000; Andreassian *et al.*, 2006) est utilisé en opérationnel à EDF-DTG depuis plus de 15 ans pour la prévision des débits à des échéances pouvant aller de quelques heures à quelques mois, mais également

Le modèle MORDOR

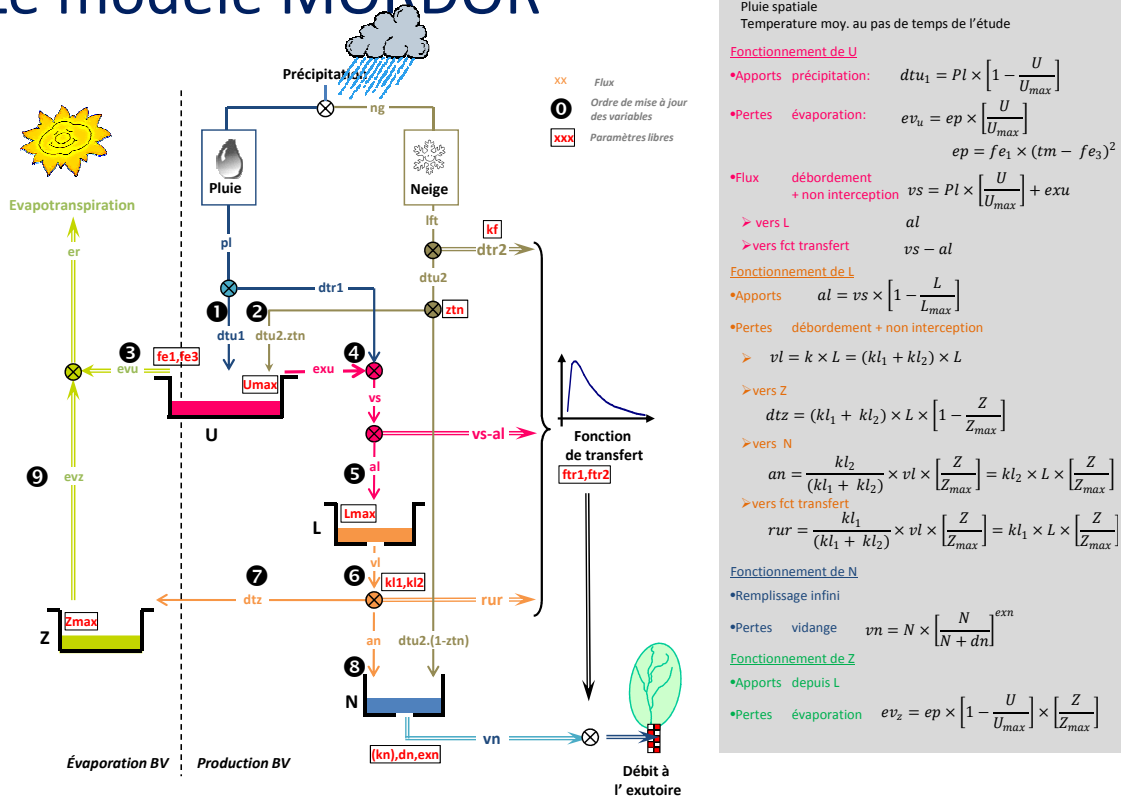


Figure 6.1 – Schéma conceptuel du modèle hydrologique MORDOR (schéma H. Combes - EDF).

pour des études hydrologiques de bassins versants et des études de crues extrêmes au sein de la méthode SCHADEX (Simulation Climato-Hydrologique pour l'Appréciation des Débits EXtrêmes; Paquet *et al.*, 2006; Garavaglia, 2011; Paquet *et al.*, 2013).

MORDOR est un modèle hydrologique destiné à estimer le débit d'une rivière en fonction des conditions météorologiques antérieures sur son bassin versant. Il s'agit d'un modèle conceptuel global à réservoirs qui intègre dans son algorithme un module d'accumulation et de fonte de la neige. À partir de données de pluies et de températures journalières, il fait évoluer schématiquement l'état d'un certain nombre de stocks (stock de neige, réservoirs à dynamiques rapides à lentes...) qui interagissent et génèrent un écoulement à l'exutoire du bassin. Le schéma conceptuel du modèle MORDOR est reporté en figure 6.1.

Les transferts d'eau entre l'atmosphère, les différents réservoirs et les écoulements superficiels sont réglés par des formulations mathématiques simples. Ainsi le modèle cherche à représenter la dynamique des processus lents, moyens et rapides que l'on retrouve sur un bassin versant (dynamique de nappe, ruissellement, écoulements superficiels, accumulation et fonte, évapotranspiration, infiltration). Les transferts d'eau entre les différents réservoirs sont régis par 23 paramètres, dépendants du bassin versant étudié. Enfin, on peut noter que la structure du modèle MORDOR (c'est-à-dire la façon dont celui-ci schématise les différents processus hydrologiques) n'est pas dépendante du pas de temps caractéristique du bassin versant étudié.

Notre choix s'est porté sur ce modèle hydrologique car il est utilisé intensivement depuis plusieurs années à EDF-DTG pour diverses applications opérationnelles dans les zones de montagne et en particulier sur le bassin de la Durance. Par ailleurs, plusieurs études comparatives menées sur un large échantillon de bassins versants (Mathevet, 2005; Valery, 2010) ont mis en évidence les performances de ce modèle qui est apparu comme

l'un des meilleurs parmi un ensemble de modèles actuellement disponibles, aussi bien pour son algorithme pluie-débit que pour sa représentation des processus d'accumulation et de fonte de la neige. Plus localement, le modèle MORDOR a été historiquement appliqué à EDF-DTG au bassin de la Durance (Garçon, 1996). Ce modèle a également été utilisé dans le cadre du projet RIWER 2030 (Hingray *et al.*, 2013) et fait partie des modèles appliqués au sein du projet R²D² 2050.

I.1.3 | Calage du modèle

Comme tout modèle hydrologique, le modèle MORDOR est constitué de fonctions mathématiques permettant de représenter les relations entre précipitations et débits. Ces différentes fonctions mathématiques sont régies par des paramètres qu'il faut déterminer. Les paramètres d'un modèle hydrologique peuvent être de différente nature et correspondre ou non à des grandeurs physiques.

Deux stratégies principales sont généralement utilisées pour la détermination des paramètres d'un modèle hydrologique : la spécification des paramètres (généralement à sens physique) sur la base de données descriptives du bassin versant et/ou de données dérivées des mesures ou bien l'estimation des paramètres par une procédure de calage. Ces deux types de stratégie peuvent être combinés au sein du même modèle.

Dans le cas des modèles hydrologiques conceptuels comme le modèle MORDOR, qui ont généralement très peu de paramètres à sens physique, les paramètres sont calés selon un processus spécifique. Plus concrètement, un ou plusieurs critères numériques de performance de la simulation sont fixés *a priori* et la phase de calage consiste à identifier un jeu de paramètres permettant d'optimiser ce ou ces critères. Ce processus de calage est mené sur une période sur laquelle à la fois les données d'entrée du modèle (forçages climatiques dans le cas de MORDOR) et les débits observés sont disponibles. Le calage peut-être fait manuellement, mais il est plus courant d'utiliser un algorithme automatique permettant cette calibration. Dans l'idéal, comme c'est le cas pour les applications opérationnelles, une procédure de calage automatique est combinée avec une expertise humaine. La pratique à EDF-DTG est *a minima* une validation visuelle des hydrogrammes suivant différents critères et/ou un recalage manuel si besoin.

Les modèles utilisés dans le cadre de notre étude ont été calés selon une procédure simplifiée basée principalement sur un calage automatique. Les modèles que nous utiliserons dans ce chapitre ont été calés dans le cadre d'un processus de calage automatique. Il ne s'agit donc probablement pas des « meilleurs » modèles pouvant être obtenus sur chacun des bassins versants étudiés, mais de modèles optimisant, d'après la procédure automatique, le critère numérique que nous avons choisi. Il est fort probable que les performances des reconstitutions pourraient être améliorées en affinant cette étape de calibration du modèle hydrologique.

Il existe de multiples possibilités de choix des critères numériques à utiliser pour le calage des modèles hydrologiques. Dans le cadre du projet R²D² 2050, le modèle a été calé automatiquement, pour chaque bassin versant et chaque sous-période, selon 5 fonctions objectif différentes. L'intérêt de ces différentes fonctions objectif est d'extraire différentes « signatures hydrologiques » représentatives du bassin versant d'intérêt (Mathevet *et al.*, 2012). Les fonctions objectif sont les suivantes :

- **Q** : KGE sur les débits journaliers, $FO = KGE(Q)$
- **INVQ** : KGE sur les débits journaliers et sur l'inverse des débits journaliers, $FO = KGE(Q) + KGE(1/Q)$;
- **QCL** : KGE sur les débits journaliers et sur les fréquences au non dépassement des débits journaliers, $FO = KGE(Q) + KGE(QCL)$, où QCL est la série des débits

- journaliers classés par ordre croissant ;
- **REG** : KGE sur les débits journaliers et sur le régime interannuel journalier, $FO = KGE(Q) + KGE(REG_Q)$, où REG_Q est la série des débits moyens journaliers interannuels
- **VCN** : KGE sur les débits journaliers et sur les VCN30 (débits moyens sur 30 jours consécutifs minima de chaque année, notés ci-après VCN_Q), $FO = KGE(Q) + KGE(VCN_Q)$

L'expression du KGE est donnée à l'équation 4.3. Un sixième critère a été ajouté à ces cinq fonctions objectif. Ce critère, que nous noterons **COMP**, est un critère composite actuellement en cours de test à EDF-DTG et ayant pour objectif d'optimiser la calibration sur plusieurs signatures hydrologiques. Il s'écrit ainsi : $COMP = KGE(Q) + KGE(REG) + KGE(SEC_M)$, où SEC_M est un échantillon mensuel de débits classés conditionné par les événements pluvieux (Garavaglia, 2011).

Les reconstitutions présentées dans ce chapitre s'appuient sur le modèle hydrologique calé selon le premier de ces critères (« **Q** »). Nous présenterons dans le chapitre 7 une comparaison des reconstitutions obtenues avec différents critères de calage.

Le choix de la période de calage fait également partie des éléments pouvant être adaptés pour améliorer les performances de la modélisation hydrologique. Pour les reconstitutions présentées dans la suite de ce chapitre, nous avons fait le choix de retenir le calage sur l'ensemble de la période de disponibilité à la fois les données climatiques SPAZM sur le bassin versant et des données observées de débits à la station. Une analyse de la sensibilité des reconstitutions au choix de la période de calage sera présentée dans le chapitre 7.

La procédure automatique de calibration des modèles hydrologiques a été appliquée aux 22 bassins versants présentés dans le chapitre 1. Pour quatre bassins parmi ces 22, la procédure automatique n'a pas permis d'obtenir un modèle convenable : deux très petits bassins (le Verdon à Allos et le Riou de Crachet à Saint-Paul) ont dû être retirés de l'échantillon d'étude, et deux autres (le Lauzon à Villeneuve et le Jabron à Comps-sur-Artuby) ont pu être conservés en utilisant un calage plus expertisé.

I.2 | Mise en place de la modélisation probabiliste

Afin de transférer l'aspect probabiliste des reconstitutions climatiques ANATEM aux reconstitutions hydrologiques, 50 simulations de débits sont réalisées pour chaque bassin versant. Pour cela les 50 reconstitutions des températures de l'air et les 50 reconstitutions des précipitations du bassin à modéliser sont appariées, c'est-à-dire que la première reconstitution de températures de l'air est utilisée avec la première reconstitution de précipitations, la deuxième avec la deuxième et ainsi de suite de manière à obtenir 50 jeux températures de l'air - précipitations utilisables en entrée du modèle hydrologique.

I.3 | Qualité des modèles hydrologiques utilisés

Le tableau 6.1 présente quelques critères de performance des modèles hydrologiques utilisés pour les reconstitutions de séries de débits sur les 20 bassins versants d'étude. Ces résultats sont obtenus par comparaison entre les débits simulés à partir des données climatiques SPAZM sur la période 1948-2010 et les débits observés de chaque station sur la période où ils sont disponibles. La période de calcul de ces critères de performance est donc variable d'une station à l'autre, en fonction de la disponibilité des débits observés. Les périodes de disponibilité des séries de débits sont indiquées dans le tableau 1.3.

Les caractéristiques des modèles hydrologiques utilisés sont globalement bonnes avec des corrélations au pas de temps journalier généralement comprises entre 0.82 et 0.95, et

Station	Journalier					Mensuel					Annuel					β
	r	r_a	α	KGE	NSE	r	r_a	α	KGE	NSE	r	α	KGE	NSE		
Durance@ValdesPres	0.92	0.73	0.99	0.92	0.84	0.94	0.77	1.02	0.94	0.89	0.94	1.29	0.70	0.75	1.00	
Guisane@Monetier	0.85	0.61	1.01	0.85	0.70	0.88	0.51	1.06	0.87	0.75	0.62	1.13	0.60	0.13	1.00	
Durance@Briançon	0.91	0.69	1.01	0.91	0.81	0.94	0.72	1.07	0.91	0.87	0.90	1.35	0.64	0.62	1.01	
Guil@Montdauphin	0.90	0.67	0.98	0.90	0.80	0.93	0.63	1.03	0.92	0.85	0.91	1.21	0.77	0.74	0.99	
Durance@LaClapiere	0.93	0.73	0.97	0.93	0.87	0.96	0.77	1.01	0.96	0.92	0.94	1.20	0.80	0.81	1.00	
Ubaye@RocheRousse	0.95	0.85	1.01	0.95	0.89	0.97	0.88	1.02	0.96	0.95	0.97	1.20	0.80	0.90	1.00	
Ubaye@Barcelonnette	0.91	0.73	0.99	0.91	0.82	0.95	0.76	1.04	0.93	0.89	0.89	1.09	0.86	0.74	1.00	
Durance@SerrePoncon	0.93	0.77	0.98	0.93	0.86	0.96	0.81	1.03	0.95	0.92	0.96	1.18	0.82	0.86	1.01	
Buech@Chambons	0.92	0.89	1.00	0.92	0.84	0.95	0.89	1.05	0.93	0.90	0.95	0.88	0.87	0.90	1.00	
Meouge@Meouge	0.86	0.81	1.00	0.86	0.72	0.91	0.80	1.04	0.90	0.81	0.88	1.06	0.87	0.75	1.01	
Jabron@Piedguichard	0.87	0.85	1.03	0.86	0.73	0.90	0.81	1.01	0.90	0.80	0.90	0.95	0.88	0.79	1.03	
Bes@LaJavie	0.70	0.56	1.00	0.70	0.39	0.81	0.56	1.18	0.74	0.51	0.69	0.91	0.68	0.42	1.02	
Lauzon@Villeneuve	0.84	0.82	1.05	0.82	0.66	0.88	0.80	0.95	0.86	0.77	0.88	0.93	0.85	0.77	1.05	
Asse@CluedeChabriere	0.84	0.76	0.98	0.83	0.68	0.89	0.74	1.03	0.89	0.78	0.88	1.11	0.83	0.71	1.00	
Verdon@Colmars	0.89	0.77	1.00	0.89	0.79	0.95	0.80	1.06	0.92	0.88	0.90	1.14	0.83	0.74	1.00	
Issole@StAndreesAlpes	0.83	0.72	0.94	0.82	0.68	0.90	0.79	1.07	0.88	0.78	0.89	1.10	0.85	0.75	1.01	
Verdon@Castillon	0.90	0.83	0.98	0.90	0.81	0.94	0.83	1.02	0.93	0.87	0.93	1.10	0.88	0.84	0.99	
Artuby@laBastide	0.82	0.79	0.99	0.81	0.65	0.90	0.80	1.10	0.84	0.76	0.91	1.32	0.65	0.61	1.06	
Jabron@CompssurArtuby	0.83	0.81	1.03	0.80	0.65	0.92	0.85	0.94	0.85	0.83	0.93	0.92	0.81	0.81	1.11	
Verdon@SainteCroix	0.90	0.85	1.00	0.90	0.80	0.93	0.85	1.06	0.90	0.85	0.92	1.09	0.87	0.81	1.01	
Quantile 10%	0.83	0.66	0.98	0.81	0.65	0.88	0.63	1.00	0.85	0.76	0.86	0.92	0.65	0.59	1.00	
Quantile 50%	0.90	0.77	1.00	0.90	0.79	0.93	0.80	1.04	0.91	0.85	0.91	1.11	0.82	0.75	1.01	
Quantile 90%	0.93	0.85	1.03	0.93	0.86	0.96	0.85	1.07	0.96	0.92	0.95	1.29	0.87	0.87	1.05	

Tableau 6.1 – *Résumé des performances des modèles hydrologiques calés sur chaque bassin versant ; r coefficient de corrélation, r_a coefficient de corrélation des séries d'anomalies par rapport au régime moyen, α ratio d'écart-type, β ratio de moyennes, KGE Kling-Gupta Efficiency, NSE Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash et Sutcliffe, 1970).*

au pas de temps mensuel entre 0.88 et 0.97. Le modèle calibré pour le bassin versant du Bes à La Javie est moins performant que les autres en termes de corrélation aux pas de temps journalier et mensuel, et présente également un biais d'écart-type important au pas de temps mensuel.

Au pas de temps annuel, les corrélations des différents modèles restent globalement bonnes excepté pour les bassins de la Guisane au Monêtier et du Bes à La Javie. Des biais d'écart-type parfois importants apparaissent cependant à ce pas de temps, en particulier sur les bassins de la Durance à Val-des-Près et Briançon, et de l'Artuby à La Bastide, où ils sont de l'ordre de +30%. En termes de moyenne, les modèles sont peu biaisés, excepté celui du Jabron à Comps-sur-Artuby dont le biais de moyenne vaut +11%.

Comme nous l'avons signalé précédemment, ces modèles ont été calés par une procédure automatique, et une prise en main individuelle de chaque modèle permettrait de mieux comprendre leurs problèmes et probablement d'améliorer leur qualité.

I.4 | Évaluation en deux temps des reconstitutions hydrologiques

Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus pour la reconstitution de séries hydrologiques sur le bassin de la Durance. Cette reconstitution est obtenue par l'enchaînement de deux processus de modélisation : d'une part une reconstitution climatique au travers de la méthode ANATEM, décrite dans le chapitre 3 et évaluée sur le bassin de la Durance dans le chapitre 4, et d'autre part un modèle hydrologique, présenté ci-dessus.

L'évaluation des reconstitutions hydrologiques sera décomposée en deux étapes. Dans un premier temps, nous chercherons à évaluer la pertinence, du point de vue hydrologique, des reconstitutions climatiques au travers du couplage entre reconstitution climatique et modèle hydrologique. En d'autres termes, il s'agit de qualifier la capacité des reconstitutions climatiques des séries de précipitations et de températures à remplir le rôle de

forçages du modèle hydrologique. Dans cette optique, les séries hydrologiques modélisées à partir des reconstitutions climatiques seront comparées à une série hydrologique simulée de référence obtenue par l'intermédiaire du même modèle hydrologique, mais à partir des données climatiques observées, c'est-à-dire dans le cadre de ce travail des précipitations et températures de l'air spatiales SPAZM. Ce procédé d'évaluation permet de se concentrer sur la possibilité de déduire une série hydrologique des reconstitutions climatiques en s'affranchissant des défauts intrinsèques de la modélisation hydrologique. La simulation de référence construite à partir des données SPAZM sera par la suite appelée « simulation SPAZM ». Pour cette première étape, l'évaluation se fera sur la période 1948-2010, période de disponibilité des données SPAZM.

La seconde étape d'évaluation consiste à qualifier dans sa globalité l'ensemble de la chaîne de reconstitution des débits, en comparant les débits obtenus par modélisation hydrologique à partir des reconstitutions climatiques aux débits observés. C'est cette étape finale qui permettra de juger de la possibilité d'utiliser cette chaîne de reconstitution pour aider à qualifier la variabilité hydrologique du bassin versant. De plus, c'est uniquement à ce niveau de la reconstitution qu'il nous sera possible de mener une évaluation sur le long terme à l'aide de huit séries historiques de débits présentées dans le chapitre 2.

Pour ces deux étapes d'évaluation, les critères et les outils d'évaluation utilisés seront identiques à ceux introduits pour l'évaluation des reconstitutions climatiques dans le chapitre 4.

Les résultats présentés dans le chapitre 4 ayant montré que les reconstitutions construites à l'aide de la méthode ANATEM ont des performances meilleures que celles construites avec les méthodes ANA et TEM, nous nous focaliserons dans ce chapitre sur les résultats obtenus avec la méthode ANATEM. Cependant, afin de rendre compte des performances qui pourraient être obtenues pour la reconstitution de séries hydrologiques dans l'hypothèse où aucun témoin ne serait disponible, nous montrerons également les résultats obtenus avec la méthode ANA. Les graphiques correspondant à la reconstitution de la série hydrologique de l'Ubaye à Barcelonnette à partir du modèle TEM sont reportés en annexe E.

II | Reconstitution de la série hydrologique de l'Ubaye à Barcelonnette

Cette section présente les résultats obtenus en ce qui concerne la reconstitution de la série des débits de l'Ubaye à Barcelonnette à partir des reconstitutions climatiques ANATEM et ANA présentées dans le chapitre 4.

En préalable aux résultats des reconstitutions hydrologiques, nous présenterons tout d'abord les performances du modèle hydrologique en lui-même : comparaison des débits modélisés par le modèle hydrologique à partir des données climatiques SPAZM (simulation de référence) aux débits observés.

Ensuite, les débits obtenus par le processus de reconstitution seront comparés à la simulation de référence pour qualifier la capacité des reconstitutions climatiques ANATEM et ANA à engendrer une chronique de débits tout en « oubliant » les erreurs liées à la modélisation hydrologique en elle-même.

Le fait de disposer d'une longue série de débits observés de l'Ubaye à Barcelonnette nous permettra pour finir de qualifier de manière plus globale l'ensemble de la chaîne de reconstitution en comparant les débits simulés à partir des séries climatiques reconstituées par ANATEM ou ANA aux débits observés à la station.

Bien que les désignations ANA, TEM et ANATEM correspondent aux méthodes de reconstitution de données climatiques présentées dans le chapitre 3, nous les utiliserons également, par extension, pour désigner les séries hydrologiques reconstituées, via le modèle hydrologique, à partir des données climatiques issues de ces méthodes.

II.1 | Performances du modèle hydrologique

Les figures 6.2 à 6.4 présentent les performances aux pas de temps journalier, mensuel et annuel de la simulation des débits de l'Ubaye à Barcelonnette par le modèle hydrologique à partir des données climatiques SPAZM. Compte-tenu de la disponibilité de ces données, la période de simulation est ici 1949-2010, le modèle hydrologique nécessitant une période de mise à jour de l'état des réservoirs (« warm-up period ») d'un an qui correspond à l'année 1948.

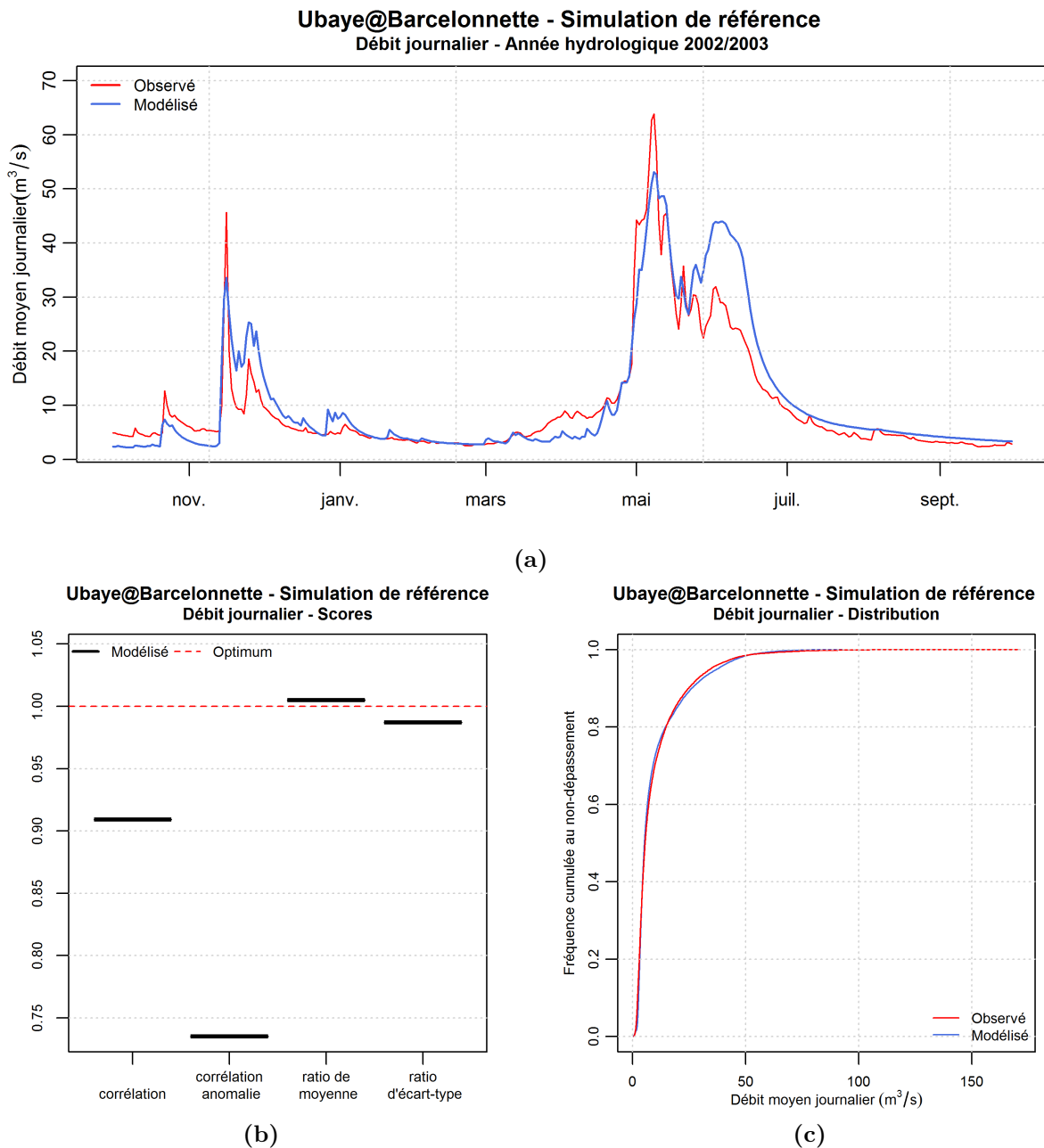


Figure 6.2 – Performances du modèle hydrologique associé aux données climatiques SPAZM (simulation de référence) pour la représentation des débits de l'Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps journalier.

L'observation de la chronique au pas de temps journalier de l'année hydrologique 2003 montre une qualité correcte de simulation. La variabilité des débits à l'échelle journalière est bien reproduite mais quelques décalages peuvent être observés, notamment au mois d'octobre où les débits sont sous-estimés pendant tout le mois, ou encore au mois de juin où le modèle fait apparaître une pointe assez importante de débit qui n'est pas présente sur les observés.

Les scores calculés sur la période 1948-2010 sont relativement bons : la corrélation entre débits observés et simulés est supérieure à 0.90. La corrélation entre séries d'anomalies par rapport au régime (0.74) est assez nettement inférieure à celle des séries « brutes » mettant en évidence l'importance du caractère saisonnier des débits. En ce qui concerne les biais, ceux-ci sont très faibles à la fois sur la moyenne (moins de 1%) et l'écart-type (environ -1%).

La distribution des débits classés au pas de temps journalier est presque parfaitement représentée par la simulation.

Au pas de temps mensuel (figure 6.3), le régime interannuel est globalement très bien reproduit. Seuls les débits moyens des mois de mai et juin sont légèrement sur-estimés par le modèle, alors que ceux des mois d'août et septembre sont légèrement sous-estimés.

Les corrélations au pas de temps mensuel sont légèrement supérieures à celles au pas de temps journalier : le coefficient de corrélation entre débits observés et simulés est de 0.95, et entre les séries d'anomalies sa valeur est légèrement supérieure à 0.75. Le biais d'écart-type est cette fois positif, mais reste relativement faible (+4% environ).

La distribution des débits classés est à nouveau très bien reproduite au pas de temps mensuel.

La chronique des débits annuels (figure 6.4) montre qu'à ce pas de temps, la variabilité des débits est globalement très bien reproduite par la simulation de référence. Quelques erreurs ponctuelles apparaissent néanmoins, par exemple en 1951 où l'observation est très nettement supérieure à la simulation, ou en 2001 où le phénomène inverse se produit.

En ce qui concerne les scores, ceux-ci sont légèrement moins bons au pas de temps annuel qu'ils ne l'étaient aux pas de temps journalier et mensuel, mais restent néanmoins tout à fait acceptables : la corrélation est d'environ 0.89 et l'écart-type est surestimé d'environ +9% par la simulation.

Cette fois encore, la distribution des débits classés au pas de temps annuel est très bien reproduite par la simulation hydrologique.

Les résultats en termes de corrélation et de ratio d'écart-type pour les trois pas de temps étudiés sont résumés sur le diagramme de Taylor présenté figure 6.5. On retrouve les observations faites précédemment : c'est au pas de temps mensuel que la corrélation entre les débits observés et simulés est la meilleure, et elle est la moins bonne au pas de temps annuel. Par contre, le biais d'écart-type est nul au pas de temps journalier et légèrement positif aux pas de temps mensuel et annuel.

Finalement, cette rapide présentation de la simulation de référence montre que celle-ci présente de bonnes performances pour des pas de temps allant du journalier à l'annuel. La reproduction des distributions de débits classés est très bonne à ces trois pas de temps, le biais de moyenne de la simulation est proche de zéro, et le biais d'écart-type est inférieur à 9%. Bien entendu, comme on a pu l'observer sur les chroniques aux pas de temps journalier et mensuel, cette simulation n'est toutefois pas exempte de quelques défauts qui pourraient impacter les reconstitutions hydrologiques.

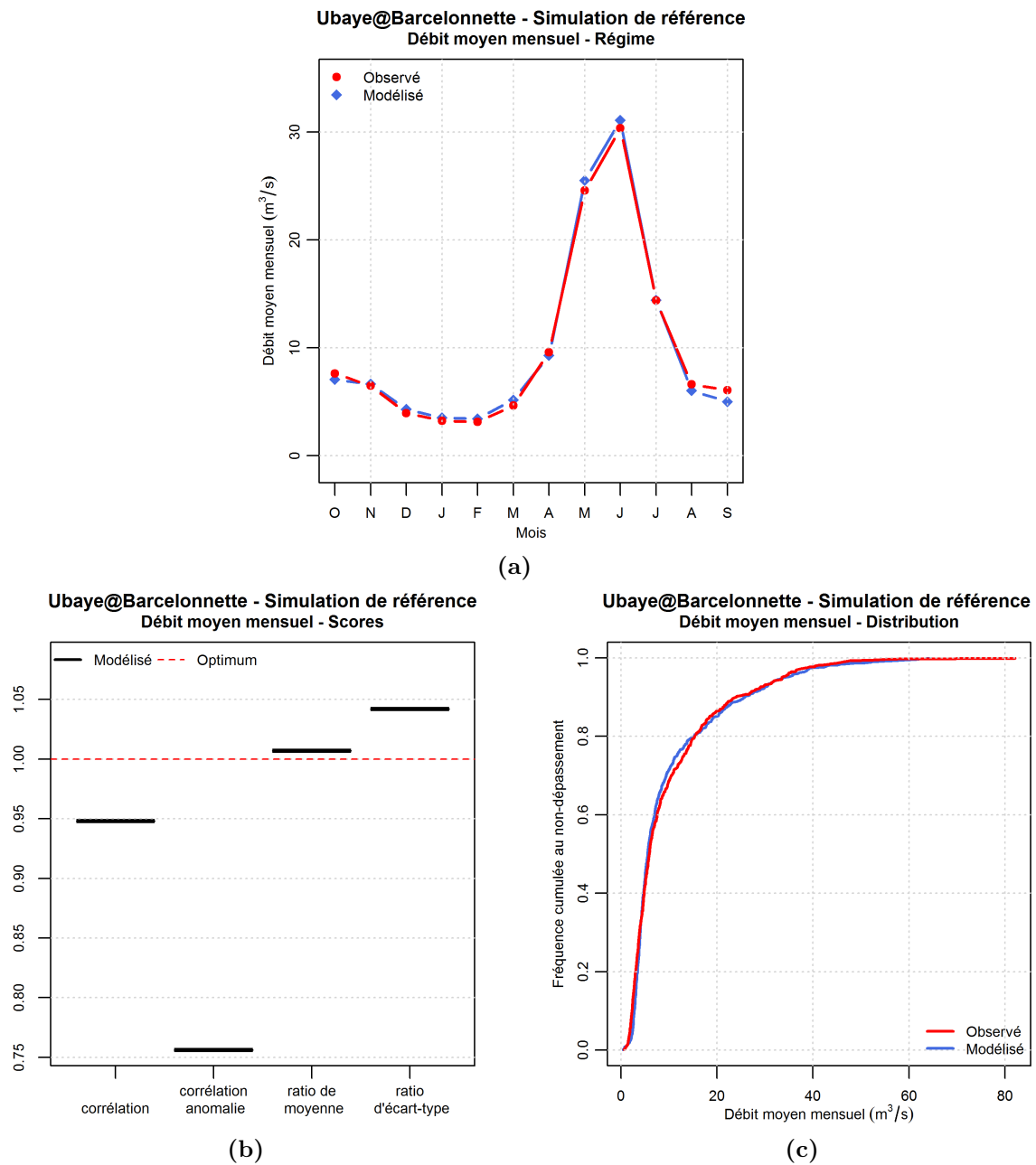


Figure 6.3 – Performances du modèle hydrologique associé aux données climatiques SPAZM (simulation de référence) pour la représentation des débits de l’Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps mensuel.

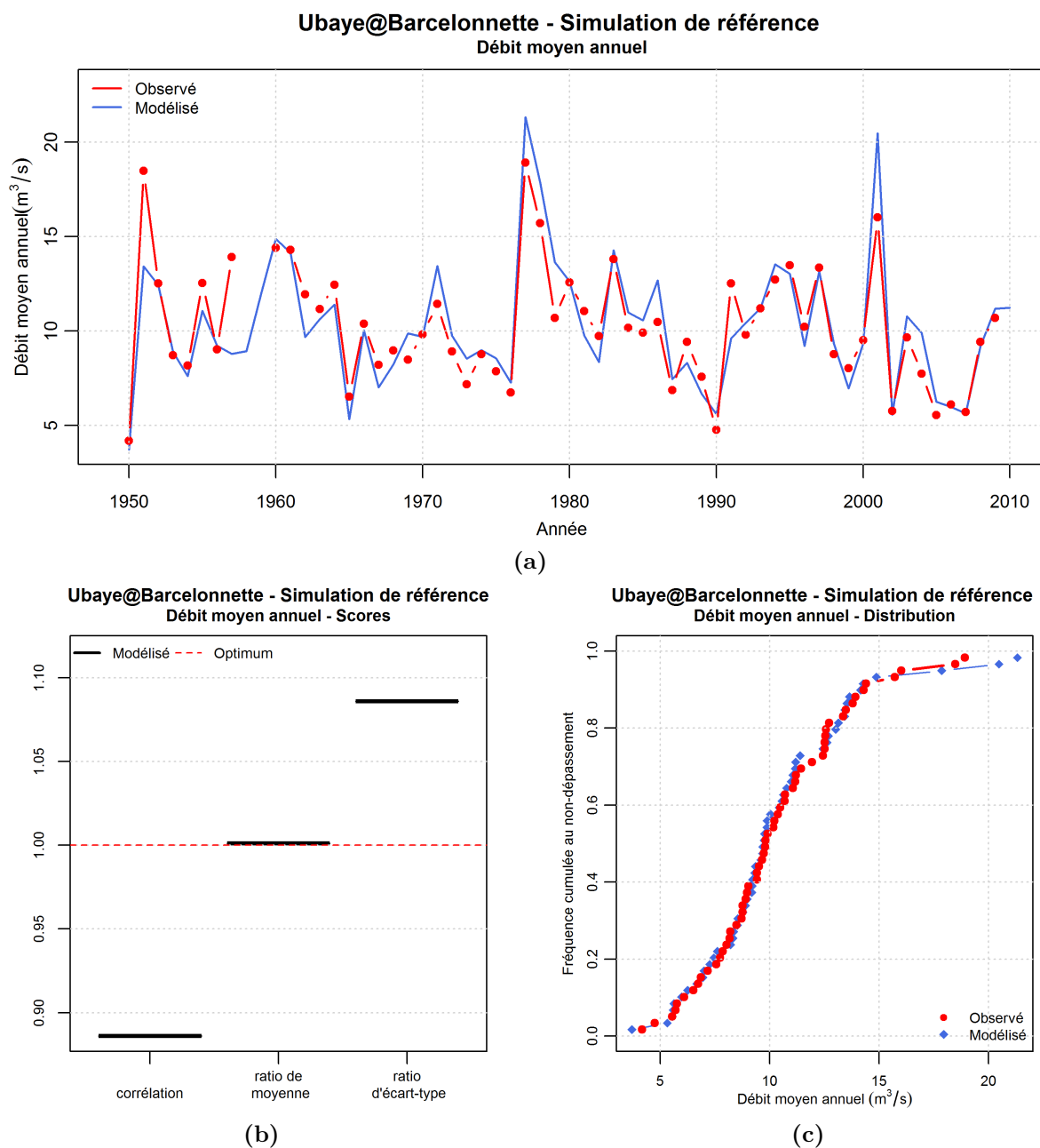


Figure 6.4 – Performances du modèle hydrologique associé aux données climatiques SPAZM (simulation de référence) pour la représentation des débits de l’Ubaye à Barcelonnette - Pas de temps annuel.

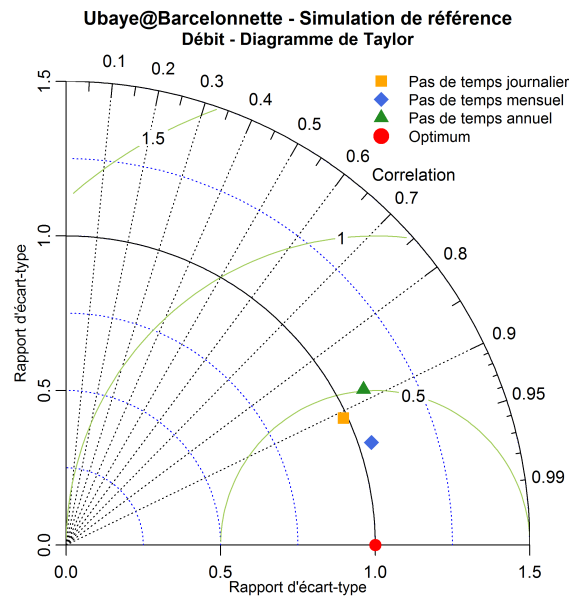


Figure 6.5 – Diagramme de Taylor (3 pas de temps) du modèle hydrologique associé aux données climatiques SPAZM (simulation de référence) pour la représentation des débits de l’Ubaye à Barcelonnette.

II.2 | Reconstitution à partir des séries climatiques ANATEM

II.2.1 | Reconstitution hydrologique ANATEM comparée à une simulation hydrologique de référence

Les figures 6.6 à 6.8 regroupent, pour les pas de temps journalier, mensuel et annuel, les graphiques d’analyse de la reconstitution via ANATEM des débits de l’Ubaye à Barcelonnette en prenant comme référence le débit simulé par le modèle hydrologique à partir des données climatiques observées SPAZM (simulation de référence).

La chronique des débits journaliers de l’année hydrologique 2003 (figure 6.6a) permet une première évaluation subjective des reconstitutions hydrologiques. On remarque que la simulation réalisée à partir des reconstitutions climatiques ANATEM donne une chronique similaire à celle des débits simulés à partir des données SPAZM, excepté au mois de mai où la reconstitution moyenne ANATEM est nettement inférieure au débit de la simulation SPAZM. Cependant, sur cette période, on note que certaines des reconstitutions individuelles ANATEM donnent un débit proche de celui de la simulation SPAZM.

Le détail des scores obtenus par la reconstitution de débit ANATEM relativement aux débits issus de la simulation SPAZM est donné sur la figure 6.6b. Le coefficient de corrélation au pas de temps journalier entre les deux types de simulations est bon (0.94 pour la reconstitution moyenne). Si l’on s’intéresse aux séries d’anomalies par rapport au régime moyen, on remarque une différence de corrélation non-négligeable avec celle des séries brutes (pour la reconstitution moyenne : 0.77 contre 0.94), ce qui montre que la saisonnalité est importante dans la reconstitution des débits. Un biais de moyenne d’environ -6%, identique quelque soit le pas de temps d’agrégation, est observé sur les débits modélisés via ANATEM comparativement à la simulation SPAZM. Ce biais est du même ordre que celui constaté sur la reconstitution ANATEM des précipitations spatiales du bassin. L’écart-type de la série journalière de débits est également sous-estimé, d’environ 11% pour la reconstitution moyenne, et d’entre 8 et 11% environ pour les reconstitutions individuelles. On retrouve ces informations sur le diagramme de Taylor (figure 6.6c) où l’on peut également remarquer que les différentes reconstitutions individuelles présentent

des performances relativement proches.

La distribution des débits journaliers classés (figure 6.6d) semble très bien reproduite par le débit modélisé via ANATEM. En revanche, le diagramme de fiabilité (figure 6.6e) montre une légère sous-dispersion des reconstitutions. Pour près de 30% des journées, le débit obtenu par la simulation SPAZM se trouve en dehors des bornes des valeurs des reconstitutions ANATEM, avec une légère prépondérance pour les cas où le débit de la simulation SPAZM est supérieur à l'ensemble des modélisations ANATEM (probabilité au non-dépassement de 1). Cette légère disymétrie de la courbe des probabilités au non-dépassement de la simulation SPAZM sachant la reconstitution ANATEM est à relier au biais de moyenne d'environ -5% déjà observé.

Au pas de temps mensuel, on voit sur la figure 6.7a que le régime interannuel obtenu avec la reconstitution ANATEM est globalement très proche du modélisé SPAZM. Seuls les débits moyens des mois de mai et juin sont sous-estimés d'environ 5 à 8%.

Les scores obtenus au pas de temps mensuel sont du même ordre que ceux observés au pas de temps journalier : le coefficient de corrélation entre la reconstitution ANATEM et la simulation SPAZM est de 0.95 environ, et il est compris entre 0.6 et 0.7 pour les séries d'anomalies par rapport au régime interannuel. Le ratio d'écart-type est presque identique à celui observé au pas de temps journalier, c'est-à-dire de 0.89 environ. On constate sur le diagramme de Taylor que les reconstitutions individuelles ANATEM sont à nouveau assez regroupées et proches de la reconstitution moyenne.

En ce qui concerne la distribution des débits classés et celle des probabilités de la simulation SPAZM sachant les reconstitutions ANATEM, on retrouve des résultats très similaires à ceux observés au pas de temps journalier, à savoir une bonne reconstitution de la distribution des débits classés, ainsi qu'une légère sous-dispersion et disymétrie des reconstitutions ANATEM.

Au pas de temps annuel, l'observation de la chronique des débits annuels (figure 6.8a) montre une très forte ressemblance entre les débits simulés à partir des reconstitutions ANATEM et la simulation SPAZM. On constate néanmoins que certains pics de débits annuels de la simulation SPAZM comme en 1977, 1983 ou 2001 ne sont pas reproduits par les reconstitutions via ANATEM. Cela peut être lié au déficit de précipitations de la reconstitution ANATEM observable pour ces mêmes années sur la figure 4.16a du chapitre 4, mais on peut également noter que la figure 6.4a montrait que pour les années 1977 et 2001 la simulation de référence produisait des débits supérieurs aux observations.

En ce qui concerne les scores, on trouve au pas de temps annuel une corrélation entre les deux types de simulations de 0.84 pour le modèle moyen, et légèrement inférieure pour les modèles individuels. Ces valeurs sont inférieures à celles observées aux pas de temps journalier et mensuel, mais supérieures aux corrélations des séries d'anomalies par rapport au régime interannuel à ces mêmes pas de temps. Le biais d'écart-type, en revanche, est significativement plus important qu'aux pas de temps journalier et mensuel puisqu'il atteint ici -18% pour la reconstitution moyenne (de -10% à -25% pour les modèles individuels). Sur le diagramme de Taylor au pas de temps annuel, les différentes reconstitutions individuelles sont légèrement plus dispersées qu'aux pas de temps inférieurs, mais la reconstitution moyenne continue de présenter des performances similaires à celles des reconstitutions individuelles.

Les distribution des débits annuels classés des deux types de simulations sont relativement semblables, le faible biais négatif de moyenne observé précédemment se retrouve néanmoins dans le léger décalage entre la distribution des observations et celles des reconstitutions. Sur le diagramme de fiabilité, la tendance de la reconstitution ANATEM

à être sous-dispersive et légèrement asymétrique observée aux pas de temps journalier et mensuel est ici légèrement amplifiée. Pour environ 35% des années, la simulation SPAZM est supérieure à l'ensemble des reconstitutions ANATEM.

Finalement, les performances des reconstitutions de la série de débits de l'Ubaye à Barcelonnette à partir des reconstitutions climatiques ANATEM comparativement à la simulation de ces mêmes débits utilisant les données SPAZM sont assez bonnes, et similaires entre les différents pas de temps analysés. La corrélation entre les deux types de reconstitutions est globalement bonne, tout comme la reproduction de la distribution des débits classés. Un léger biais de moyenne de -5% apparaît, à relier au biais du même ordre déjà observé sur la reconstitution ANATEM des précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette. L'écart-type des reconstitutions ANATEM est inférieur d'environ 10% (18% au pas de temps annuel) à celui de la simulation utilisant les données SPAZM. La fiabilité des reconstitutions ANATEM par rapport à la simulation SPAZM n'est pas parfaite : on observe à tous les pas de temps une sous-dispersion de ces reconstitutions, ainsi qu'une légère disymétrie en faveur des valeurs élevées de probabilité au non dépassement. Cette disymétrie peut être reliée au léger biais de moyenne ainsi qu'à la tendance observée sur les chroniques à sous estimer une partie des valeurs élevées de débits.

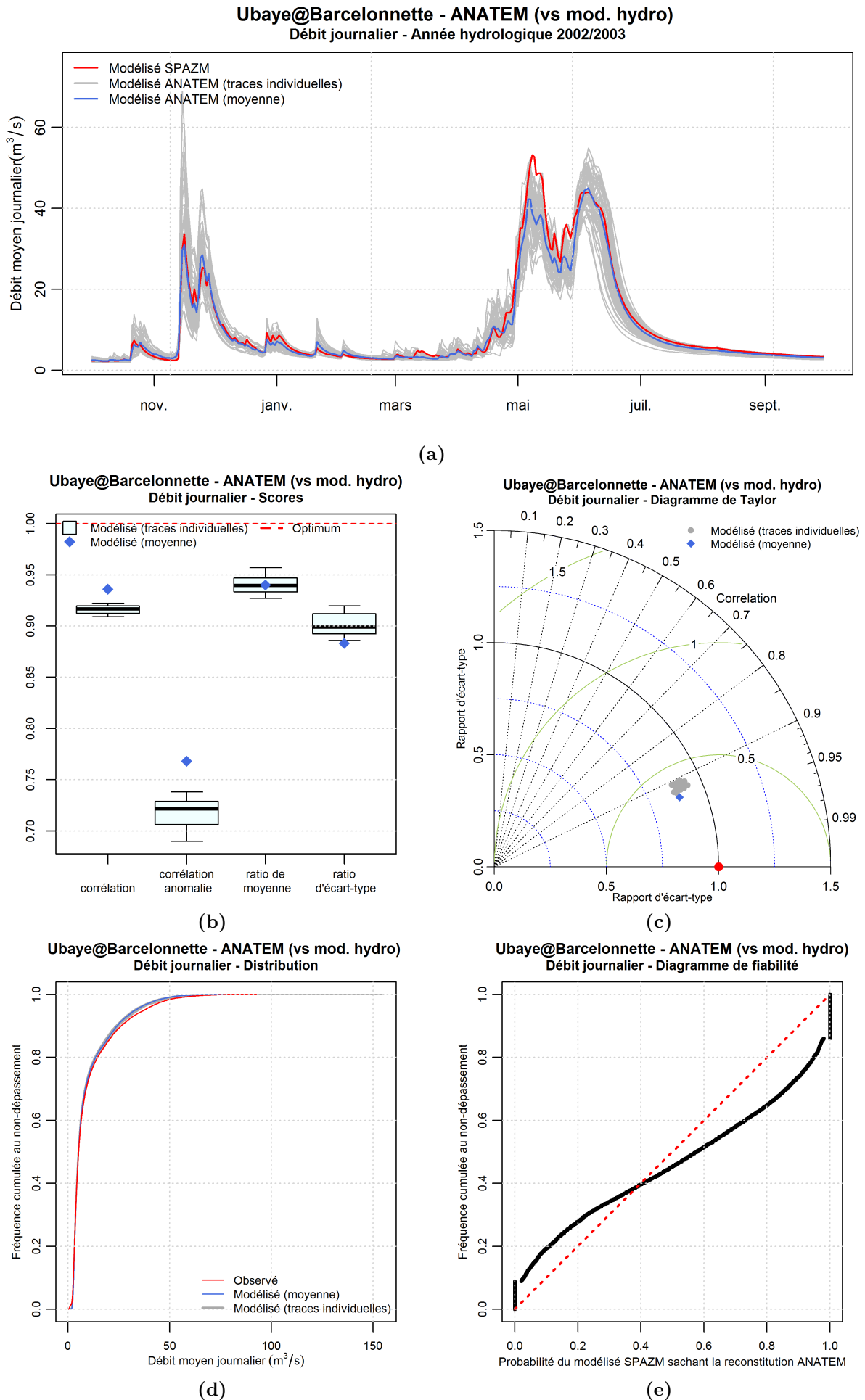


Figure 6.6 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l’Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps journalier.

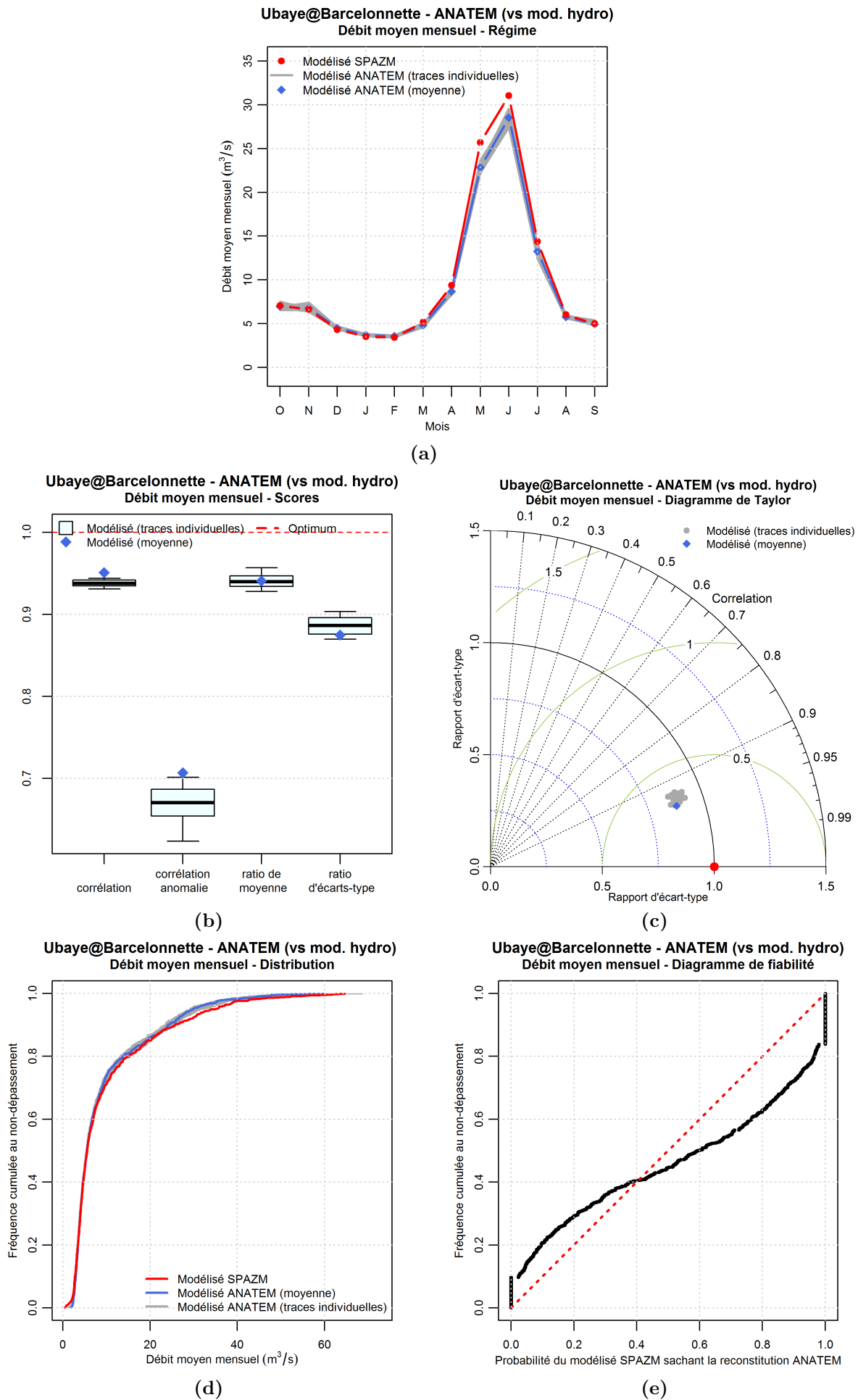


Figure 6.7 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps mensuel.

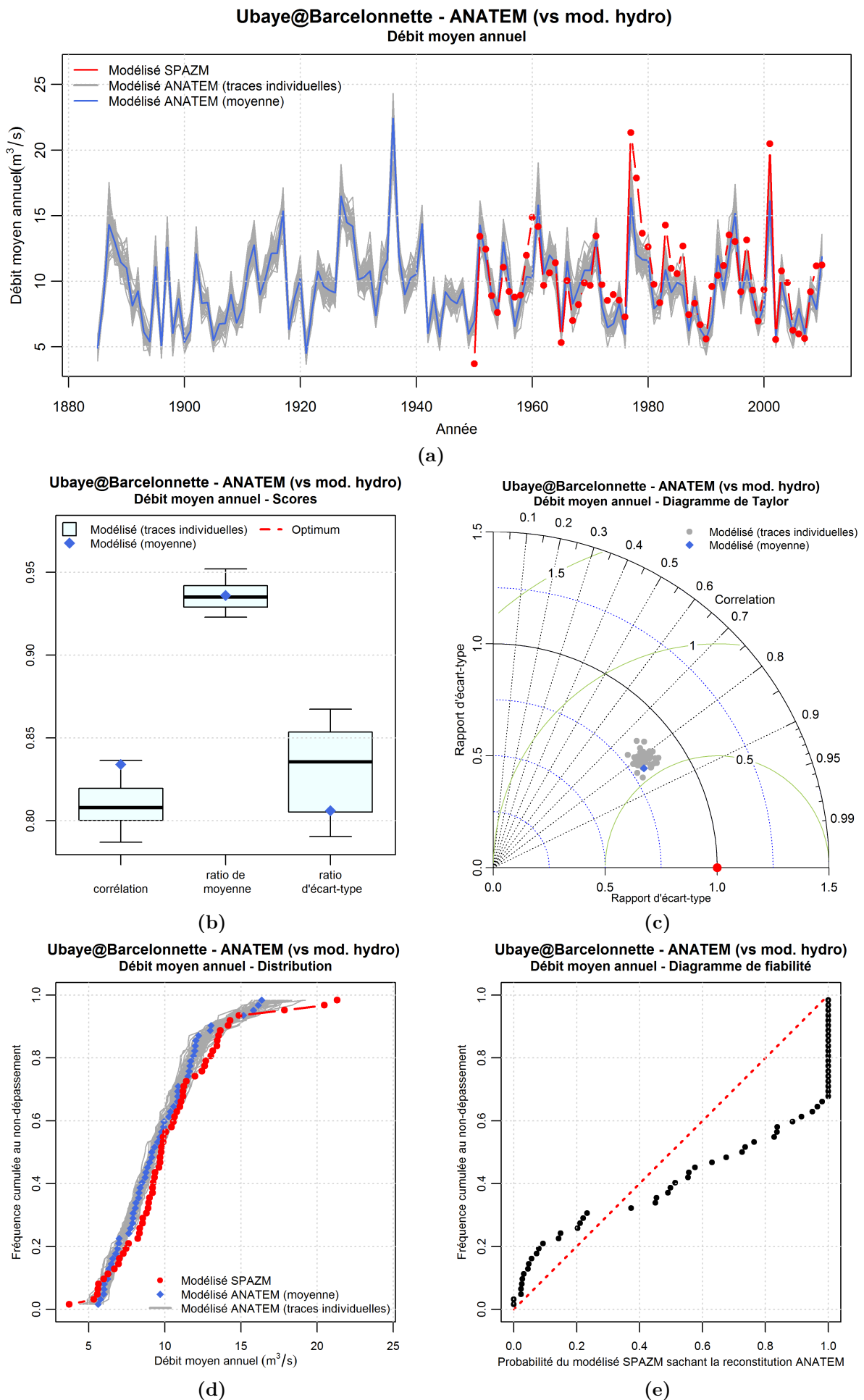


Figure 6.8 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l’Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps annuel.

II.2.2 | Reconstitution hydrologique ANATEM comparée aux débits observés

Dans ce paragraphe, nous analyserons les performances de la reconstitution hydrologique via ANATEM des débits de l'Ubaye à Barcelonnette en utilisant cette fois comme référence les débits observés à la station de Barcelonnette. Comme nous l'avons écrit dans le chapitre 2, la série hydrologique de l'Ubaye à Barcelonnette est la longue série la plus continue dont nous disposons pour cette étude, puisqu'elle est disponible depuis 1904 jusqu'à aujourd'hui, avec seulement trois années manquantes : 1915 1916 et 1958.

Le fait de disposer d'une longue série de débits va nous permettre de qualifier l'ensemble de la chaîne de reconstitution sur la période 1904-2010, ce qui n'était pas possible au cours de l'étape de reconstitution climatique du fait du manque de données climatiques sur la période la plus ancienne. Cependant, afin de conserver un moyen de comparaison entre les performances de la reconstitution hydrologique via ANATEM relativement aux débits modélisés SPAZM d'une part et aux débits observés d'autre part, les valeurs des différents scores obtenues sur la période 1948-2010 ont été ajoutées aux graphiques lorsque les contraintes de lisibilité le permettaient. Le régime hydrologique est également présenté sur les deux périodes.

Les résultats de cette analyse sont présentés sous forme de graphiques sur les figures 6.9 pour le pas de temps journalier, 6.10 pour le pas de temps mensuel, et 6.11 pour le pas de temps annuel.

La chronique des débits journaliers de l'année hydrologique 2003 (figure 6.9a) montre une reproduction correcte de la dynamique globale à l'échelle d'une année avec toutefois des erreurs pouvant être importantes sur certaines périodes. Au printemps par exemple, les débits du mois de mai, et en particulier la crue intervenant en début de mois, sont sous-estimés par la reconstitution. La figure 6.2a montrait que la simulation de référence sous-estime également cette pointe puisque le débit maximal atteint par ce modèle est d'environ $50 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que l'observé dépasse $60 \text{ m}^3/\text{s}$, cependant, dans le cas de la simulation basée sur les reconstitutions ANATEM le phénomène est amplifié, avec un débit pour cette date de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ seulement. Au contraire, au cours du mois de juin apparaît une hausse du débit reconstitué qui n'est pas présente sur la série de débits observés. En comparant à nouveau cette reconstitution avec celle utilisant les données SPAZM (figure 6.2a) il apparaît que cette fois l'erreur semble provenir principalement de la modélisation hydrologique puisqu'elle apparaît sur les deux séries simulées.

Les critères de comparaison de la reconstitution ANATEM avec la série d'observés sont logiquement moins bons que lorsque les modélisés SPAZM étaient utilisés comme référence. En effet, pour les premiers, les erreurs liées au modèle hydrologique viennent s'ajouter à celles liées aux reconstitutions climatiques. Sur la période 1948-2010, la corrélation entre débits observés et débits reconstitués à partir d'ANATEM est d'environ 0.88 pour la reconstitution moyenne, alors que celle entre les deux types de débits simulés était d'environ 0.94 (figure 6.6b). Les valeurs obtenues sur l'ensemble de la période de disponibilité de débits observés, sont légèrement inférieures (0.86 pour la reconstitution moyenne). Le biais de moyenne des débits reconstitués à partir d'ANATEM par rapport aux débits observés est d'environ -9% sur l'ensemble de la période, et -5% sur 1948-2010. L'écart-type de la série est quant à lui sous-estimé d'environ 11% par la reconstitution (sur la période 1948-2010), ce qui n'est pas négligeable mais proche de la valeur constatée lorsque le débit modélisé SPAZM était utilisé comme référence. Le diagramme de Taylor montre que les différentes reconstitutions individuelles ont des performances similaires entre elles, et proches de celles de la reconstitution moyenne.

En ce qui concerne la distribution des débits classés, seules les distributions obtenues

sur l'ensemble de la période de disponibilité de débits observés sont représentées, mais les résultats obtenus sur la période 1948-2010 s'avèrent très ressemblants à ceux représentés ici. La figure 6.9d montre que la reproduction de cette distribution des débits journaliers classés par la reconstitution ANATEM est très bonne.

La reconstitution ANATEM présente en revanche au pas de temps journalier une fiabilité imparfaite comme le montre la figure 6.9e : cette reconstitution apparaît sous-dispersive, amenant plus de 40% des valeurs observées à se trouver en dehors de la gamme des valeurs reconstituées.

Au pas de temps mensuel (figure 6.10), la représentation du régime hydrologique moyen par la reconstitution ANATEM est globalement bonne avec toutefois, sur le régime hydrologique calculé sur la période complète (1904-2010, figure 6.10a), une sous-estimation des débits moyens des mois de mai à septembre.

La corrélation entre la reconstitution via ANATEM des débits mensuels de l'Ubaye à Barcelonnette et les débits mensuels observés est relativement bonne, d'environ 0.9. En ce qui concerne les séries d'anomalies par rapport au régime hydrologique moyen, la corrélation obtenue est assez nettement inférieure (0.61 pour la reconstitution moyenne), ce qui montre à nouveau le caractère saisonnier de la variable débit. La sous-estimation de l'écart-type de la série est légèrement plus faible au pas de temps mensuel (biais d'écart-type -9%) qu'il ne l'était au pas de temps journalier mais elle reste importante. Le diagramme de Taylor montre à nouveau un nuage de points assez regroupé mettant en évidence la similarité des performances des différentes reconstitutions individuelles. Les performances limitées à la période 1948-2010 sont légèrement meilleures que sur la série complète.

La distribution des débits mensuels classés est à nouveau assez bien reproduite par la simulation basée sur les reconstitutions ANATEM. En revanche, la fiabilité au pas de temps mensuel reste moyenne, la reconstitution apparaissant comme sous-dispersive.

Au pas de temps annuel (figure 6.11), l'observation de l'ensemble de la chronique montre une reproduction globalement satisfaisante de la variabilité interannuelle, mais aussi relativement inégale dans le temps. Par exemple, la reconstitution semble très bien reproduire la période de 1960 à 2010 alors qu'elle paraît moins fidèle aux observés sur la période antérieure à 1930.

En ce qui concerne les critères de performances au pas de temps annuel de la reconstitution hydrologique via ANATEM, on observe un coefficient de corrélation proche de 0.75 pour la reconstitution moyenne, et compris entre 0.69 et 0.77 environ pour les reconstitutions individuelles. Cette valeur est inférieure à celles observées aux pas de temps journaliers, mais supérieure à celles des séries d'anomalies par rapport au régime hydrologique moyen. Sur la période 1948-2010, la corrélation est meilleure, de 0.81 environ pour la reconstitution moyenne. Comme remarqué aux pas de temps journalier et mensuel, le biais de moyenne est non négligeable sur la période complète puisqu'il est de l'ordre de -9%. Le biais d'écart-type est en revanche inférieur ici à ceux observés aux pas de temps inférieurs : il est de -5% pour la reconstitution moyenne et varie entre -10% et +5% pour les reconstitutions individuelles. Il est intéressant de constater que sur la période 1948-2010, ce biais d'écart-type est plus important (environ -14%), mais reste moins important que celui observé lorsque les débits modélisés à partir des données SPAZM étaient pris comme référence, ce qui laisserait penser qu'en ce qui concerne ce critère, les erreurs liées aux reconstitutions climatiques et au modèle hydrologique se compenseraient, le biais d'écart-type au pas de temps annuel de la simulation de référence étant positif (+9%).

Le diagramme de Taylor montre à nouveau un nuage de points assez regroupé, mais cette fois le point correspondant aux performances observées sur la période 1948-2010 est plus détaché des autres points : sur cette période, la reconstitution est meilleure en corrélation, mais moins bonne pour la reproduction de l'écart-type que sur la période complète.

Le biais de moyenne constaté précédemment se reporte sur la distribution des débits annuels classés : celle obtenue à partir de la reconstitution via ANATEM est légèrement décalée par rapport à celle correspondant aux débits observés. Le diagramme de fiabilité montre encore une fois que les débits modélisés de l'Ubaye à Barcelonnette à partir des reconstitutions climatiques ANATEM ont tendance à être sous-dispersés. La dissymétrie de la courbe des probabilités au non dépassement de l'observé sachant la reconstitution met en évidence le fait que les débits observés se trouvent plus souvent dans la partie haute ou au-delà de la distribution des reconstitutions que dans sa partie inférieure, ce qui s'explique en partie par le fait que ces reconstitutions sont biaisées en moyenne.

Cette analyse a montré que la reconstitution des débits de l'Ubaye à Barcelonnette par la combinaison de la méthode ANATEM et d'un modèle hydrologique permet une bonne reproduction de la variabilité des débits observés à différents pas de temps. Quelques différences entre débits reconstitués et débits observés sont néanmoins apparues, notamment un biais négatif de moyenne proche de -9%, et un biais d'écart-type d'environ -5% au pas de temps annuel. Sur la période 1948-2010 où une comparaison peut être faite, le biais de moyenne semble être principalement porté par l'étape de reconstitution climatique puisqu'il est également observé en comparaison à la simulation de référence. On peut d'ailleurs rappeler qu'un biais de moyenne du même ordre était observé sur la reconstitution de la série de précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette. A l'échelle annuelle, nous avons également observé que la reconstitution ANATEM reproduit mieux les observations sur certaines périodes que sur d'autres.

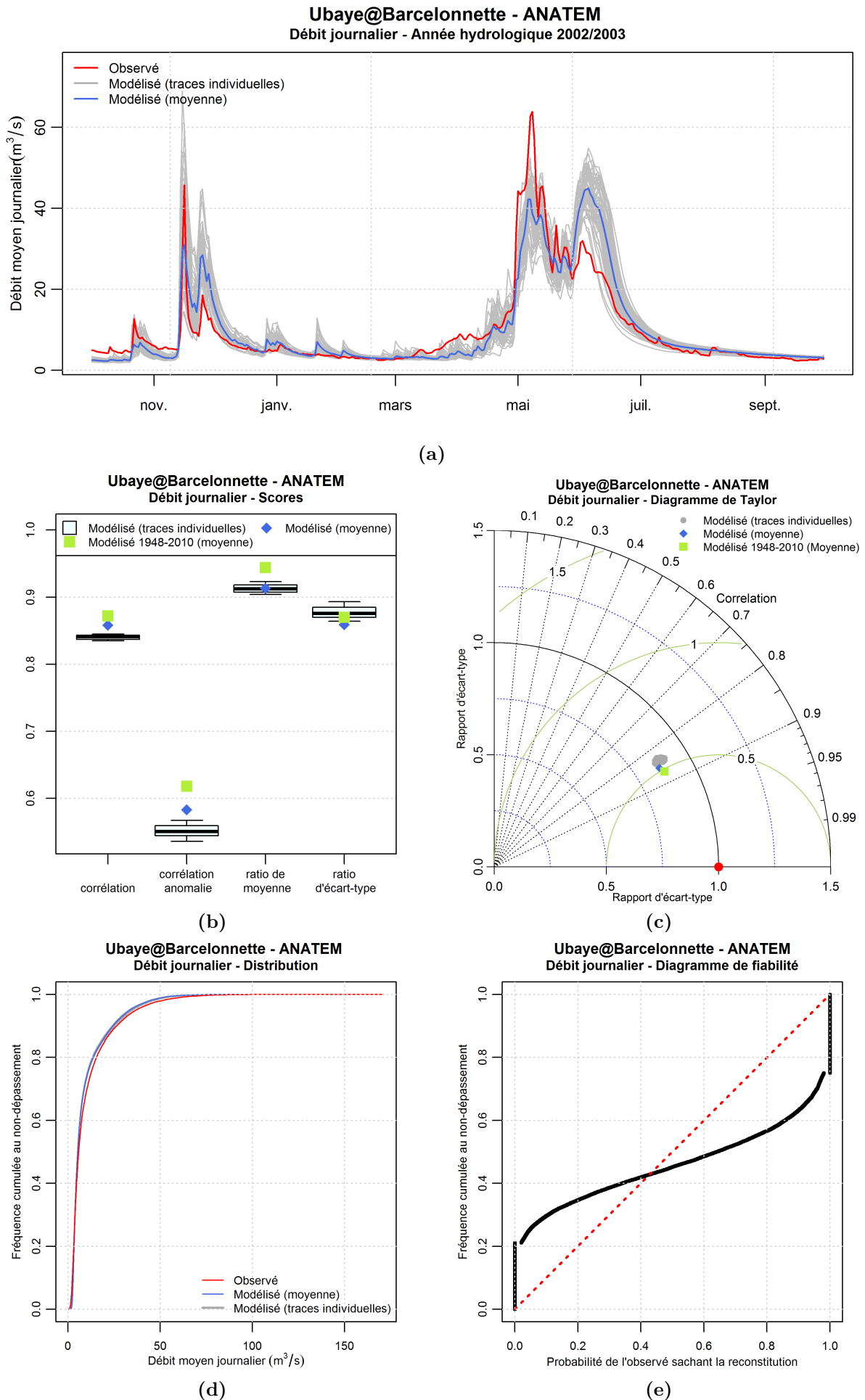


Figure 6.9 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l’Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps journalier.

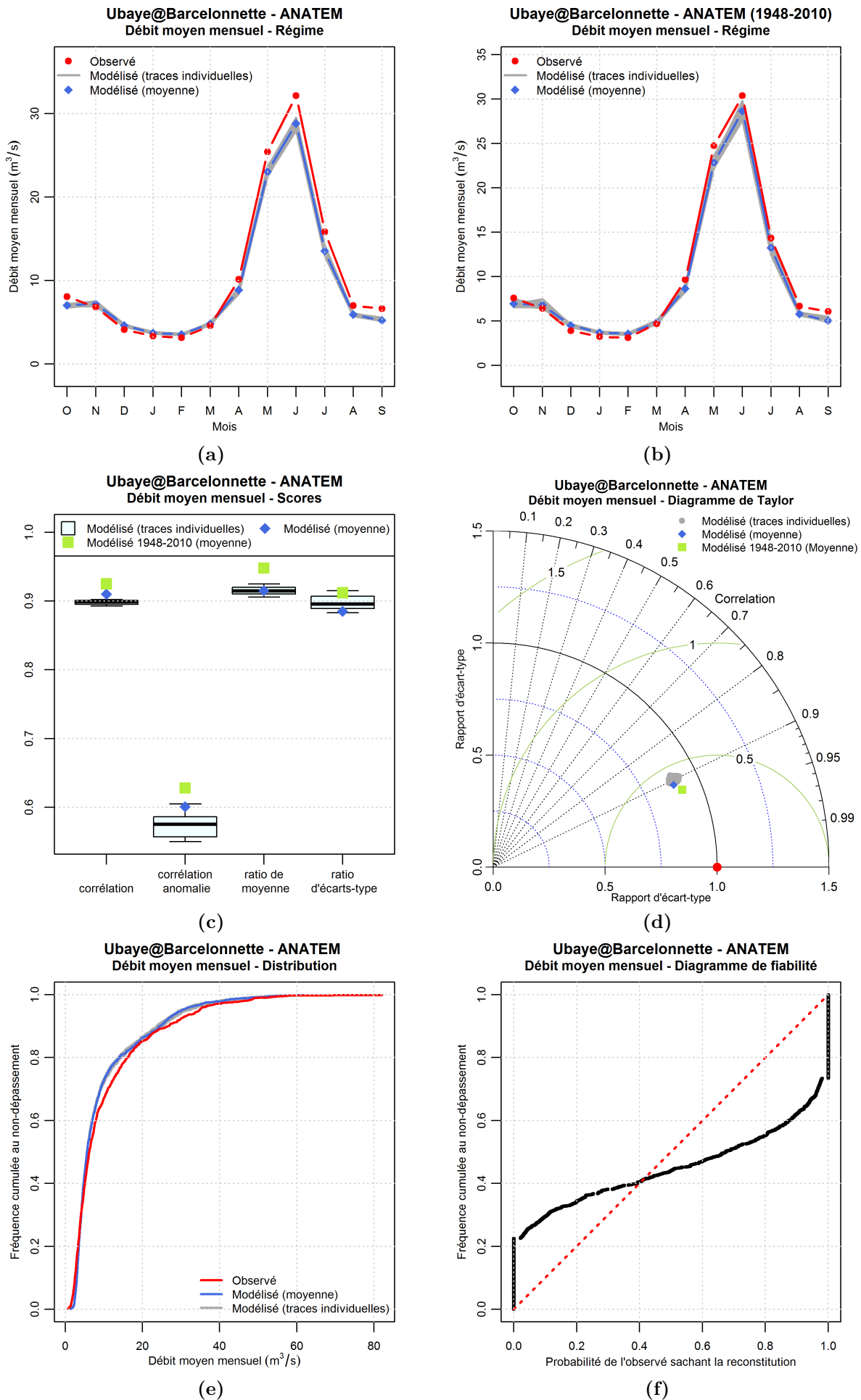


Figure 6.10 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l’Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps mensuel.

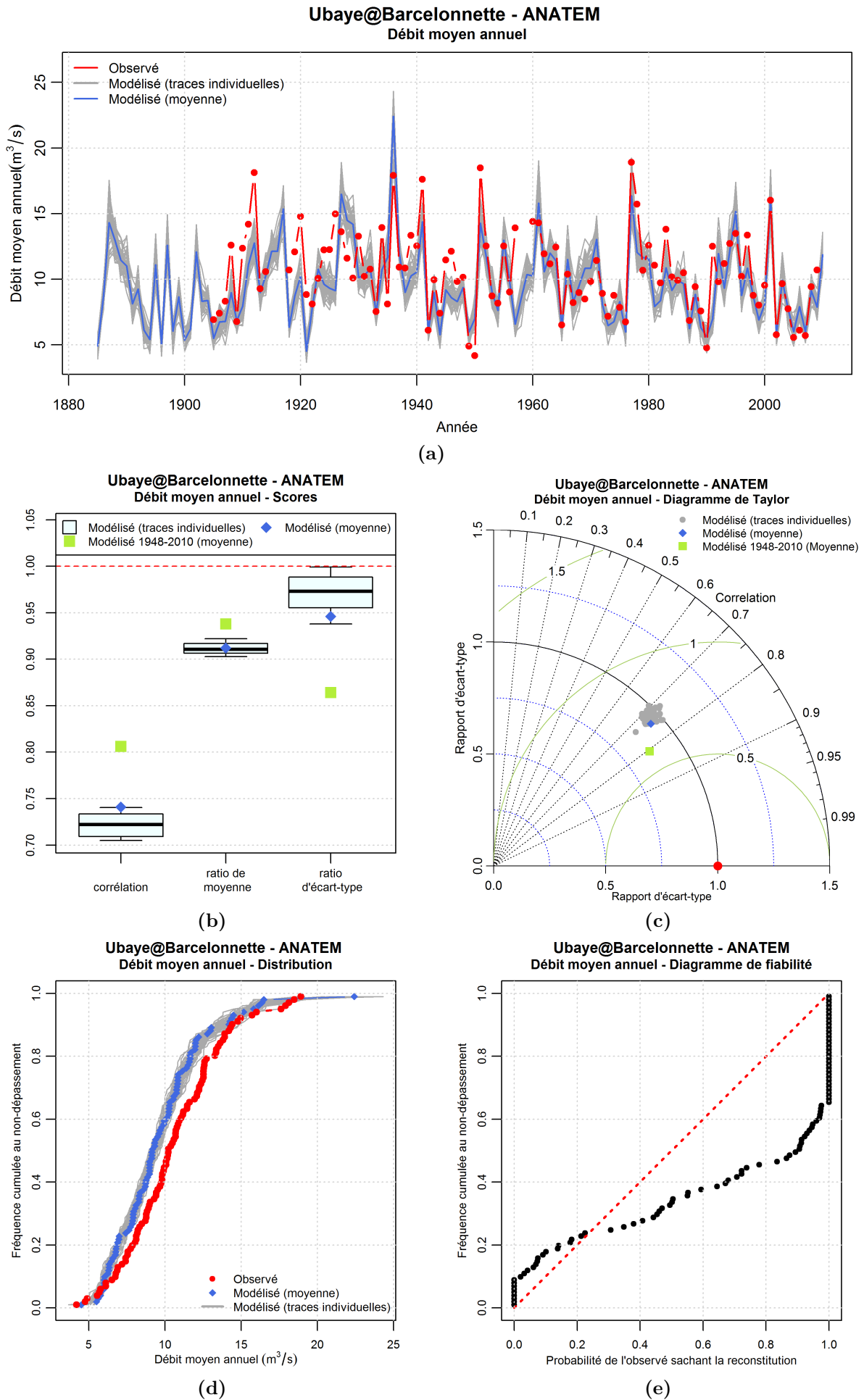


Figure 6.11 – Performances du modèle ANATEM de reconstitution du débit de l’Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps annuel.

II.3 | Reconstitution à partir des données issues de la réanalyse uniquement

Nous avons présenté dans la section précédente les résultats obtenus pour la reconstitution de la série des débits de l'Ubaye à Barcelonnette à partir des reconstitutions climatiques ANATEM, en comparaison avec une simulation hydrologique de référence d'une part, et avec les débits observés à Barcelonnette d'autre part. Suite aux conclusions du chapitre 4, nous utiliserons la méthode ANATEM pour l'ensemble de nos reconstitutions, cependant, nous présentons dans cette section les résultats qui seraient obtenus en remplaçant, en entrée du modèle hydrologique, les reconstitutions climatiques ANATEM par des reconstitutions climatiques construites uniquement à partir des données de la réanalyse 20CR. Cette section permettra de présenter les performances qui pourraient être obtenues dans le cadre d'une reconstitution hydrologique lorsqu'aucun témoin régional de précipitations ou de températures de l'air n'est disponible. Cela correspond également à l'une des méthodes utilisées dans le cadre du projet RIWER 2030 pour la construction de scénarios futurs sur le bassin de la Durance (Hingray *et al.*, 2013).

Les reconstitutions climatiques utilisées sont pour les températures de l'air la reconstitution ANATEM utilisant le témoin d'épaisseur de la couche d'atmosphère entre les isopotentiels 700 et 1000 hPa de la réanalyse 20CR (voir chapitre 5), et pour les précipitations la reconstitution ANA. Nous désignerons la reconstitution hydrologique ainsi obtenue par la notation « 20CR ».

Dans la mesure où les performances des reconstitutions présentées ici seront principalement comparées à celles des reconstitutions ANATEM sur la même station, et sachant que le modèle hydrologique est inchangé entre les reconstitutions 20CR et ANATEM, nous ne présenterons pour la reconstitution 20CR que les performances en référence aux débits observés.

Les graphiques présentant les performances de la reconstitution 20CR relativement aux débits observés sont regroupés sur les figures 6.12 à 6.14. Sans détailler chacun de ces graphiques, nous regroupons ci-dessous les principales remarques pouvant être faites lorsqu'ils sont comparés à ceux correspondant à la reconstitution ANATEM.

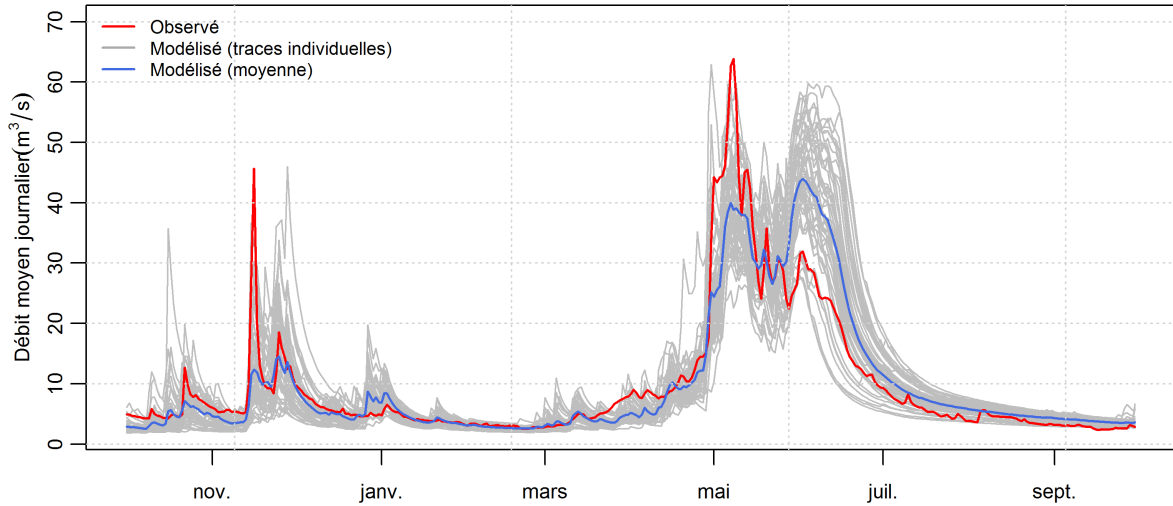
Aux pas de temps journalier et mensuel, les corrélations des reconstitutions 20CR sont légèrement moins bonnes que celles des reconstitutions ANATEM, ce qui s'explique par l'absence de témoin de précipitations qui, comme nous l'avons vu au chapitre 4, diminue de manière notable la corrélation de la reconstitution des précipitations.

Le biais de moyenne en revanche est moins important dans le cas de la reconstitution 20CR que pour la reconstitution ANATEM, et les biais d'écart-type aux pas de temps journalier et mensuel sont légèrement réduits. La reproduction des débits moyens interannuels des mois de mai, juin et juillet est également meilleure avec la reconstitution 20CR, ce qui explique la diminution du biais de moyenne. L'absence de témoin de précipitations rend le faisceau des reconstitutions individuelles plus large, ce qui améliore légèrement la fiabilité de la reconstitution.

Au pas de temps annuel, les performances de la reconstitution 20CR sont assez largement inférieures à celles de la reconstitution ANATEM, que ce soit en corrélation ou en ratio d'écart-type. On retrouve ici la conséquence du biais négatif d'écart-type et de la faible corrélation constatés au pas de temps annuel sur les reconstitutions ANA de précipitations (chapitre 4). Par ailleurs, le problème de représentation de la variabilité basse-fréquence des températures de l'air par la série d'épaisseurs 20CR soulevé au chapitre 5 peut également jouer sur cette diminution des performances au pas de temps annuel.

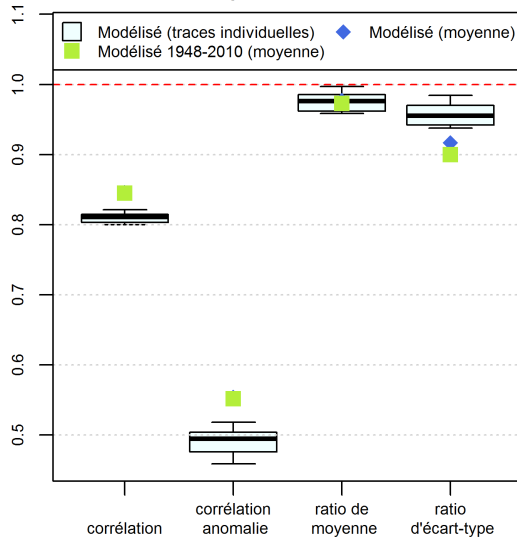
Finalement, cette comparaison montre qu'il est possible de construire à partir de données uniquement issues de la réanalyse des reconstitutions de débits présentant des performances intéressantes, *a minima* aux pas de temps journalier et mensuel. Les performances au pas de temps annuel d'une telle réanalyse sont néanmoins inférieures à celles de la reconstitution ANATEM, et quelques réserves peuvent être émises quant à la reproduction de la variabilité basse-fréquence.

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit journalier - Année hydrologique 2002/2003



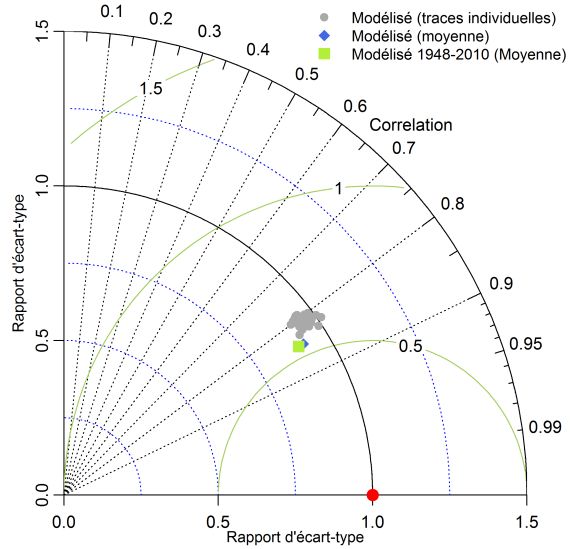
(a)

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit journalier - Scores



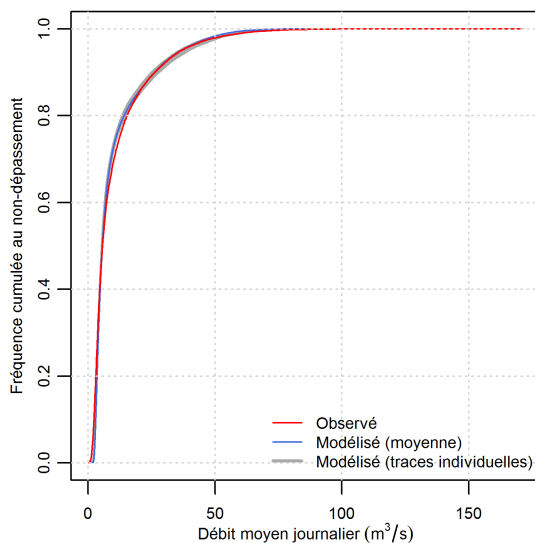
(b)

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit journalier - Diagramme de Taylor



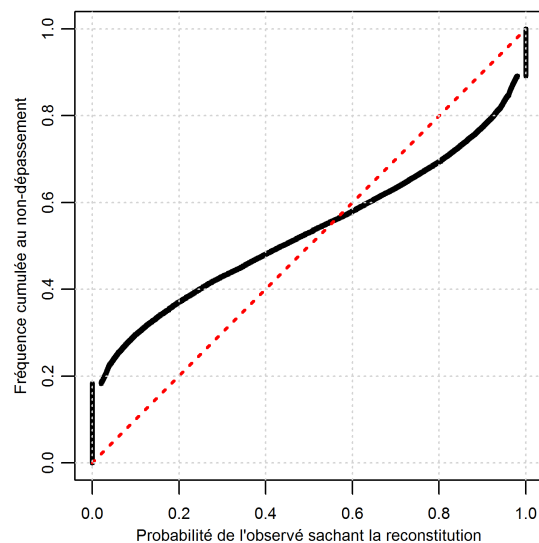
(c)

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit journalier - Distribution



(d)

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit journalier - Diagramme de fiabilité



(e)

Figure 6.12 – Performances du modèle [Tair ANATEM (Ep. 20CR) / Pluie ANA] de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps journalier.

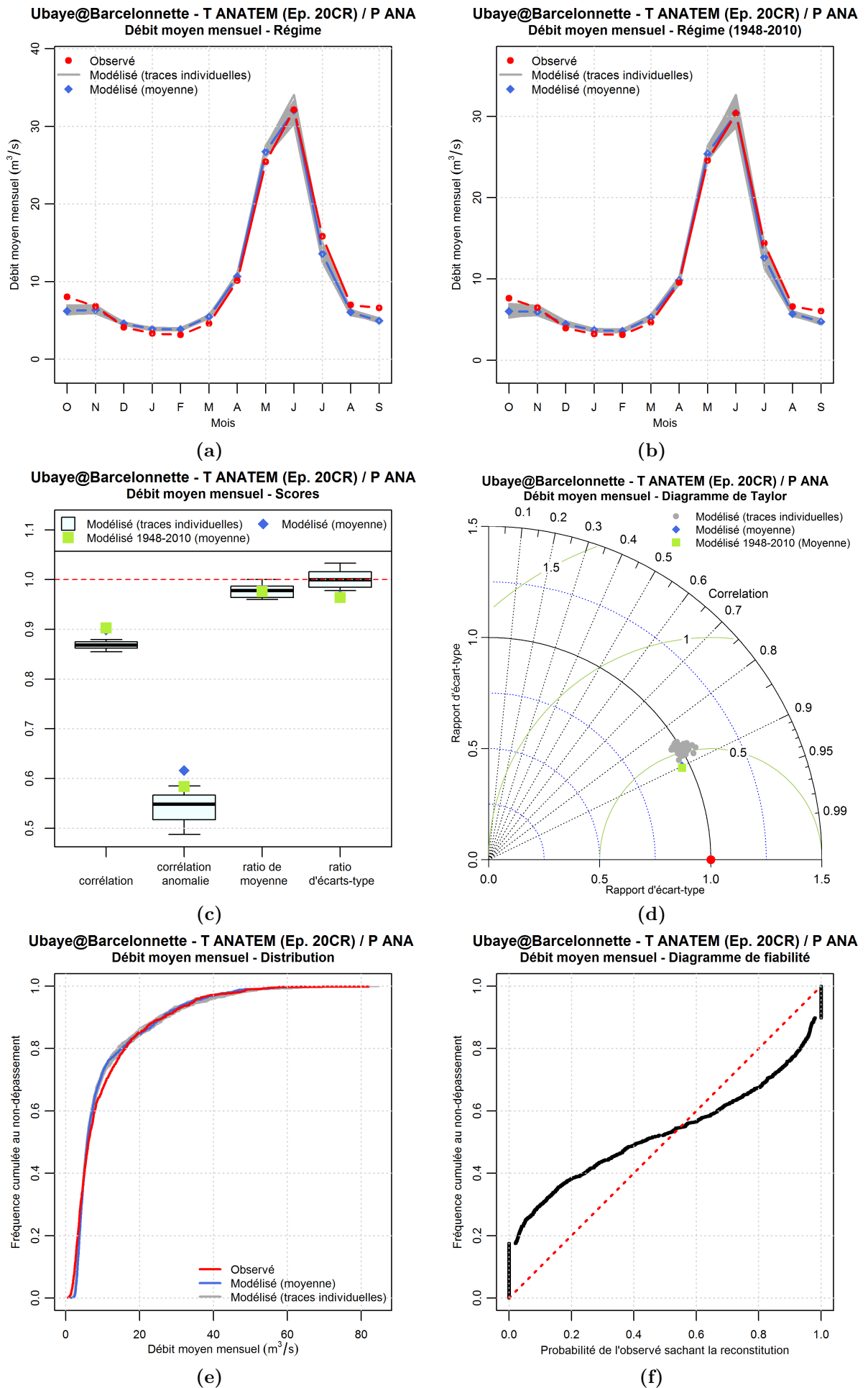
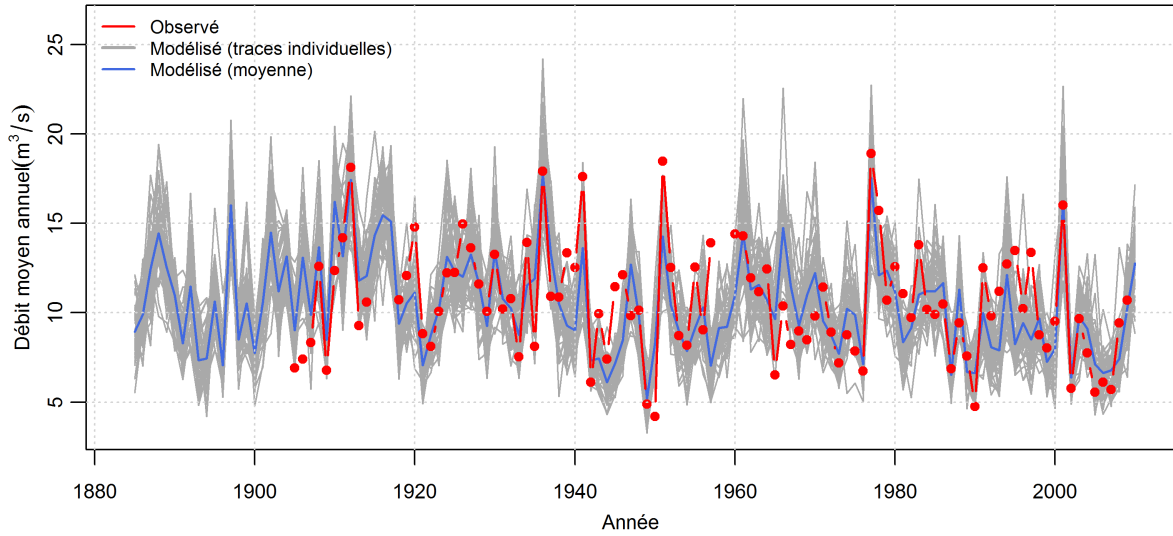


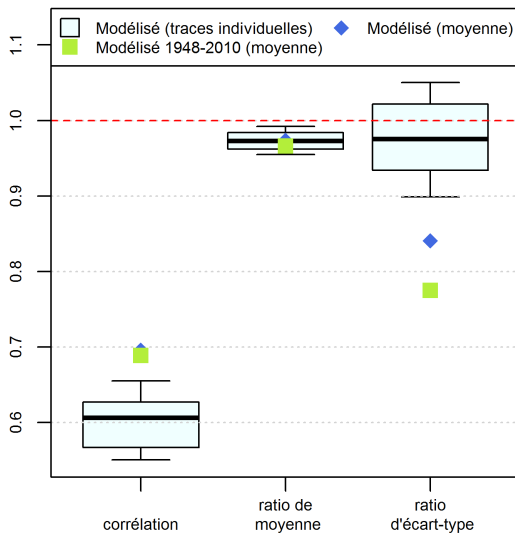
Figure 6.13 – Performances du modèle [Tair ANATEM (Ep. 20CR) / Pluie ANA] de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps mensuel.

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit moyen annuel



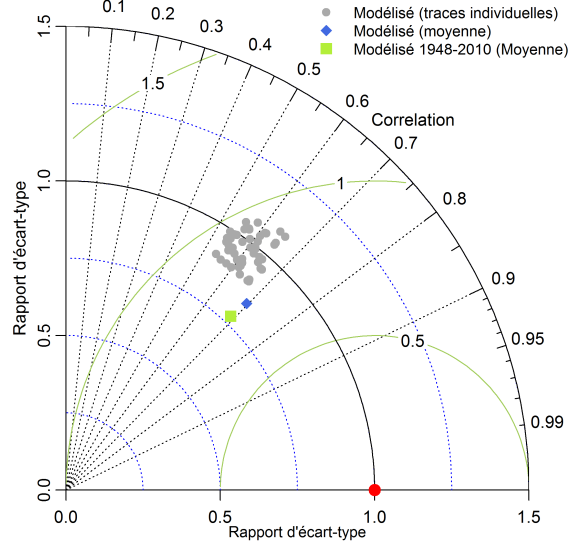
(a)

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit moyen annuel - Scores



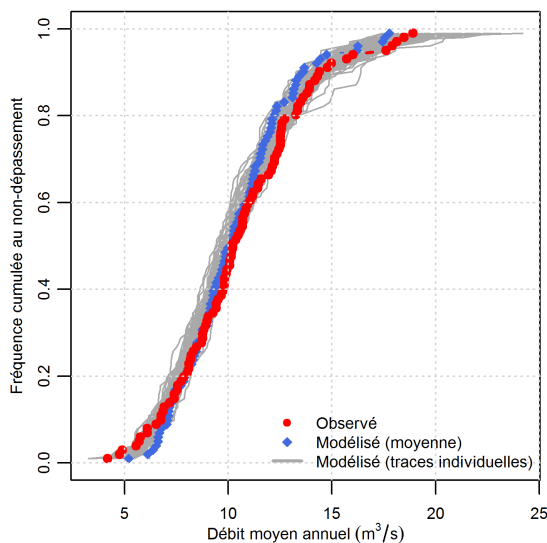
(b)

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit moyen annuel - Diagramme de Taylor



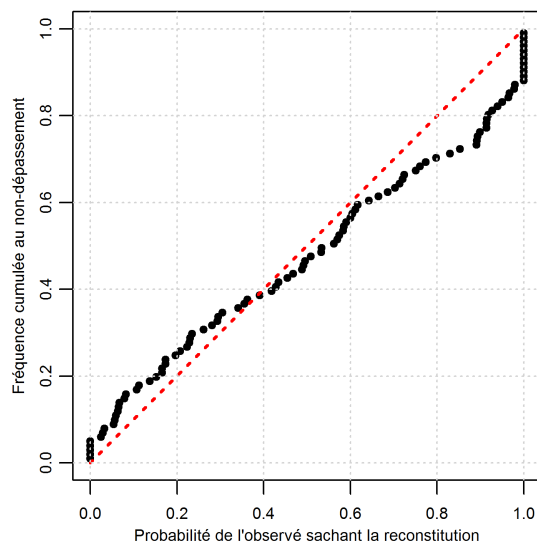
(c)

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit moyen annuel - Distribution



(d)

Ubaye@Barcelonnette - T ANATEM (Ep. 20CR) / P ANA
Débit moyen annuel - Diagramme de fiabilité



(e)

Figure 6.14 – Performances du modèle [Tair ANATEM (Ep. 20CR) / Pluie ANA] de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps annuel.

III | Résultats obtenus sur l'échantillon de 20 bassins versants (1948-2010)

Cette section présente les reconstitutions construites sur les 20 bassins versants étudiés à ce stade. Les performances de ces reconstitutions seront analysées dans cette section sur la période 1948-2010 uniquement. Cela permettra de comparer les reconstitutions ANATEM aux simulations hydrologiques d'une part, et aux débits observés d'autre part. L'association de ces deux comparaisons permet de savoir s'il faut plutôt attribuer les erreurs constatées à la reconstitution climatique ou au modèle hydrologique. Nous présenterons dans un premier temps les chroniques au pas de temps annuel des reconstitutions, puis analyserons les critères numériques de performance déjà utilisés dans le chapitre 4.

Une évaluation des reconstitutions sur une période plus longue sera menée dans la section IV en se basant sur les stations pour lesquelles nous disposons d'une longue chronique de débits observés (8 stations).

III.1 | Chroniques annuelles

Afin de donner un premier aperçu visuel des reconstitutions hydrologiques obtenues sur les 20 bassins d'étude, nous avons représenté sur les figures 6.15 à 6.19 les chroniques annuelles, pour chaque station, des débits observés à la station (sur la période où ceux-ci sont disponibles, variable d'une station à l'autre), les débits construits à partir des reconstitutions climatiques ANATEM, et les débits simulés à partir des données SPAZM (simulation de référence). Ces chroniques sont présentées sur la période 1948-2010, bien que les reconstitutions démarrent en 1884, et certaines séries observées avant 1948.

Plusieurs observations peuvent être faites à partir des différentes chroniques annuelles. La première de ces observations est que, de manière générale, les reconstitutions hydrologiques obtenues fournissent une reproduction de bonne qualité de la variabilité interannuelle des débits aux différentes stations.

En observant plus en détail, il apparaît une certaine disparité entre les performances des reconstitutions sur les différents bassins. Si certains débits reconstitués comme ceux de la Durance à La Clapière ou à Serre-Ponçon, de l'Ubaye à Roche-Rousse, du Verdon à Colmars ou à Castillon recouvrent presque parfaitement les observations, d'autres semblent bien moins proches des observés. C'est le cas par exemple des reconstitutions sur les bassins de la Guisane au Monétier, de l'Artuby à La Bastide ou du Verdon à Sainte-Croix. Dans la majorité des cas où la reconstitution est imparfaite, les valeurs reconstituées sont globalement inférieures aux valeurs observées. Sur l'Artuby à La Bastide et le Verdon à Sainte-Croix, la simulation de référence recouvre nettement mieux les observés, laissant penser que l'erreur proviendrait plutôt des reconstitutions climatiques. Il est plus difficile de conclure sur la Guisane au Monétier. Sur le Bes à La Javie, la reconstitution ANATEM semble au contraire légèrement mieux corrélée aux observations que la simulation de référence.

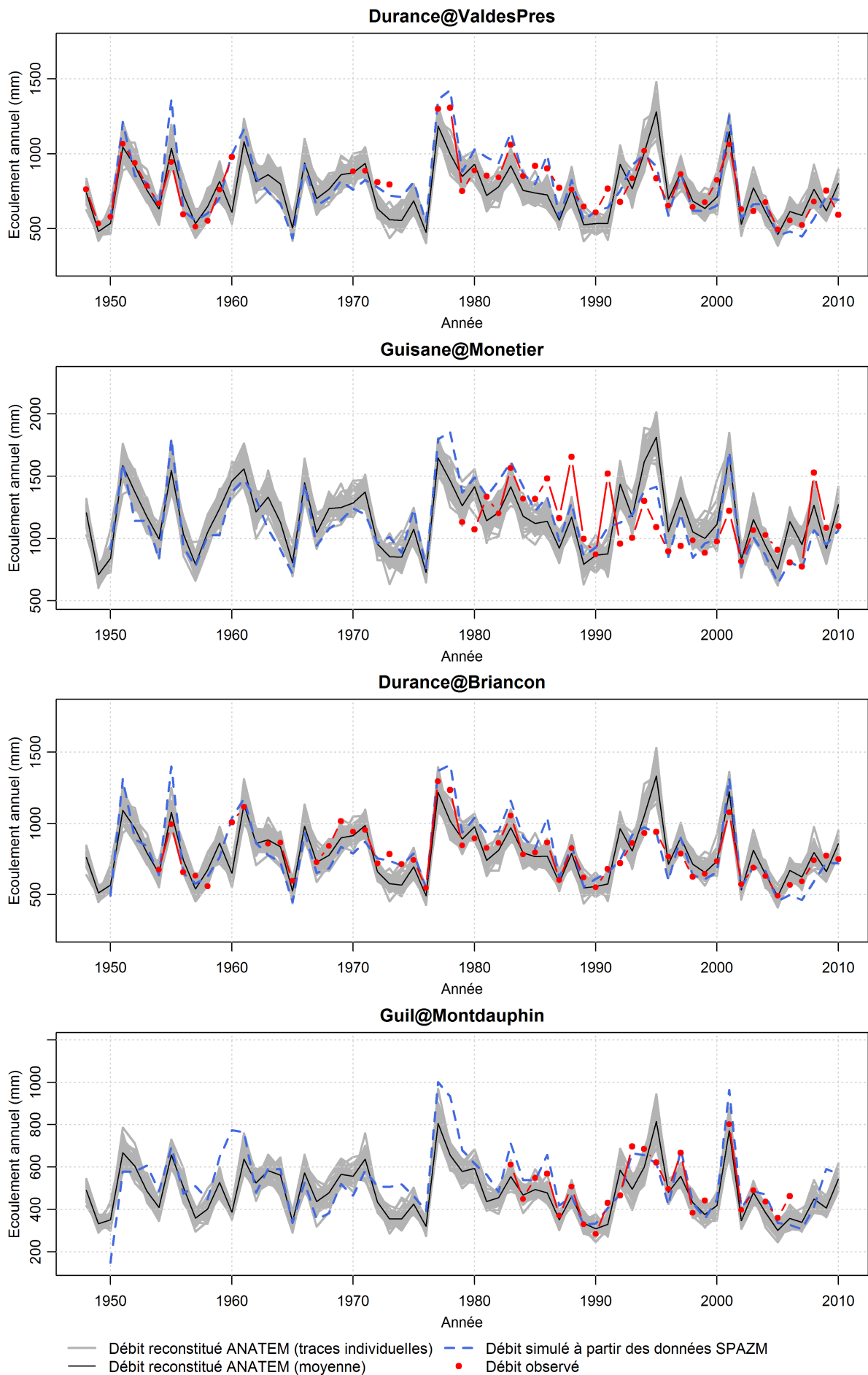


Figure 6.15 – Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).

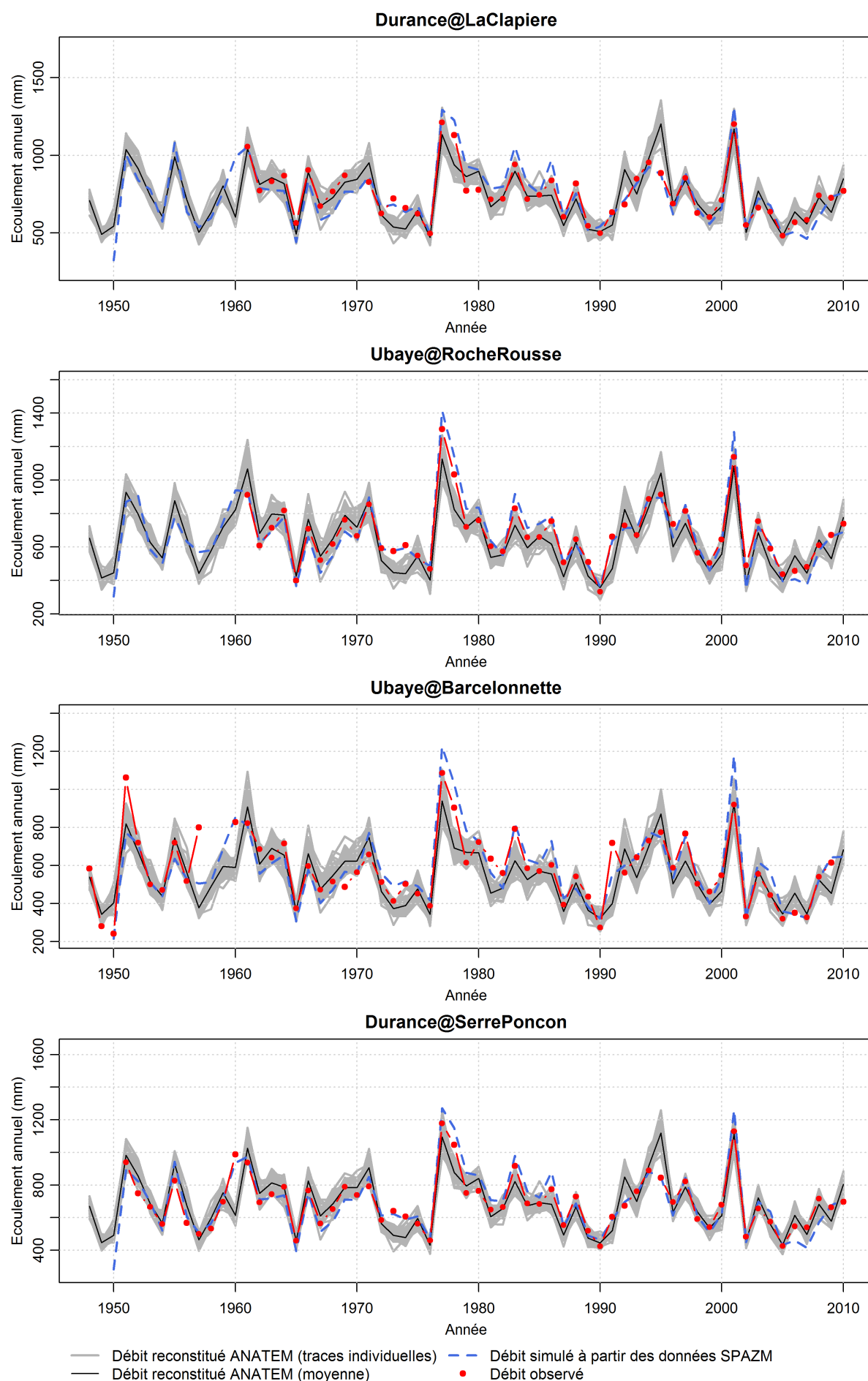


Figure 6.16 – Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).

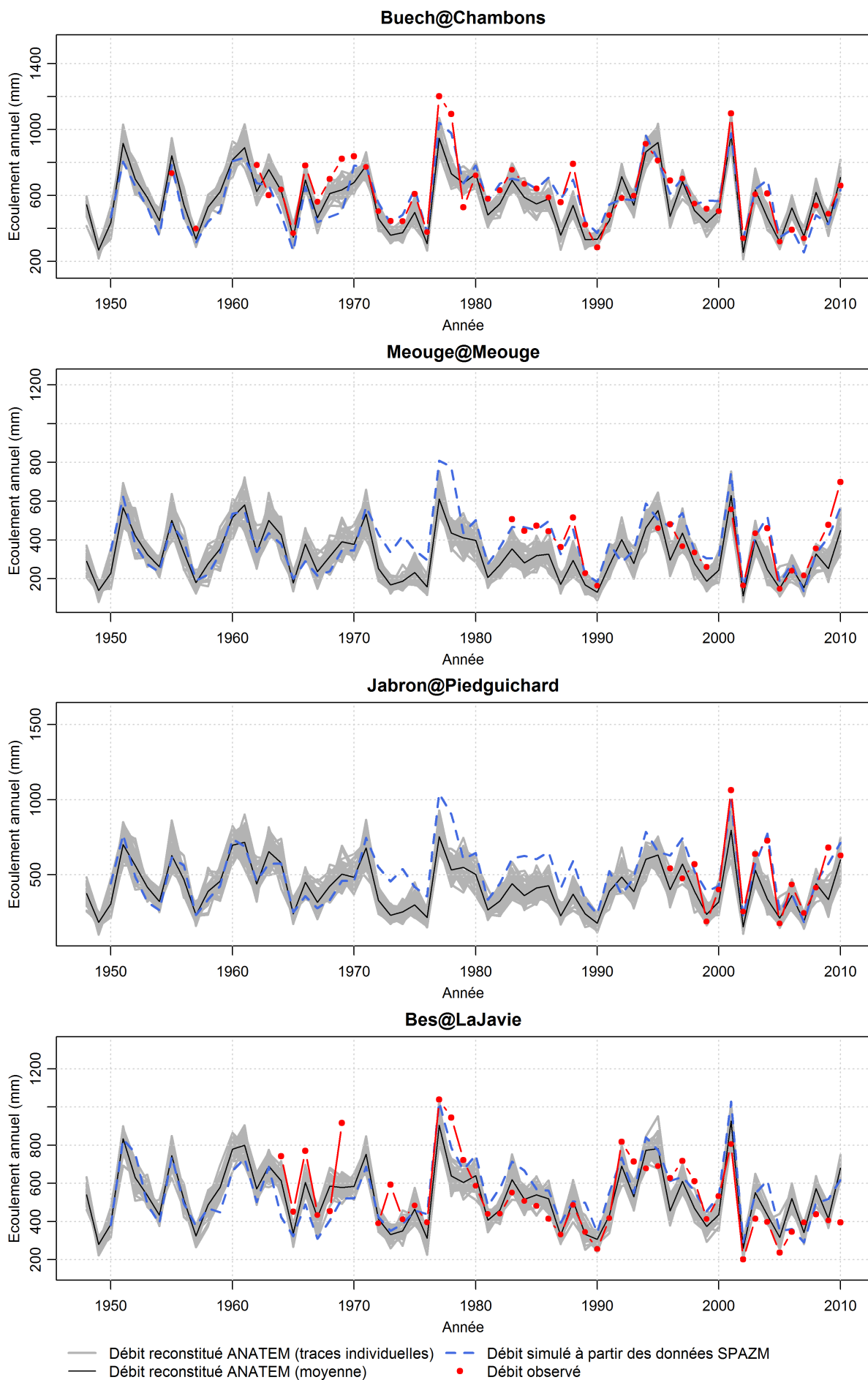


Figure 6.17 – Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).

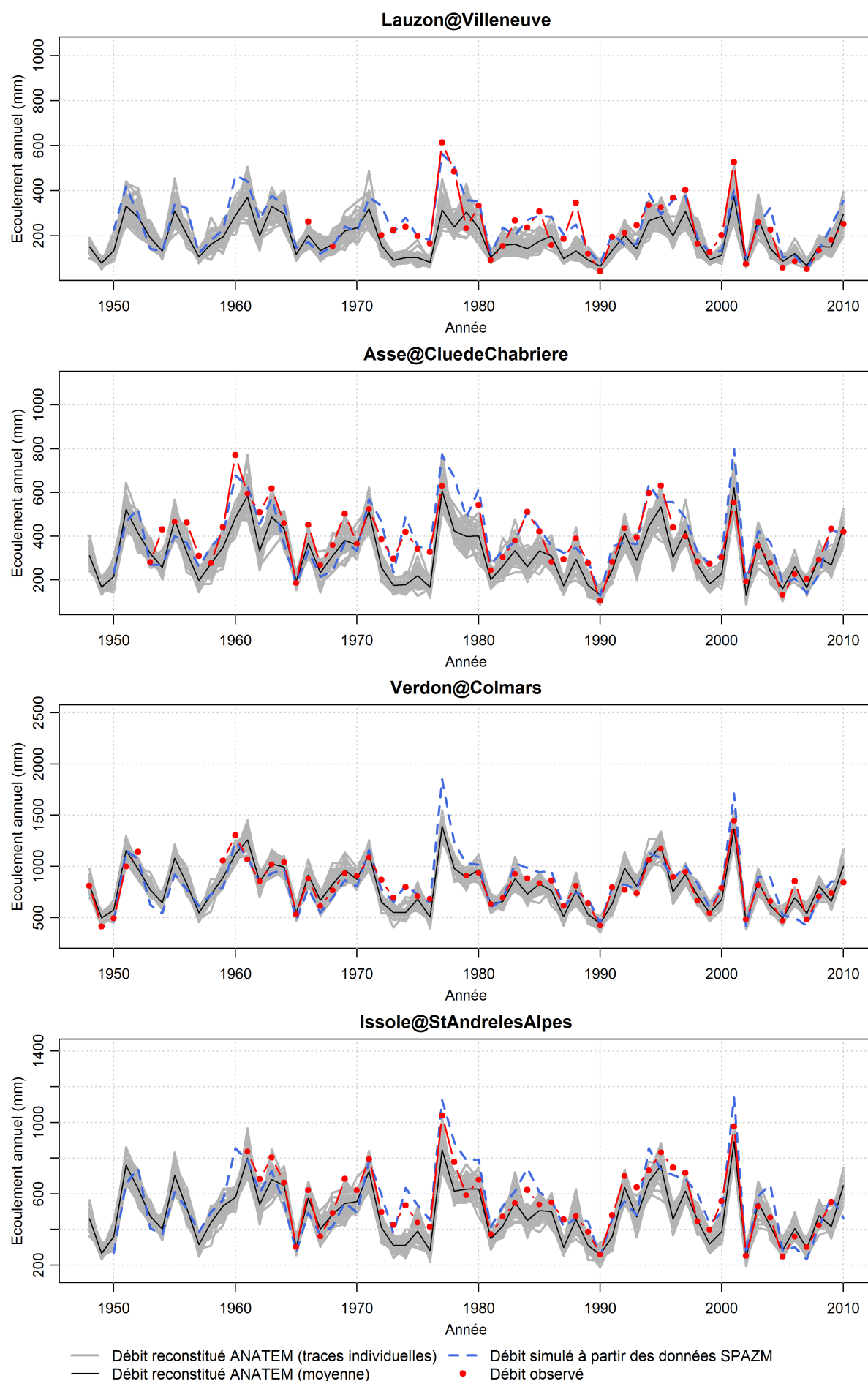


Figure 6.18 – Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).

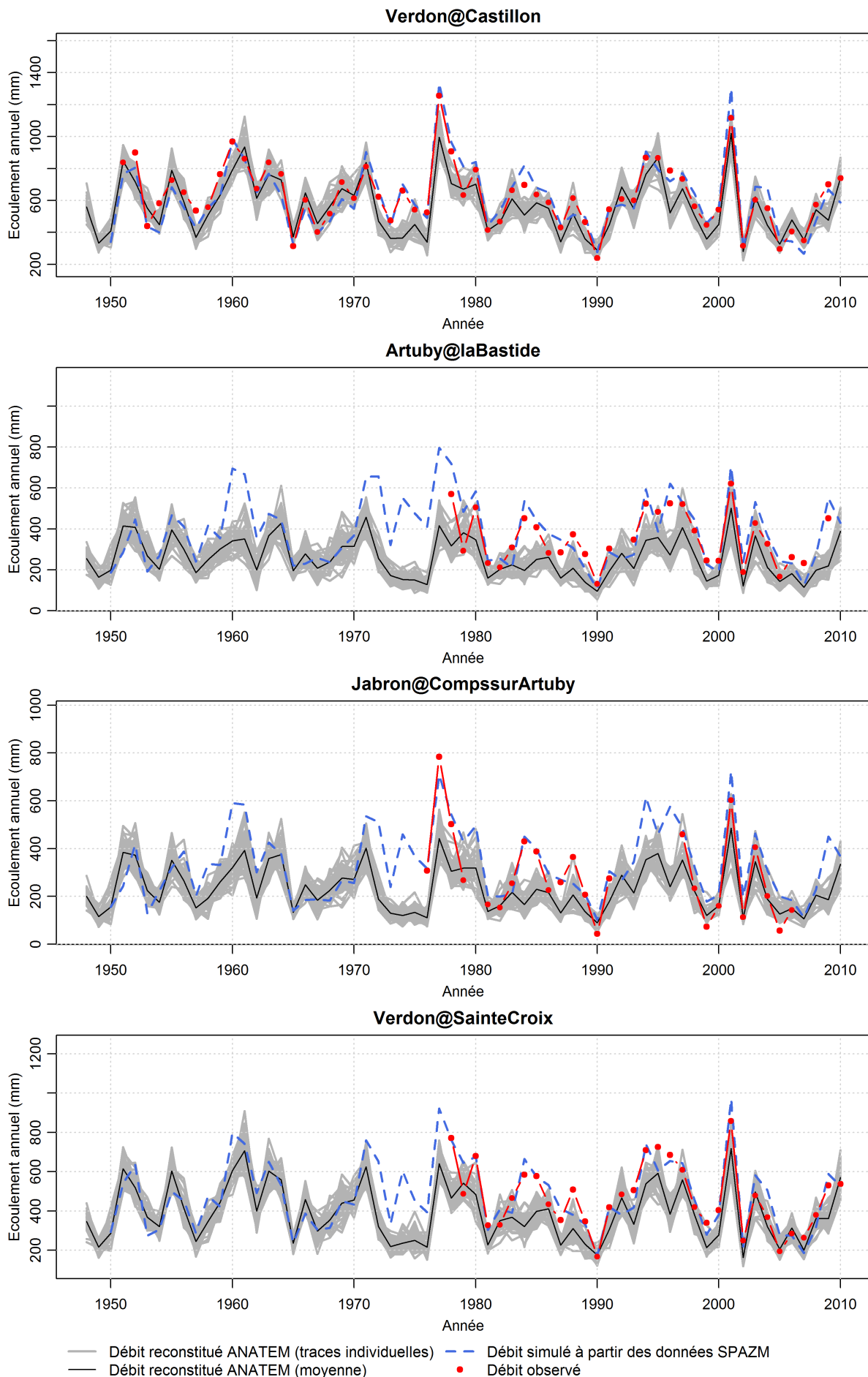


Figure 6.19 – Chroniques annuelles de débits observés, simulés à partir des données SPAZM, et reconstitués via la méthode ANATEM (1948-2010).

III.2 | Scores numériques relativement à la simulation de référence et aux observations

Nous présentons dans cette section les performances des reconstitutions hydrologiques construites à partir des séries climatiques ANATEM, en comparaison à une simulation hydrologique de référence basée sur les données climatiques SPAZM d'une part, et aux débits observés d'autre part. De la même manière que ce qui a été présenté pour les reconstitutions climatiques dans le chapitre 4, les scores numériques obtenus sur les 20 bassins versants sont présentés sous forme de boxplots sur les figures 6.20 à 6.26. Nous n'avons cependant conservé ici que les reconstitutions ANATEM qui se sont avérées être les plus performantes. Pour chaque critère et chaque bassin versant, un boxplot (bleu) représente les résultats de la comparaison des 50 reconstitutions ANATEM avec la simulation hydrologique de référence, et un autre (orange) représente les résultats de la comparaison de ces mêmes reconstitutions avec les débits observés. À nouveau, le score de la reconstitution moyenne est marqué par un point de la couleur correspondante.

Pour la comparaison avec les débits observés, seules les valeurs postérieures à 1948 ont été conservées, mais il faut toutefois noter que pour certaines stations disposant d'une courte chronique de débits observés, les périodes de comparaison à la simulation de référence (1948-2010) et aux débits observés (selon disponibilité) peuvent être significativement différentes. Pour cette raison, afin de faciliter les comparaisons, un point correspondant à la valeur du score de la reconstitution moyenne ANATEM comparée à la simulation de référence sur la période de disponibilité des observés a été ajouté. Une analyse sur les longues séries hydrologiques sera par ailleurs présentée dans la section IV.

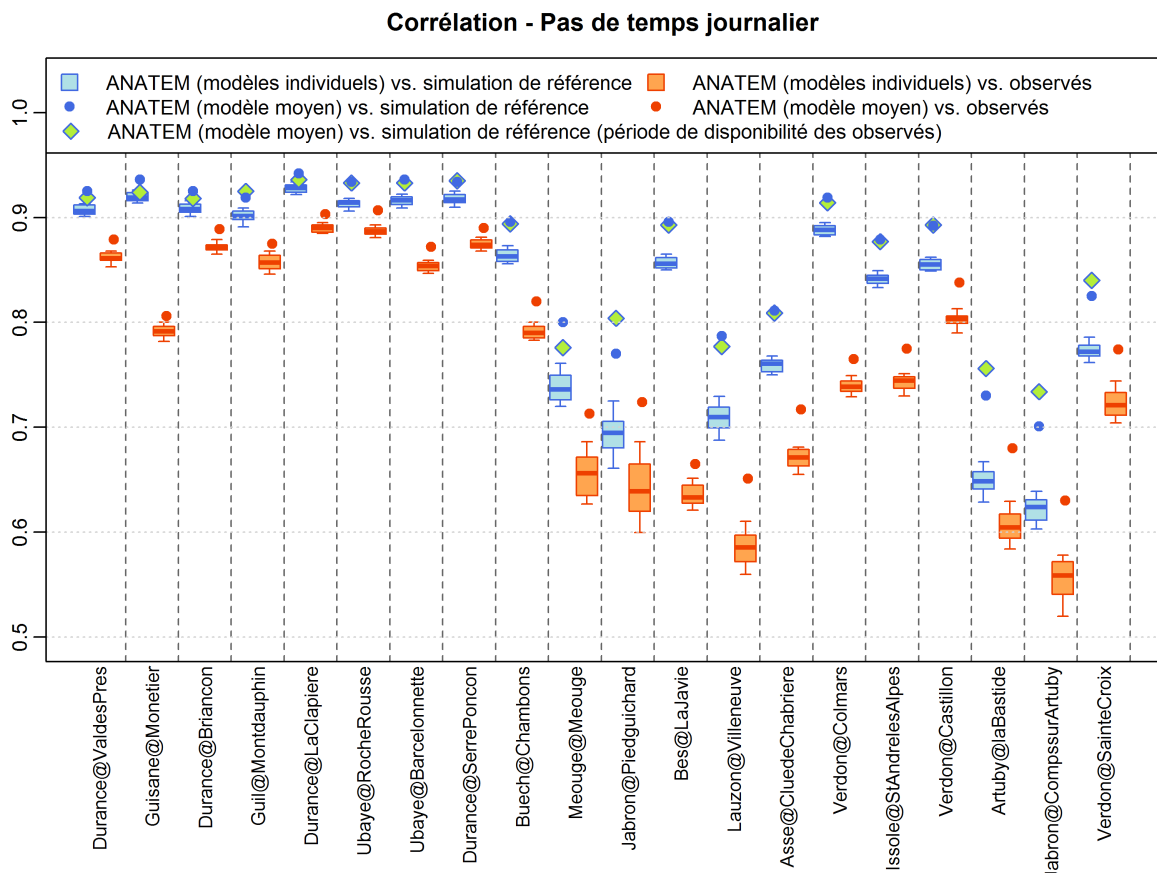


Figure 6.20 – Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Coefficient de corrélation au pas de temps journalier.

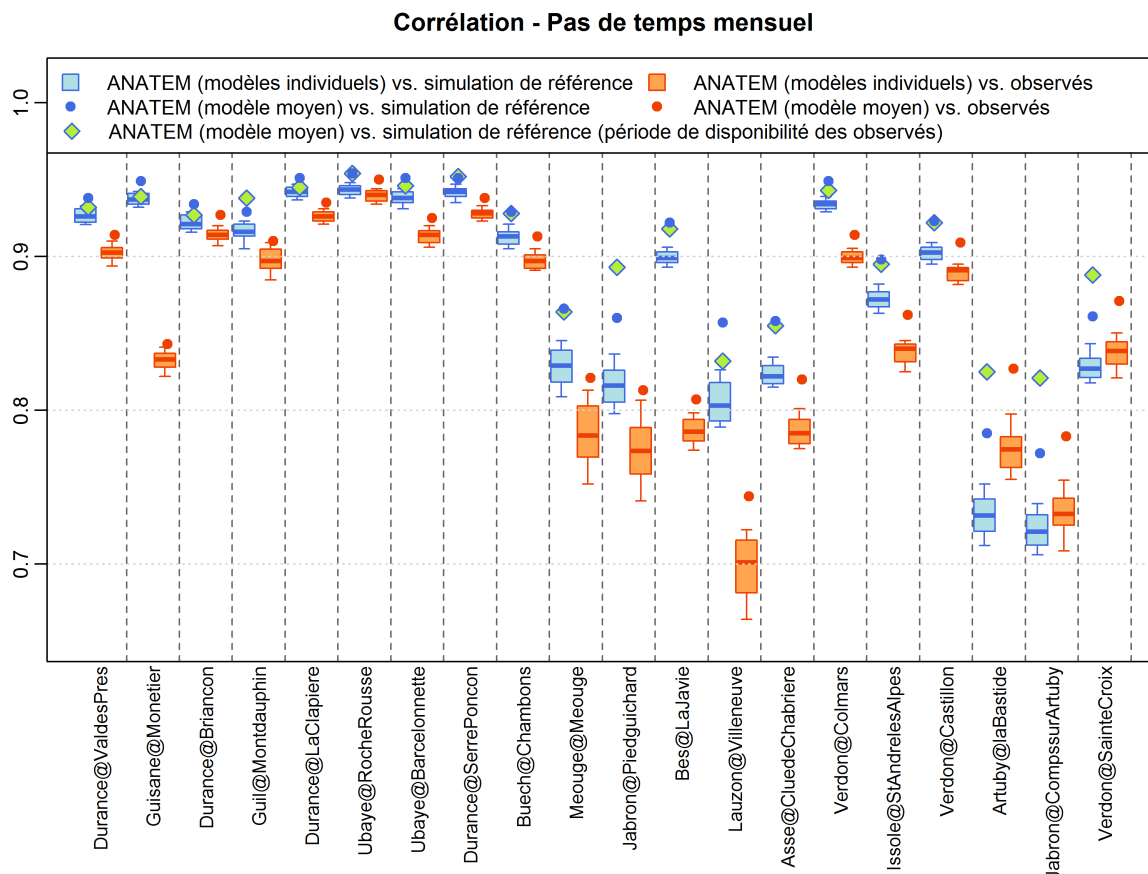


Figure 6.21 – Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Coefficient de corrélation au pas de temps mensuel.

Les graphiques présentant les corrélations aux pas de temps journalier (figure 6.20) et mensuel (figure 6.21) sont relativement semblables. Les reconstitutions hydrologiques sont globalement bien corrélées aux simulation de référence, mais aussi aux observations. Il existe cependant une assez grande disparité entre les différents bassins versants. En comparaison avec la simulation de référence, tous les bassins de la haute-Durance ont des corrélations aux pas de temps journalier et mensuel supérieures à 0.9, alors que sur certains bassins comme ceux de l'Artuby à La Bastide ou du Jabron à Comps-sur-Artuby, le coefficient de corrélation de la reconstitution moyenne est proche de 0.7 au pas de temps journalier, et de 0.8 au pas de temps mensuel.

Au pas de temps journalier, les corrélations des reconstitutions avec les observations sont systématiquement inférieures à celles calculées par rapport à la simulation de référence. De manière assez logique, l'écart le plus important entre ces deux corrélations est constaté pour le bassin du Bes à La Javie, sur lequel avait été observé la plus faible corrélation entre la simulation de référence et le débit observé (voir section I.3).

Au pas de temps annuel (figure 6.22), les corrélations calculées sont globalement inférieures à celles obtenues aux pas de temps journalier et mensuel. Excepté le cas de la Guisane au Monétier dont le modèle hydrologique est nettement moins performant au pas de temps mensuel que ceux des autres bassins (voir section I.3), les corrélations entre débits reconstitués et débits observés sont comprises entre 0.7 et 0.9. On trouve cette fois quelques bassins pour lesquels, y compris sur la même période de calcul, les reconstitutions hydrologiques sont mieux corrélées avec les observations qu'avec la simulation de référence. C'est le cas par exemple des bassins de l'Asse à la Clue de Chabrières, de l'Issole à Saint-André-les-Alpes ou du Verdon à Castillon.

D'importants biais de moyenne (figure 6.23) sont constatés sur certaines reconstitu-

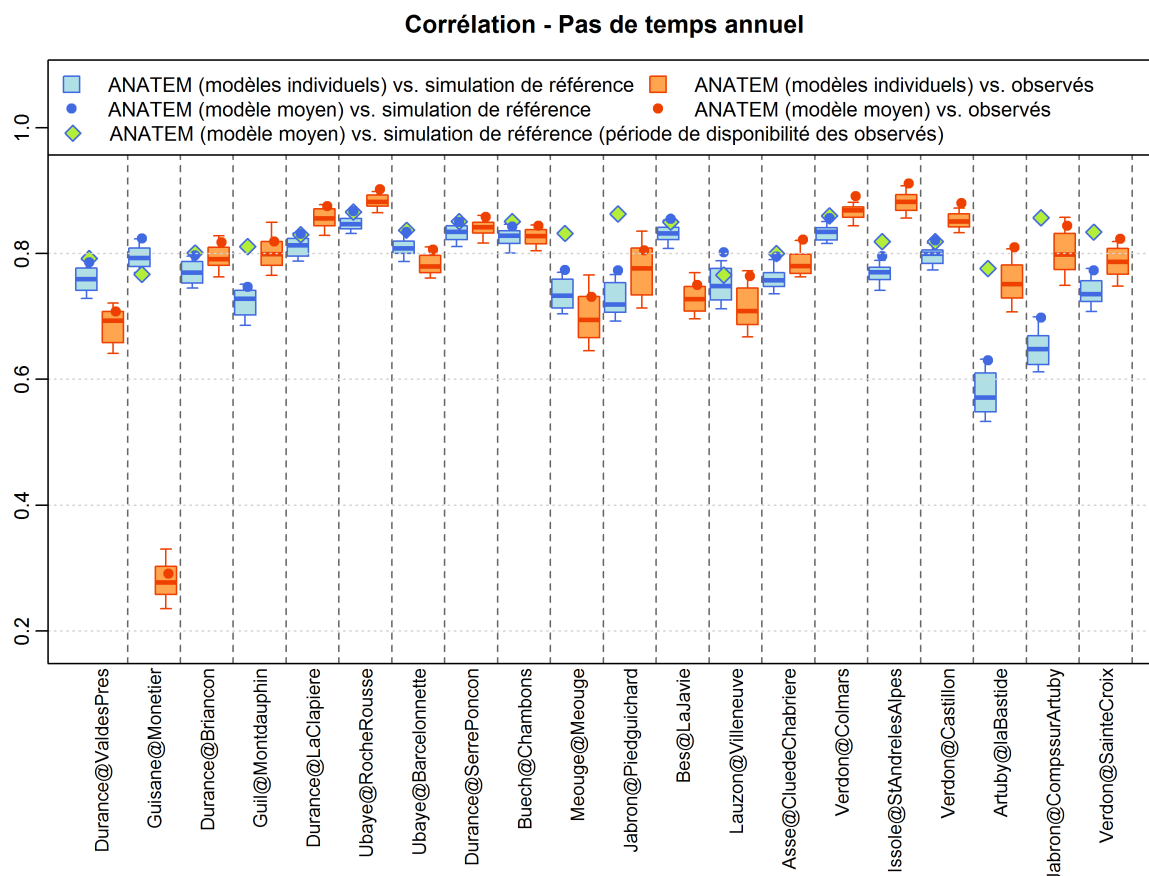


Figure 6.22 – Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Coefficient de corrélation au pas de temps annuel.

tions. Pour la plupart, ces biais sont également observables sur les chroniques annuelles présentées dans la section III.1. Les biais importants sont tous négatifs et peuvent atteindre -30% sur les bassins de l'Artuby à La Bastide et du Jabron à Comps-sur-Artuby. De manière générale, les biais constatés en comparaison aux débits observés sont du même ordre que ceux observés relativement à la simulation de référence, ce qui laisse penser que l'origine de ces biais réside plutôt dans les reconstitutions climatiques que dans l'étape de modélisation hydrologique. Douze bassins sur les 20 étudiés à ce stade présentent néanmoins des biais de moyenne par rapport aux débits observés inférieurs à 10%.

Les reconstitutions qui présentent les biais de moyenne les plus élevés sont également caractérisées par d'importants biais d'écart-type aux pas de temps journalier (figure 6.24) et mensuel (figure 6.25). Au pas de temps mensuel, la majorité des reconstitutions sont moins biaisées en écart-type par rapport aux débits observés que par rapport à la simulation de référence. On constate ici un effet de « compensation partielle » des erreurs : d'après le tableau 6.1, au pas de temps mensuel, les biais d'écart-type des simulations de référence par rapport aux débits observés sont généralement faibles (sauf pour le Bes à La Javie), mais presque systématiquement positifs, alors que les écart-types au pas de temps mensuel des reconstitutions sont toujours inférieurs à ceux des simulations de référence. Cela laisse penser qu'une sous-estimation de l'écart-type est apportée par les reconstitutions climatiques, alors que le modèle hydrologique amène à sur-estimer l'écart-type, ces deux erreurs pouvant dans certains cas se « compenser ».

Au pas de temps annuel, les ratios d'écart-type des reconstitutions par rapport aux débits observés sont compris entre 0.6 et 1.2 environ. Il est intéressant de remarquer que, pour un certain nombre de bassins, le biais d'écart-type entre la reconstitution et la simulation de référence est négatif alors que celui observé entre la même reconstitution et

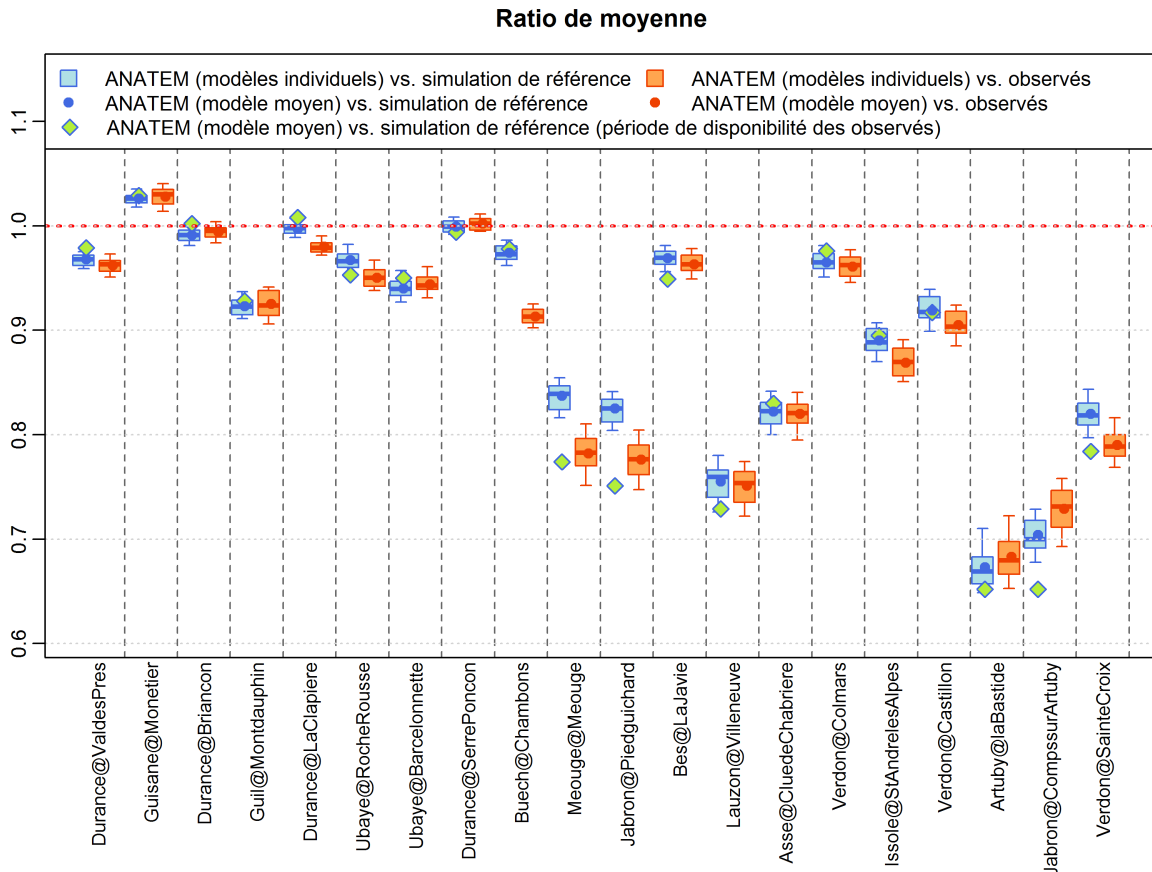


Figure 6.23 – Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Ratios de moyenne.

les débits observés est positif. On retrouve l'observation faite au pas de temps inférieur mais de manière amplifiée. Nous avons montré dans la section I.3 que sur plusieurs bassins, la simulation de référence est positivement biaisée en écart-type. Le biais d'écart-type observé entre la reconstitution via ANATEM et la simulation de référence est au contraire négatif, et cela amène, sur certains bassins, la reconstitution ANATEM à être moins biaisée en écart-type par rapport aux débits observés que ne l'est la simulation de référence. C'est le cas par exemple du bassin de la Durance à Val-des-Près. Sur ce bassin, un fort biais d'écart-type de +29% a été constaté sur la simulation de référence, mais pour la reconstitution ANATEM, qui utilise pourtant le même modèle hydrologique, ce biais est ramené à +2% environ. En revanche, sur d'autres bassins où la simulation de référence est peu biaisée ou biaisée négativement en écart-type, la reconstitution ANATEM sous-estime assez largement l'écart-type des débits observés, le biais d'écart-type pouvant atteindre -40% pour la reconstitution des débits du Jabron à Comps-sur-Artuby.

Finalement, cette analyse des chroniques annuelles et des scores obtenus sur 20 bassins versants montre que la chaîne de reconstitution que nous avons présentée peut permettre d'obtenir une reproduction de bonne qualité des débits observés sur une majorité de bassins. Cependant, une certaine disparité est apparue dans les performances des reconstitutions construites sur les différents bassins versants et, sur certains bassins comme le Jabron à Comps-sur-Artuby ou le Lauzon à Villeneuve, les reconstitutions sont imparfaites, tant en termes de corrélation que de biais d'écart-type ou de moyenne.

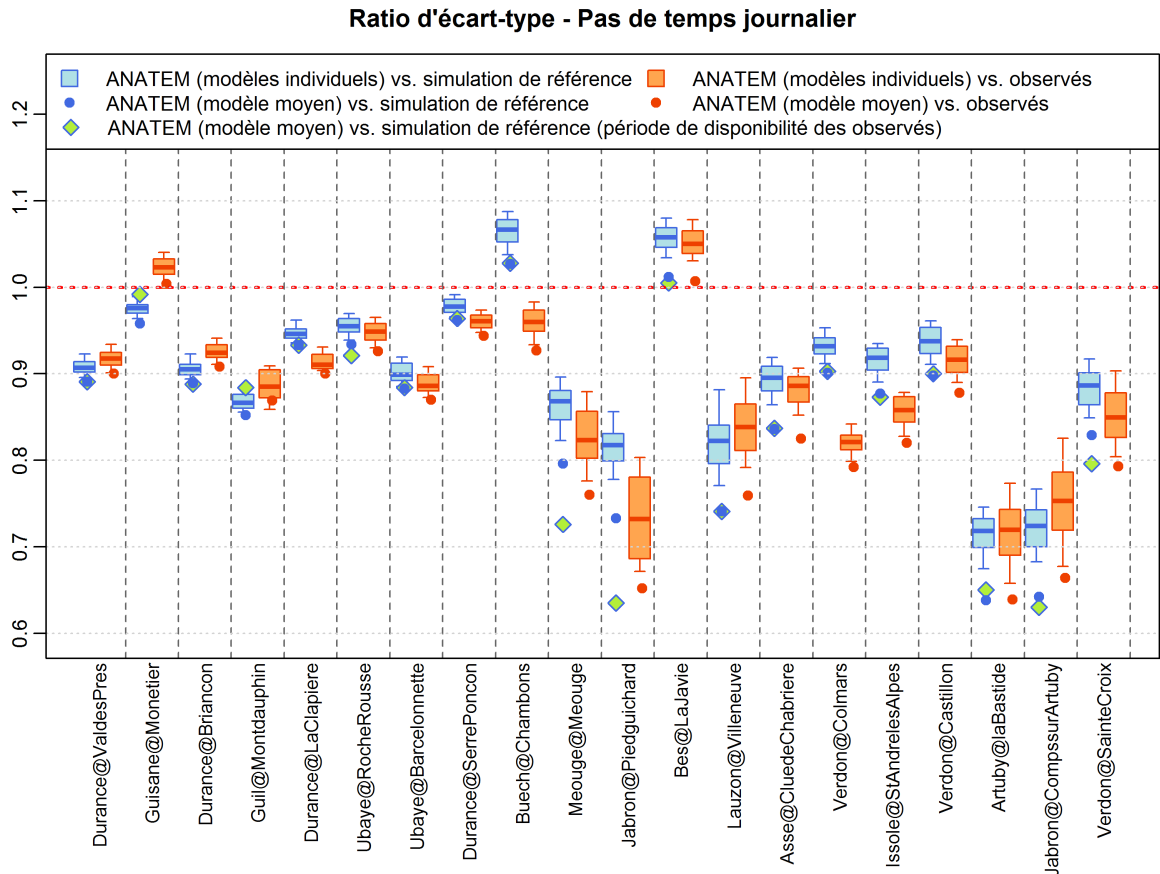


Figure 6.24 – Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Ratios d'écart-type au pas de temps journalier.

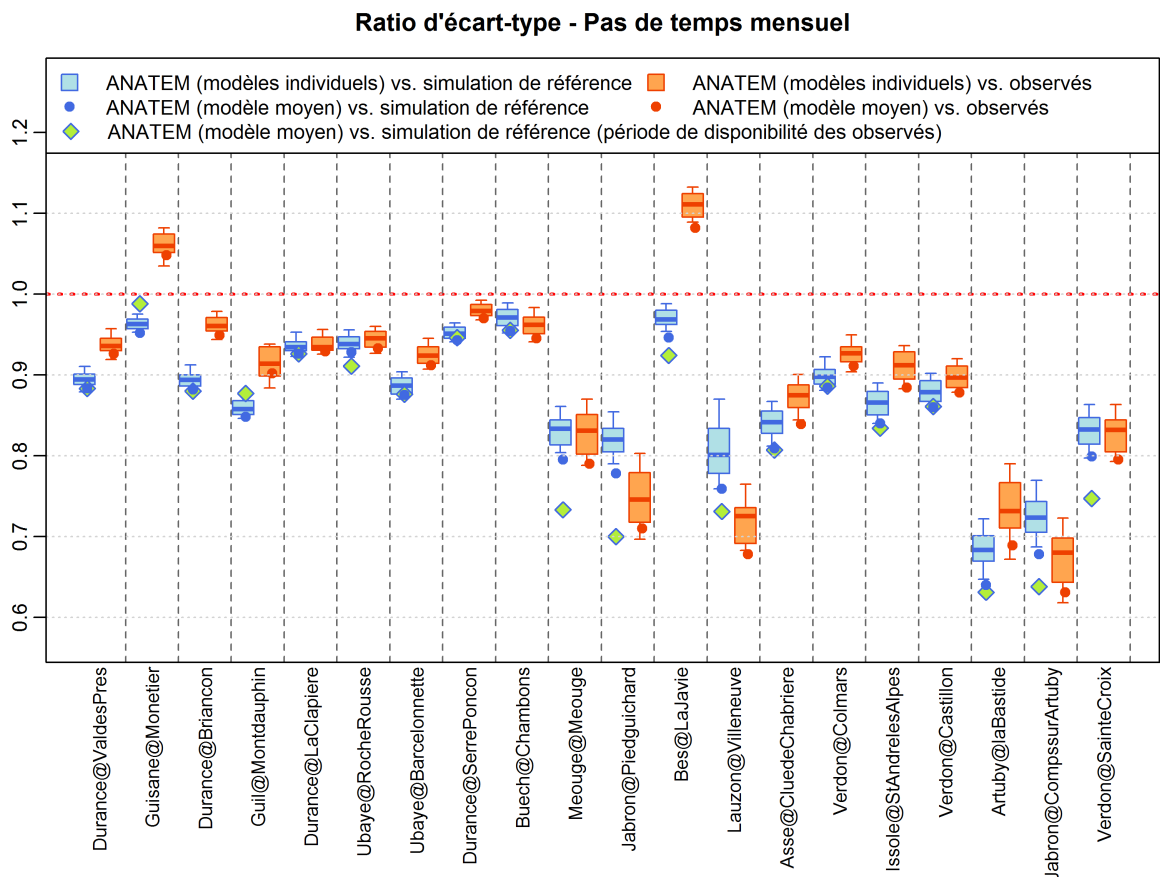


Figure 6.25 – Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Ratios d'écart-type au pas de temps mensuel.

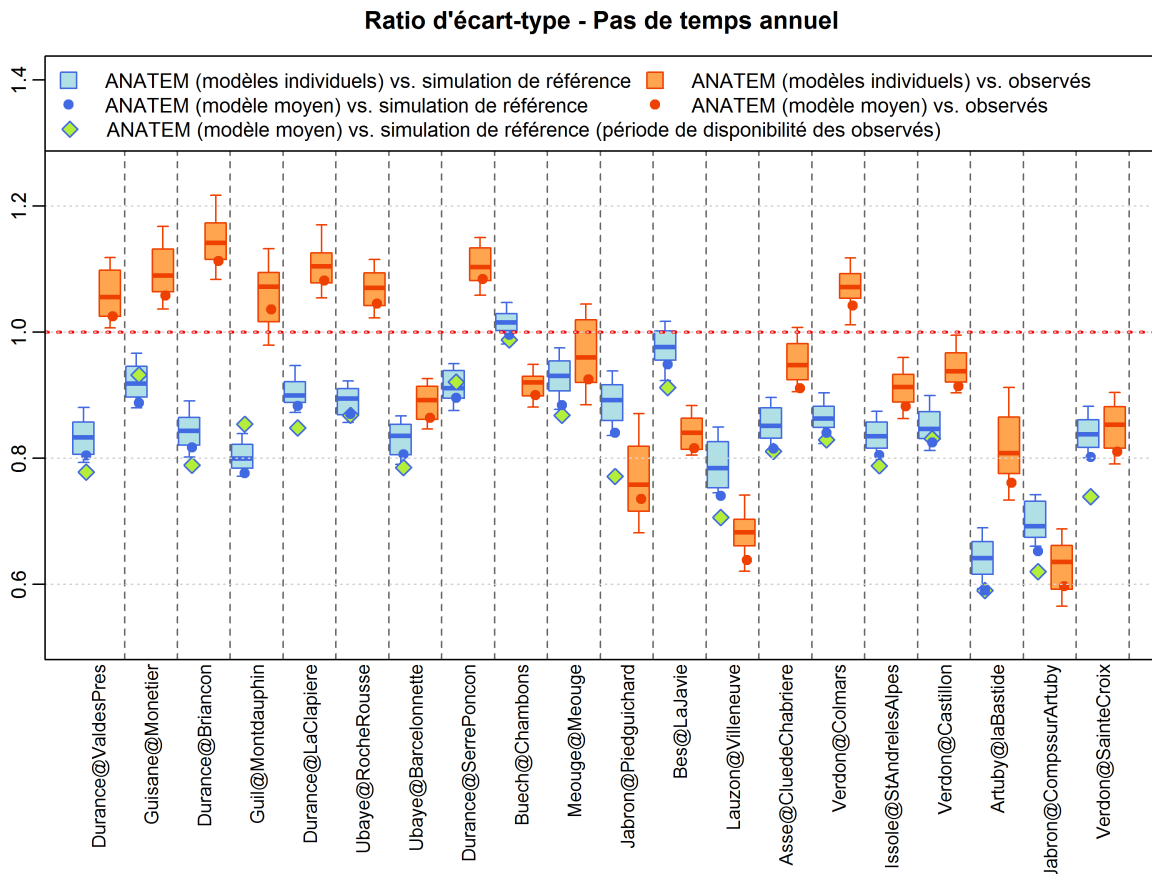


Figure 6.26 – Résultats des reconstitutions hydrologiques ANATEM sur l'échantillon de 20 bassins versants - Ratios d'écart-type au pas de temps annuel.

IV | Évaluation sur le long terme pour 8 bassins versants

Nous avons présenté dans le chapitre 2 le patrimoine de données hydrologique aujourd'hui disponibles sous forme numérique. Sur huit stations de notre échantillon d'étude, nous disposons de longues séries de débits journaliers qui vont nous permettre, dans cette section, d'évaluer sur une durée de plus de 100 ans nos reconstitutions hydrologiques. Cette validation sur le long terme n'a pu être faite à l'étape des reconstitutions climatiques puisque nous ne disposons pas sur le bassin de la Durance de données climatiques sur une aussi longue durée. Il s'agit donc ici, en comparant les observations aux reconstitutions, d'évaluer l'ensemble de la chaîne de reconstitution présentée précédemment.

IV.1 | Chroniques annuelles des reconstitutions hydro-climatiques sur 8 bassins versants

Les figures 6.27 à 6.34 présentent les chroniques annuelles des débits observés et reconstitués via la méthode ANATEM associée à la modélisation hydrologique. Nous avons également reproduit, dans la partie supérieure de chaque graphique, les reconstitutions climatiques ANATEM (précipitations et températures de l'air) du bassin versant concerné, ainsi que les chroniques de données climatiques SPAZM sur la période où elle sont disponibles, c'est-à-dire 1948-2010.

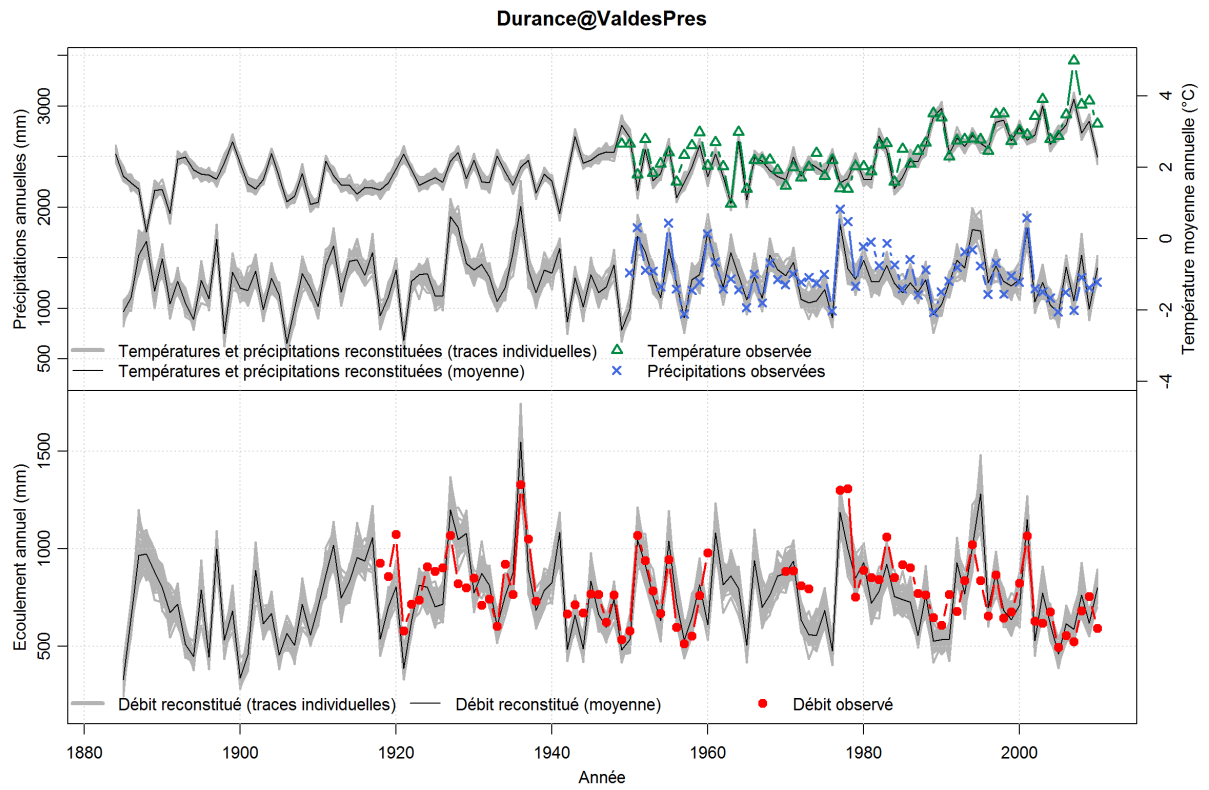


Figure 6.27 – Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de la Durance à Val-des-Près.

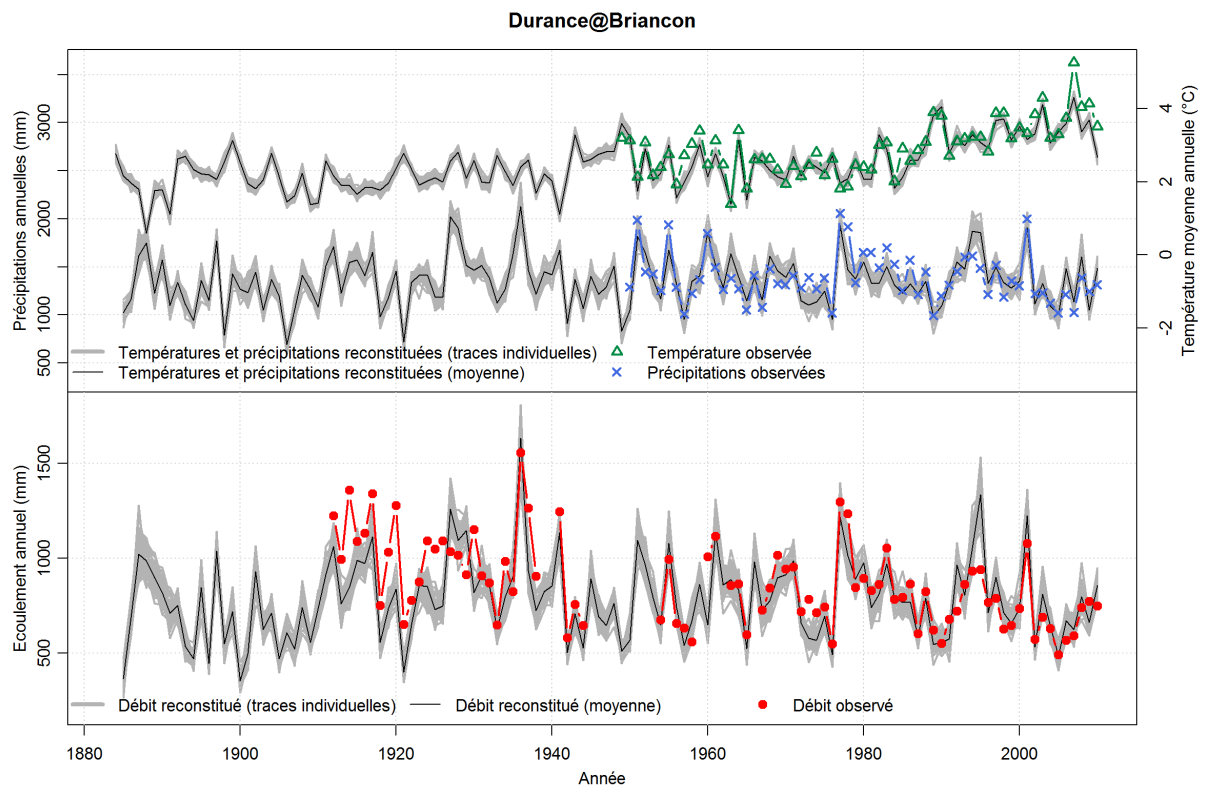


Figure 6.28 – Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de la Durance à Briançon.

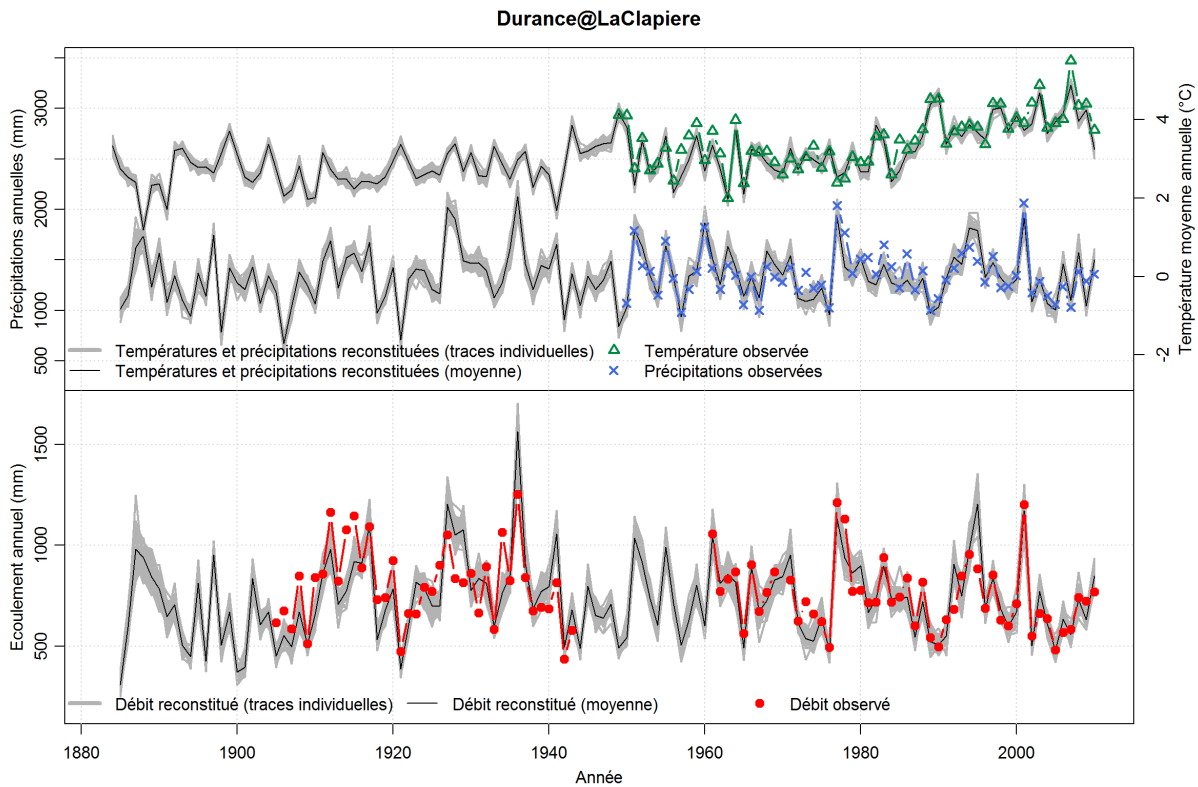


Figure 6.29 – Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de la Durance à La Clapière.

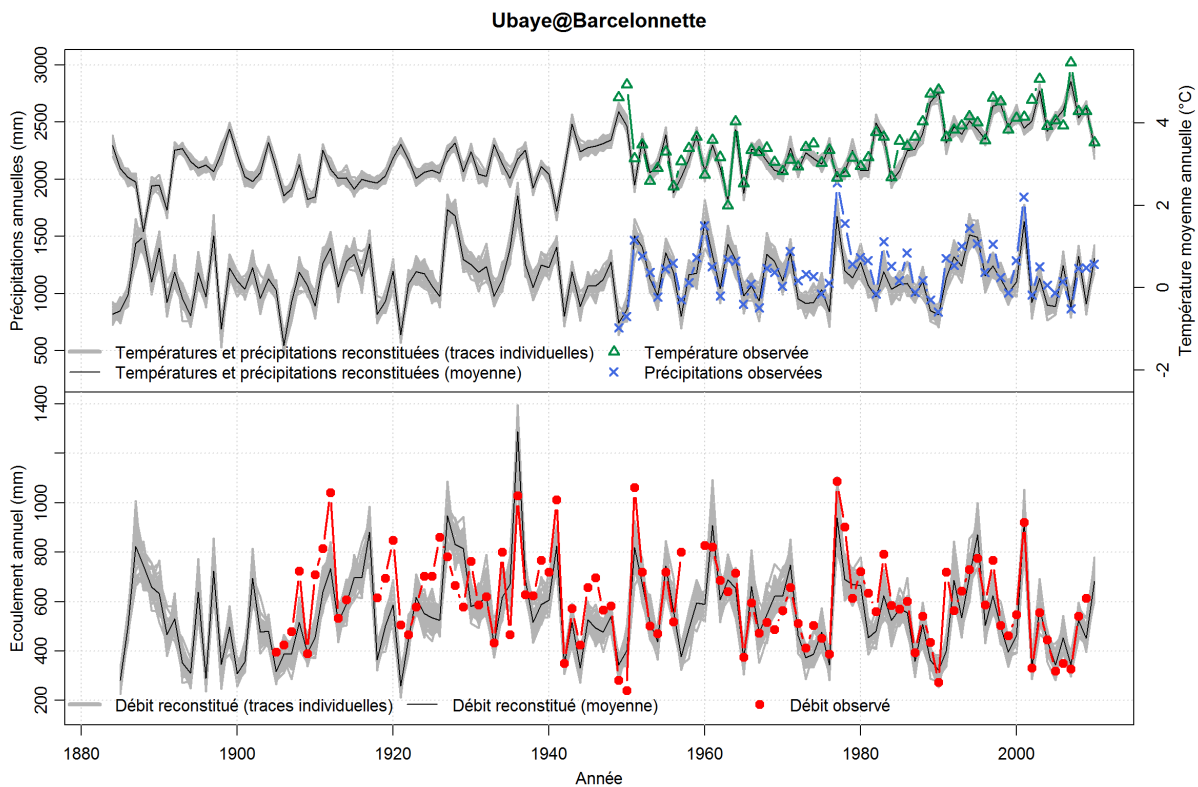


Figure 6.30 – Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette.

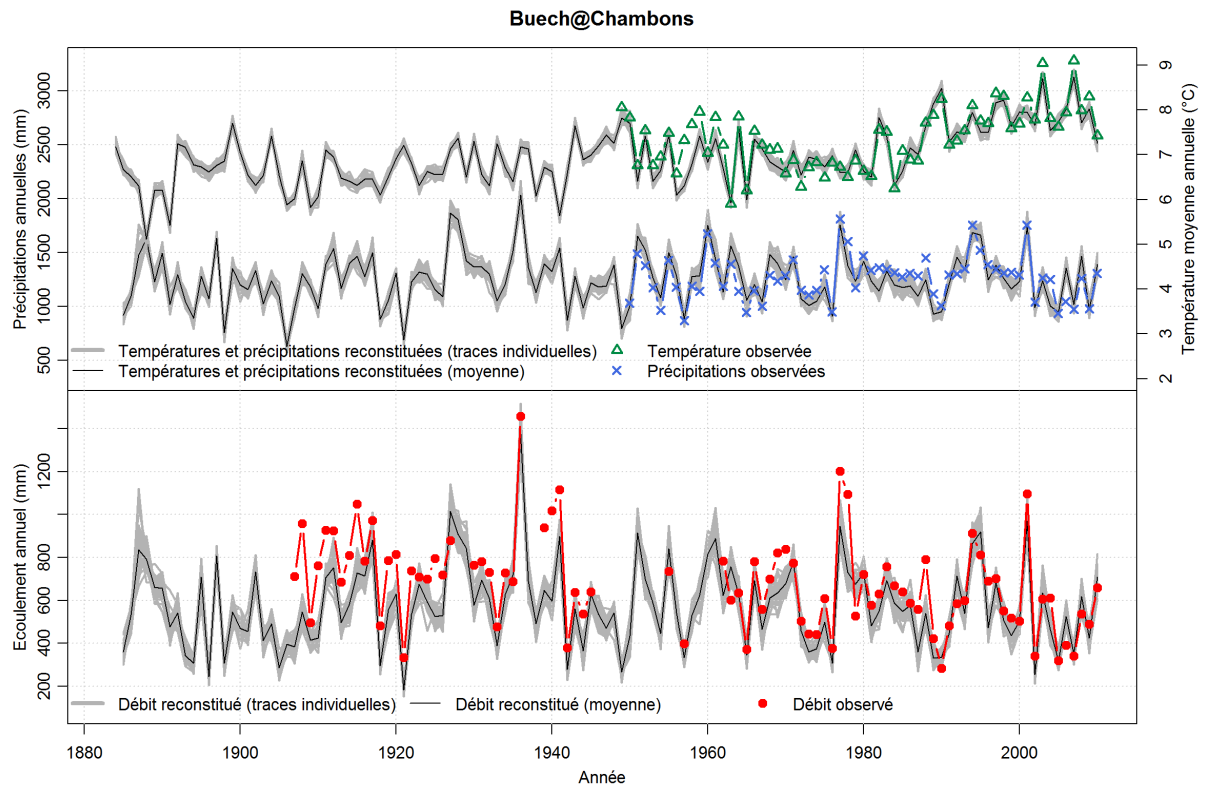


Figure 6.31 – Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin du Buech aux Chambons.

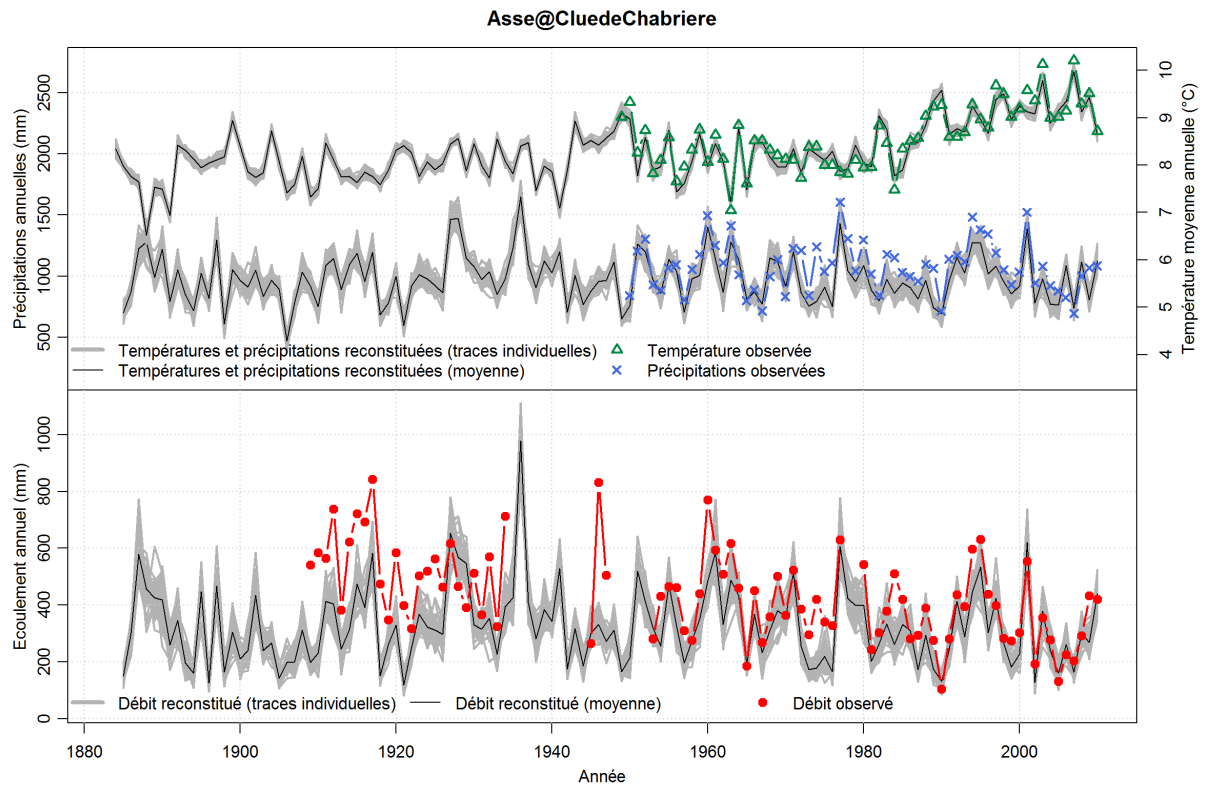


Figure 6.32 – Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de l'Asse à la Clue de Chabrières.

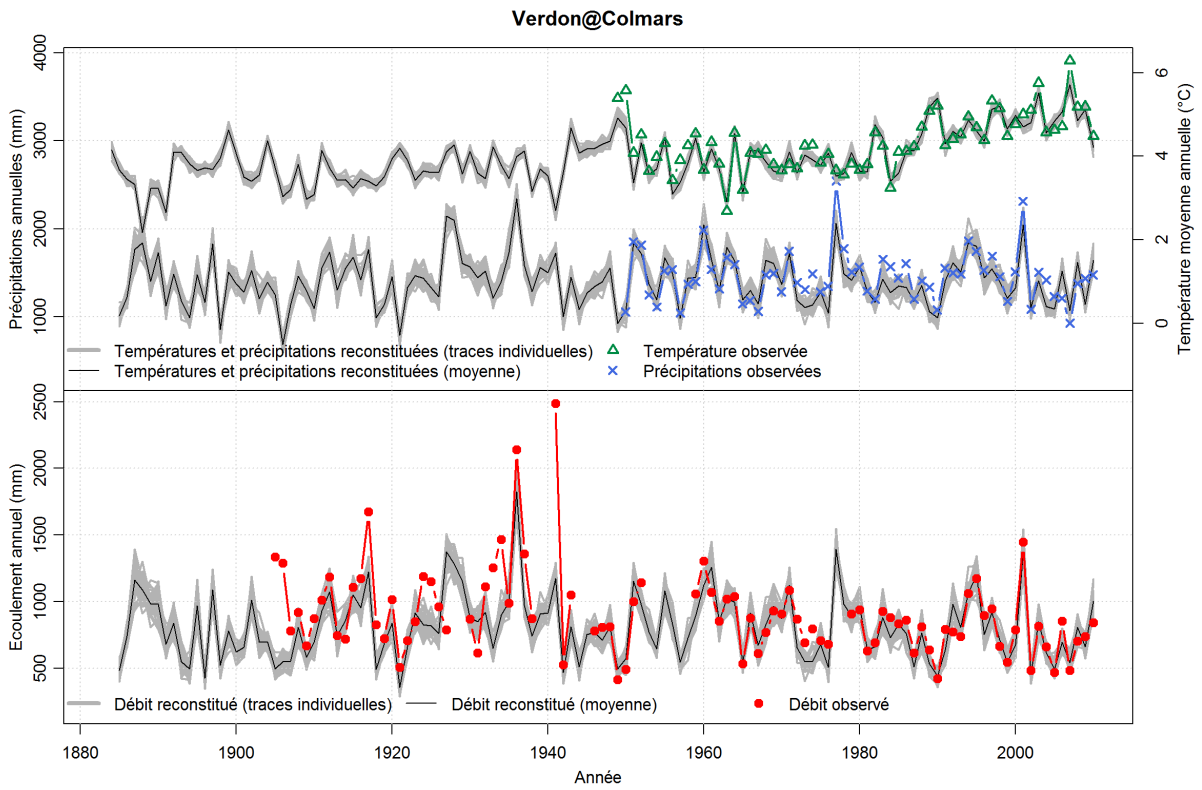


Figure 6.33 – Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin du Verdon à Colmars.

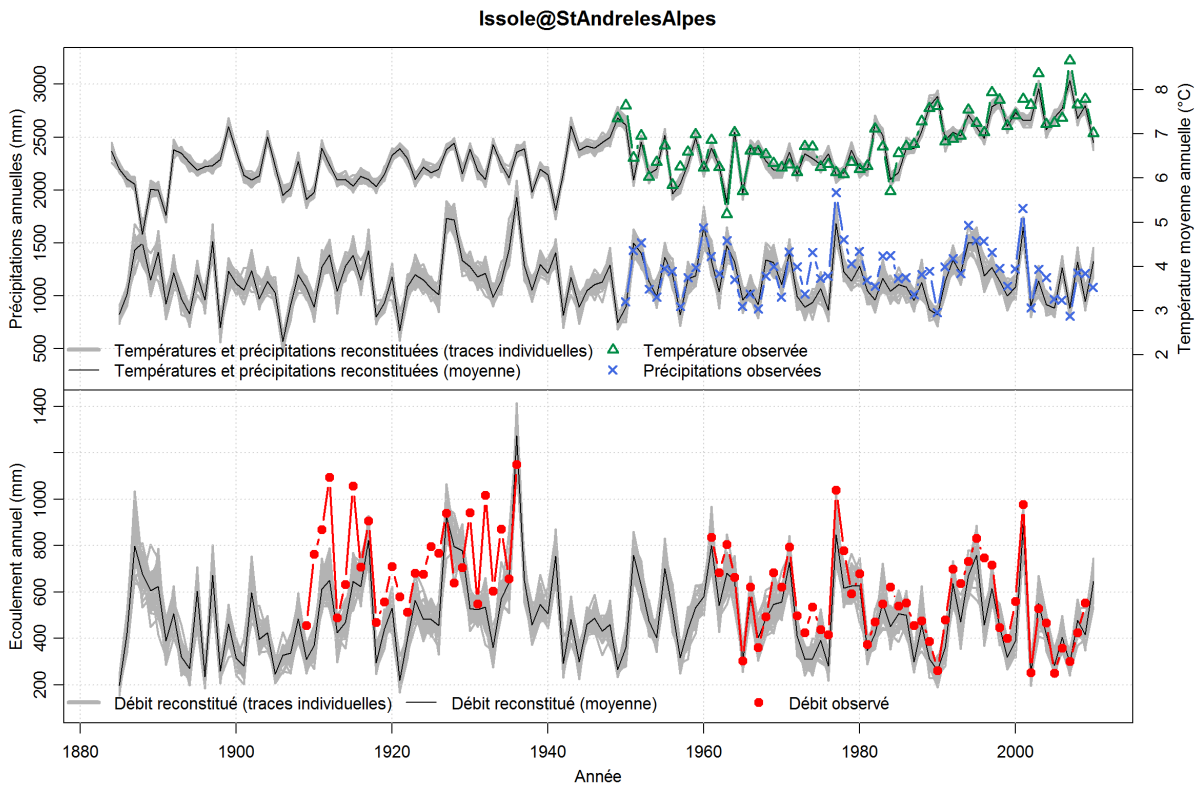


Figure 6.34 – Chroniques annuelles des observations et reconstitutions hydro-climatiques sur le bassin de l'Issole à Saint-André-les-Alpes.

L'observation des chroniques de débits met tout d'abord en évidence la bonne qualité des reconstitutions à l'échelle annuelle : la variabilité hydrologique d'une année sur l'autre est globalement bien reconstituée. Certaines séries reconstituées, comme celles de la Durance à La Clapière ou du Verdon à Colmars, recouvrent particulièrement bien les observations.

Des épisodes connus de sécheresses ou de crues sont bien représentés par les reconstitutions des différents bassins. On peut citer notamment la grande sécheresse de 1921 (Blanchard, 1922), la succession d'années sèches dans les années 1940 (Sanson et Pardé, 1950) ou les crues de l'hiver 1935 au printemps 1936 (Pardé, 1936, 1937).

Il apparaît néanmoins, sur quatre séries parmi les huit présentées ici, un comportement différent entre les périodes ancienne et récente. En effet, les reconstitutions des débits de l'Issole à Saint-André-les-Alpes et de l'Asse à la Clue de Chabrières, et dans une moindre mesure celles des débits du Buech aux Chambons et de la Durance à Briançon, sont très proches des observations à partir des années 1950, alors qu'elles sont globalement inférieures aux observés au début du siècle. C'est en particulier la période située entre le début de chaque chronique et le début des années 1930 qui semble la plus biaisée.

Il est difficile de tirer une conclusion rapide de cette observation du fait des nombreux facteurs pouvant entrer en jeu, notamment l'homogénéité des débits observés (ces quatre séries ont subi une interruption d'au moins une dizaine d'années entre les années 1930 et les années 1950, voir chapitre 2), la capacité d'un modèle calé sur la période récente à reproduire les débits du début du siècle (Coron, 2013), ou la qualité des reconstitutions climatiques qui n'a pu être évaluée sur la période ancienne faute de données observées. Le fait que seules certaines stations (mais tout de même plusieurs) soient concernées par ces observations est également étonnant : sur d'autres stations comme la Durance à Val-des-Près ou à La Clapière, la qualité de la reconstitution au pas de temps annuel est très bonne sur l'ensemble de la chronique.

En ce qui concerne la série des débits de la Durance à Briançon, on remarque trois valeurs observées bien inférieures aux autres pour les années 1905 à 1907. Les travaux d'étude d'archives présentés au chapitre 2 nous ont permis de savoir que la station de Briançon a subi un déplacement en 1908. Ce déplacement, bien que relativement faible en termes de distance, est important pour la série de débits car la station, qui était initialement en amont des confluent de la Guisane et de la Cerveyrette, a été déplacée en aval de ceux-ci. Les valeurs antérieures au déplacement ne seront donc pas prises en compte dans le calcul des scores statistiques qui vont suivre.

IV.2 | Performances en comparaison aux débits observés

Les figures 6.35 et 6.36 présentent les scores obtenus pour les reconstitutions des 8 longues séries hydrologiques. Suite aux informations faites précédemment sur les chroniques annuelles, nous avons représenté pour chaque critère et chaque série hydrologique les valeurs obtenues sur la période allant du début du siècle à 1948, sur la période 1948-2010, et sur la période complète 1904-2010.

Les corrélations au pas de temps journalier entre la série de débits reconstitués et les débits observés sont comprises entre 0.8 et 0.9 pour les bassins de la Durance à Val-des-Près, Briançon et La Clapière, de l'Ubaye à Barcelonnette et du Buech aux Chambons. Au pas de temps mensuel pour ces mêmes bassins, les corrélations sont proches de 0.9, quelle que soit la période de calcul. Les reconstitutions des séries hydrologiques de l'Asse à la Clue de Chabrières, du Verdon à Colmars et de l'Issole à Saint-André-les-Alpes sont moins bien corrélées aux observés. Leurs coefficients de corrélation calculés sur l'ensemble de la chronique varient entre 0.65 et 0.75 au pas de temps journalier, et entre 0.70 et 0.85

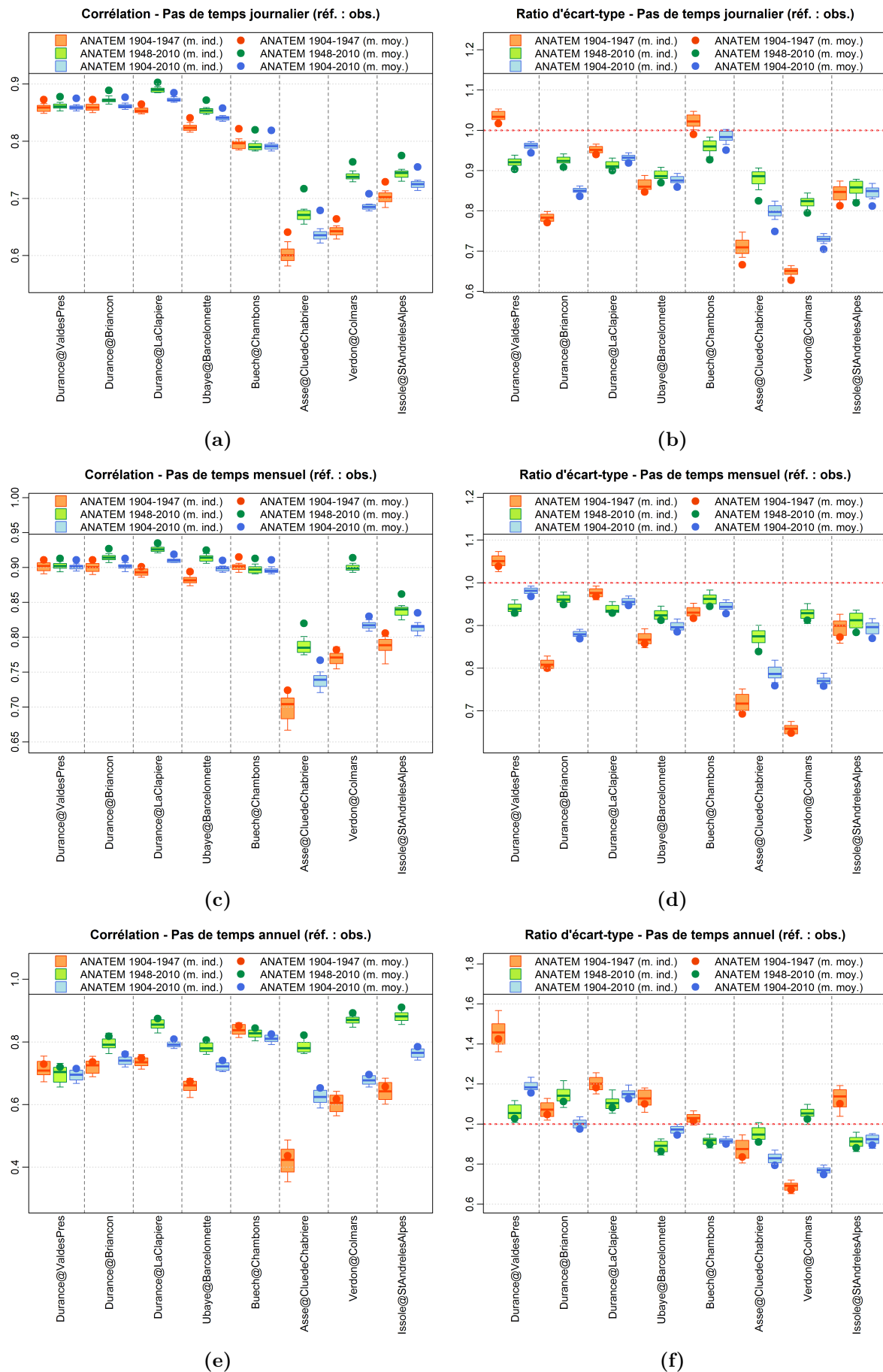


Figure 6.35 – Résultats des reconstitutions hydrologiques sur les huit bassins versants disposant d'une longue série de débits observés (Comparaison aux débits observés).

au pas de temps mensuel. Sur ces trois bassins on remarque également des différences de performances entre la période antérieure à 1948 et la période récente, cette dernière étant la mieux reconstituée.

C'est au pas de temps mensuel qu'apparaissent les différences de performance les plus importantes entre les périodes de calcul. La reconstitution moyenne des débits de l'Asse à la Clue de Chabrières en particulier est corrélée d'environ 0.45 aux observations sur la période 1904-1947, et de plus de 0.8 sur la période 1948-2010. A ce pas de temps, toutes les reconstitutions sauf celles de la Durance à Val-des-Près et du Buech aux Chambons sont mieux corrélées sur la période récente que sur la période ancienne.

Les biais d'écart-type calculés aux pas de temps journalier et mensuel sur la période complète sont négatifs pour l'ensemble des huit reconstitutions. À nouveau, les reconstitutions des séries de l'Asse à la Clue de Chabrières, du Verdon à Colmars et de l'Issole à Saint-André-les-Alpes paraissent moins performantes que celles des autres bassins : sur le Verdon à Colmars, le biais d'écart-type au pas de temps journalier de la reconstitution moyenne vaut près de -30%. Les écarts de performances d'une période à l'autre sont plus importants ici que pour les coefficients de corrélation et sont observables sur presque tous les bassins. Au pas de temps annuel, on trouve des biais d'écart-type légèrement moins importants, compris sur la période complète entre -20% et +20%.

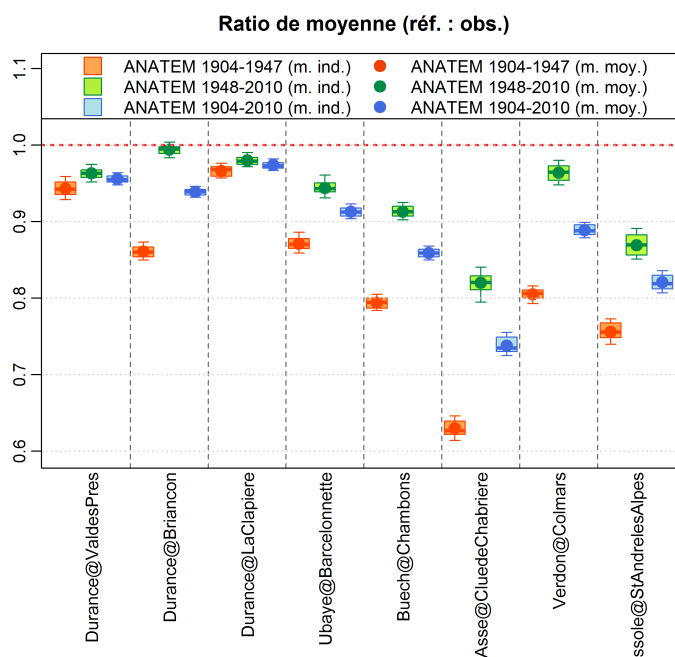


Figure 6.36 – Ratios de moyenne des reconstitutions hydrologiques sur les huit bassins versants disposant d'une longue série de débits observés (comparaison aux débits observés).

En ce qui concerne le biais de moyenne, celui-ci est également négatif sur les huit stations étudiées. Le biais le plus important est constaté sur la reconstitution de l'Asse à la Clue de Chabrières, dont la moyenne est sous-estimée d'environ -27% par rapport aux observations. Toujours sur la période complète, les biais de moyenne sont compris entre -10% et 0 pour les stations de Val-des-Près, Briançon, La Clapière et Barcelonnette.

En ce qui concerne les deux sous-périodes, on retrouve les observations faites sur les chroniques annuelles : sur les stations de Saint-André-les-Alpes, de la Clue de Chabrières, des Chambons et de Briançon, le biais de moyenne est nettement plus fort sur la période ancienne que sur la période récente. Bien que cela ne soit pas directement visible sur les chroniques, les calculs de biais montrent que ce phénomène est également présent sur les

autres stations, mais de manière moins marquée. L'écart entre les deux sous-périodes est assez important sur le Verdon à Colmars, mais l'observation des chroniques à cette station montre que, sur la période ancienne, le biais est essentiellement porté par l'année 1941, pendant laquelle le débit observé est particulièrement élevé (maximum enregistré) alors que la reconstitution ne produit pas de pointe de débit pour cette année là.

V | Validation croisée avec la dendrochronologie

Le projet « Reconstitutions hydro-climatiques EDF-ECCOREV » (Nicault *et al.*, 2012), mené en partenariat entre EDF, la fédération ECCOREV (ECosystèmes CONTinentaux et Risques EnVironnementaux) et le laboratoire CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) d'Aix-en-Provence, a eu pour objectif d'évaluer le potentiel, en France, de reconstitutions spatio-temporelles de variables portant une information hydrologique à partir de données dendrochronologiques.

Ce projet s'est focalisé sur le bassin de la Durance en raison de sa bonne couverture à la fois en données dendrochronologiques et historiques et en données hydro-climatiques. Une étape de collecte de données dendrochronologiques a permis de regrouper 38 séries de cernes de croissance des arbres localisées dans le bassin de la Durance et couvrant au minimum la période 1800-1989. Chaque série est construite à partir d'une population d'arbres d'une même espèce et situés dans une même zone. Des relations ont ensuite été recherchées entre ces séries dendrochronologiques et différentes variables hydro-climatiques (précipitations, températures, débits, enneigement).

Les résultats de ce projet ont mis en évidence des relations inattendues entre les séries dendrochronologiques et les débits de printemps. En effet, malgré l'absence de relation directe entre les débits mesurés en rivière et l'écophysiologie des arbres, de bonnes corrélations ont été trouvées entre certaines séries dendrochronologiques et certaines séries hydrologiques. Cela a permis de construire des reconstitutions hydrologiques en plusieurs stations du bassin de la Durance, et notamment à la station de La Clapière sur la Durance. À cette station, les débits moyens annuels des mois de mai et juin ont été reconstitués sur la période 1800-1989 à partir de 15 séries dendrochronologiques provenant de populations de pins cembro, espèce qui s'est avérée être la plus représentative des variables hydrologiques.

La série ainsi reconstituée est présentée, accompagnée des données observées à la station à partir de 1904 et numérisées dans le cadre de cette thèse, à la figure 6.37.

On constate sur cette figure une très bonne adéquation entre débits reconstitués et observés. Le coefficient de corrélation de cette reconstitution est de 0.78, c'est-à-dire du même ordre de grandeur que celui obtenu avec la reconstitution ANATEM de cette même série. Ces deux reconstitutions sont comparées, sur leur période commune, sur la figure 6.38.

Cette figure permet d'observer une bonne adéquation entre les deux reconstitutions pourtant construites à partir de données bien différentes, d'une part les cernes de croissance des arbres, et d'autre part une chaîne de reconstitution à partir de réanalyses de champs de pressions associées à des données climatiques régionales et utilisées en entrée d'un modèle hydrologique. Le coefficient de corrélation calculé entre ces deux reconstitutions est de 0.65 ce qui, compte-tenu de l'indépendance des données utilisées pour les construire, donne une bonne confiance dans l'une et l'autre de ces reconstitutions.

Ce résultat presque surprenant invite à multiplier ce type de comparaison entre différents types de reconstitutions basées sur des variables indépendantes et à développer la reconstitution de séries hydrologiques à partir d'indicateurs indirects. Des travaux vont

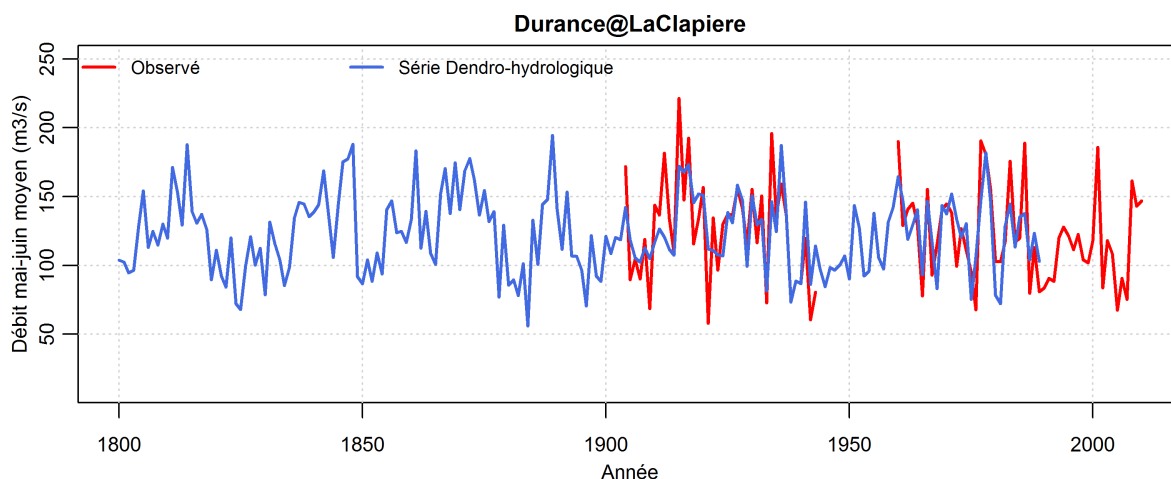


Figure 6.37 – Reconstitution des débits moyens des mois de mai et juin à la station de La Clapière sur la Durance à partir de données dendrochronologiques.

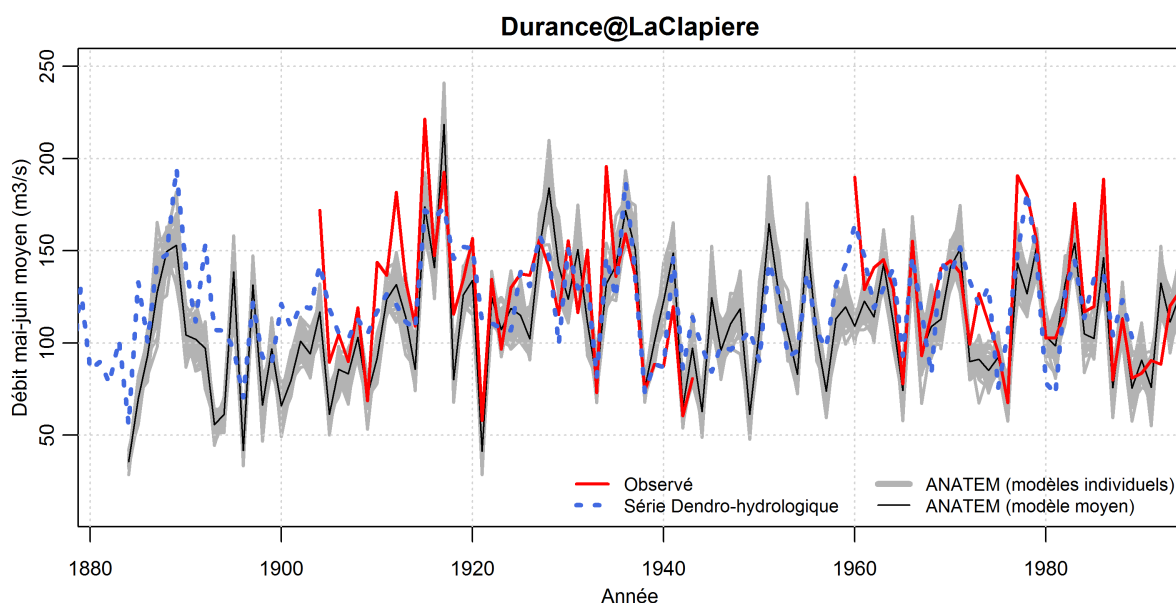


Figure 6.38 – Reconstitution dendro-hydrologique et ANATEM des débits moyens des mois de mai et juin à la station de La Clapière sur la Durance.

déjà dans ce sens en dendrochronologie (par exemple au Québec : projet ARCHIVES) ou en sédimentologie : une étude menée dans plusieurs lacs naturels alpins a notamment montré que les archives naturelles que constituent les dépôts de sédiments au fond de ces lacs permettent de retracer un historique des extrêmes hydrologiques au cours du dernier millénaire (Wilhelm, 2012; Wilhelm *et al.*, 2013).

VI | Synthèse du sixième chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre la dernière étape de reconstitution de séries hydrologiques sur le bassin de la Durance. Il s'agissait d'utiliser les reconstitutions climatiques présentées dans le chapitre 4 en entrée du modèle hydrologique MORDOR calé sur la période 1948-2010 à partir des données SPAZM. Les reconstitutions des débits journaliers en 20 points de mesure du bassin de la Durance ont ainsi été obtenues.

À la manière de ce qui a été présenté dans le chapitre 4, nous avons procédé à une étape

de validation de ces reconstitutions par comparaison aux débits observés. Cependant, les débits reconstitués ont également été comparés, sur la période 1948-2010, à une « simulation de référence » obtenue par modélisation hydrologique à partir des données SPAZM. Cette double comparaison permet de distinguer les erreurs imputables aux reconstitutions climatiques de celles liées à la modélisation hydrologique.

Nous avons conservé l'exemple du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette pour présenter dans le détail les résultats de cette comparaison, puis les performances sur la période 1948-2010 des reconstitutions sur les 20 bassins versants ont été présentées. L'évaluation s'est basée sur les mêmes critères que ceux utilisés dans le chapitre 4, à savoir la corrélation et la reproduction de l'écart-type et de la moyenne, pour les pas de temps journalier, mensuel et annuel. Les résultats obtenus en comparaison avec les débits observés sont globalement bons, mais nous avons pu remarquer une certaine disparité des performances entre les différents bassins, et sur certains bassins de la moyenne ou basse-Durance les reconstitutions peuvent présenter d'importants biais de moyenne et d'écart-type.

Malgré de bonnes performances sur une majorité de bassins, notre analyse basée sur différents critères et différents pas de temps a finalement montré que la reconstitution à long terme de chroniques hydrologiques est relativement complexe et que sur certains bassins il est difficile de reproduire, sur une période de 50 ans, *a minima* la moyenne et la variance d'une série hydrologique.

Les longues séries hydrométriques présentées dans le chapitre 2 nous ont permis d'élargir notre analyse à l'ensemble du XX^{ème} siècle pour 8 bassins versants. Les performances obtenues sur cette centaine d'années sont globalement du même ordre que celles constatées précédemment sur la période 1948-2010, ce qui met en évidence les bonnes capacités de notre chaîne de reconstitution à reproduire certaines longues séries hydrologiques. Il est cependant apparu sur certains bassins des écarts de performances importants et difficiles à expliquer entre la période antérieure à 1948 et la période 1948-2010. Cet aspect sera étudié plus en détail dans le chapitre suivant où nous analyserons la capacité des reconstitution à reproduire la variabilité basse-fréquence des chroniques de débits.

Pour finir, nous avons eu l'occasion de comparer notre reconstitution des débits de la Durance à La Clapière à une reconstitution construite uniquement à partir de données dendrochronologiques. Cette comparaison, portant sur les débits annuels moyens des mois de mai et juin a montré une très bonne adéquation entre les deux reconstitutions. Compte-tenu de la nature totalement différente des deux types de reconstitutions, un tel résultat est surprenant et augmente notre confiance en l'une et l'autre des deux méthodes employées.

Variabilité à long terme observée et reconstituée sur le bassin de la Durance

Ce septième et dernier chapitre synthétise des données hydrologiques observées et reconstituées sous l'angle de la variabilité basse fréquence des débits de la Durance au cours du dernier siècle. Une analyse de la sensibilité des reconstitutions à la période et au critère de calage du modèle hydrologique, et à l'utilisation ou non du témoin de précipitations est également proposée.

Sommaire

I	Un siècle de variabilité hydrologique...	250
I.1	... observée	250
I.2	...reconstituée	251
II	Sensibilité au calage du modèle hydrologique	253
II.1	Sensibilité au critère de calage	253
II.2	Sensibilité à la période de calage	257
III	Comparaison avec les reconstitutions obtenues sans la série témoin de Gap	260
IV	Synthèse du septième chapitre	264

I | Un siècle de variabilité hydrologique...

À la fois les données de débits observés collectées et numérisées (voir chapitre 2) et les reconstitutions hydrologiques basées sur des données climatiques de grande échelle (voir chapitre 6) permettent une illustration de la variabilité hydrologique du bassin de la Durance au cours du dernier siècle. Sans entrer dans une analyse approfondie de cette variabilité, qui devrait selon nous faire partie des perspectives de cette étude, nous en proposons dans cette section un premier aperçu.

I.1 | ... observée

La figure 7.1 présente les 8 séries de débits observés déjà présentées dans le chapitre 2 et utilisées dans le chapitre 6 (section IV). Afin de les rendre comparables entre elles, nous avons représenté pour chaque série l'anomalie de débit annuel, c'est-à-dire le débit annuel divisé par le débit moyen interannuel. Pour cette figure comme dans le reste du chapitre, la moyenne interannuelle utilisée pour le calcul des anomalies est calculée sur la période de disponibilité commune de l'ensemble des huit séries d'observations.

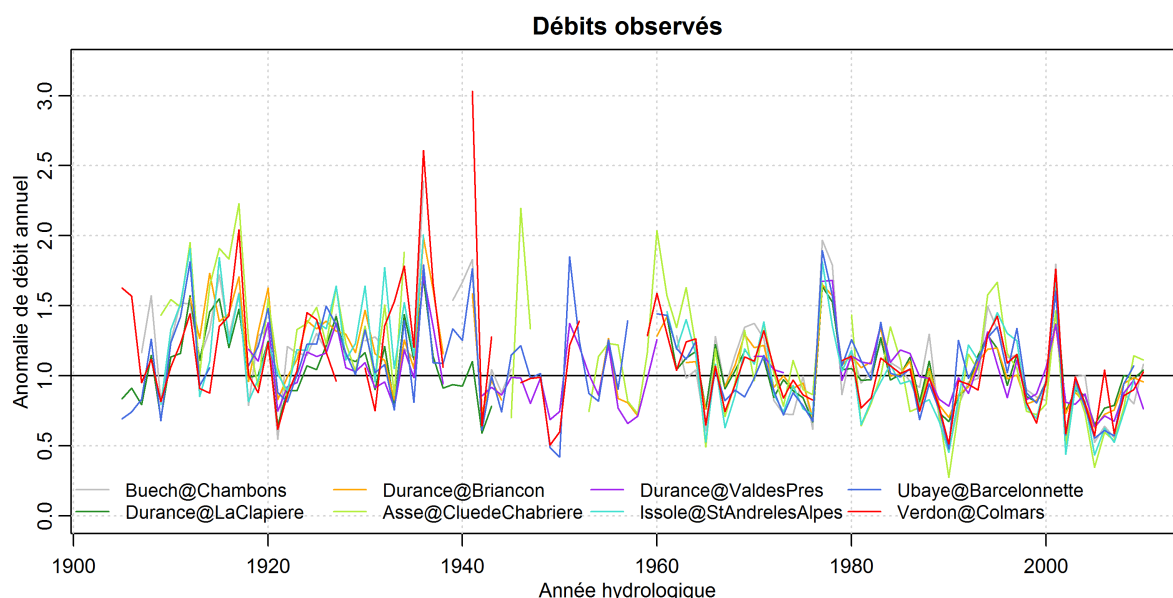


Figure 7.1 – Anomalies de débits observés en 8 points de mesure du bassin de la Durance.

La figure permet d'observer que la variabilité interannuelle des débits du bassin de la Durance est importante, avec des variations de débit annuel observé allant de 30% à 250% environ du débit moyen interannuel. Par ailleurs, il apparaît une certaine co-variabilité entre les différentes stations, en particulier sur les périodes particulièrement sèches (1921, 1990) ou particulièrement humides (1917, 1936, 1977, 2001). Une légère tendance à la baisse semble également se dessiner : les anomalies de débits annuels sont plus souvent positives en début de chronique et négatives en fin de chronique.

En traçant les mêmes séries, mais lissées par moyenne glissante sur 9 ans (figure 7.2), on peut étudier plus aisément la variabilité basse fréquence des débits observés.

Malgré des périodes manquantes relativement nombreuses, ce graphique met en évidence une sorte d'« oscillation » des débits. En effet, bien que l'amplitude et la durée de ces cycles soient irrégulières, il existe une alternance de périodes humides et de périodes sèches à l'échelle de la dizaine d'année. Ces « oscillations » sont d'une amplitude non-négligeable puisque la moyenne lissée sur 9 ans varie globalement entre 80% et 120% du

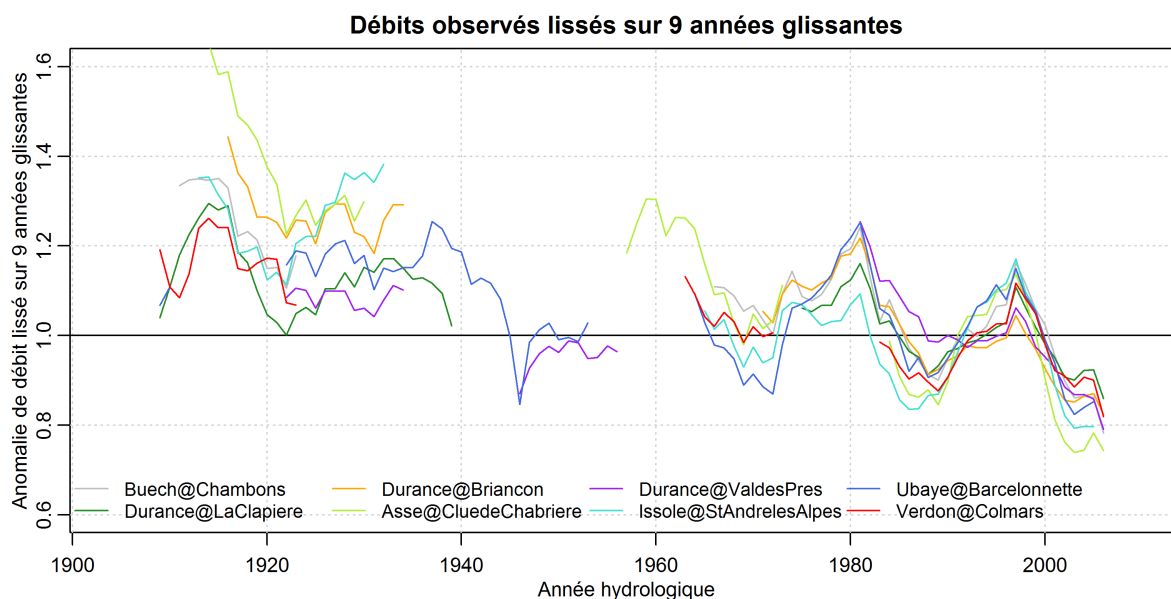


Figure 7.2 – Anomalies de débits observés en 8 points de mesure du bassin de la Durance - lissage sur neuf années glissantes.

module. De telles observations ont une grande importance pour les gestionnaires de l'eau pour lesquels, au delà des tendances sur le long terme, la prévision à l'échelle d'une décennie environ des apports naturels en eau est un enjeu majeur (prévision décennale, projet PRECLIDE, 2009-2014). Des comportements oscillatoires de ce type sont régulièrement observés pour un certain nombre de variables climatiques et caractérisent également les débits de certaines rivières, notamment en Afrique de l'Ouest (Hubert *et al.*, 2007).

À une échelle plus large, sur l'ensemble du siècle d'observations, la tendance à la baisse que l'on devinait déjà sur la figure 7.1 s'observe ici plus nettement grâce à l'atténuation des signaux plus « haute-fréquence » due au lissage.

I.2 | ...reconstituée

Les figures 7.1 et 7.2 ont mis en évidence une variabilité importante des débits observés à l'échelle annuelle, ainsi qu'une alternance de périodes humides et sèches à l'échelle de la dizaine d'années et une légère tendance à la baisse à l'échelle du siècle. Qu'en est-il des débits reconstitués ? Nous présentons dans ce paragraphe les mêmes figures que dans le paragraphe précédent, cette fois construites sur les débits reconstitués à partir des reconstitutions climatiques ANATEM (chapitre 6).

Sur les débits annuels, on remarque tout d'abord le fait que les différentes séries reconstituées covarient de manière nettement plus forte que les séries observées. Cela peut s'expliquer d'une part par le fait que les données observées peuvent être soumises à des variations d'origine météorologique ou anthropique ce qui n'est pas le cas des reconstitutions, et d'autre part par le fait que les reconstitutions sont toutes construites de la même manière, en utilisant les mêmes données synoptiques et les mêmes séries témoin pour toutes les stations.

La comparaison entre débits observés et reconstitués au pas de temps annuel a été présentée station par station dans le chapitre 6, on retrouve sur ces figures plus globales une bonne reconstitution des années sèches et humides signalées dans le paragraphe I.1.

Concernant la variabilité basse fréquence, on retrouve sur la figure 7.4 les « oscillations » constatées sur les débits observés. Bien que les premiers cycles soient moins nets sur

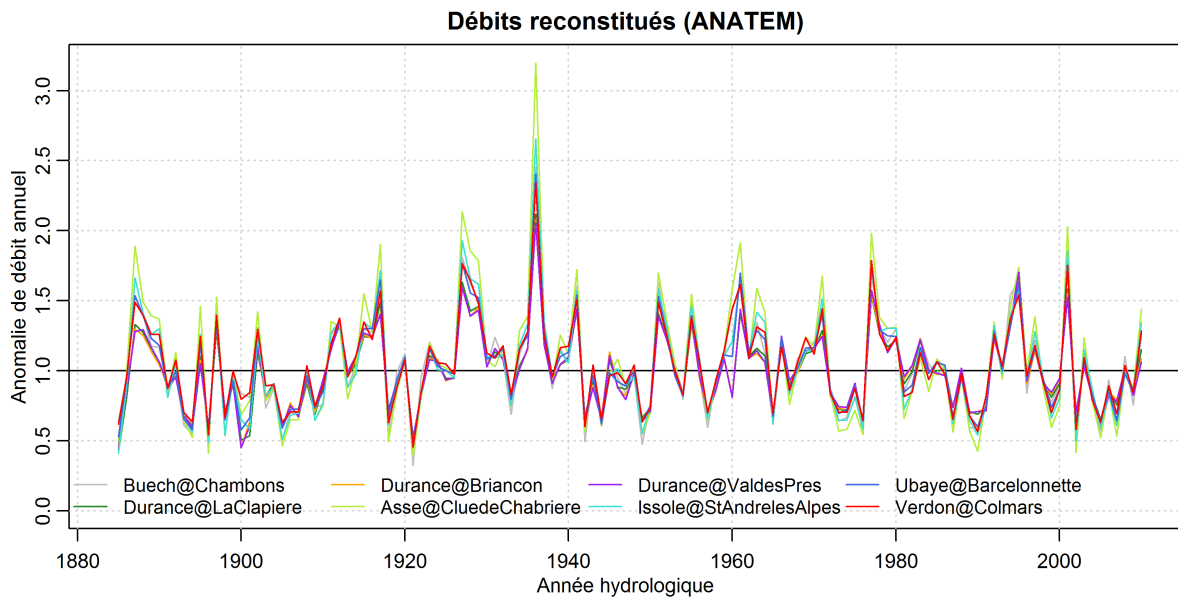


Figure 7.3 – Anomalies de débits reconstitués (ANATEM) en 8 points du bassin de la Durance.

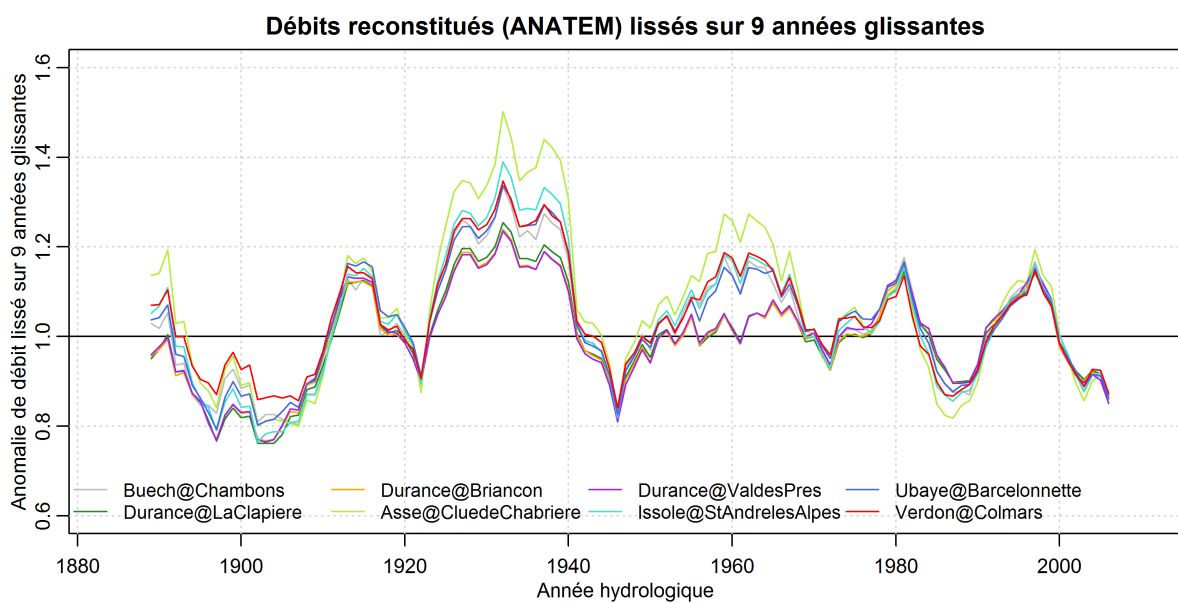


Figure 7.4 – Anomalies de débits reconstitués (ANATEM) en 8 points du bassin de la Durance - lissage sur neuf années glissantes.

les débits observés du fait notamment de la discontinuité des données, on peut remarquer que les « oscillations » des données observées et reconstituées sont bien synchronisées, avec des périodes plus humides en 1910-1915, 1925-1940, 1950-1965, 1975-1985 et 1990-2000, et des périodes plus sèches en 1915-1925, 1940-1950, 1965-1975, 1985-1990 et 2000-2010.

En revanche, la tendance à la baisse observée sur les débits observés n'est pas visible sur les débits reconstitués. Ce constat, qui rejoint les observations faites au chapitre 6 lors de l'observation des chroniques annuelles observées et reconstituées (section IV), est difficile à expliquer au premier abord. Plusieurs hypothèses peuvent être envisagées selon la confiance que l'on accorde à l'un ou l'autre des types de débits :

- les débits contiennent des hétérogénéités d'origine métrologique qui provoquent une tendance « artificielle » ;
- les débits observés sont justes et les reconstitutions ne représentent pas correctement la tendance à la baisse ;
- les débits observés et les reconstitutions sont « justes », et la tendance à la baisse est réelle mais ne s'explique pas par des phénomènes portés par les variables climatiques (évolution de la relation précipitations+températures / débits).

Concernant la première hypothèse, les analyses présentées dans le chapitre 2 ont montré qu'il pouvait effectivement exister des hétérogénéités d'origine métrologique (déplacement de station, changement de méthode d'élaboration, variabilité temporelle de la section de mesure ...) dans les séries hydrologiques. Nous avons par exemple montré que des biais de l'ordre de quelques pour-cents sur le débit moyen annuel pouvaient apparaître sur les portions de séries ayant été construites par lecture quotidienne à l'échelle, biais qui ont pu être corrigés sur les stations du Verdon à Colmars, de l'Asse à la Clue de Chabrières et du Buech aux Chambons uniquement. Cependant, le fait notamment que la tendance observée le soit sur une majorité des stations laisse penser que ces hétérogénéités potentielles ne suffisent probablement pas à expliquer le phénomène observé.

La seconde hypothèse peut être décomposée en deux possibilités : il se peut que les reconstitutions climatiques, qui ont été validées sur la période 1948-2010 uniquement, ne représentent pas correctement la période plus ancienne, ou bien il est également possible que les reconstitutions climatiques soient correctes mais que le modèle hydrologique tel que nous l'avons utilisé ne permette pas de restituer la tendance. Il n'est pas exclu que ces deux sources potentielles d'erreur soient combinées.

II | Sensibilité au calage du modèle hydrologique

Nous nous intéressons dans cette section à la sensibilité des reconstitutions au mode de calage du modèle hydrologique (voir chapitre 6, section I). Étant donné notre objectif de reconstituer la variabilité hydrologique de la Durance sur une longue période démarrant à la fin du XIX^{ème} siècle, nous nous intéressons spécialement à l'impact du mode de calage sur la variabilité basse fréquence de la série reconstituée. Pour cela, nous proposons simplement d'observer, pour chacun des huit bassins sur lesquels nous disposons de longues séries hydrologiques, les chroniques lissées sur 9 ans de la série observée et de plusieurs reconstitutions basées sur des modes de calage différents.

II.1 | Sensibilité au critère de calage

Nous comparons dans cette section les reconstitutions obtenues sur les huit bassins versants dotés d'une longue série hydrologique avec différents critères de calage du modèle hydrologique. Les reconstitutions hydrologiques présentées ici sont construites de la

manière suivante :

- Données climatiques en entrée du modèle hydrologique : reconstitutions ANATEM (voir chapitre 4)
 - données synoptiques : champs de géopotentiels de la réanalyse NOAA ;
 - donnée régionale témoin pour les températures de l'air : série de températures de l'air observées à Marseille ;
 - donnée régionale témoin pour les précipitations : série de précipitations observées à Gap ;
- Modèle hydrologique MORDOR (voir chapitre 6) calé sur la période 1948-2010 à l'aide des différents critères décrits dans le chapitre 6 : **Q**, **INVQ**, **QCL**, **REG**, **VCN**, **COMP**.

Pour chaque bassin versant, nous avons donc construit six reconstitutions hydrologiques à partir des six modèles hydrologiques calés selon les différents critères. Nous représentons sur les figures 7.5 et 7.6 les anomalies des moyennes glissantes sur 9 ans de ces reconstitutions, ainsi que de la série de débits observés au pas de temps annuel (« obs. non lissé ») et de sa moyenne glissante sur 9 ans (« obs. lissé »). Les corrélations obtenues au pas de temps annuel entre la reconstitution et la série observée sont indiquées pour chaque critère entre parenthèses dans la légende. La représentation en anomalies de débits (ratios entre le débit annuel et le débit moyen interannuel) permet de faciliter les comparaisons entre stations et de se focaliser sur la représentation de la variabilité des débits pluri-annuels. Les éventuels biais des reconstitutions ne sont en revanche pas visibles sur ces représentations.

Dans l'ensemble, l'influence du critère de calage du modèle hydrologique sur les chroniques basse fréquence des reconstitutions de débits est modérée. On observe toutefois sur certains bassins quelques écarts entre les reconstitutions, principalement sur la période 1890-1905 où les débits modélisés sont les plus faibles. Les écarts de corrélation entre les différents calages sont très faibles.

Sur les bassins où il existe des différences importantes entre les séries lissées observées et reconstituées, il apparaît que le changement du critère de calage du modèle hydrologique ne permet pas un meilleur recouvrement, en particulier en ce qui concerne la reconstitution de la tendance à la baisse observée sur certaines séries.

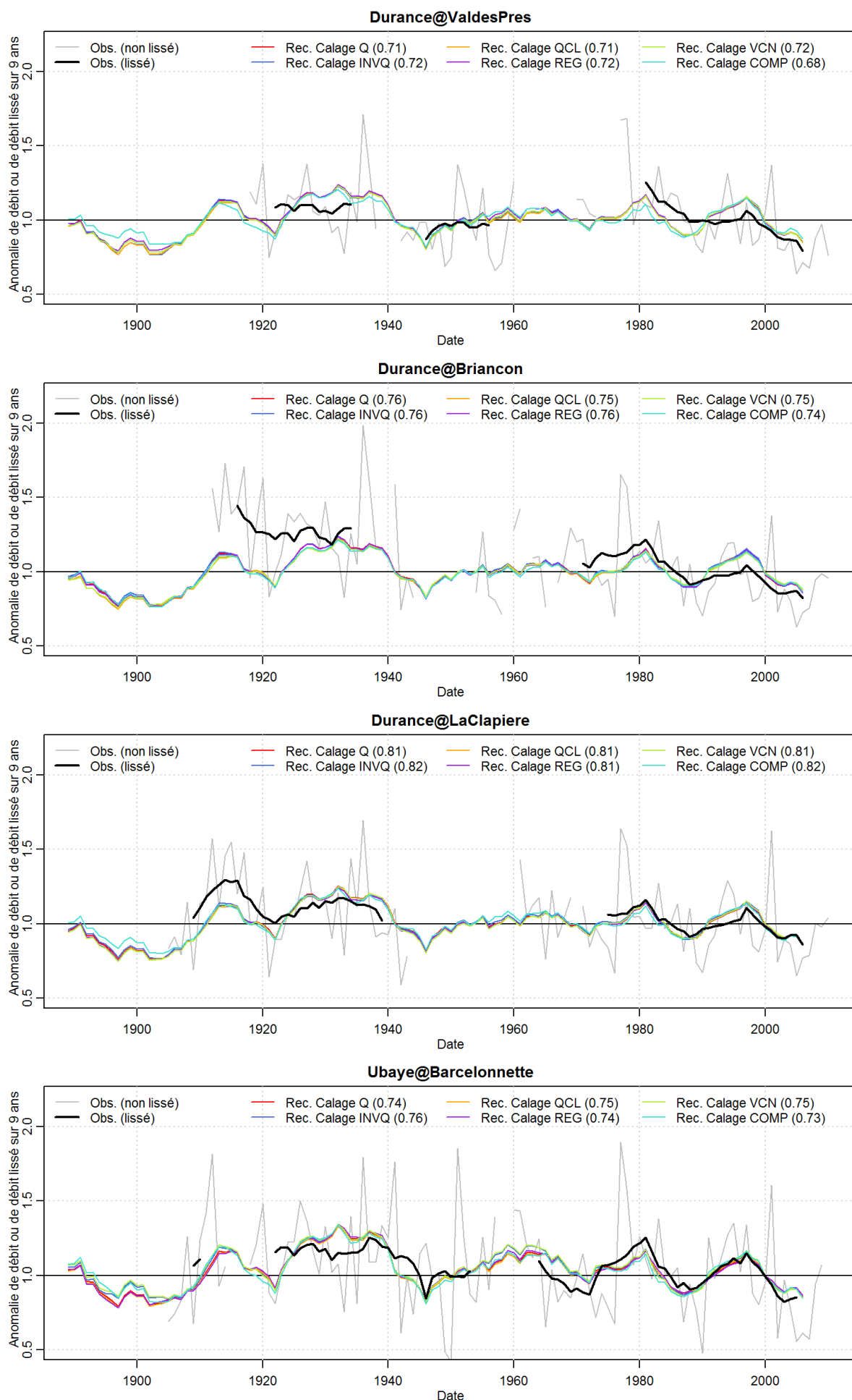


Figure 7.5 – Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques de la Durance à Val-des-Près, à Briançon et à La Clapière, et de l’Ubaye à Barcelonnette selon le critère de calage du modèle.

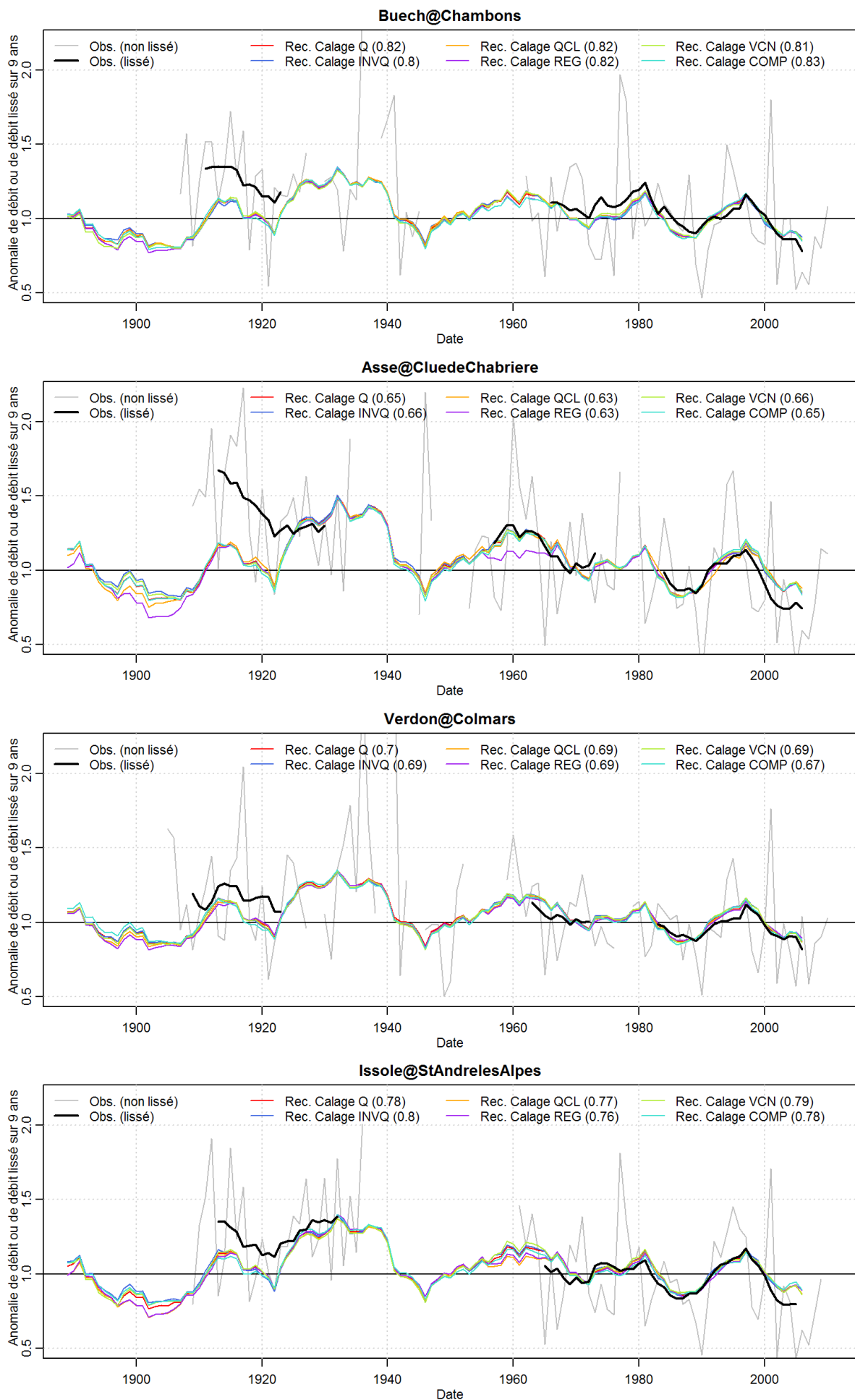


Figure 7.6 – Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques du Buech aux Chambons, de l'Asse à la Clue de Chabrières, du Verdon à Colmars et de l'Issole à Saint-André-les-Alpes selon le critère de calage du modèle.

II.2 | Sensibilité à la période de calage

L. Coron (2013) a mis en évidence des problématiques de transposabilité temporelle des paramètres d'un modèle hydrologique conceptuel comme MORDOR. Ces problématiques sont importantes dans le cadre de nos reconstitutions puisqu'il s'agit de simuler des débits sur une période antérieure, et présentant potentiellement des caractéristiques différentes de la période de calage.

Nous cherchons donc dans ce paragraphe à évaluer la sensibilité de nos longues reconstitutions de débits à la période de calage du modèle hydrologique. Nous procédons pour cela de la même manière que dans le paragraphe II.1. Les figures 7.7 et 7.8 montrent les chroniques lissées sur 9 ans des reconstitutions moyennes obtenues avec des modèles hydrologiques calés sur différentes périodes. Les périodes choisies sont issues de la sélection de sous-périodes utilisées pour les tests d'intercomparaison des modèles hydrologiques menés dans le cadre du projet R²D² 2050 (voir chapitre 6, section I). Pour chaque station, six périodes de calage sont comparées :

- la période « complète » 1948-2010,
- deux périodes de 15 ans 1980-1994 et 1994-2009,
- trois périodes contrastées de cinq ans 1983-1988, 1993-1998 et 2004-2009

Le critère de calage du modèle est fixe, il s'agit du critère « **Q** » (KGE sur les débits journaliers).

Tout comme le critère de calage, la période de calage semble avoir peu d'influence sur la capacité du modèle à représenter la variabilité hydrologique à l'échelle de la dizaine d'années. Le choix de la période de calage ne semble pas non plus jouer sur la reproduction des éventuelles tendances par la reconstitution.

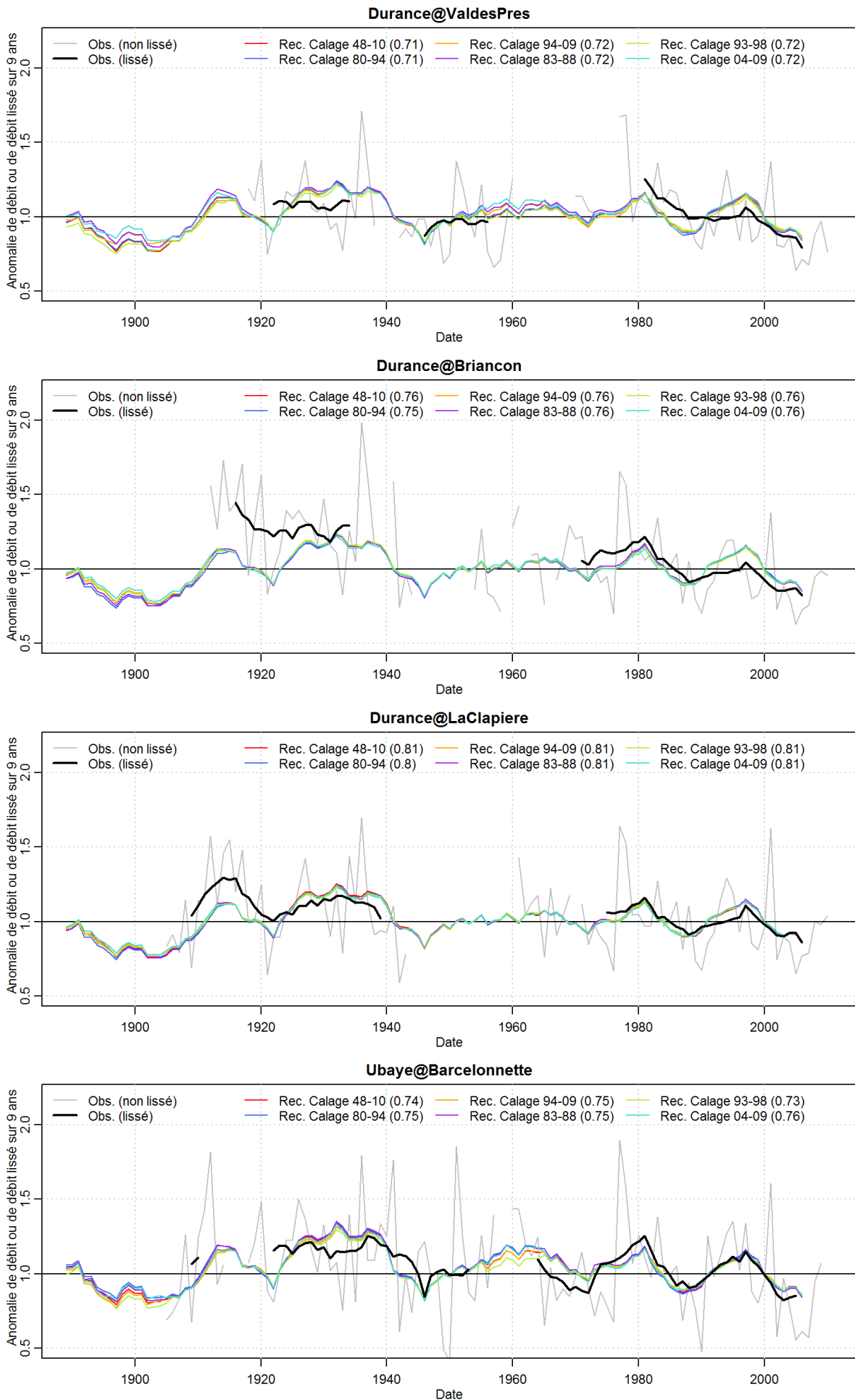


Figure 7.7 – Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques de la Durance à Val-des-Près, à Briançon et à La Clapière, et de l’Ubaye à Barcelonnette selon la période de calage du modèle.

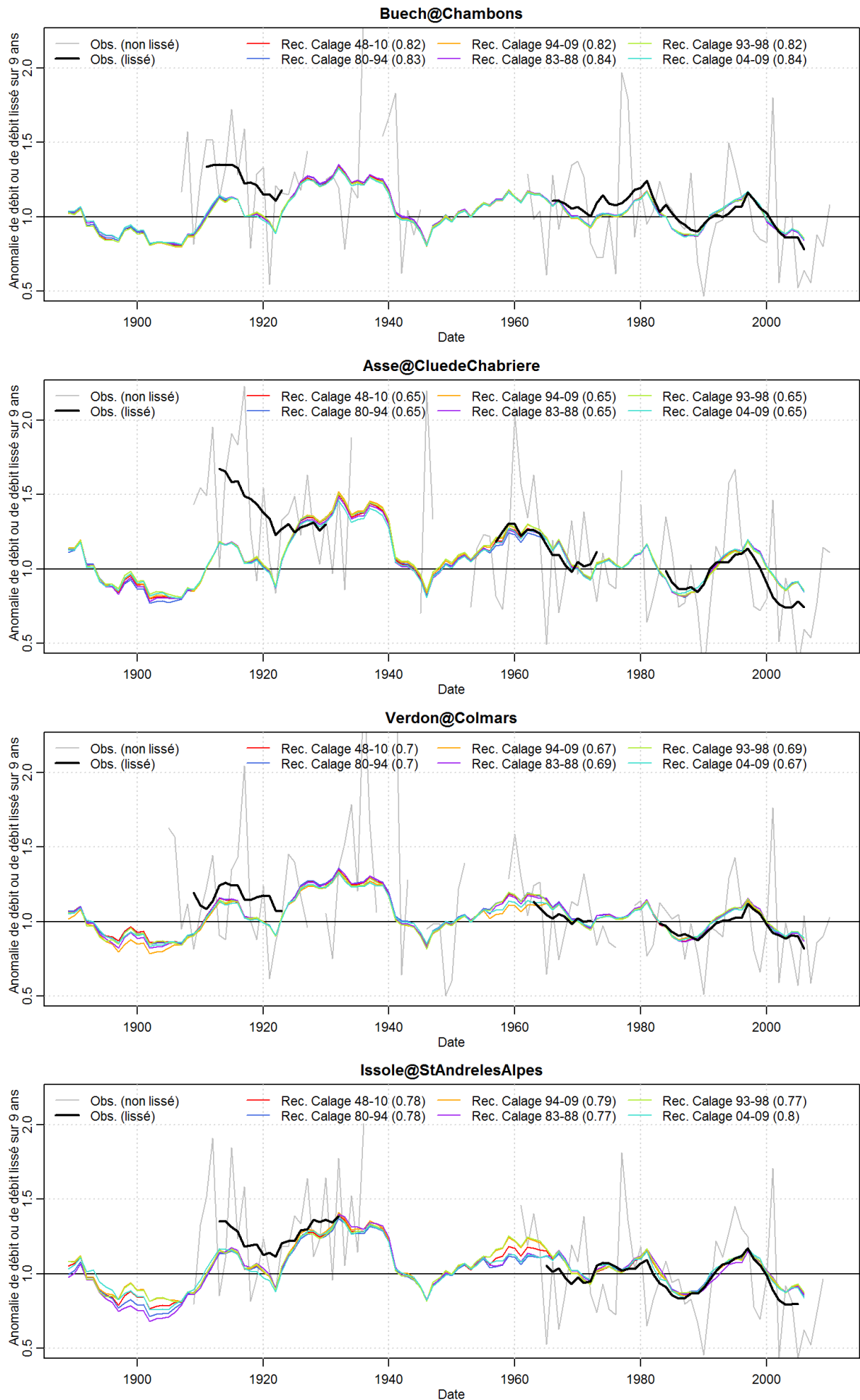


Figure 7.8 – Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques du Buech aux Chambons, de l'Asse à la Clue de Chabrières, du Verdon à Colmars et de l'Issole à Saint-André-les-Alpes selon la période de calage du modèle.

III | Comparaison avec les reconstitutions obtenues sans la série témoin de Gap

Des analyses sur le long terme menées sur les reconstitutions de précipitations (voir chapitre 5, section IV) ont montré certaines différences dans la variabilité long terme entre la série d'observations à Gap et sa reconstitution par la méthode des analogues, en particulier au début du XX^{ème} siècle. Ces analyses n'ont pas permis de conclure sur la source de ces écarts, mais compte-tenu de ces observations et de celles effectuées dans la section I, ils nous paraissent intéressants de comparer, au niveau de l'étape finale de reconstitution hydrologique, les résultats obtenus avec ou sans le témoin de précipitations de Gap.

À la manière de ce qui a été présenté dans la section II, nous avons représenté sur les figures 7.9 et 7.10 les moyennes interannuelles lissées des anomalies de débits observés et reconstitués pour deux types de reconstitutions :

- (ANATEM) : les précipitations et les températures de l'air sont reconstituées en utilisant la méthode ANATEM (témoin températures Marseille et précipitations Gap) ;
- (T ANATEM, P ANA) : les températures de l'air sont reconstituées par la méthode ANATEM (témoin Marseille) et les précipitations par la méthode des analogues.

Pour toutes ces reconstitutions le modèle hydrologique utilisé est le modèle calé sur la période 1948-2010 avec le critère de calage « Q » (KGE sur les débits).

Pour la majorité des stations, les reconstitutions (T ANATEM, P ANA) et ANATEM sont semblables sur la période 1925-1990 environ, et reconstituent de manière correcte la variabilité basse fréquence des observations. On observe en revanche des écarts importants entre ces deux reconstitutions pour toutes les stations sur la période antérieure à 1925, et pour une majorité de stations sur la période postérieure à 1990.

Pendant la période 1885-1925, la reconstitution (T ANATEM, P ANA) est supérieure d'environ 20% à plus de 50% à la reconstitution ANATEM. Sur plusieurs stations comme la Durance à Briançon, le Buech aux Chambons, l'Asse à la Clue de Chabrières ou le Verdon à Colmars, où l'on avait observé des écarts de performance importants entre période ancienne et période récente sur les reconstitutions ANATEM (voir chapitre 6), la reconstitution (T ANATEM, P ANA) est plus proche des observations. Les écarts observés ne sont pas étonnants si l'on se rappelle les observations faites au chapitre 5 (section IV) lorsque la série de Gap était comparée à ses reconstitutions par la méthode ANA : la période antérieure à 1925 de la série de Gap montre une anomalie négative de précipitations qui n'est pas présente sur les reconstitutions par la méthode ANA. La comparaison effectuée maintenant sur les débits nous montre que, dans l'hypothèse où on fait « confiance » aux séries de débits observés, l'utilisation comme témoin de la série de Gap provoque des erreurs importantes sur la reconstitution de cette période. Cela laisse penser qu'il existe probablement dans la série de Gap une hétérogénéité entre les périodes antérieure et postérieure à 1925 environ qui n'a pas été détectée pendant la phase de critique (chapitre 3).

En ce qui concerne la période 1990-2010 on remarque que cette fois, sur toutes les stations sauf deux (la Durance à Val-des-Près et à Briançon), c'est la reconstitution utilisant la série de Gap (ANATEM) qui recouvre mieux les observations que la reconstitution ne l'utilisant pas (T ANATEM, P ANA). Sur cette période la série de Gap apporte manifestement une information non portée par la circulation synoptique : à l'arrivée les précipitations moyennes annuelles sont plus importantes que ce que donne la méthode par analogues, pourtant performante sur le reste de la chronique.

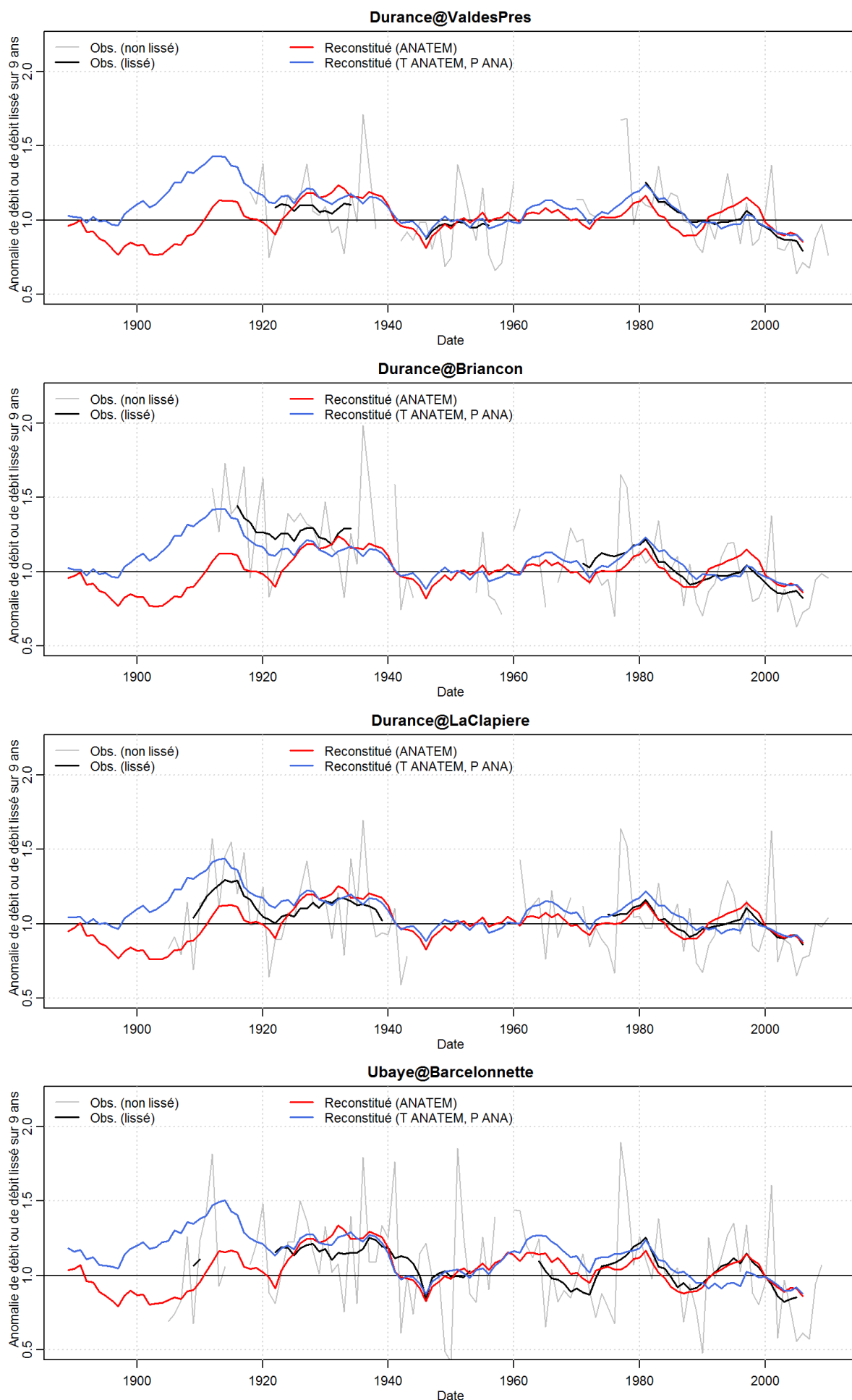


Figure 7.9 – Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques de la Durance à Val-des-Près, à Briançon et à La Clapière, et de l’Ubaye à Barcelonnette selon la méthode de reconstitution utilisée pour les précipitations.

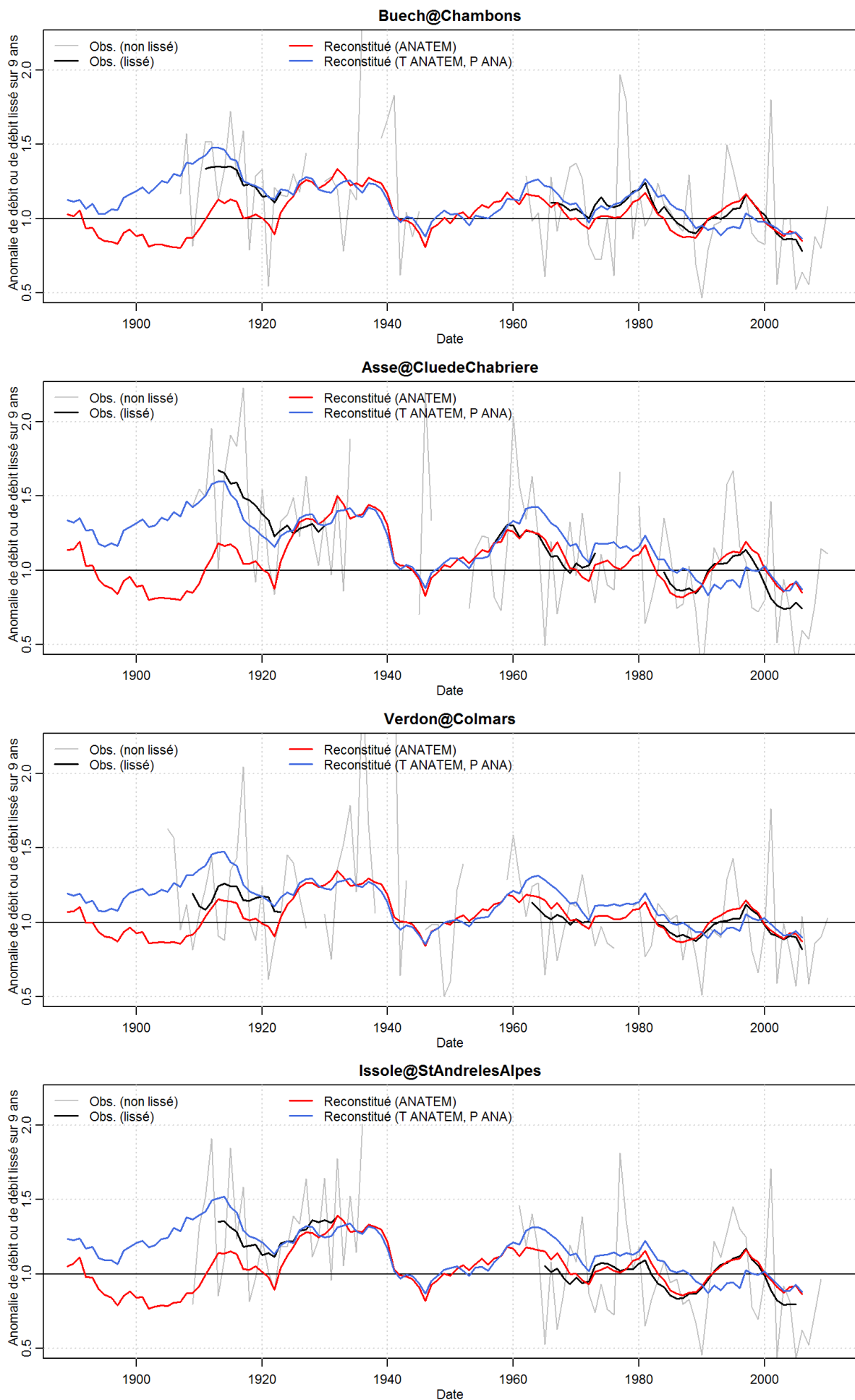


Figure 7.10 – Moyennes glissantes des reconstitutions hydrologiques du Buech aux Chambons, de l'Asse à la Clue de Chabrières, du Verdon à Colmars et de l'Issole à Saint-André-les-Alpes selon la méthode de reconstitution utilisée pour les précipitations.

Nous avons tracé sur les figures 7.11 et 7.12 les anomalies de débits annuels et de débits annuels lissés des reconstitutions (T ANATEM, P ANA) pour les huit bassins versants. Ces figures peuvent être comparées aux figures 7.1 à 7.4 présentées en début de chapitre.

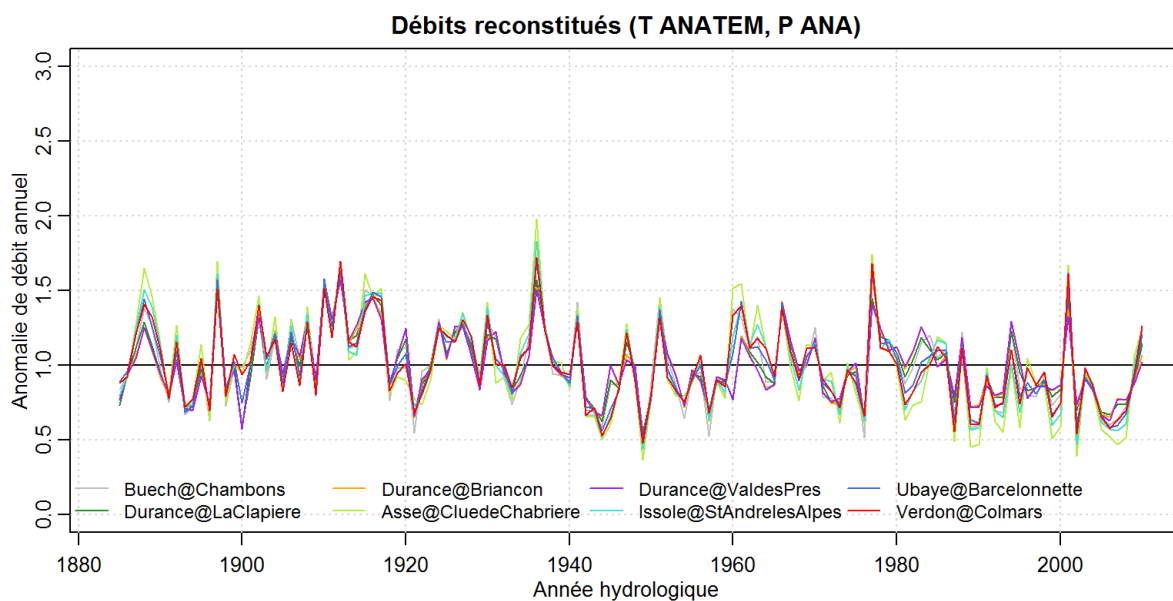


Figure 7.11 – Anomalies de débits reconstitués (T ANATEM, P ANA) en 8 points du bassin de la Durance.

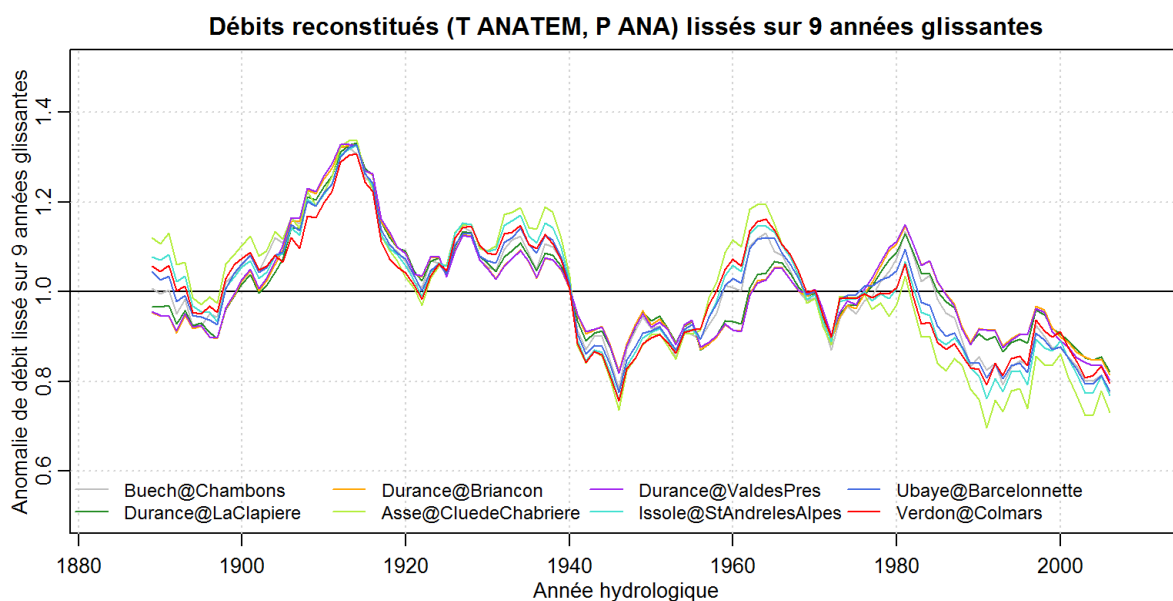


Figure 7.12 – Anomalies de débits reconstitués (T ANATEM, P ANA) en 8 points du bassin de la Durance - lissage sur neuf années glissantes.

A l'échelle annuelle, on remarque que les reconstitutions (T ANATEM, P ANA) ont une variabilité plus faible que celle des observations. On retrouve ici la conséquence de la sous-estimation de l'écart-type des précipitations par les reconstitutions moyennes ANA, constatée dans le chapitre 4. Sur ce point l'apport du témoin est important et les reconstitutions ANATEM semblent mieux reproduire cette variabilité annuelle.

En revanche, pour ce qui est de la reproduction de la variabilité basse fréquence, comme on a pu l'observer sur les graphiques de chaque station, la tendance constatée

sur les débits observés semble correctement reproduite, alors que ce n'était pas le cas des reconstitutions ANATEM. Cela est essentiellement dû au changement opéré sur la période antérieure à 1925. Un défaut apparaît cependant sur la période postérieure à 1990.

Les analyses présentées dans les chapitres 4 et 6 ont montré que l'apport d'une série témoin comme Gap par rapport à l'utilisation des analogues seuls améliore fortement les performances des reconstitutions de précipitations et de débits aux pas de temps allant du journalier à l'annuel, *a minima* sur la période 1948-2010. L'analyse sur la basse fréquence, menée dans les chapitre 5 et 7 a mis en évidence les bonnes capacités des reconstitutions ANATEM à reproduire les « oscillations » des débits observés à l'échelle de la dizaine d'années, mais il est apparu que ces reconstitutions ne reproduisent pas la tendance à la baisse constatée sur les débits observés. Suite aux observations faites dans cette section, on peut finalement penser que ce défaut est en partie lié à une hétérogénéité dans la série témoin de précipitations à Gap.

Une solution pour conserver les qualités d'une reconstitution ANATEM tout en évitant les défauts liés à l'hétérogénéité de la série de précipitations à Gap serait de procéder à une critique et une homogénéisation de la série basée non plus sur d'autres séries d'observations comme nous l'avons fait dans le chapitre 3, mais sur une reconstitution de cette même série par la méthode des analogues.

IV | Synthèse du septième chapitre

Nous avons présenté dans ce chapitre un dernier niveau d'analyse et de comparaison de 8 séries hydrologiques observées et reconstituées. Il s'agissait d'observer au travers de ces séries la variabilité hydrologique basse fréquence du bassin de la Durance depuis la fin du XIX^{ème} siècle.

Ces analyses ont mis en évidence un caractère « oscillatoire » des débits lissés : une alternance de périodes sèches et de périodes humides à l'échelle de 10 à 15 ans est visible sur toutes les séries observées et reconstituées, avec une bonne synchronisation de ces périodes entre les observations et les reconstitutions. Ces « oscillations » sont importantes puisque leur amplitude peut atteindre 20% du débit moyen annuel.

Par ailleurs, ce dernier niveau d'observation et de comparaison des séries observées et reconstituées a apporté un éclairage supplémentaire sur la qualité des reconstitutions. Il est apparu qu'il existait dans les séries observées une tendance à la baisse à l'échelle du siècle, qui n'était pas reproduite par les reconstitutions. Cette constatation nous a amené à comparer ces reconstitutions à d'autres obtenues avec différents modes de calages du modèle hydrologique d'une part, ou sans utiliser la série témoin de Gap d'autre part.

Les premières comparaisons ont montré que, s'ils peuvent jouer sur la qualité des reconstitutions et notamment sur le biais, la période ou le critère de calage n'ont que peu d'influence sur la reproduction de la variabilité basse fréquence.

En revanche, nos analyses ont permis de remettre en question l'homogénéité de la série de précipitations à Gap. En effet, les reconstitutions construites sans utiliser la série de Gap permettent, contrairement à celles utilisant cette série, de reproduire une tendance semblable à celle des débits observés. Le déroulement de la méthode de reconstitution jusqu'aux débits et la comparaison finale aux débits observés a ainsi permis de souligner dans la série de Gap une hétérogénéité qui n'avait pas été détectée par l'étape de critique préalable (chapitre 3).

Conclusion

Voilà que s'achève ce travail de thèse, fruit de trois années passées non pas sur le bassin de la Durance mais à Grenoble, suffisamment proche pour pouvoir lui rendre de nombreuses visites, l'aimer tant pour ses rivières que pour ses montagnes, et l'étudier sous toutes ses coutures ... ou presque !

Nous nous sommes attachés dans cette thèse à améliorer l'état des connaissances sur la variabilité hydro-climatique du bassin de la Durance au cours du dernier siècle. Nous avons dans un premier chapitre donné une présentation de ce bassin versant qui se caractérise, en raison de sa géographie, par une grande variété de processus hydro-climatiques. Ce bassin est également le lieu de nombreux enjeux liés à l'eau, en particulier pour EDF, gestionnaire de la chaîne d'aménagements hydro-électriques Durance-Verdon qui est soumise à de nombreuses contraintes liées à l'agriculture, au milieu naturel (gestion des sédiments, respect de débits réglementaires), à l'alimentation en eau potable ou encore au tourisme. Pour ces raisons, le bassin de la Durance est l'objet d'une attention particulière en ce qui concerne les questions liées au changement climatique, que ce soit au sein d'EDF ou dans le cadre de projets de recherche comme le projet RIWER 2030 ou le projet R²D² 2050 auquel participe ce travail de thèse.

Sur quelles données peut-on s'appuyer pour mieux connaître le passé ?

La première source d'information sur l'hydrologie passée d'une rivière comme la Durance se trouve dans les données hydrométriques. Une première étape de nos travaux a consisté à rechercher et à regrouper un ensemble de longues séries hydrométriques concernant la Durance et ses affluents. Ces recherches, menées en collaboration avec D. Cœur (historien, ACTHYS Diffusion) auprès de plusieurs fonds documentaires ont permis de mettre au jour plusieurs séries centenaires de débits journaliers commençant au début du XX^{ème} siècle. Après une étape de numérisation et un regroupement avec les séries déjà numérisées sur ce bassin, nous disposons aujourd'hui sous forme numérique de 11 séries longues de débits journaliers situées dans le bassin de la Durance.

Par ailleurs, une analyse des nombreux documents (lettres, plans, jaugeages, courbes de tarages, règlements...) accompagnant les données hydrométriques retrouvées nous a permis de retracer, pour une partie de ces séries, l'historique des méthodes utilisées pour les construire. Nous avons montré que derrière ces séries d'apparence continue se cache

généralement une succession de séries mises bout-à-bout, chacune ayant été élaborée selon des méthodes différentes (lecture quotidienne de la hauteur à l'échelle par un observateur, enregistrement graphique automatique de la hauteur d'eau et dépouillement manuel des limnigrammes, enregistrement numérique horaire de la hauteur d'eau).

Partant de ce constat, nous avons mis en place un processus de simulation des méthodes anciennes de construction d'une série quotidienne de débits et l'avons appliqué sur la période récente de disponibilité de données horaires. La comparaison entre les séries obtenues par ces simulations et les séries construites par la méthode actuelle utilisée comme référence (enregistrement horaire) a permis de quantifier l'incertitude associée aux méthodes anciennes. Il est apparu que la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle pouvait engendrer des biais sur les débits journaliers, en particulier sur les stations de montagne pendant la période de fonte des neiges. Une méthode de correction des portions de séries construites à l'aide de cette méthode a été proposée et appliquée à trois séries pour lesquelles nous disposons des informations nécessaires.

Comment reconstituer le passé ?

Le deuxième axe de notre travail sur la variabilité hydrologique du bassin de la Durance a consisté en une reconstitution de séries hydrologiques en différents points du bassin. Ces reconstitutions hydrologiques comprennent deux étapes principales, la première consistant à construire des séries climatiques à l'échelle locale à partir de données de plus grande échelle, et la seconde étant l'utilisation de ces séries climatiques pour obtenir des séries de débits via la modélisation hydrologique.

Les reconstitutions climatiques (précipitations et températures de l'air) ont été construites au pas de temps journalier à l'aide de la méthode ANATEM que nous introduisons dans cette thèse. L'originalité de cette méthode réside dans la combinaison de deux sources d'information traditionnellement utilisées séparément pour la reconstitution, la critique ou la simulation de séries de données climatiques. Il s'agit d'une part d'une information régionale appelée témoin, généralement une série climatique observée au pas de temps journalier, et d'autre part d'une information climatique à l'échelle synoptique, exploitée au travers de la méthode de descente d'échelle statistique appelée méthode des analogues. La méthode ANATEM fournit, pour chaque variable et chaque journée cibles, un ensemble probabiliste de reconstitutions issues de la combinaison de ces deux types d'information.

La méthode ANATEM nous a permis de reconstituer les séries de précipitations et températures spatiales journalières de 1883 à 2010 pour un ensemble de 22 bassins versants appartenant au bassin de la Durance. Ces séries climatiques ont ensuite été utilisées en entrée du modèle hydrologique MORDOR pour produire des reconstitutions hydrologiques sur les mêmes bassins versants.

Cette chaîne de reconstitution a pu être validée à deux niveaux. En premier lieu, au niveau des reconstitutions climatiques, celles-ci ont été comparées aux données observées disponibles sur la période 1948-2010. La seconde étape de validation a été opérée au niveau des reconstitutions hydrologiques qui ont été comparées aux débits observés disponibles à chaque station. À cette étape, les longues séries hydrométriques présentées et étudiées dans une première partie de ce travail ont permis une validation, sur une durée de plus de 100 ans, de l'ensemble de la chaîne de reconstitution pour huit bassins versants.

Les deux étapes de comparaison des reconstitutions aux observations ont été faites sur la base d'une analyse multi-critères (corrélation, reproduction de la variance et de la moyenne) et multi pas de temps (journalier, mensuel et annuel).

En ce qui concerne les reconstitutions climatiques, l'analyse a montré que la combi-

raison de l'information régionale et de l'information synoptique permet une amélioration notable des reconstitutions en comparaison à l'utilisation individuelle de l'une ou l'autre de ces deux sources d'information. L'utilisation de la méthode ANATEM permet d'obtenir des reconstitutions climatiques performantes à la fois aux pas de temps journalier, mensuel et annuel.

Concernant les reconstitutions hydrologiques, une première validation sur l'ensemble des bassins versants étudiés a montré les bonnes performances générales des reconstitutions sur la majorité d'entre eux, mais a également soulevé certaines difficultés que peuvent poser la reconstitution à long terme de chroniques hydrologiques. En effet, pour un nombre limité de bassins, il est apparu que les reconstitutions reproduisent mal la moyenne et la variance des séries observées.

Par ailleurs, les performances obtenues sur plus de 100 ans pour huit bassins versants donnent globalement confiance dans le processus de reconstitution, mais mettent en évidence, sur certains bassins, des écarts significatifs de performance des reconstitutions entre la première moitié et la seconde moitié du XX^{ème} siècle. D'importants biais négatifs de moyenne ont notamment été constatés sur la partie ancienne de certaines séries.

Plusieurs pistes d'améliorations ou de solutions alternatives ont été explorées concernant différents aspects de la méthode ANATEM. Une analyse régionale et une comparaison des résultats obtenus sur chaque bassin avec différentes séries témoin ont mis en évidence un lien marqué entre la distance séparant la série cible de la série témoin et la qualité des reconstitutions climatiques, en particulier pour les précipitations. Ces analyses ont également montré la complémentarité entre les données climatiques régionales (témoin) et synoptiques (dates analogues), ces dernières apportant d'autant plus d'information que le modèle basé sur le témoin seul est de moins bonne qualité. Par ailleurs, imaginant le cas où aucune série climatique observée ne serait disponible au pas de temps journalier, l'utilisation comme témoin de séries issues d'une réanalyse a été expérimentée et s'est révélée intéressante aux échelles journalière et mensuelle pour la reconstitution de températures de l'air.

Quelle évolution des débits de la Durance à l'échelle du dernier siècle ?

Nous nous sommes finalement intéressés à la variabilité hydrologique basse fréquence du bassin de la Durance et l'avons étudiée au travers des longues séries observées d'une part, et des reconstitutions hydrologiques d'autre part. Ces 140 années d'hydrologie, dont 100 ans observés, ont mis en évidence l'existence d'une sorte d'« oscillation » des débits à l'échelle de la décennie. Une alternance de périodes plus humides et de périodes plus sèches d'une durée comprise entre 10 et 15 ans est en effet observée à la fois sur les séries observées et reconstituées. L'observation sur le bassin de la Durance de ces « oscillations » d'une amplitude pouvant atteindre 20% du débit moyen interannuel est en soi un résultat important. En effet, connaître ce fonctionnement hydrologique est d'une grande utilité pour la prévision des apports naturels en eau à l'échelle décennale qui se trouve être un enjeu majeur des gestionnaires de l'eau. Par ailleurs le fait que ces oscillations se retrouvent sur les reconstitutions obtenues à partir des seules données synoptiques (méthode ANA) montre qu'il s'agit de la signature locale à l'échelle du bassin de la Durance d'un phénomène climatique de plus grande échelle.

L'analyse de la variabilité basse fréquence des séries observées et reconstituées a également été l'occasion d'affiner notre regard sur les reconstitutions obtenues. En effet, elle a permis de constater une tendance à la baisse des débits observés, qui n'était pas pré-

sente sur les débits reconstitués. Pour comprendre l'origine de cette différence, nous avons effectué plusieurs comparaisons qui ont finalement permis de mettre en évidence une probable hétérogénéité dans la série de précipitations à Gap, hétérogénéité qui n'avait pas été détectée lors de la phase de critique de la série, et que seul le déroulement de la procédure de reconstitution jusqu'aux débits sur plusieurs stations du bassin a pu révéler. Des reconstitutions obtenues sans l'utilisation de la série de Gap permettent de reproduire la tendance à la baisse constatée sur les débits observés. On montre ainsi combien les longues séries hydrologiques sont précieuses : ce sont indéniablement des témoins du passé de qualité de par leur côté intégrateur, qui pourrait les placer à mi-chemin entre des séries de mesures glaciaires (excellents témoins climatiques) et des longues séries de précipitations (peut-être trop locales et trop sensibles aux changements météorologiques où d'emplacement).

Par ailleurs, les travaux de L. Coron (2013) ayant mis en évidence l'existence de défauts de robustesse des modèles hydrologiques pouvant se traduire par des biais lorsqu'ils sont appliqués sur une période différente de la période de calage, nous avons souhaité comparer les résultats obtenus sur le plan de la variabilité basse fréquence avec des modèles calés sur des périodes différentes. Le même type de comparaison a été effectué en faisant varier le critère de calage du modèle. Ces comparaisons ont montré qu'en dehors des éventuels biais, la reproduction de la variabilité basse fréquence des débits était peu affectée par le critère ou la période de calage.

Et après ?

Les résultats de ce travail de thèse sont prometteurs et ouvrent de nombreuses perspectives dont nous présentons ci-dessous quelques propositions.

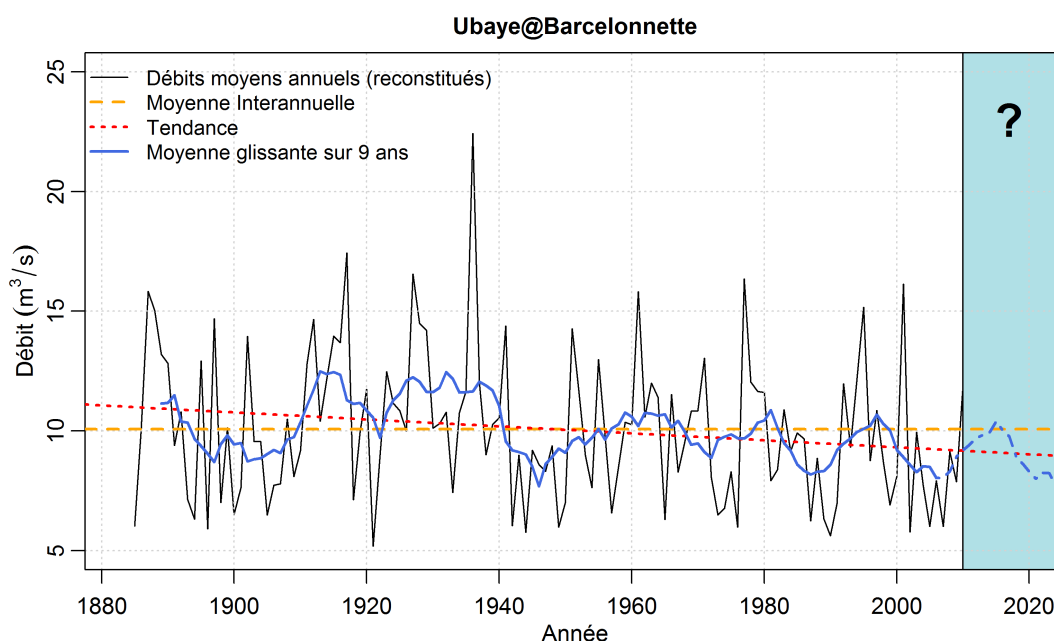
En ce qui concerne la recherche et l'analyse des données historiques, nous espérons que notre travail montrera le chemin vers d'autres développements et d'autres recherches. En se limitant au bassin de la Durance et même aux seuls résultats des recherches documentaires menées dans le cadre de cette thèse, il reste énormément à apprendre de l'ensemble de documents mis au jour, que ce soient des correspondances ou surtout des nombreuses données de jaugeages ou de courbes de tarages. De nouveaux travaux de valorisation de ces données devraient permettre d'affiner nos connaissances sur les séries anciennes et de compléter notre étude sur l'évaluation des incertitudes de manière à pouvoir associer une incertitude globale aux débits anciens tout en fournissant un cadre d'étude plus large aux travaux menés actuellement à EDF DTG sur la gestion dynamique de la courbe de tarage (Morlot, 2011-2014).

L'application et l'évaluation de la méthode ANATEM de reconstitution hydro-climatique a montré l'intérêt de s'appuyer à la fois sur des données climatiques locales et sur des données à l'échelle synoptique représentatives de l'état de l'atmosphère. La méthode de reconstitution en elle-même pourrait cependant faire l'objet d'améliorations à plusieurs niveaux. Un premier niveau, qui a été en partie exploré dans ce document (chapitre 5) est celui des modèles permettant l'utilisation de chacune des deux sources d'information indépendamment, avant que celles-ci ne soient regroupées. Si les premiers tests effectués laissent penser que l'amélioration des performances apportée par un perfectionnement de ce premier niveau de modèles resterait faible, il nous paraît en revanche plus intéressant de se pencher sur la deuxième étape, c'est-à-dire sur la façon dont les deux sources d'information sont regroupées. Il s'agit donc de la formulation de la méthode ANATEM en elle-même, qui pourrait par exemple être remplacée par une approche de type « analogues imbriqués » avec une double sélection de journées analogues, d'abord en lien avec les données synoptiques, puis avec les données locales (Bontron, 2004). Une

autre piste à explorer pourrait être l'exploitation de techniques de combinaison de modèles probabilistes déjà utilisées pour la prévision (Voir par exemple Bates et Granger, 1969; Winkler et Makridakis, 1983; Hoeting *et al.*, 1999). Pour finir, l'étape finale de modélisation hydrologique pourrait être affinée pour améliorer la qualité des reconstitutions de débits.

Une première approche de comparaison de nos reconstitutions ANATEM avec la dendrochronologie a été présentée pour la station de La Clapière sur la Durance et a révélé une très bonne concordance entre les deux types de reconstitutions. Ce résultat est encourageant et engage à développer ce type de comparaison « multi-témoins » sur le long terme. La sédimentologie et la dendrochronologie permettent de reconstituer des séries de plusieurs centaines d'années, bien au delà de ce qu'autorisent à l'heure actuelle les réanalyses climatiques disponibles. Il s'agit donc d'outils à exploiter pour progresser dans la connaissance de la variabilité hydrologique passée.

Suite à ce travail de thèse, une dizaine de séries centenaires de débits observés, ainsi que des reconstitutions hydrologiques journalières sur 20 stations et sur une durée de 140 ans sont disponibles pour permettre une meilleure caractérisation de la variabilité hydrologique de la Durance au cours du dernier siècle. Si une première analyse de cette variabilité, fondée sur l'observation de chroniques de débits annuels lissés a été proposée dans ce document, ce ne devrait être qu'un point de départ vers des travaux plus approfondis d'analyse pouvant notamment mener à une modélisation de la variabilité hydrologique passée. De tels modèles permettraient par exemple d'améliorer la prévision à l'échelle de la prochaine décennie en contexte non stationnaire, qui constitue un enjeu important pour les gestionnaires d'ouvrages comme Électricité de France. La figure ci-dessous illustre cette problématique : comment s'appuyer sur le passé pour mieux prévoir la ressource à venir ? A l'heure actuelle, beaucoup de gestionnaires appuient leurs projections décennales sur les normales climatiques observées (moyennes interannuelles). Différents exemples de « prolongation » possible de l'hydrologie passée sont représentés sur la figure.



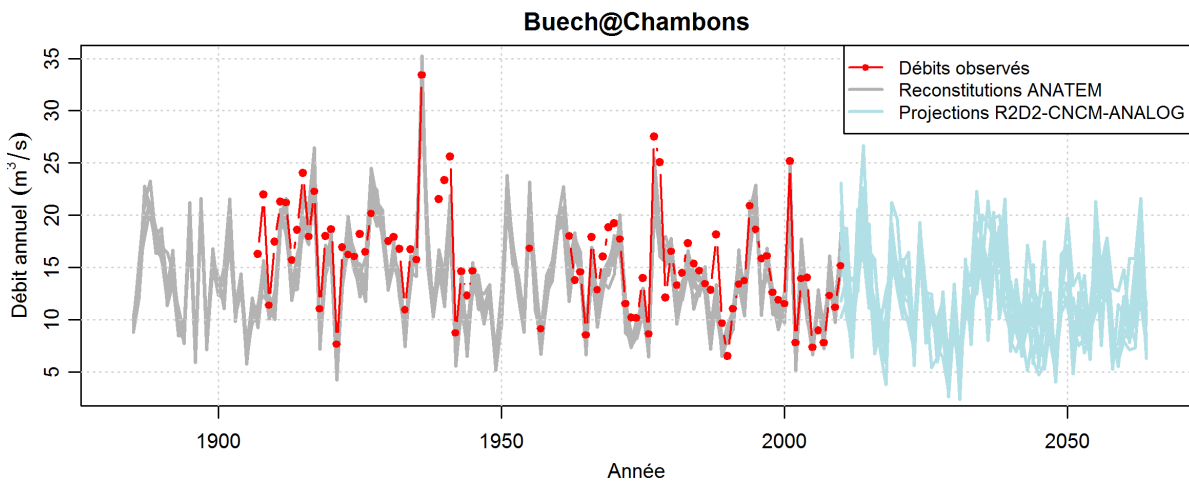
Débits moyens annuels de l'Ubaye à Barcelonnette reconstitués par la méthode ANATEM et exemples de projections pour les dix prochaines années.

Dans cette optique de prévision décennale, des analyses relativement simples (détection de ruptures, de tendances, moyennes) pourraient permettre un affinement dans la

projection de normales climatiques (Wilks, 2013). Des approches statistiques plus évoluées de type mélange de lois de probabilités vont également dans le sens de la prise en compte du caractère non stationnaire des processus hydrologiques (Perreault *et al.*, 2000, 2008). Enfin, la recherche d'éventuelles relations entre la variabilité hydrologique basse fréquence observée et celle d'indices climatiques comme la *North Atlantic Oscillation* (NAO) ou l'*Atlantic Meridional Overturning Circulation* (AMOC) pourrait être une étape importante vers une meilleure caractérisation de l'hydrologie passée et à venir.

La démarche que nous avons mise en place et validée dans le cadre de cette thèse sur le bassin de la Durance pourrait par ailleurs être élargie à d'autres bassins et d'autres régions, permettant ainsi un approfondissement des connaissances sur la variabilité hydrologique passée à une échelle plus large.

Enfin, cette « base » de plus de 100 ans d'hydrologie fournit un contexte élargi pour l'interprétation de projections hydro-climatiques comme celles réalisées sur le bassin de la Durance dans le cadre du projet RIWER 2030 ou en cours de réalisation dans le cadre du projet R²D², dont nous donnons un exemple sur la figure suivante représentant les débits du Buech aux Chambons.



Débits annuels observés, reconstitution ANATEM et projections climatiques sur le bassin du Buech aux Chambons. Projection climatique réalisée dans le cadre du projet R²D² avec le Modèle de Circulation Générale CNCM (CNRM - Météo-France), la méthode de descente d'échelle ANALOG et le modèle hydrologique MORDOR.

Bibliographie

- ACTHYS-DIFFUSION. Enquête documentaire sur les données hydrologiques et hydrométriques anciennes du bassin de la Durance. Rapport technique Rapport 1, 2011.
- ACTHYS-DIFFUSION. Enquête documentaire sur les données hydrologiques et hydrométriques anciennes du bassin de la Durance. Rapport technique Rapport 2, 2012.
- ALEXANDERSSON, H. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6): 661–675, janvier 1986. ISSN 1097-0088.
- ANDREASSIAN, V., BERGSTROM, S., CHAHINIAN, N., DUAN, Q., GUSEV, Y. M., LITTLEWOOD, I., MATHEVET, T., MICHEL, C., MONTANARI, A. et MORETTI, G. Catalogue of the models used in MOPEX 2004/2005. *IAHS publication*, 307: 41, 2006.
- ARCHIVES. Analyse Rétrospective des Conditions Hydroclimatiques à l'aide des Indicateurs de leur Variabilité à l'Echelle Seculaire. 2008-2013. Projet de recherche INRS, URL : <http://archives.ete.inrs.ca>.
- ARNELL, N. W. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1): 31–52, avril 2004. ISSN 0959-3780.
- AUER, I., BÖHM, R., JURKOVIC, A., LIPA, W., ORLIK, A., POTZMANN, R., SCHÖNER, W., UNGERSBÖCK, M., MATULLA, C., BRIFFA, K., JONES, P., EFTHYMIADIS, D., BRUNETTI, M., NANNI, T., MAUGERI, M., MERCALLI, L., MESTRE, O., MOISSELIN, J.-M., BEGERT, M., MÜLLER-WESTERMEIER, G., KVETON, V., BOCHNICEK, O., STASTNY, P., LAPIN, M., SZALAI, S., SZENTIMREY, T., CEGNAR, T., DOLINAR, M., GAJIC-CAPKA, M., ZANINOVIC, K., MAJSTOROVIC, Z. et NIEPLOVA, E. HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27(1): 17–46, janvier 2007. ISSN 08998418, 10970088.
- BARAILLE, S. *Les crues dommageables dans le bassin de la Haute-Durance (Hautes-Alpes, France) - Recensement depuis le XIV^{ème} siècle ; signification climatique ; Facteurs météorologiques et prévision*. Thèse de doctorat, Université de Savoie en Géographie Physique, 2001.
- BATES, J. M. et GRANGER, C. W. J. The Combination of Forecasts. *OR*, 20(4): 451, décembre 1969. ISSN 14732858.
- BEN DAUD, A., SAUQUET, E., LANG, M., OBLED, C. et BONTRON, G. La prévision des précipitations par recherche d'analogues : état de l'art et perspectives. *La Houille Blanche*, (6): 60–65, janvier 2010. ISSN 0018-6368.

- BENISTON, M. *Changements climatiques et impacts: De l'échelle globale à l'échelle locale*. PPUR presses polytechniques, 2009. ISBN 288074816X.
- BERNARD, P. et SMITH, C. De la prévision à l'exploitation en crue des aménagements hydrauliques EDF: application au bassin de la Durance. *La Houille Blanche*, (1): 29–35, janvier 2005. ISSN 0018-6368.
- BIRSAN, M.-V., MOLNAR, P., BURLANDO, P. et PFAUNDLER, M. Streamflow trends in Switzerland. *Journal of Hydrology*, 314(1–4): 312–329, novembre 2005. ISSN 0022-1694.
- BLANCHARD, R. La sécheresse en Dauphiné (1920-1921). *Revue de géographie alpine*, 10(1): 181–199, 1922. ISSN 0035-1121.
- BOIS, P. Contrôle de séries chronologiques corrélées par l'étude du cumul des résidus de la corrélation. *Deuxièmes journées hydrologiques de l'Orstom*, pages 87–99, 1987.
- BONTRON, G. *Prevision quantitative des précipitations: adaptation probabiliste par recherche d'analogues; utilisation des reanalyses NCEP-NCAR et application aux précipitations du sud-est de la France*. Thèse doctorat, Institut national polytechnique, Grenoble, France, 2004.
- BONTRON, G., DJERBOUA, A. et OBLED, C. Sélection de situations météorologiques analogues : applications en prévision opérationnelle de précipitations et en évolution climatique. *La Houille Blanche*, (8): 46–51, décembre 2002. ISSN 0018-6368.
- BOURQUI, M., MATHEVET, T., GAILHARD, J. et HENDRICKX, F. Hydrological validation of statistical downscaling methods applied to model projections. *IAHS publication*, 344: 32–38, 2011.
- CLÉBERT, J.-P. et ROUYER, J.-P. *La Durance*. Rivières et Vallées de France. Privat, 1995. ISBN 2708995030.
- COMPO, G. P., WHITAKER, J. S., SARDESHMUKH, P. D., MATSUI, N., ALLAN, R. J., YIN, X., GLEASON, B. E., VOSE, R. S., RUTLEDGE, G., BESSEMOULIN, P., BRÖNNIMANN, S., BRUNET, M., CROUTHAMEL, R. I., GRANT, A. N., GROISMAN, P. Y., JONES, P. D., KRUK, M. C., KRUGER, A. C., MARSHALL, G. J., MAUGERI, M., MOK, H. Y., NORDLI, ., ROSS, T. F., TRIGO, R. M., WANG, X. L., WOODRUFF, S. D. et WORLEY, S. J. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654): 1–28, 2011. ISSN 1477-870X.
- CORON, L. *Les modèles hydrologiques conceptuels sont-ils robustes face à un climat en évolution ? Diagnostic sur un échantillon de bassins versants français et australiens*. Thèse de doctorat, AgroParisTech, Paris, 2013.
- COSSART, t., FORT, M., JOMELLI, V. et GRANCHER, D. Les variations glaciaires en Haute Durance (Briançonnais, Hautes-Alpes) depuis la fin du XIXe siècle : mise au point d'après les documents d'archives et la lichénométrie. *Quaternaire. Revue de l'Association française pour l'étude du Quaternaire*, (vol. 17/1): 75–92, mars 2006. ISSN 1142 -2904.
- CSIRO. Climate variability and change in south-eastern Australia : A synthesis of findings from Phase 1 of the South Eastern Australian Climate Initiative (SEACI). Rapport technique, mai 2010.
- DEBELMAS, J. *Alpes du Dauphiné*. Guides géologiques régionaux. Masson, 1983. ISBN 2225782768.
- DEMONTZEY, P. *Les retenues d'eau et le reboisement dans le Bassin de la Durance*. Aix, 1896.

- DUBAND, D. *Reconnaissance dynamique de la forme des situations météorologiques : application à la prévision quantitative des précipitations*. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Paris, 1970.
- DUBAND, D. Prévision spatiale des hauteurs de précipitations journalières. *La Houille Blanche*, (7-8): 497–512, novembre 1981. ISSN 0018-6368.
- DUFOUR, C. et GARÇON, R. Méthode statistique de recalage du modèle de prévision au pas journalier MORDOR dans le cadre du projet Vienne. Rapport technique, Electricité de France, février 1997.
- EDF. L'aménagement de la Durance. *La Houille Blanche*, (5): 561–578, 1963. ISSN 0018-6368.
- ESCALLON, J.-P. Communication personnelle. 2011.
- FRANÇOIS, B. *Gestion optimale d'un réservoir hydraulique multi-usages et changement climatique. Modèles, projections et incertitudes. Application à la réserve de Serre-Ponçon*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2013.
- GARAVAGLIA, F. *Méthode SCHADEX de prédétermination des crues extrêmes*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, février 2011.
- GARAVAGLIA, F., GAILHARD, J., PAQUET, E., LANG, M., GARÇON, R. et BERNARDARA, P. Introducing a rainfall compound distribution model based on weather patterns sub-sampling. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(6): 951–964, juin 2010. ISSN 1607-7938.
- GARDENT, M. Communication personnelle. mars 2013.
- GARDENT, M., RABATEL, A., DEDIEU, J., DELINE, P. et SCHOENEICH, P. First results of the new French Alps glaciers inventory. *AGU Fall Meeting Abstracts*, -1: 0728, décembre 2011.
- GARÇON, R. 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*, (5): 71–76, août 1996. ISSN 0018-6368.
- GOTTARDI, F. *Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2009.
- GOTTARDI, F., OBLED, C., GAILHARD, J. et PAQUET, E. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, 432–433: 154–167, avril 2012. ISSN 0022-1694.
- GOVERNET, C., GUIEU, G. et ROUSSET, C. *Guide géologique régional : Provence*. Masson, 2e éd. édition, janvier 1979. ISBN 2225628106.
- GUPTA, H. V., KLING, H., YILMAZ, K. K. et MARTINEZ, G. F. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1–2): 80–91, octobre 2009. ISSN 0022-1694.
- GUÉRIN, L. Etude du fonctionnement hydrologique de la durance. Rapport de stage de master 1 HYDROPROTECH, Université Nice Sophia Antipolis, 2012.
- HANNAFORD, J., BUYS, G., STAHL, K. et TALLAKSEN, L. M. The influence of decadal-scale variability on trends in long European streamflow records. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 10(2): 1859–1896, février 2013. ISSN 1812-2116.

- HANNAH, D. M., DEMUTH, S., VAN LANEN, H. A. J., LOOSER, U., PRUDHOMME, C., REES, G., STAHL, K. et TALLAKSEN, L. M. Large-scale river flow archives: importance, current status and future needs. *Hydrological Processes*, 25(7): 1191–1200, 2011. ISSN 1099-1085.
- HINGRAY, B., HENDRICKX, F., BOURQUI, M., CREUTIN, J.-D., FRANÇOIS, B., GAILHARD, J., LAFAYSSÉ, M., LEMOINE, N., MATHEVET, T., MEZGHANI, A. et MONTEIL, C. RIWER 2030 - Climats Régionaux et Incertitudes, Ressource en Eau et Gestion associée de 1960 à 2030. Rapport de fin de projet, ANR, février 2013.
- HOETING, J. A., MADIGAN, D., RAFTERY, A. E. et VOLINSKY, C. T. Bayesian model averaging: a tutorial. *Statistical science*, pages 382–401, 1999.
- HORTON, P., JABOYEDOFF, M., METZGER, R., OBLED, C. et MARTY, R. Spatial relationship between the atmospheric circulation and the precipitation measured in the western Swiss Alps by means of the analogue method. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12(3): 777–784, mars 2012. ISSN 1684-9981.
- HUBERT, P., BADER, J.-C. et BENDJOUDI, H. Un siècle de débits annuels du fleuve Sénégal. *Hydrological Sciences Journal*, 52(1): 68, 2007. ISSN 0262-6667.
- HUNTINGTON, T. G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1–4): 83–95, mars 2006. ISSN 0022-1694.
- IMBEAUX, E. *La Durance : régime, crues et inondations*. Vve Ch. Dunod, Paris, France, 1892.
- ISOCRATE. Discours de morale. IVe s. av. J.C.
- JACQUIGNON, L. *Histoire de l'électricité dans les Hautes-Alpes : des origines à la nationalisation de 1946*. Numéro 9 dans ELEC (électricité : études et commentaires). Association pour l'histoire de l'électricité en France, Paris, France, 2000. ISBN 2-9058-2121-3.
- JALBERT, J., MATHEVET, T. et FAVRE, A.-C. Temporal uncertainty estimation of discharges from rating curves using a variographic analysis. *Journal of Hydrology*, 397(1–2): 83–92, janvier 2011. ISSN 0022-1694.
- JEAN, M. *Les architectes de l'eau en Provence : De la renaissance au XXIe siècle*. Actes Sud, mai 2011. ISBN 2742797106.
- JENSEN, J. L. W. V. Sur les fonctions convexes et les inégalités entre les valeurs moyennes. *Acta Mathematica*, 30(1): 175–193, décembre 1906. ISSN 0001-5962, 1871-2509.
- KALNAY, E., KANAMITSU, M., KISTLER, R., COLLINS, W., DEAVEN, D., GANDIN, L. et ... The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437–471, 1996.
- KLEIN TANK, A. M. G., WIJNGAARD, J. B., KÖNNEN, G. P., BÖHM, R., DEMARÉE, G., GO-CHEVA, A., MILETA, M., PASHIARDIS, S., HEJKRLIK, L., KERN-HANSEN, C., HEINO, R., BESSEMOULIN, P., MÜLLER-WESTERMEIER, G., TZANAKOU, M., SZALAI, S., PÁLSDÓTTIR, T., FITZGERALD, D., RUBIN, S., CAPALDO, M., MAUGERI, M., LEITASS, A., BUKANTIS, A., ABERFELD, R., VAN ENGELEN, A. F. V., FORLAND, E., MIETUS, M., COELHO, F., MARES, C., RAZUVAEV, V., NIEPLOVA, E., CEGNAR, T., ANTONIO LÓPEZ, J., DAHLSTRÖM, B., MÖBERG, A., KIRCHHOFER, W., CEYLAN, A., PACHALIUK, O., ALEXANDER, L. V. et PETROVIC, P. Daily dataset of 20th-century surface air temperature and precipitation series for the European Climate Assessment. *International Journal of Climatology*, 22(12): 1441–1453, 2002. ISSN 1097-0088.
- KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31(1): 13–24, 1986. ISSN 0262-6667.

- KLOK, E. J. et KLEIN TANK, A. M. G. Updated and extended European dataset of daily climate observations. *International Journal of Climatology*, 29(8): 1182–1191, 2009. ISSN 1097-0088.
- KRUIZINGA, S. et MURPHY, A. H. Use of an analogue procedure to formulate objective probabilistic temperature forecasts in the Netherlands. *Monthly Weather Review*, 111: 2244–2254, novembre 1983.
- LAFAYSSE, M. *Changement climatique et régime hydrologique d'un bassin alpin. Génération de scénarios sur la Haute-Durance, méthodologie d'évaluation et incertitudes associées*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Grenoble, 2011.
- LALLEMENT, C. Exploitation de la station hydrométrique de la Durance à Pont de Mirabeau - Historique et résultats obtenus 1832-1959. Rapport interne 2001-00658-A, EDF, décembre 2001.
- LALLEMENT, C. Que peut apporter la valorisation d'anciennes données hydrométriques? la Durance au pont de Mirabeau 1832-1959. *La Houille Blanche*, (3): 31–38, juillet 2009. ISSN 0018-6368.
- LEBARBIER, E. et MARY-HUARD, T. Le critère BIC : fondements théoriques et interprétation. 2004.
- LORENZ, E. N. Atmospheric Predictability as Revealed by Naturally Occurring Analogues. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 26(4): 636–646, juillet 1969. ISSN 0022-4928, 1520-0469.
- LORENZO-LACRUZ, J., VICENTE-SERRANO, S., LÓPEZ-MORENO, J., MORÁN-TEJEDA, E. et ZABALZA, J. Recent trends in Iberian streamflows (1945–2005). *Journal of Hydrology*, 414–415: 463–475, janvier 2012. ISSN 0022-1694.
- LUNDQUIST, J. D. How snowpack heterogeneity affects diurnal streamflow timing. *Water Resources Research*, 41(5), 2005a. ISSN 0043-1397.
- LUNDQUIST, J. D. Snow-fed streamflow timing at different basin scales: Case study of the Tuolumne River above Hetch Hetchy, Yosemite, California. *Water Resources Research*, 41(7), 2005b. ISSN 0043-1397.
- MATHEVET, T. *Quels modèles pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développements empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versants*. Thèse de doctorat, ENGREF, Paris, novembre 2005.
- MATHEVET, T., CARRÉ, C., GARÇON, R. et PERRET, C. Estimation de l'incertitude d'un débit sur le réseau hydrométrique d'EDF. Paris, avril 2008.
- MATHEVET, T., GARAVAGLIA, F., PAQUET, E. et GARÇON, R. Improving hydrological model calibration and selection via a better use of evaluation metrics and streamflow sub-samples for operational applications. Poster at IAHS 90th Anniversary - PUB Symposium 2012, Delft, octobre 2012.
- MATHYS, N., BROCHOT, S. et MEUNIER, M. L'érosion des Terres Noires dans les Alpes du sud : contribution à l'estimation des valeurs annuelles moyennes (bassins versants expérimentaux de Draix, Alpes de Haute Provence, France). *Revue de géographie alpine*, 84(2): 17–27, 1996. ISSN 0035-1121.
- MESSIÉ, C. Critics and validation of raingauges data on alpine watersheds. Rapport technique, Swiss Federal Institute of Technology Zurich / EDF, 2012.

- MILLY, P. C. D., DUNNE, K. A. et VECCHIA, A. V. Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438(7066): 347–350, novembre 2005. ISSN 0028-0836.
- MOISSELIN, J.-M., SCHNEIDER, M., CANELLAS, C. et MESTRE, O. Les changements climatiques en France au XXe siècle - Etude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations. *La Météorologie*, (38): 45–56, 2002.
- MONJUVENT, G. La transfluence Durance-Isère. Essai de Synthèse du Quaternaire du bassin du Drac (Alpes française). *Géologie Alpine*, 49: 57–118, 1973.
- MORLAT, G., BILLIET, A. et BERNIER, J. Les crues de la haute Durance et la théorie des valeurs extrêmes. *Publication de l'Association Internationale d'Hydrologie*, 42: 99–114, 1956.
- MORLOT, T. *La gestion dynamique de la relation hauteur-débit des stations hydrométriques et le calcul des incertitudes associées : un indice que qualité et de suivi*. Thèse de doctorat (en cours), Université de Grenoble, 2011-2014.
- NASH, J. et SUTCLIFFE, J. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3): 282–290, avril 1970. ISSN 0022-1694.
- NICAULT, A., GUIOT, J. et GAILHARD, J. Projet : reconstitutions hydroclimatiques EDF/ECCOREV. rapport final, juillet 2012.
- OBLED, C., BONTRON, G. et GARÇON, R. Quantitative precipitation forecasts: a statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach. *Atmospheric Research*, 63(3–4): 303–324, août 2002. ISSN 0169-8095.
- ONDE, H. Une description géologique du bassin supérieur de la Durance. *Annales de Géographie*, 49(277): 44–48, 1940. ISSN 0003-4010.
- PAQUET, E. Modèle MORDOR : présentation générale. Rapport technique, Electricité de France, 2000.
- PAQUET, E. Critique et homogénéisation de séries climatologiques. Outil KRITIKOR. Notice méthodologique, rapport interne EDF, 2005.
- PAQUET, E., GAILHARD, J. et GARÇON, R. Evolution de la méthode du gradex : approche par type de temps et modélisation hydrologique. *La Houille Blanche*, (5): 80–90, octobre 2006. ISSN 0018-6368.
- PAQUET, E., GARAVAGLIA, F., GARÇON, R. et GAILHARD, J. The SCHADEX method: a semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation. *Journal of Hydrology*, (In Press), 2013. ISSN 0022-1694.
- PAQUET, E. et GARÇON, R. Modèle MORDOR : notice méthodologique. Rapport technique, Electricité de France, 2000.
- PAQUET, E. et GARÇON, R. Caprices du climat et de l'hydrologie en Haute-Durance : nos prévisions d'apports plurimensuels sont-elles encore fiables ? *La Houille Blanche*, (8): 62–68, décembre 2002. ISSN 0018-6368.
- PARDÉ, M. *Le régime du Rhône*. Géocarrefour édition, 1925. ISBN 2-9519647-4-9.
- PARDÉ, M. Les crues du Rhône, de décembre 1935 à mai 1936. *Revue de géographie alpine*, 24(3): 701–707, 1936. ISSN 0035-1121.
- PARDÉ, M. Inondations en France en 1935 et 1936. *Annales de Géographie*, 46(260): 113–123, 1937. ISSN 0003-4010.

- PARDÉ, M. Sur les fontes des neiges lors des crues. La grande crue alpestre de juin 1957. Quelques données. *Revue de géographie alpine*, 47(3): 325–361, 1959. ISSN 0035-1121.
- PARDÉ, M. Sur la crue de juin 1957 dans le Queyras et sur l'hydrologie en général. *Revue de géographie alpine*, 48(3): 511–524, 1960. ISSN 0035-1121.
- PERREAULT, L., BERNIER, J., BOBÉE, B. et PARENT, E. Bayesian change-point analysis in hydrometeorological time series. Part 2. Comparison of change-point models and forecasting. *Journal of Hydrology*, 235(3–4): 242–263, août 2000. ISSN 0022-1694.
- PERREAULT, L., GARÇON, R. et GAUDET, J. Analyse de séquences de variables aléatoires hydrologiques à l'aide de modèles de changement de régime exploitant des variables atmosphériques. *La Houille Blanche*, (6): 111–123, janvier 2008. ISSN 0018-6368.
- PERRET, C., GAILHARD, J., KUENTZ, A. et MATHEVET, T. Intérêt des longues séries chronologiques de débit pour comprendre la variabilité du passé et interpréter les projections d'avenir dans une perspective de changement climatique. Présentation orale I.S. Rivers, Recherches et actions au service des fleuves et grandes rivières, Lyon, juin 2012.
- PERRET, C., MORLOT, T. et FAVRE, A.-C. La gestion dynamique des relations hauteur-débit des stations d'hydrométrie et le calcul des incertitudes associées : un indicateur de qualité et de suivi. Paris, France, mai 2013.
- PÉGUY, C.-P. *Haute durance et ubaye - esquisse physique de la zone intra-alpine des alpes françaises du sud*. Arthaud édition, 1947.
- POGGI, A. La fusion de la neige et les crues de juin 1957 dans les Alpes françaises orientales. *Revue de géographie alpine*, 47(3): 363–374, 1959. ISSN 0035-1121.
- PRECLIDE. PREvisibilité CLImatique DEcennale. 2009-2014. Projet de recherche, CNRM, URL : <http://onerc.developpement-durable.gouv.fr/fr/projet/preclide-projet-previsibilite-climatique-decennale>.
- R2D2 2050. Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050. 2010-2013. Projet de recherche GICC, IRSTEA, EDF, UPMC, LTHE, Société du Canal de Provence, ACTEON. URL : <https://r2d2-2050.cemagref.fr>.
- RENARD, B. *Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- RENNER, M. et BERNHOFER, C. Long term variability of the annual hydrological regime and sensitivity to temperature phase shifts in Saxony/Germany. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(6): 1819–1833, juin 2011. ISSN 1607-7938.
- RIWER 2030. Climats Régionaux et Incertitudes, Ressource en Eau et Gestion associée de 1960 à 2030. 2009-2013. Projet de recherche ANR, LTHE, EDF, URL : <http://www.lthe.fr/RIWER2030/index.html>.
- ROOD, S. B., SAMUELSON, G., WEBER, J. et WYWROT, K. Twentieth-century decline in streamflows from the hydrographic apex of North America. *Journal of Hydrology*, 306(1–4): 215–233, mai 2005. ISSN 0022-1694.
- SANSON, J. et PARDÉ, M. La sécheresse des années 1942-49 en France. *Revue de géographie alpine*, 38(2): 369–404, 1950. ISSN 0035-1121.

- SCHWARZ, G. Estimating the Dimension of a Model. *The Annals of Statistics*, 6(2): 461–464, mars 1978. ISSN 0090-5364. Mathematical Reviews number (MathSciNet): MR468014; Zentralblatt MATH identifier: 0379.62005.
- SERRA, L. Les études hydrologiques sur la Haute-Durance. *La Houille Blanche*, pages 725–734, 1953. ISSN 0018-6368.
- SÉNÈQUE. Lettres à Lucilius, LXXXIII. 64 ap. J.C.
- STAHL, K., HISDAL, H., HANNAFORD, J., TALLAKSEN, L. M., VAN LANEN, H. A. J., SAUQUET, E., DEMUTH, S., FENDEKOVA, M. et JÓDAR, J. Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 14(12): 2367–2382, décembre 2010. ISSN 1607-7938.
- SURELL, A. *Etude Sur Les Torrents Des Hautes Alpes*. Carrilan-Goeury et Vor Dalmont, Editeurs, Paris, 1841.
- TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7): 7183–7192, 2001. ISSN 2156-2202.
- TENG, J., CHIEW, F., TIMBAL, B., WANG, Y., VAZE, J. et WANG, B. Assessment of an analogue downscaling method for modelling climate change impacts on runoff. *Journal of Hydrology*, 472–473: 111–125, novembre 2012. ISSN 0022-1694.
- TEWELES, S. et WOBUS, H. Verification of prognostic charts. *Bull. Am. Met. Soc.*, 35: 455–63, 1954.
- TIMBAL, B., ARBLASTER, J. M. et POWER, S. Attribution of the Late-Twentieth-Century Rainfall Decline in Southwest Australia. *Journal of Climate*, 19(10): 2046–2062, mai 2006. ISSN 0894-8755, 1520-0442.
- TIMBAL, B., DUFOUR, A. et MCAVANEY, B. J. An estimate of future climate change for western France using a statistical downscaling technique. *Climate Dynamics*, 20(7-8): 807–823, mai 2003. ISSN 0930-7575, 1432-0894.
- TIMBAL, B. et JONES, D. A. Future projections of winter rainfall in southeast Australia using a statistical downscaling technique. *Climatic Change*, 86(1-2): 165–187, août 2007. ISSN 0165-0009, 1573-1480.
- TIMBAL, B. et MCAVANEY, B. J. An analogue-based method to downscale surface air temperature: application for Australia. *Climate Dynamics*, 17(12): 947–963, septembre 2001. ISSN 0930-7575, 1432-0894.
- TRICART, J. La crue de la mi-juin 1957 sur le Guil, l’Ubaye et la Cerveyrette. *Revue de géographie alpine*, 46(4): 565–627, 1958. ISSN 0035-1121.
- TRICART, J. Quelques données au sujet du rôle de la neige dans la crue du Guil en juin 1957. *Revue de géographie alpine*, 48(2): 333–344, 1960. ISSN 0035-1121.
- UPPALA, S. M., KÅLLBERG, P. W., SIMMONS, A. J., ANDRAE, U., BECHTOLD, V. D. C., FIORINO, M., GIBSON, J. K., HASELER, J., HERNANDEZ, A., KELLY, G. A., LI, X., ONOGI, K., SAARINEN, S., SOKKA, N., ALLAN, R. P., ANDERSSON, E., ARPE, K., BALMASEDA, M. A., BELJAARS, A. C. M., BERG, L. V. D., BIDLOT, J., BORMANN, N., CAIRES, S., CHEVALLIER, F., DETHOF, A., DRAGOSAVAC, M., FISHER, M., FUENTES, M., HAGEMANN, S., HÓLM, E., HOSKINS, B. J., ISAKSEN, L., JANSSEN, P. a. E. M., JENNE, R., MCNALLY, A. P., MAHFOUF, J.-F., MORCRETTE, J.-J., RAYNER, N. A., SAUNDERS, R. W., SIMON, P., STERL, A., TRENBERTH, K. E., UNTCH, A., VASILJEVIC, D., VITERBO, P. et WOOLLEN, J. The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612): 2961–3012, 2005. ISSN 1477-870X.

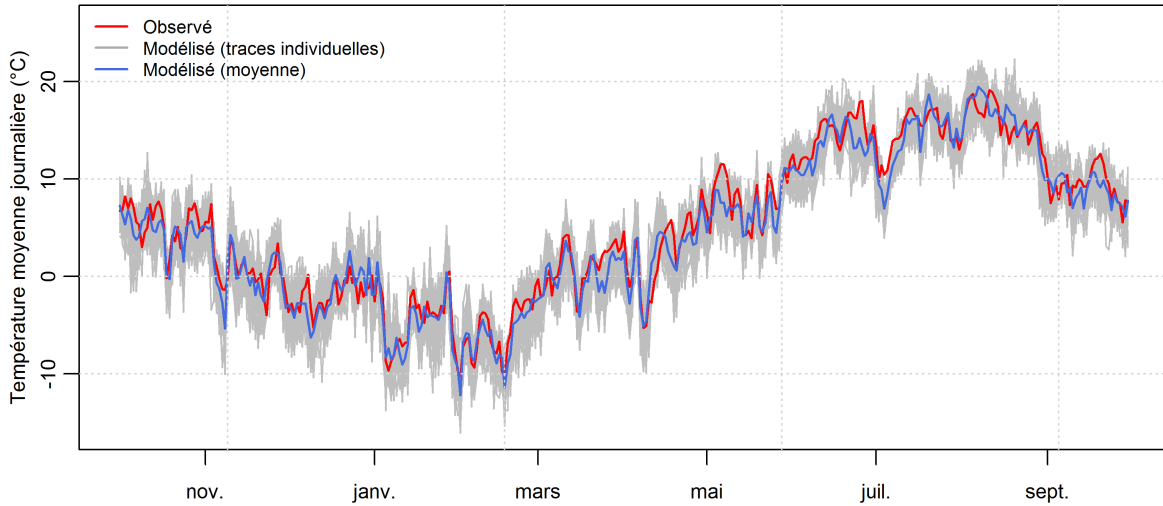
- VALERY, A. *Modélisation précipitations - débit sous influence nivale. Elaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants*. Thèse de doctorat, AgroParisTech, Paris, février 2010.
- VAN DEN DOOL, H. M. A New Look at Weather Forecasting through Analogues. *Monthly Weather Review*, 117(10): 2230–2247, octobre 1989. ISSN 0027-0644, 1520-0493.
- VAN DEN DOOL, H. M. Searching for analogues, how long must we wait? *Tellus A*, 46(3): 314–324, 1994. ISSN 1600-0870.
- VIVIROLI, D., ARCHER, D. R., BUYTAERT, W., FOWLER, H. J., GREENWOOD, G. B., HAMLET, A. F., HUANG, Y., KOBOLTSCHNIG, G., LITAOR, M. I., LÓPEZ-MORENO, J. I., LORENTZ, S., SCHÄDLER, B., SCHREIER, H., SCHWAIGER, K., VUILLE, M. et WOODS, R. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(2): 471–504, février 2011. ISSN 1607-7938.
- WETTERHALL, F., HALLDIN, S. et XU, C.-y. Statistical precipitation downscaling in central Sweden with the analogue method. *Journal of Hydrology*, 306(1–4): 174–190, mai 2005. ISSN 0022-1694.
- WILHELM, B. *Reconstitution sédimentologique des extrêmes hydrologiques au cours du dernier millénaire dans les Alpes françaises : Relations avec les changements climatiques*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, juin 2012.
- WILHELM, B., ARNAUD, F., SABATIER, P., MAGAND, O., CHAPRON, E., COURP, T., TACHIKAWA, K., FANGET, B., MALET, E., PIGNOL, C., BARD, E. et DELANNOY, J. J. Palaeoflood activity and climate change over the last 1400 years recorded by lake sediments in the north-west European Alps. *Journal of Quaternary Science*, 28(2): 189–199, 2013. ISSN 1099-1417.
- WILHELM, I. La Durance et son Utilisation (part. 3). *La Houille Blanche*, (5): 115–117, mai 1910a. ISSN 0018-6368.
- WILHELM, I. La Durance et son Utilisation (part. 4). *La Houille Blanche*, (12): 321–327, juin 1910b. ISSN 0018-6368.
- WILHELM, I. *La Durance, étude de l'utilisation de ses eaux et de l'amélioration de son régime par la création de barrages*, par Ivan Wilhelm. L. Laveur, 1913.
- WILKS, D. S. *Statistical methods in the atmospheric sciences, Vol. 59 of International Geophysics Series*. Academic Press, 1995.
- WILKS, D. S. Projecting 'Normals' in a Nonstationary Climate. *Journal of Applied Meteorology & Climatology*, 52(2): 289–302, février 2013. ISSN 15588424.
- WILSON, D., HISDAL, H. et LAWRENCE, D. Has streamflow changed in the Nordic countries? - Recent trends and comparisons to hydrological projections. *Journal of Hydrology*, 394(3-4): 334–346, novembre 2010. ISSN 0022-1694.
- WINKLER, R. L. et MAKRIDAKIS, S. The Combination of Forecasts. *Journal of the Royal Statistical Society. Series A (General)*, 146(2): 150, 1983. ISSN 00359238.
- WYART, P. Monographie hydrologique du Guil, affluent de la Durance. *La Houille Blanche*, (num. spécial A): 247–263, 1950. ISSN 0018-6368.
- ZHANG, X., HARVEY, K. D., HOGG, W. D. et YUZYK, T. R. Trends in Canadian streamflow. *Water Resources Research*, 37(4): 987–998, 2001. ISSN 1944-7973.
- ZORITA, E. et VON STORCH, H. The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods. *Journal of Climate*, 12(8): 2474–2489, août 1999. ISSN 0894-8755, 1520-0442.

Annexes

A

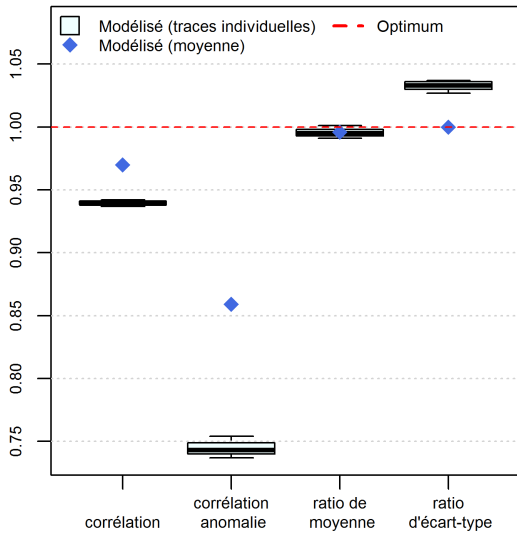
**Reconstitution des températures de l'air sur
le bassin de l'Ubaye à Barcelonnette par le
modèle ANATEM avec un témoin issu de la
réanalyse**

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. épaisseur 20CR)
Température journalière - Année hydrologique 2002/2003



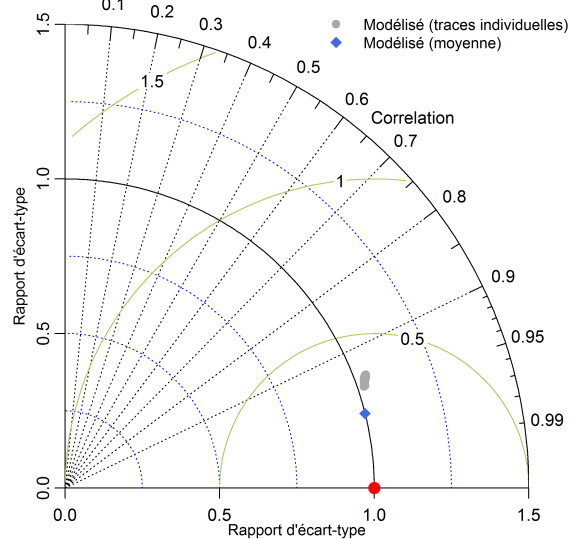
(a)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. épaisseur 20CR)
Température journalière - Scores



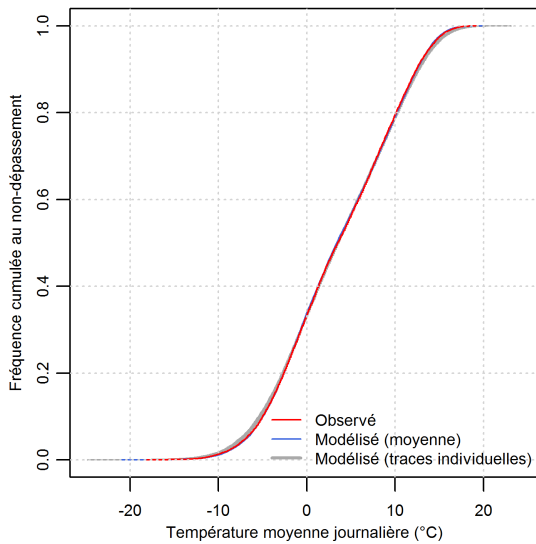
(b)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. épaisseur 20CR)
Température journalière - Diagramme de Taylor



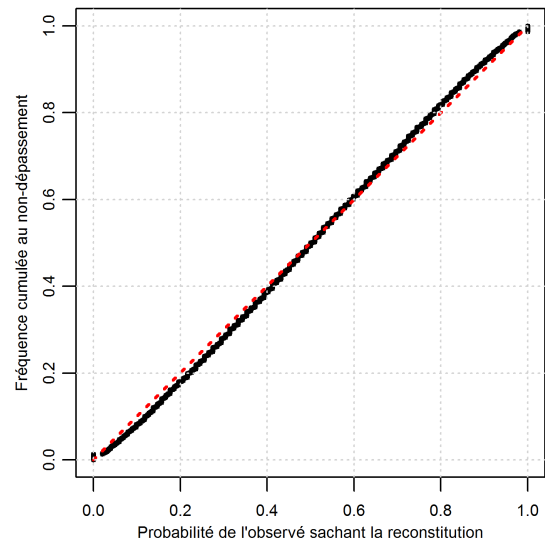
(c)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. épaisseur 20CR)
Température journalière - Distribution



(d)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. épaisseur 20CR)
Température journalière - Diagramme de fiabilité



(e)

Figure A.1 – Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin épaisseur 20CR - Pas de temps journalier

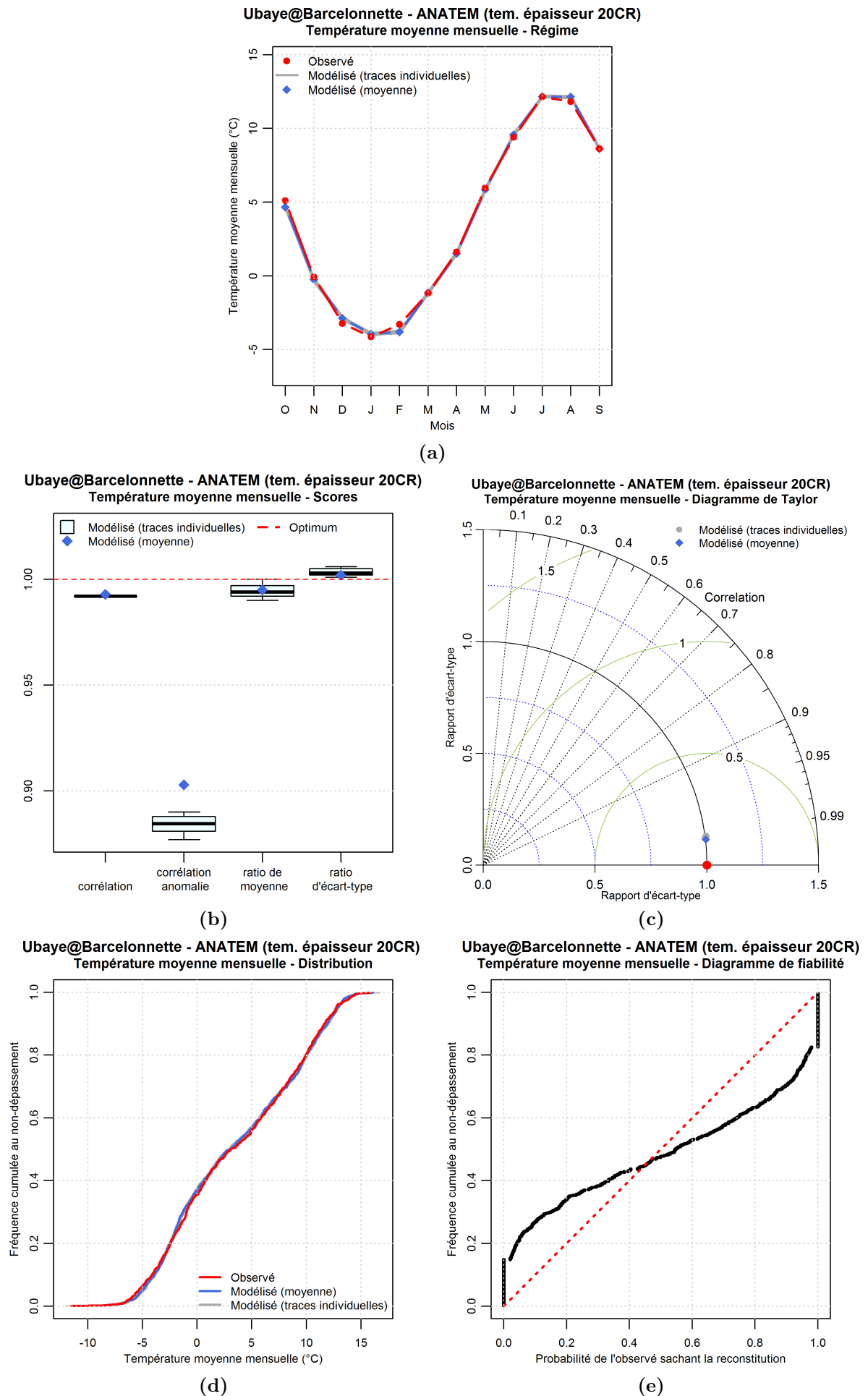
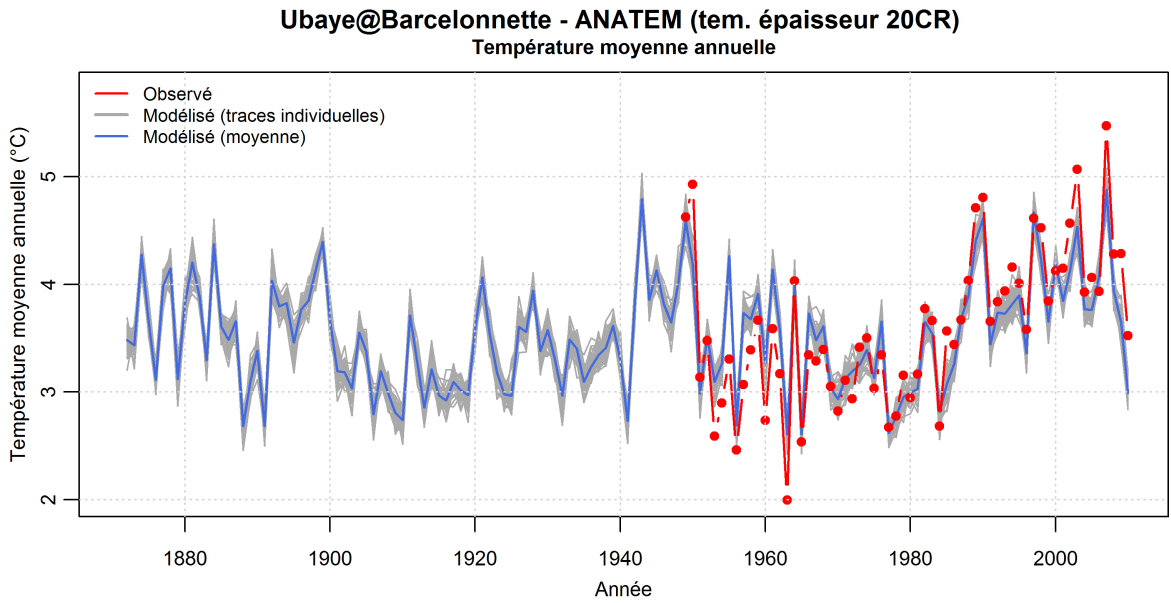
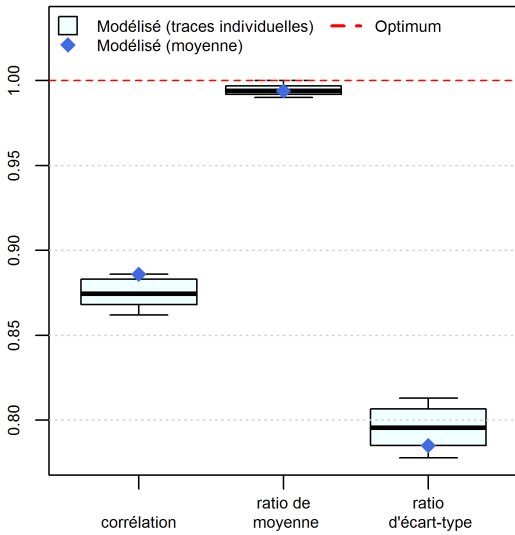


Figure A.2 – Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin épaisseur 20CR - Pas de temps mensuel



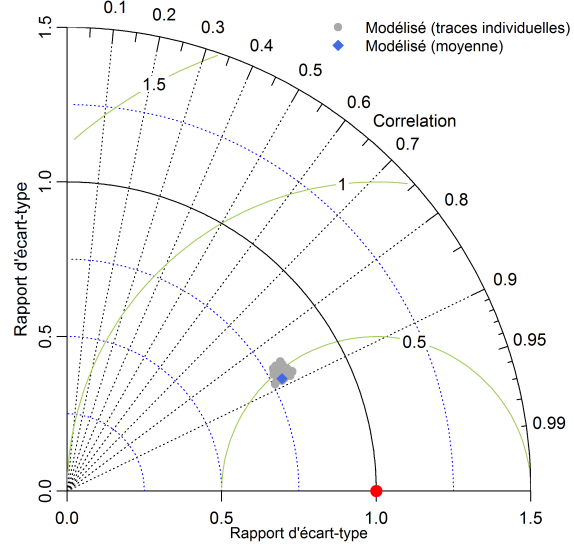
(a)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. épaisseur 20CR)
Température moyenne annuelle - Scores



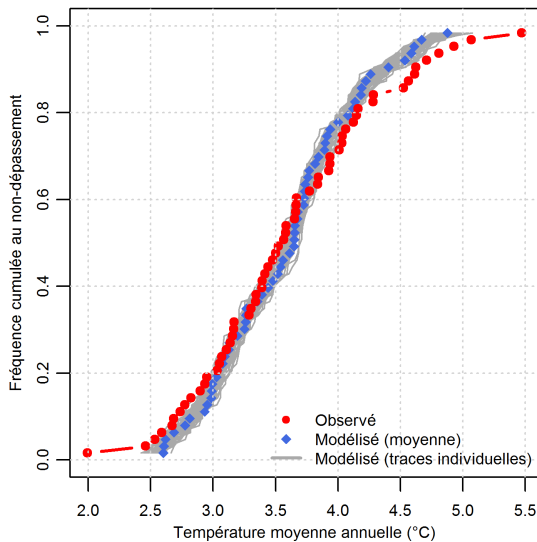
(b)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. épaisseur 20CR)
Température moyenne annuelle - Diagramme de Taylor



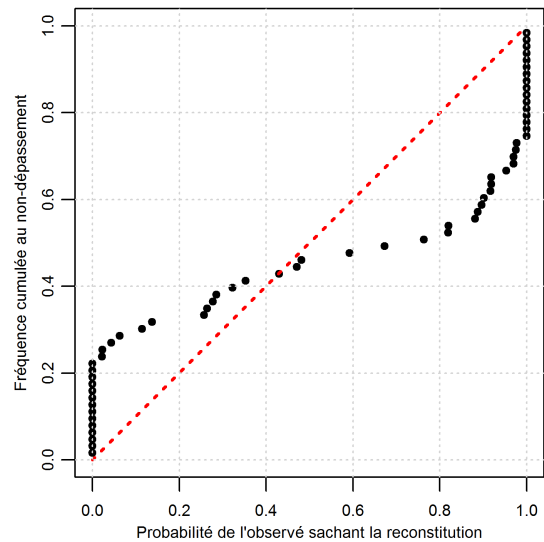
(c)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. épaisseur 20CR)
Température moyenne annuelle - Distribution



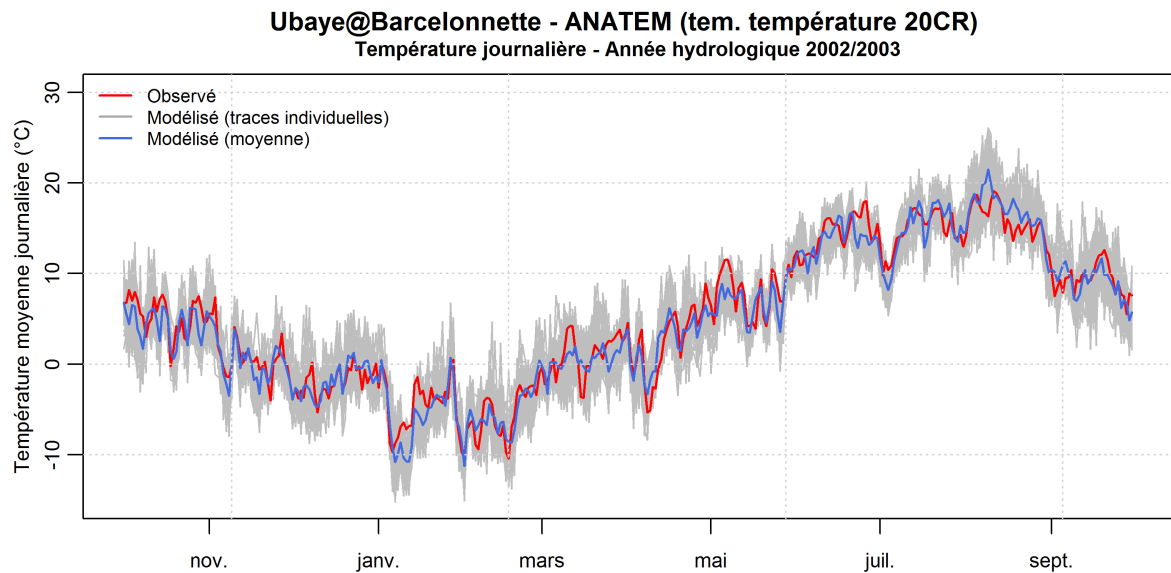
(d)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. épaisseur 20CR)
Température moyenne annuelle - Diagramme de fiabilité



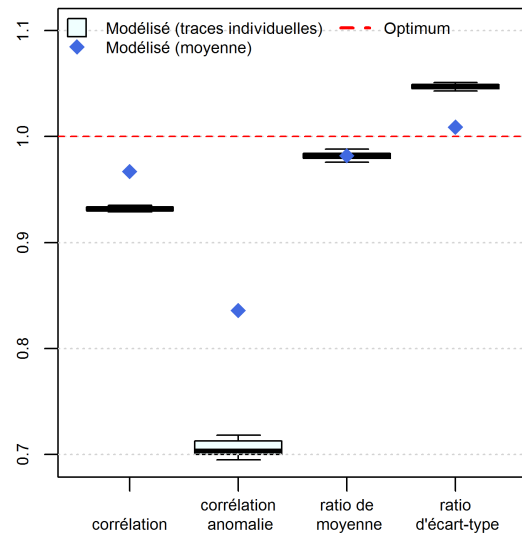
(e)

Figure A.3 – Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin épaisseur 20CR - Pas de temps annuel



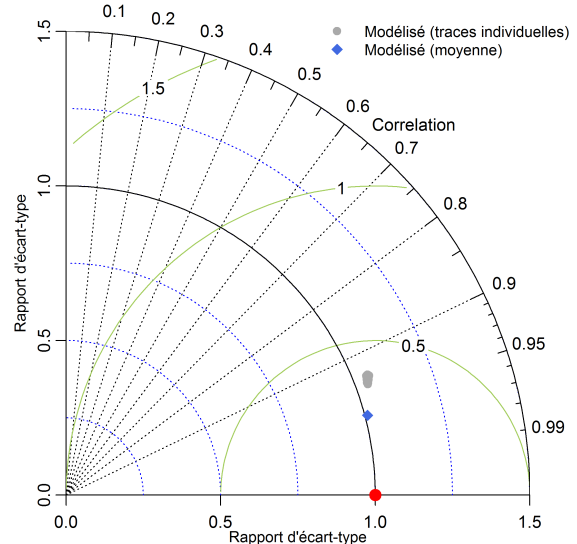
(a)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. température 20CR)
Température journalière - Scores



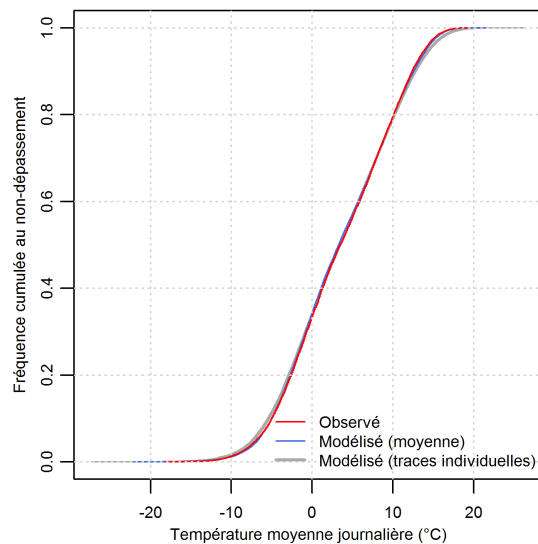
(b)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. température 20CR)
Température journalière - Diagramme de Taylor



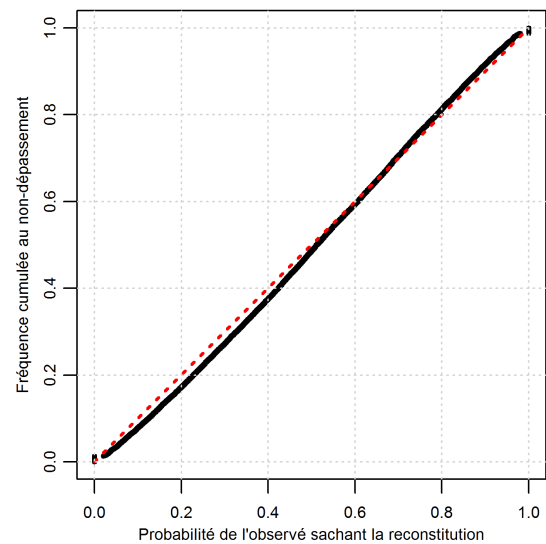
(c)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. température 20CR)
Température journalière - Distribution



(d)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. température 20CR)
Température journalière - Diagramme de fiabilité



(e)

Figure A.4 – Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin température au sol 20CR - Pas de temps journalier

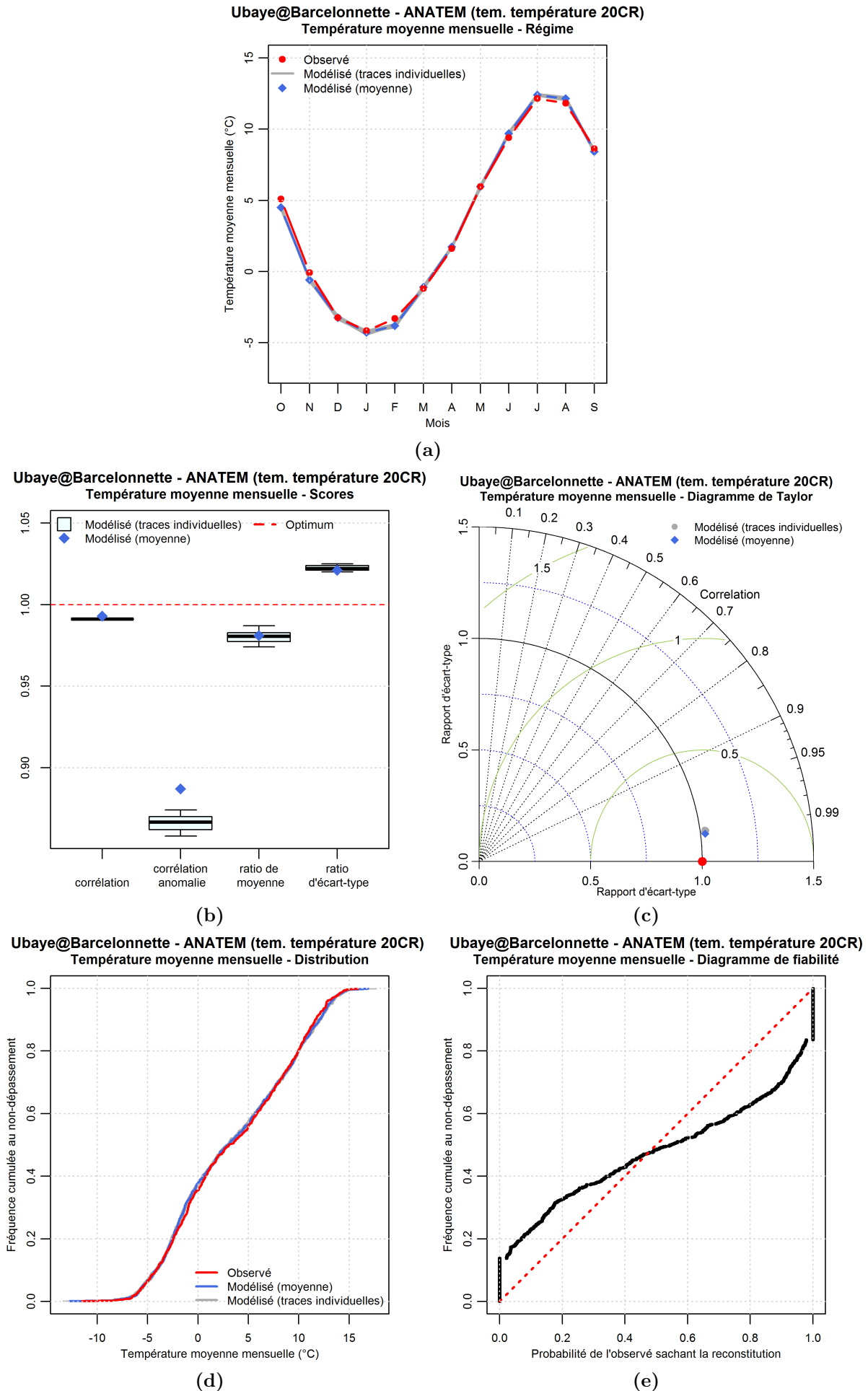
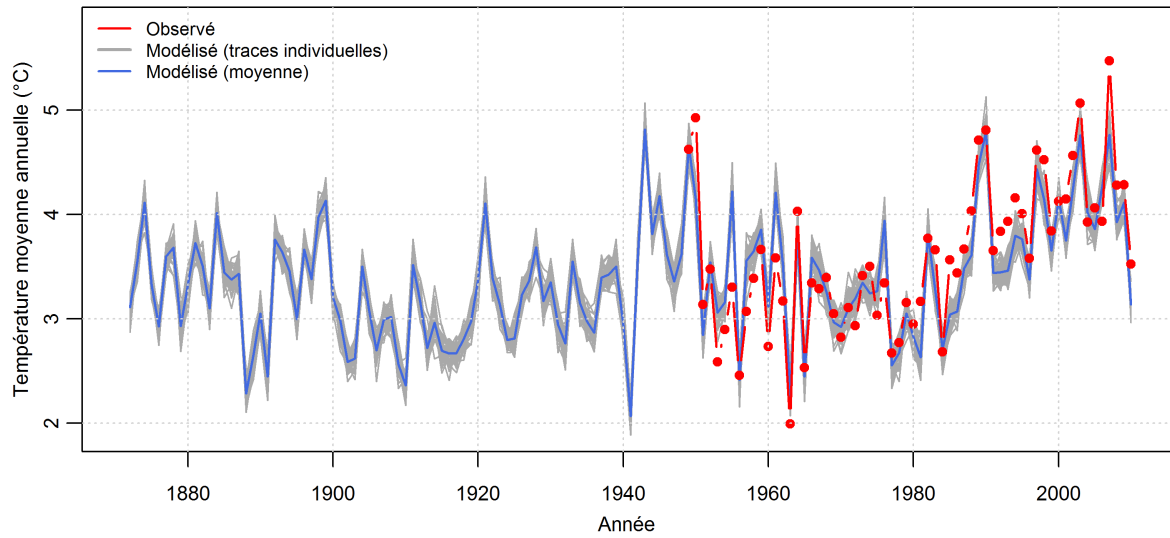


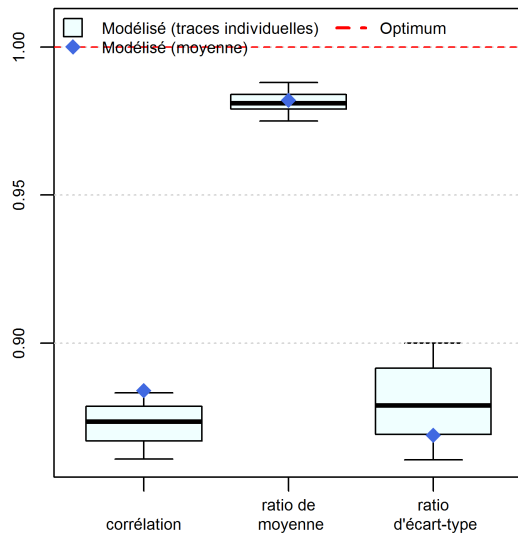
Figure A.5 – Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin température au sol 20CR - Pas de temps mensuel

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. température 20CR)
Température moyenne annuelle



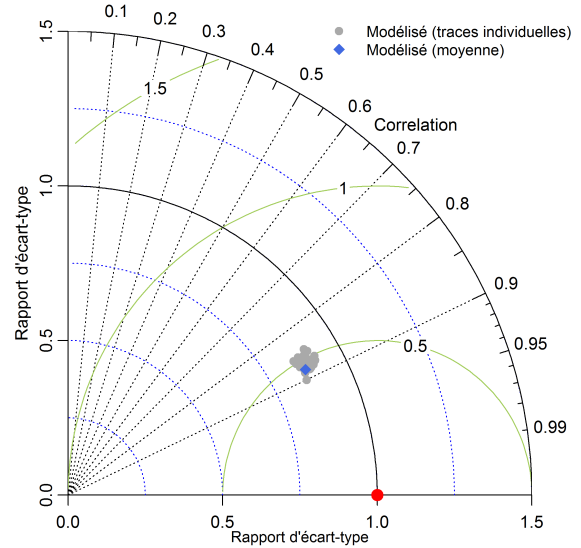
(a)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. température 20CR)
Température moyenne annuelle - Scores



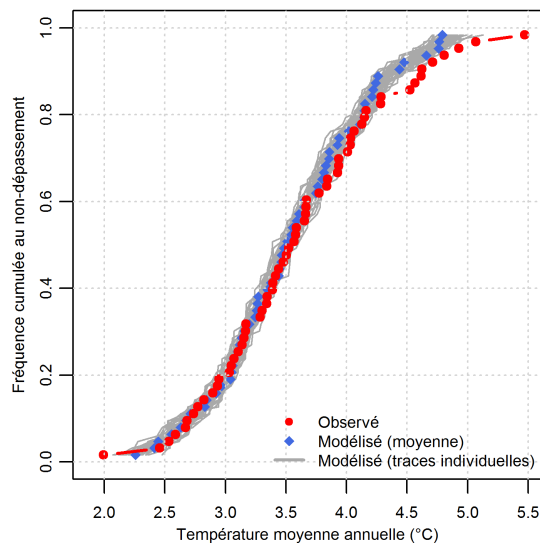
(b)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. température 20CR)
Température moyenne annuelle - Diagramme de Taylor



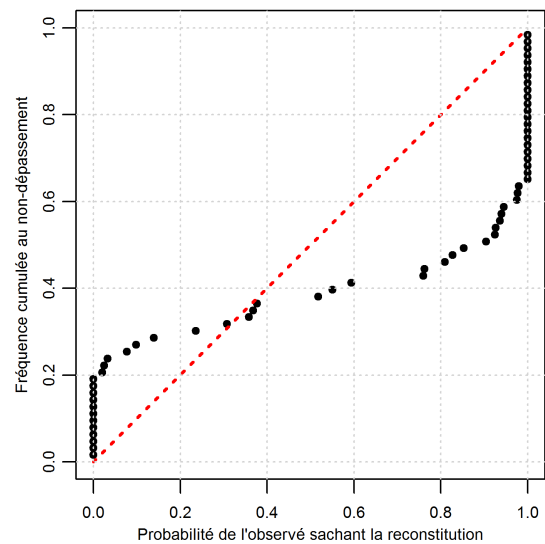
(c)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. température 20CR)
Température moyenne annuelle - Distribution



(d)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. température 20CR)
Température moyenne annuelle - Diagramme de fiabilité

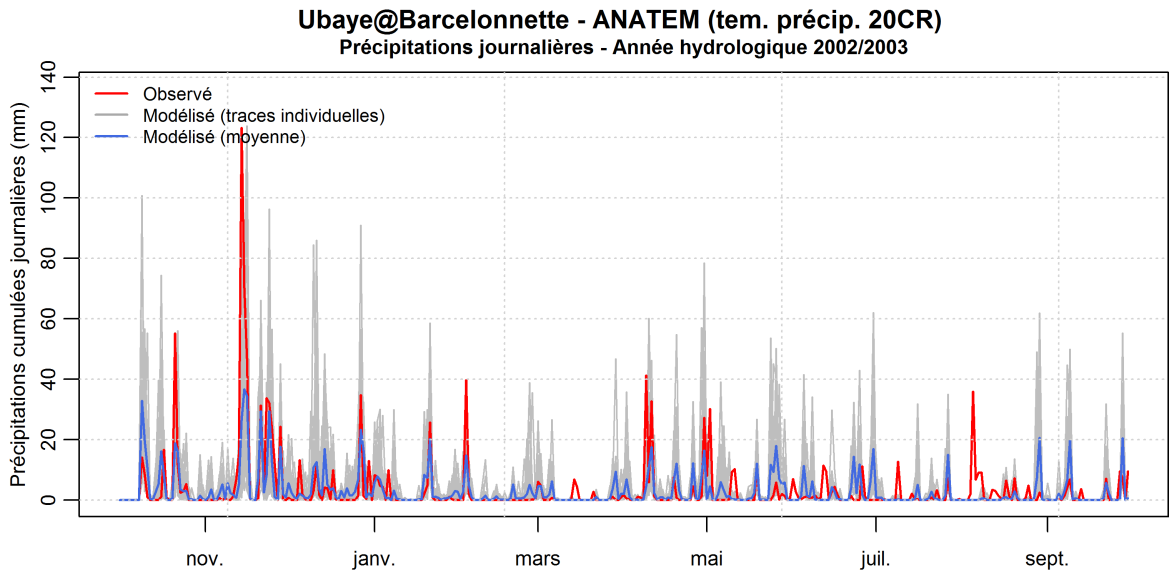


(e)

Figure A.6 – Températures de l'air du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin température au sol 20CR - Pas de temps annuel

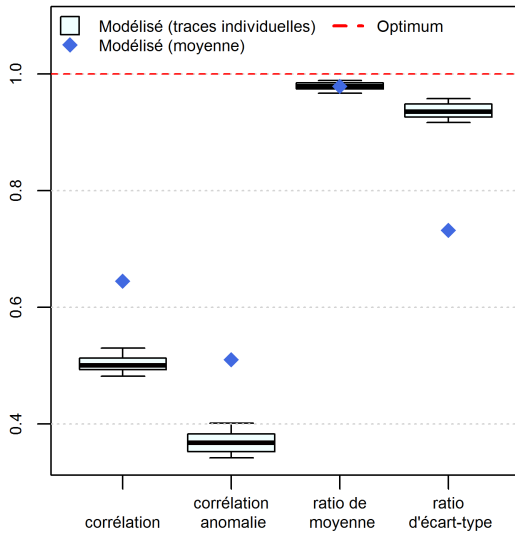
B

**Reconstitution des précipitations sur le bassin
de l'Ubaye à Barcelonnette par le modèle
ANATEM avec un témoin issu de la réanalyse**



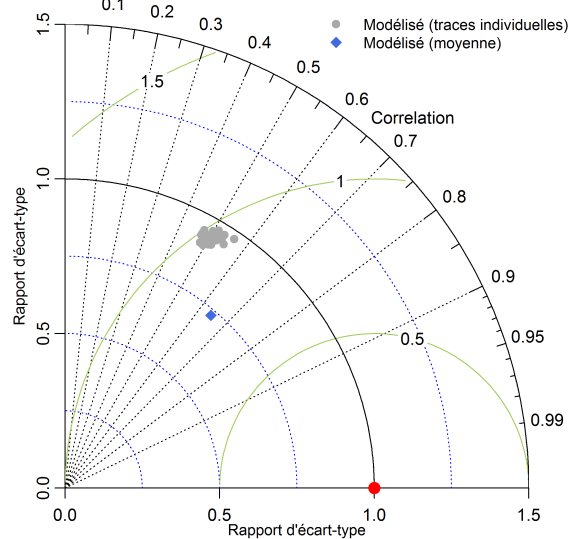
(a)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. précip. 20CR)
Précipitations journalières - Scores



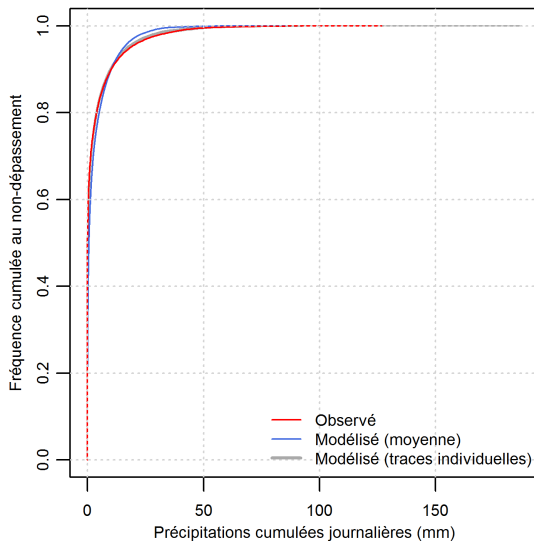
(b)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. précip. 20CR)
Précipitations journalières - Diagramme de Taylor



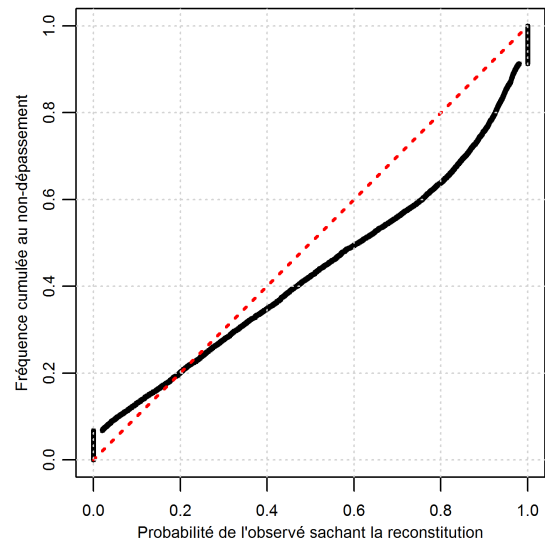
(c)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. précip. 20CR)
Précipitations journalières - Distribution



(d)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. précip. 20CR)
Précipitations journalières - Diagramme de fiabilité (j. pluvieux)



(e)

Figure B.1 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin précipitations 20CR - Pas de temps journalier

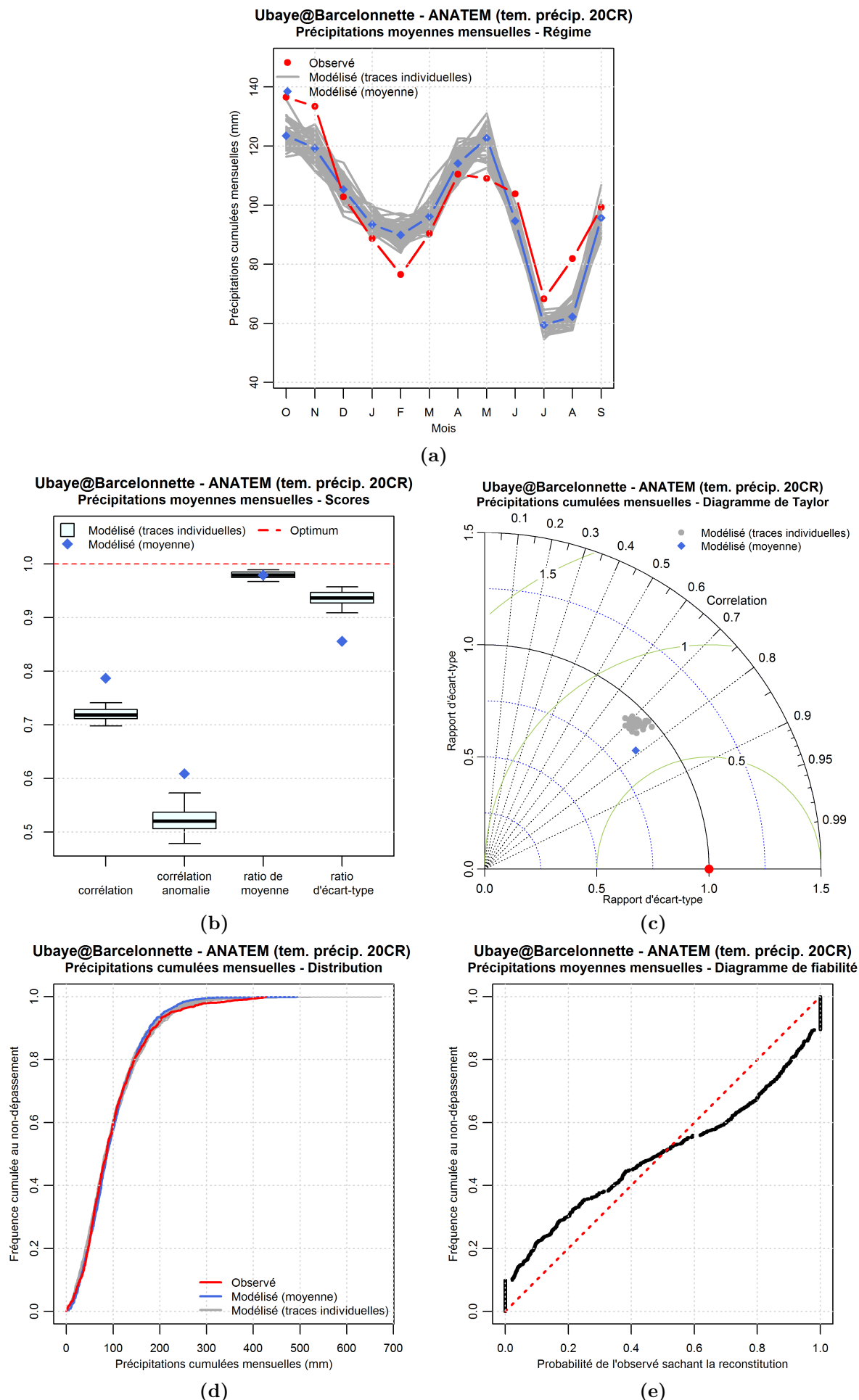
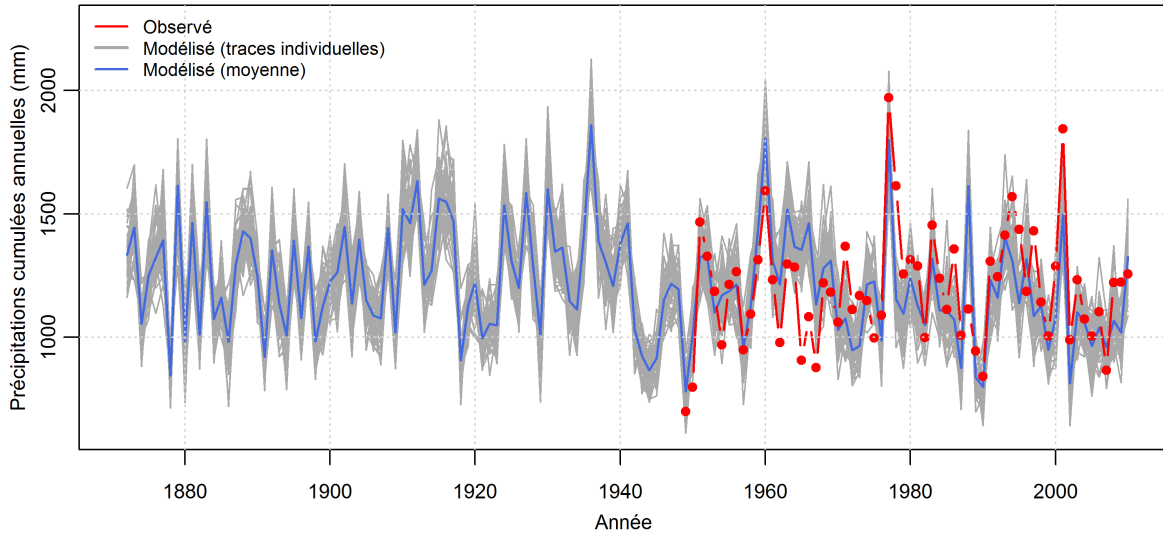


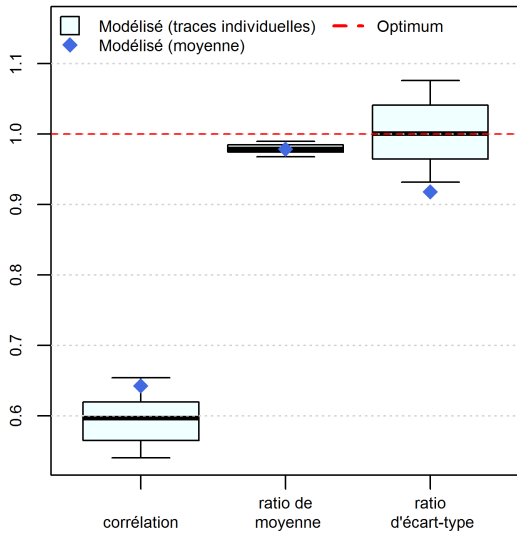
Figure B.2 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin précipitations 20CR - Pas de temps mensuel

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. précip. 20CR)
Précipitations cumulées annuelles



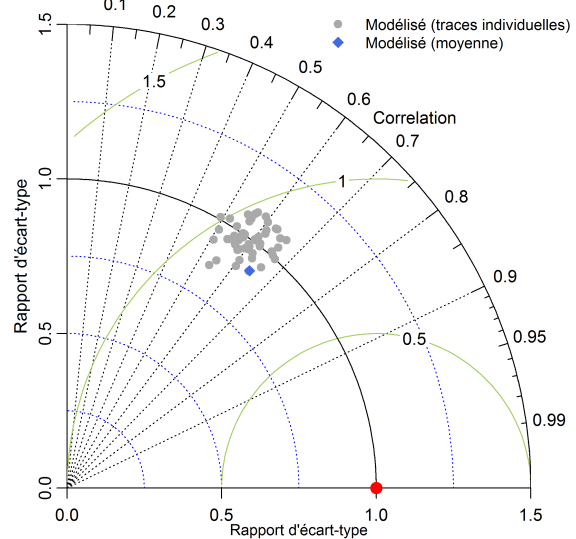
(a)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. précip. 20CR)
Précipitations moyennes annuelle - Scores



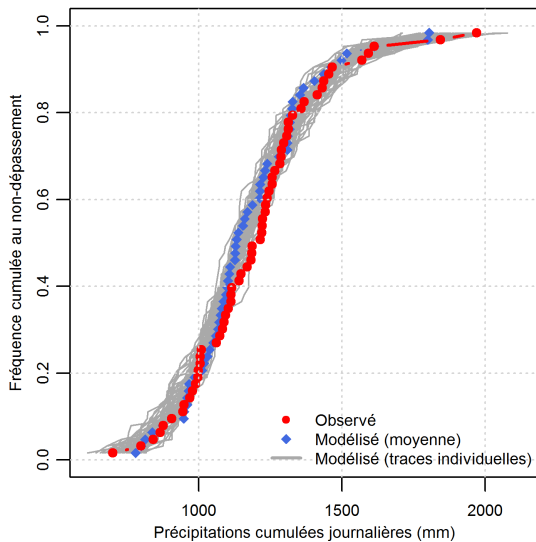
(b)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. précip. 20CR)
Précipitations cumulées annuelles - Diagramme de Taylor



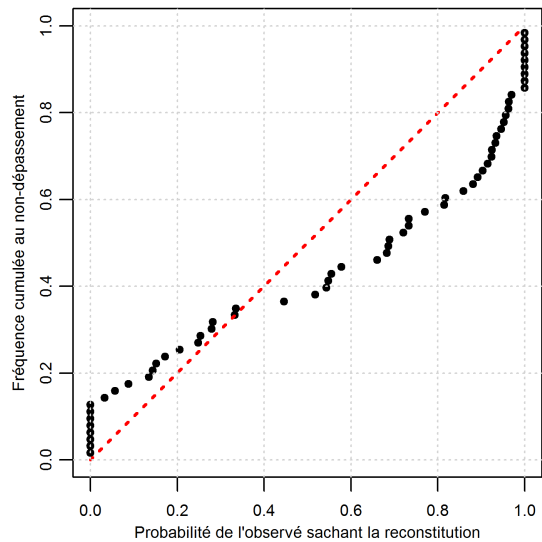
(c)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. précip. 20CR)
Précipitations cumulées annuelles - Distribution



(d)

Ubaye@Barcelonnette - ANATEM (tem. précip. 20CR)
Précipitations moyennes annuelle - Diagramme de fiabilité



(e)

Figure B.3 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec le témoin précipitations 20CR - Pas de temps annuel



**Reconstitution des précipitations sur le bassin
de l'Ubaye à Barcelonnette par les modèles
ANA et ANATEM avec « resampling »**

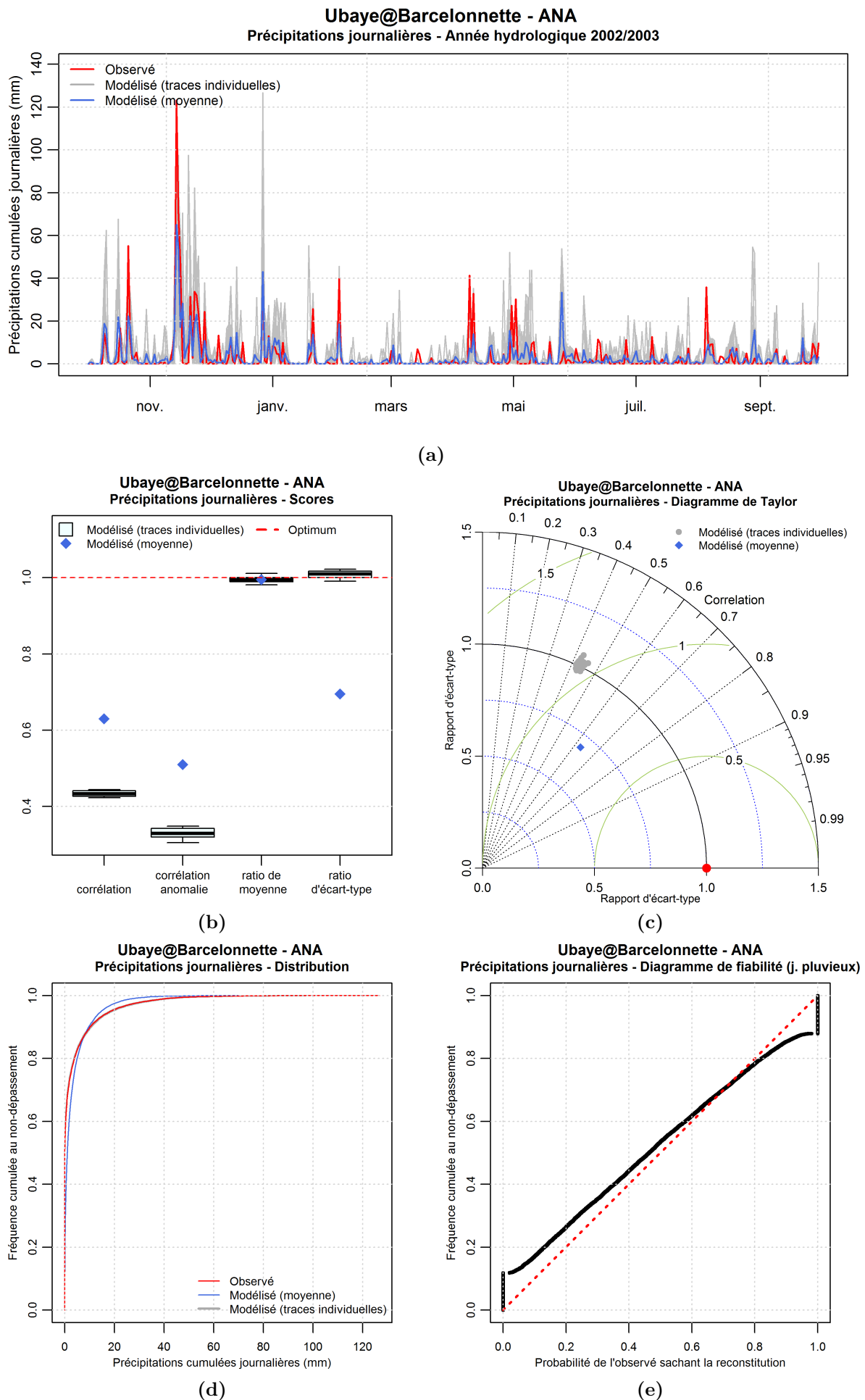


Figure C.1 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec resampling - Pas de temps journalier

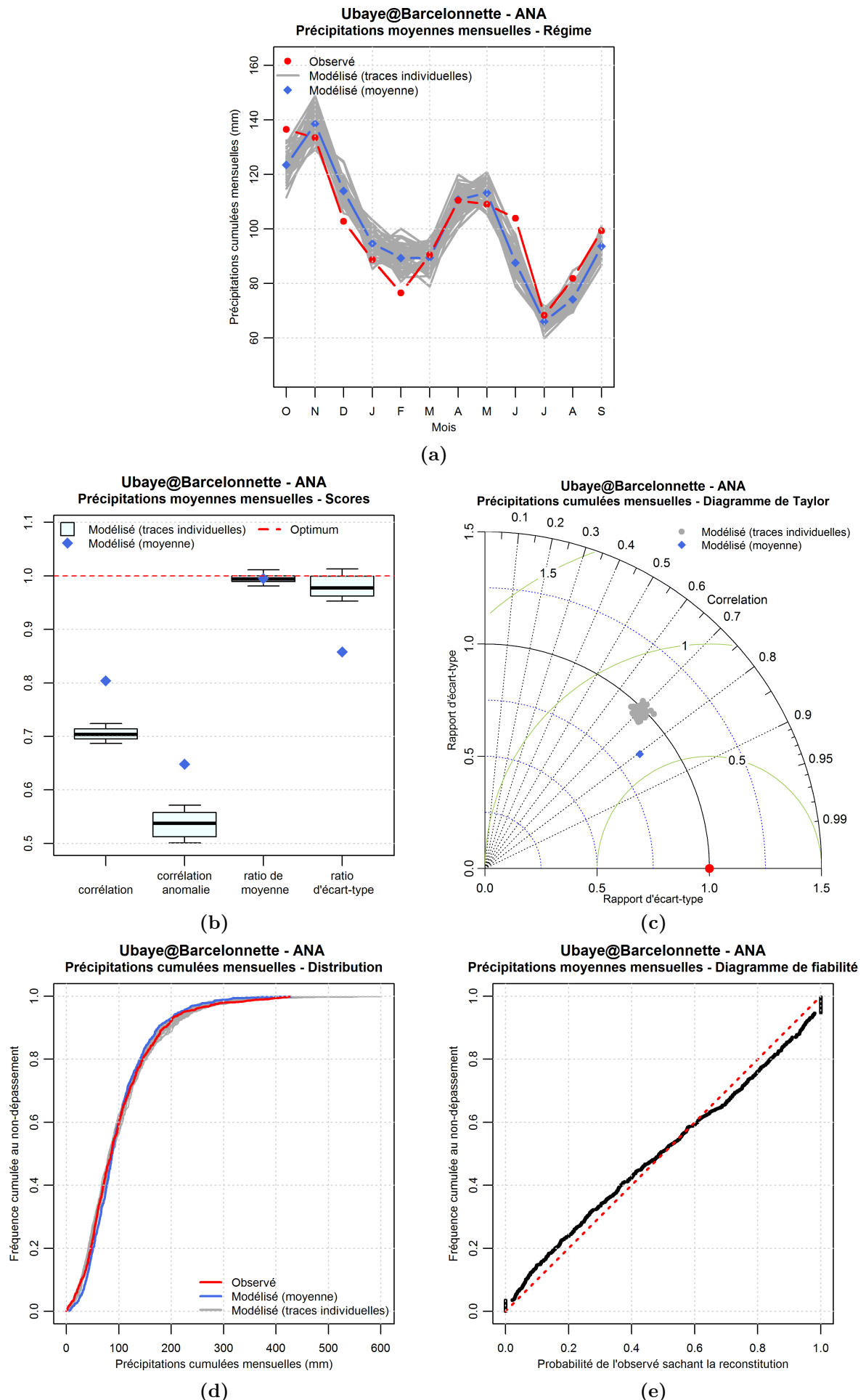
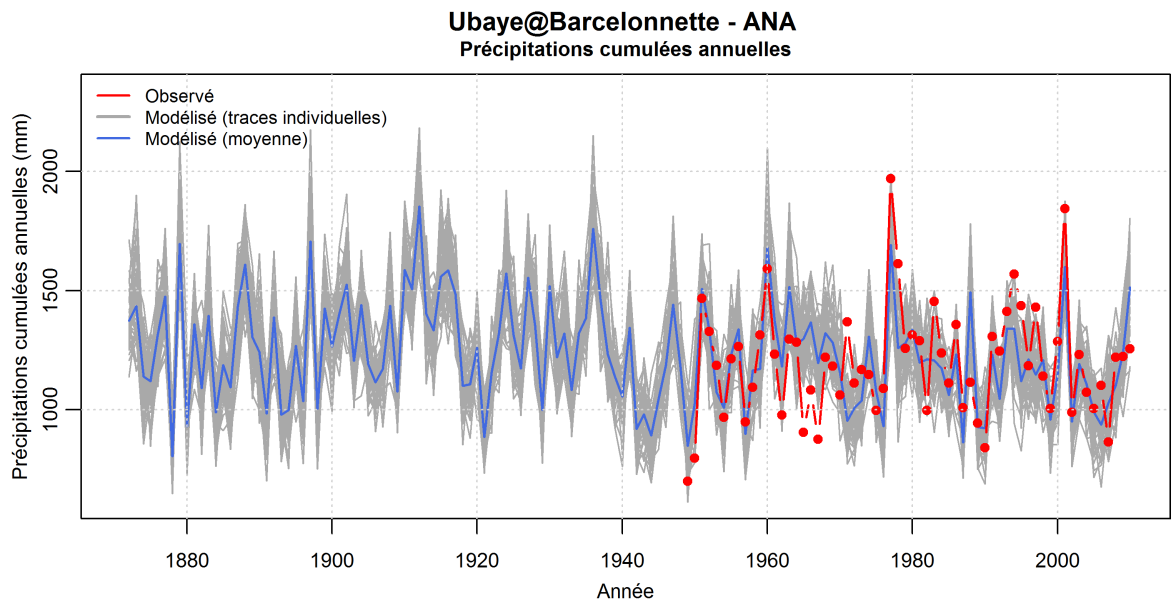
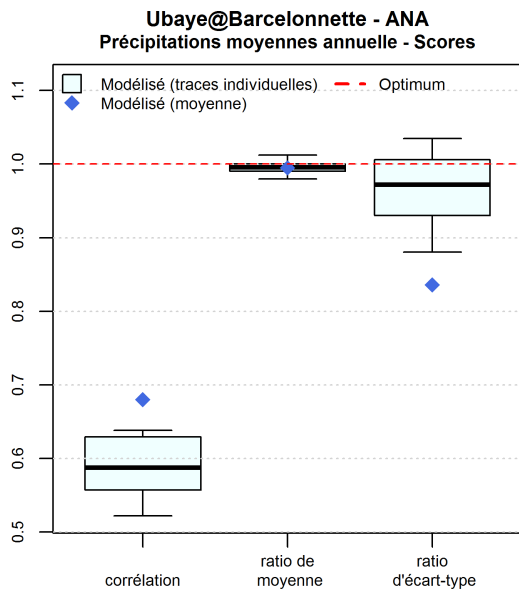


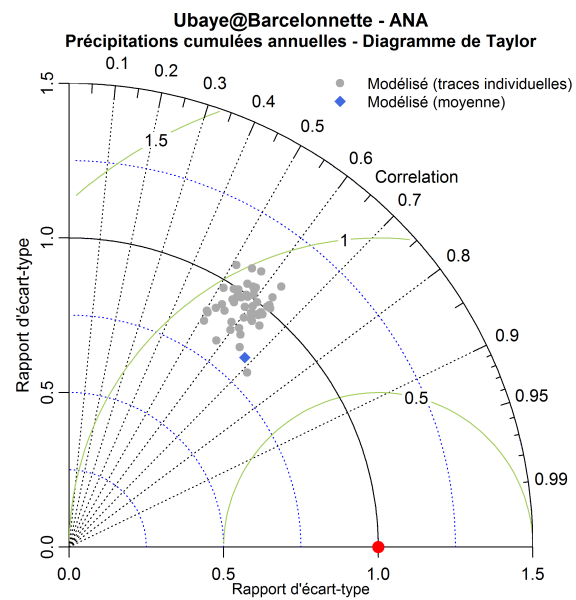
Figure C.2 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec resampling - Pas de temps mensuel



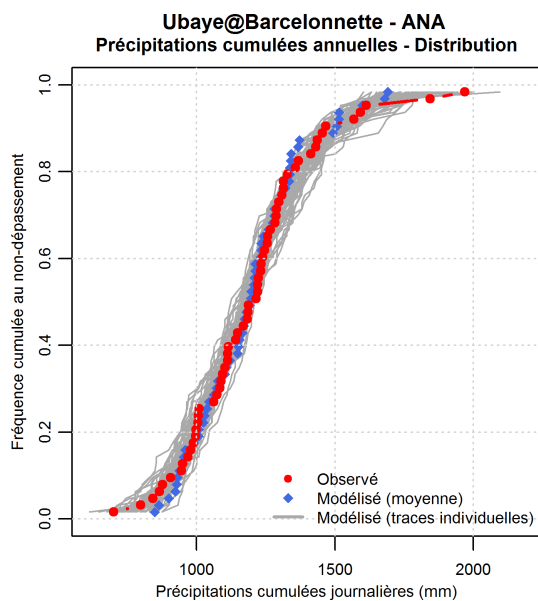
(a)



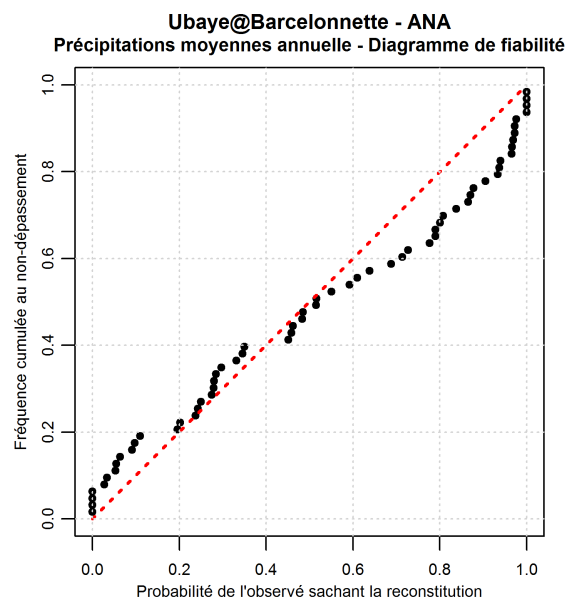
(b)



(c)

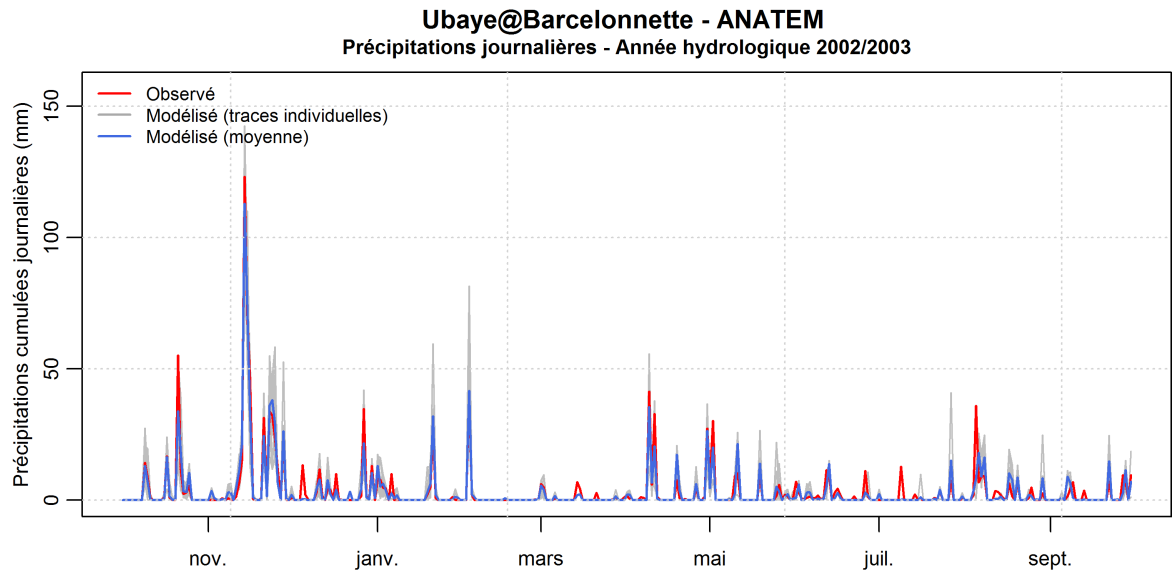


(d)

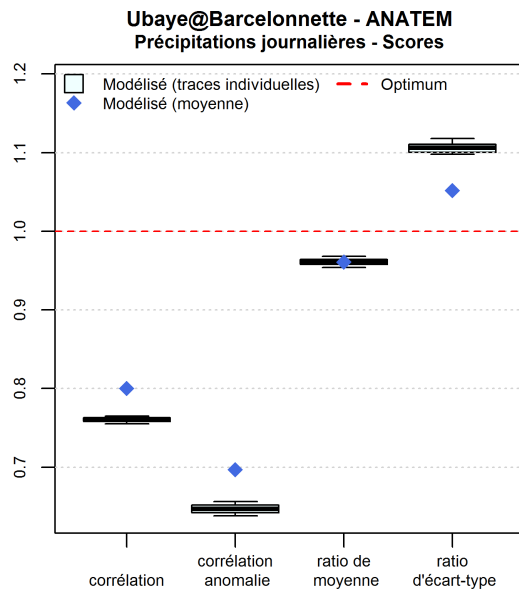


(e)

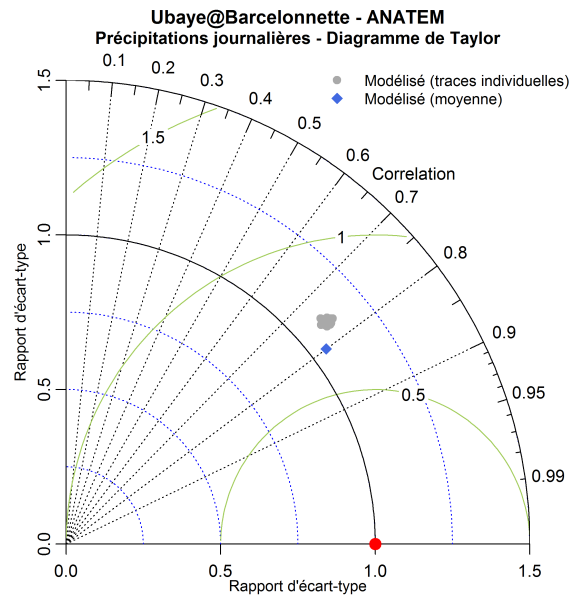
Figure C.3 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec resampling - Pas de temps annuel



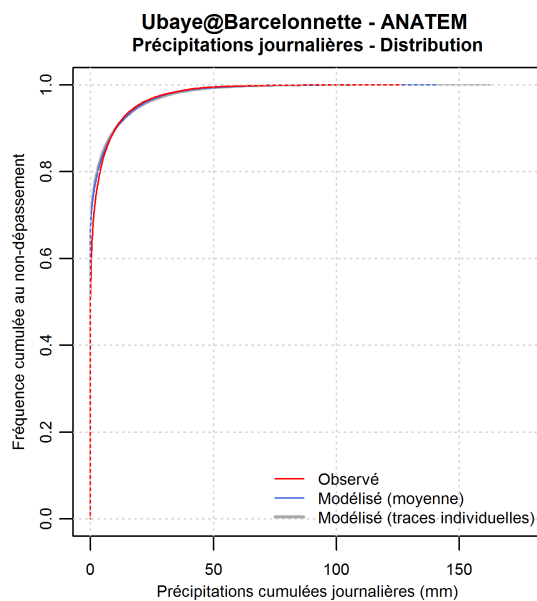
(a)



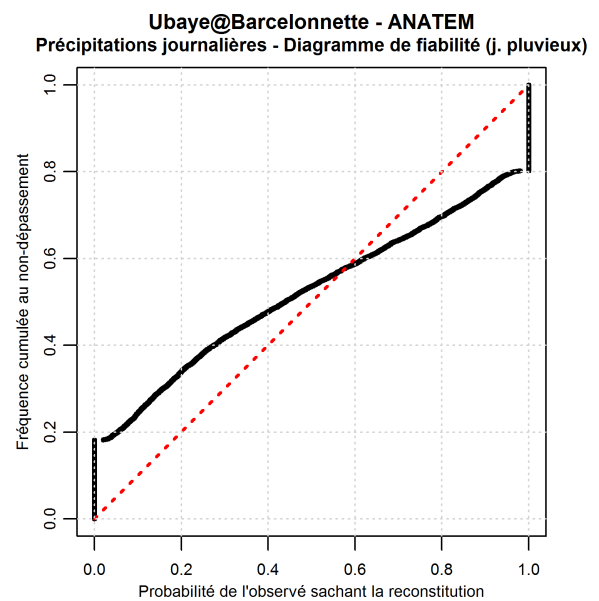
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure C.4 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec resampling - Pas de temps journalier

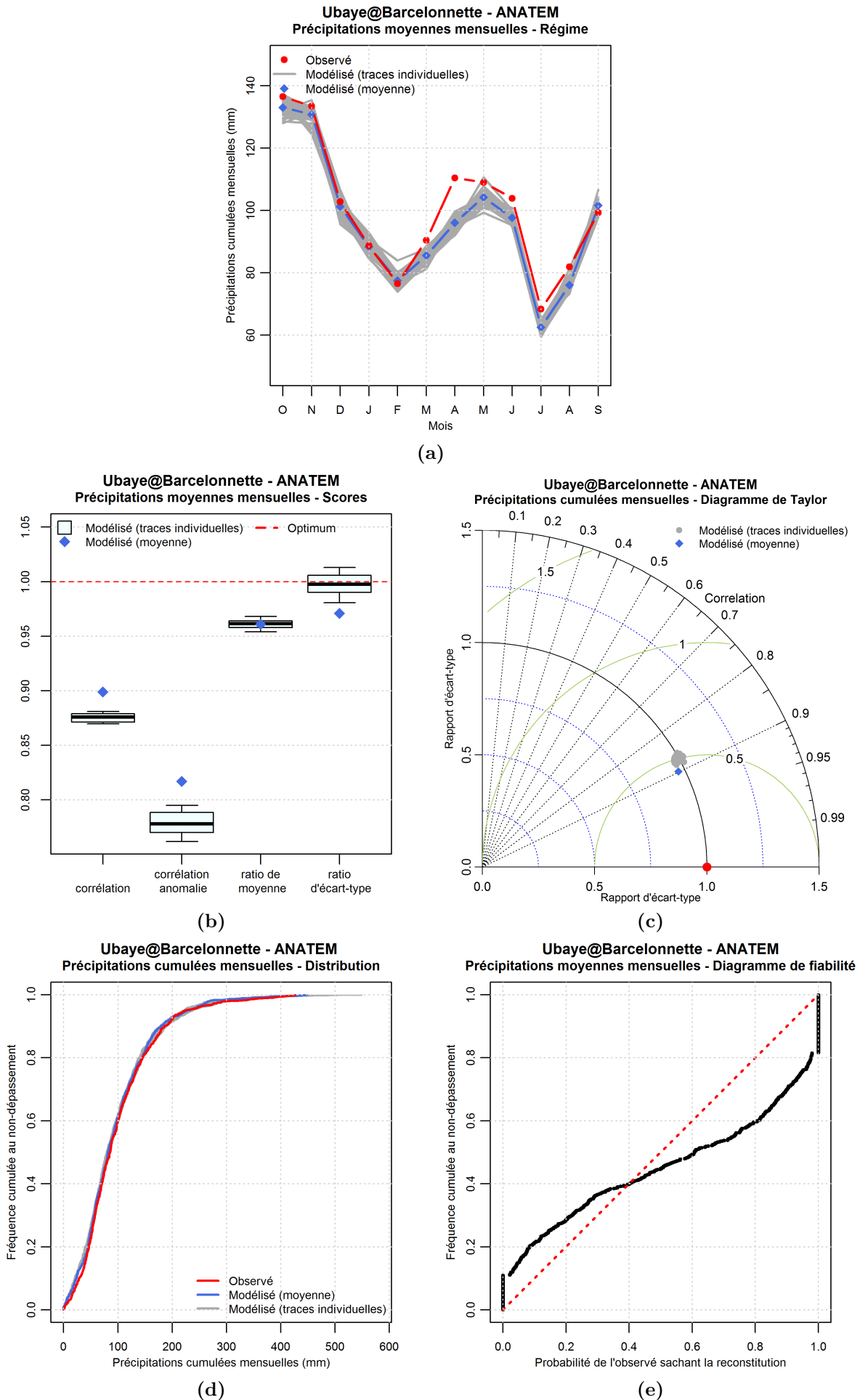


Figure C.5 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec resampling - Pas de temps mensuel

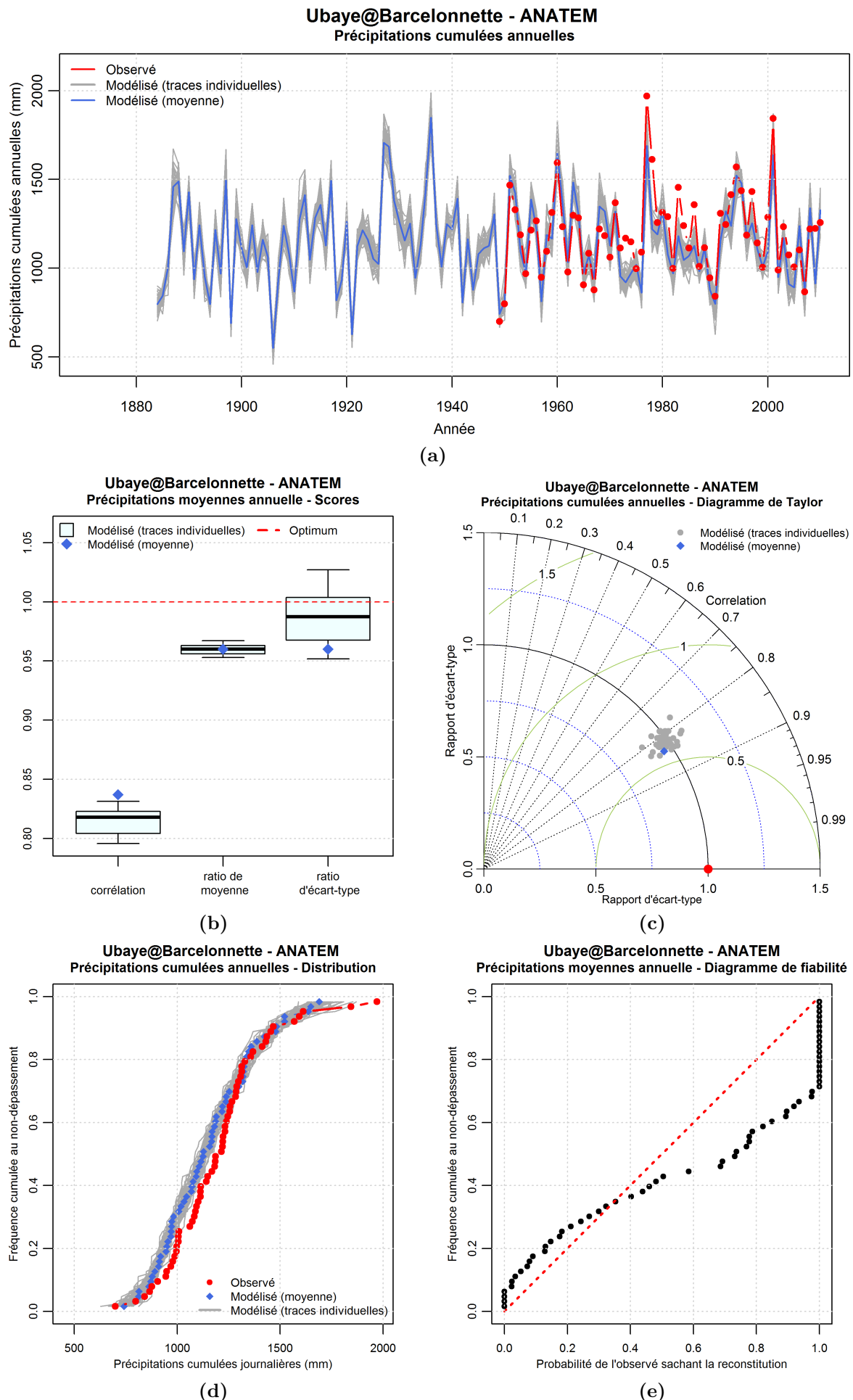


Figure C.6 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANATEM avec resampling - Pas de temps annuel



**Reconstitution des précipitations sur le bassin
de l'Ubaye à Barcelonnette par le modèle
ANA à partir des données synoptiques
EMULATE**

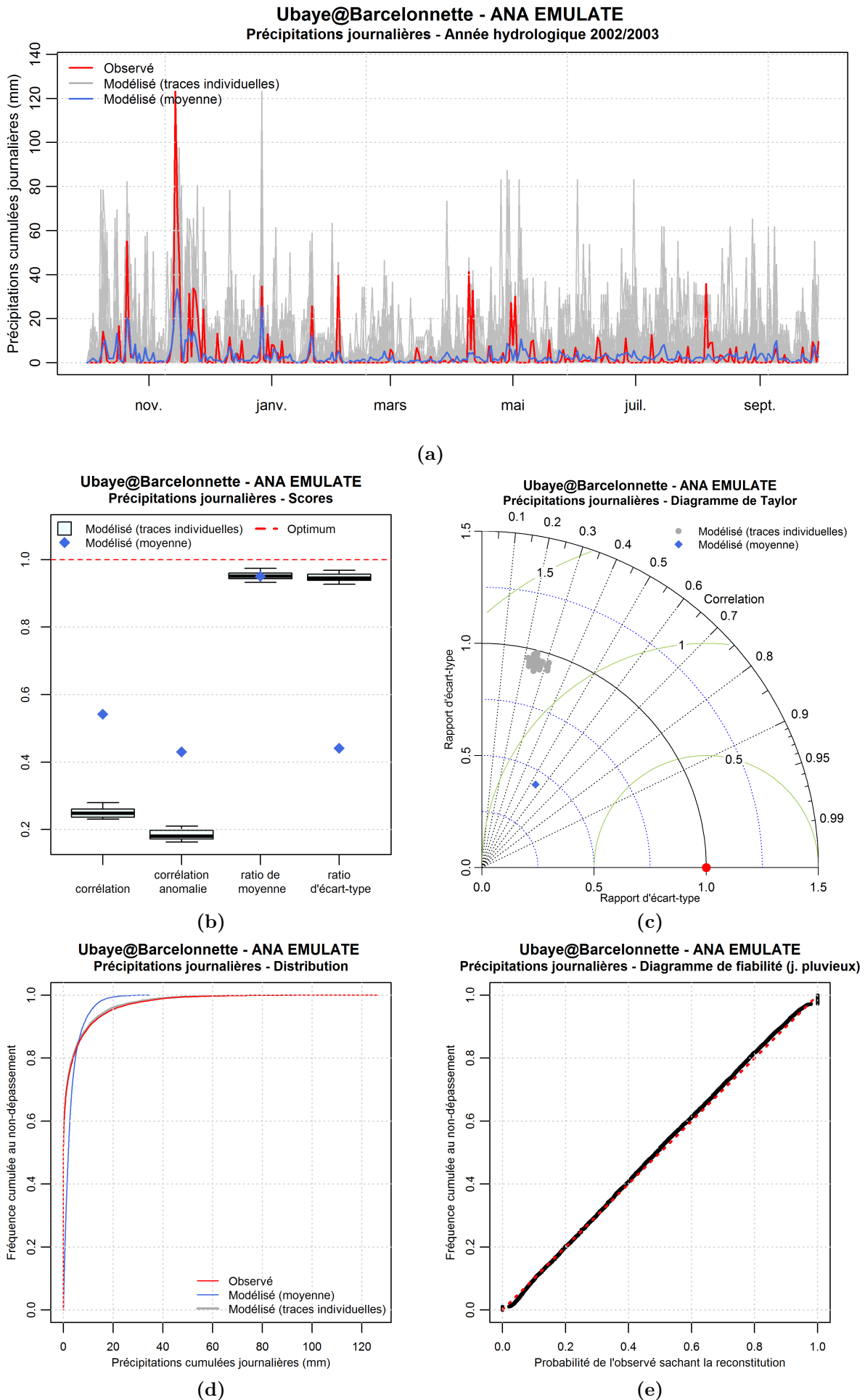


Figure D.1 – Précipitations du bassin de l’Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec données synoptiques EMULATE - Pas de temps journalier

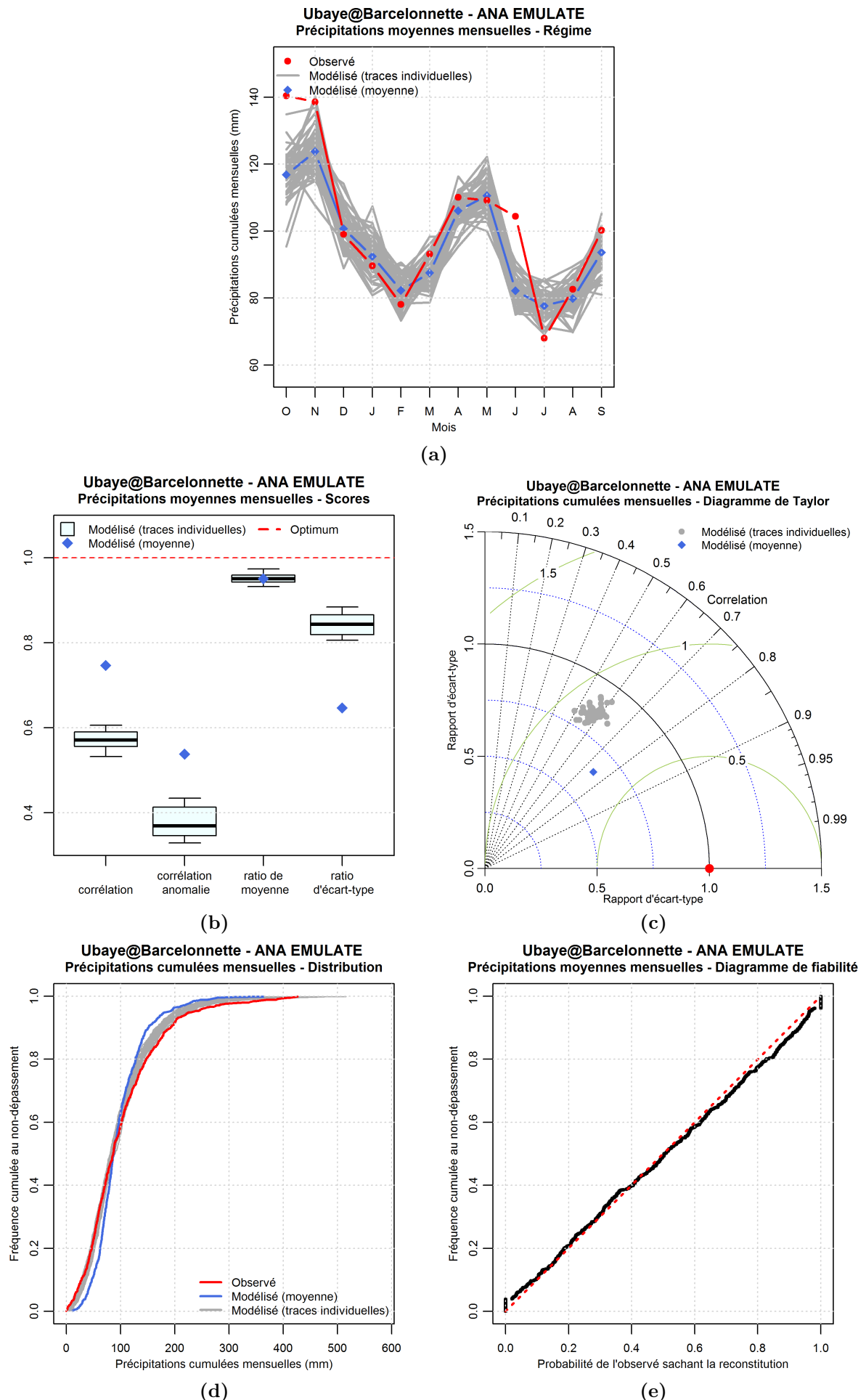
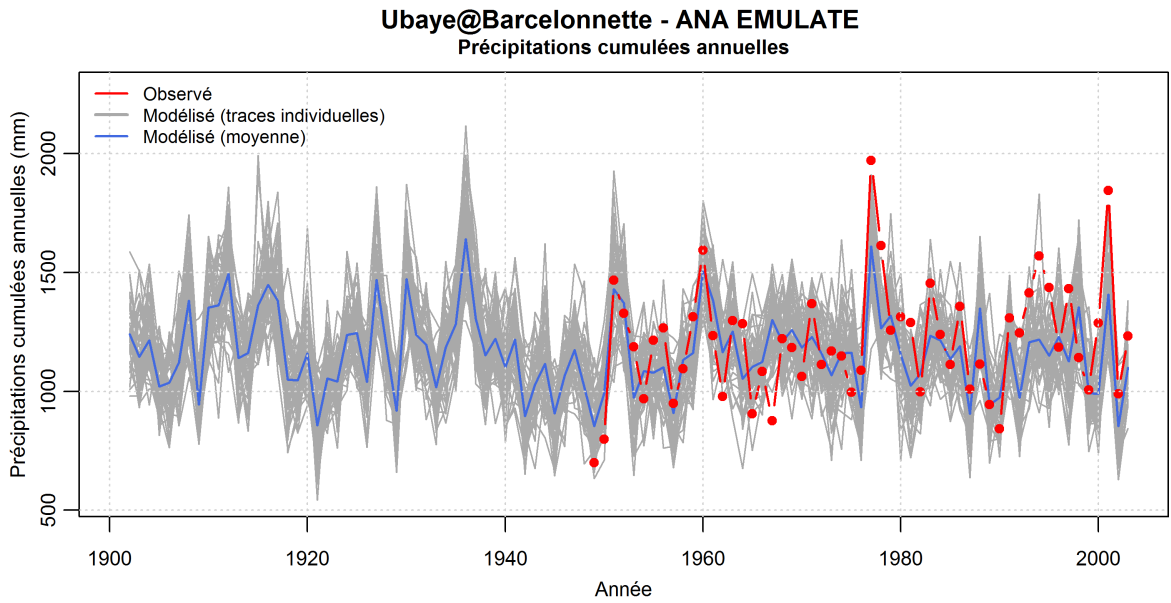
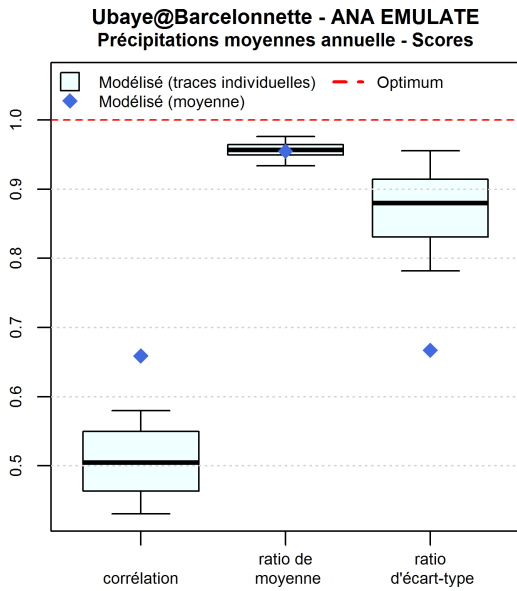


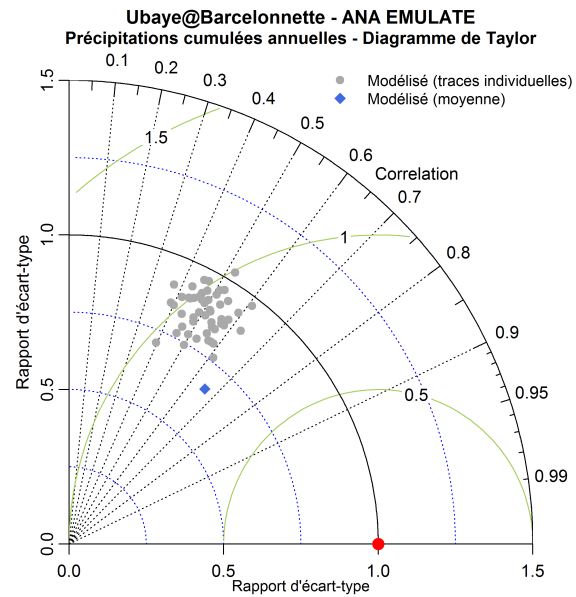
Figure D.2 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec données synoptiques EMULATE - Pas de temps mensuel



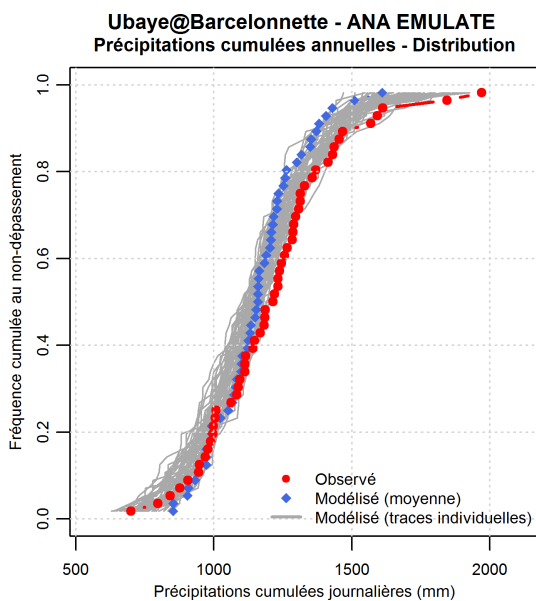
(a)



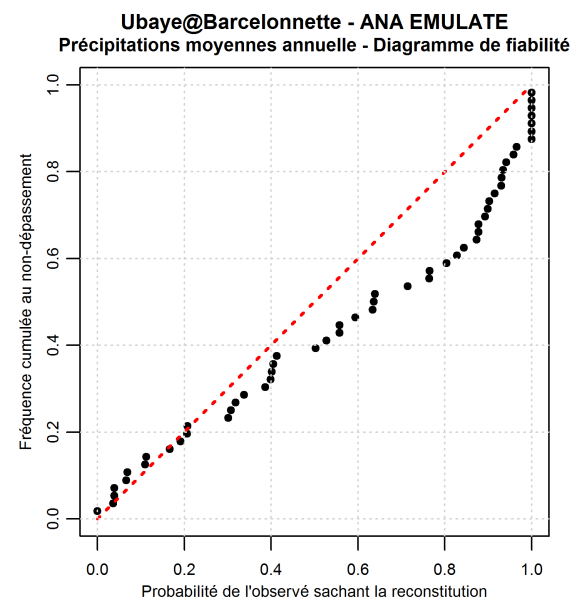
(b)



(c)



(d)



(e)

Figure D.3 – Précipitations du bassin de l'Ubaye à Barcelonnette - Modèle ANA avec données synoptiques EMULATE - Pas de temps annuel

E

**Reconstitutions de la série hydrologique de
l'Ubaye à Barcelonnette à partir des séries
climatiques ANA et TEM**

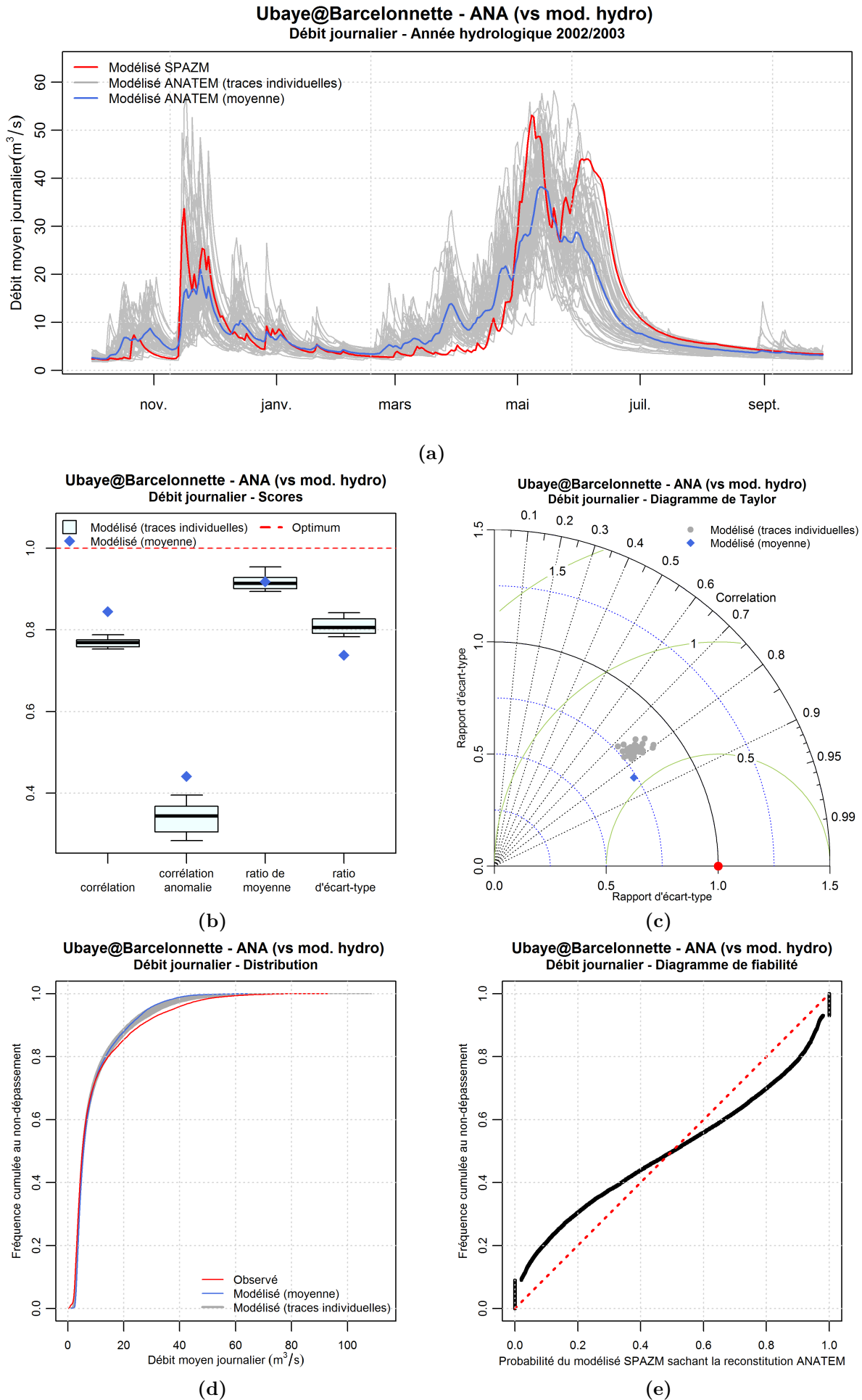


Figure E.1 – Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l’Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps journalier

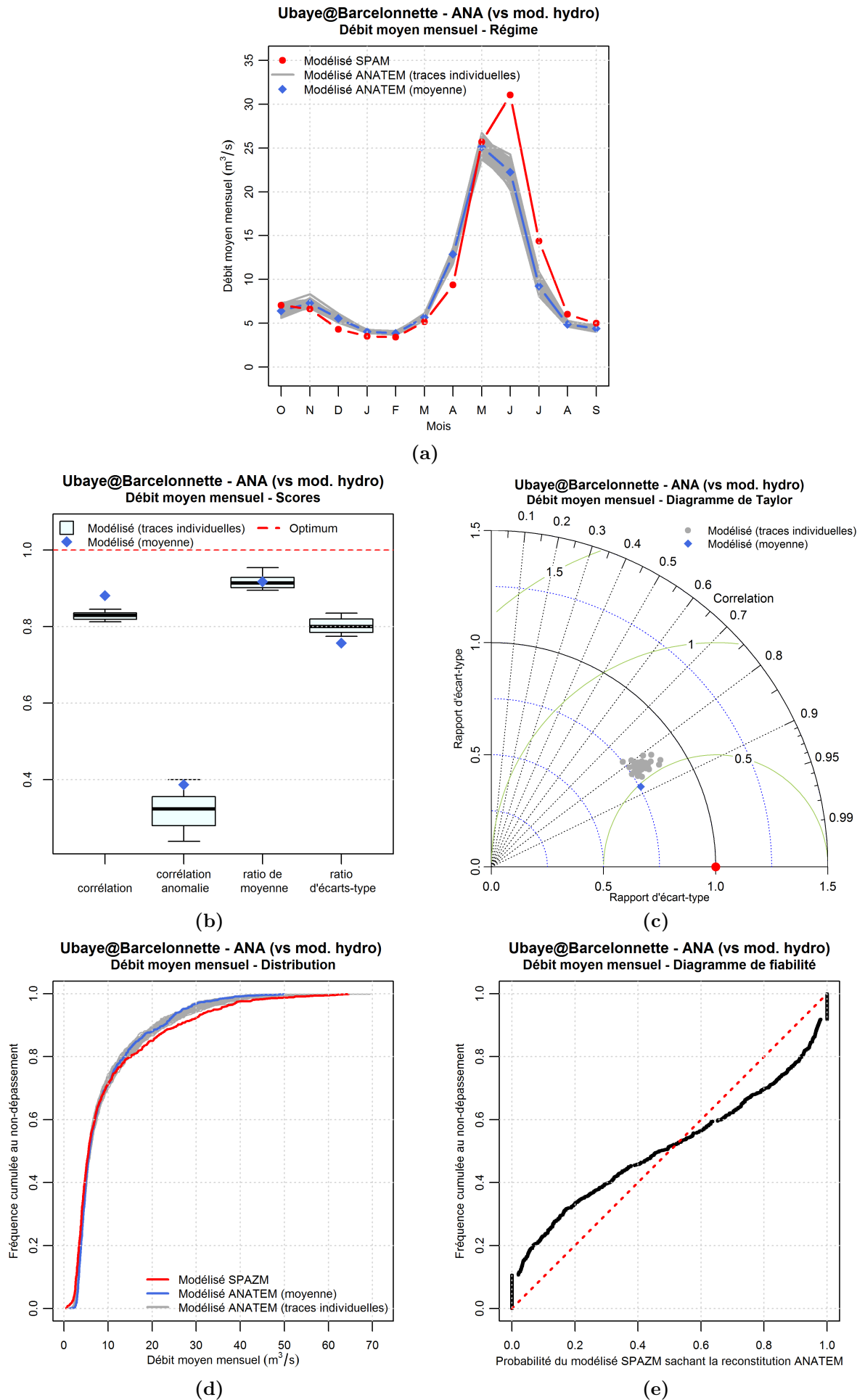


Figure E.2 – Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps mensuel

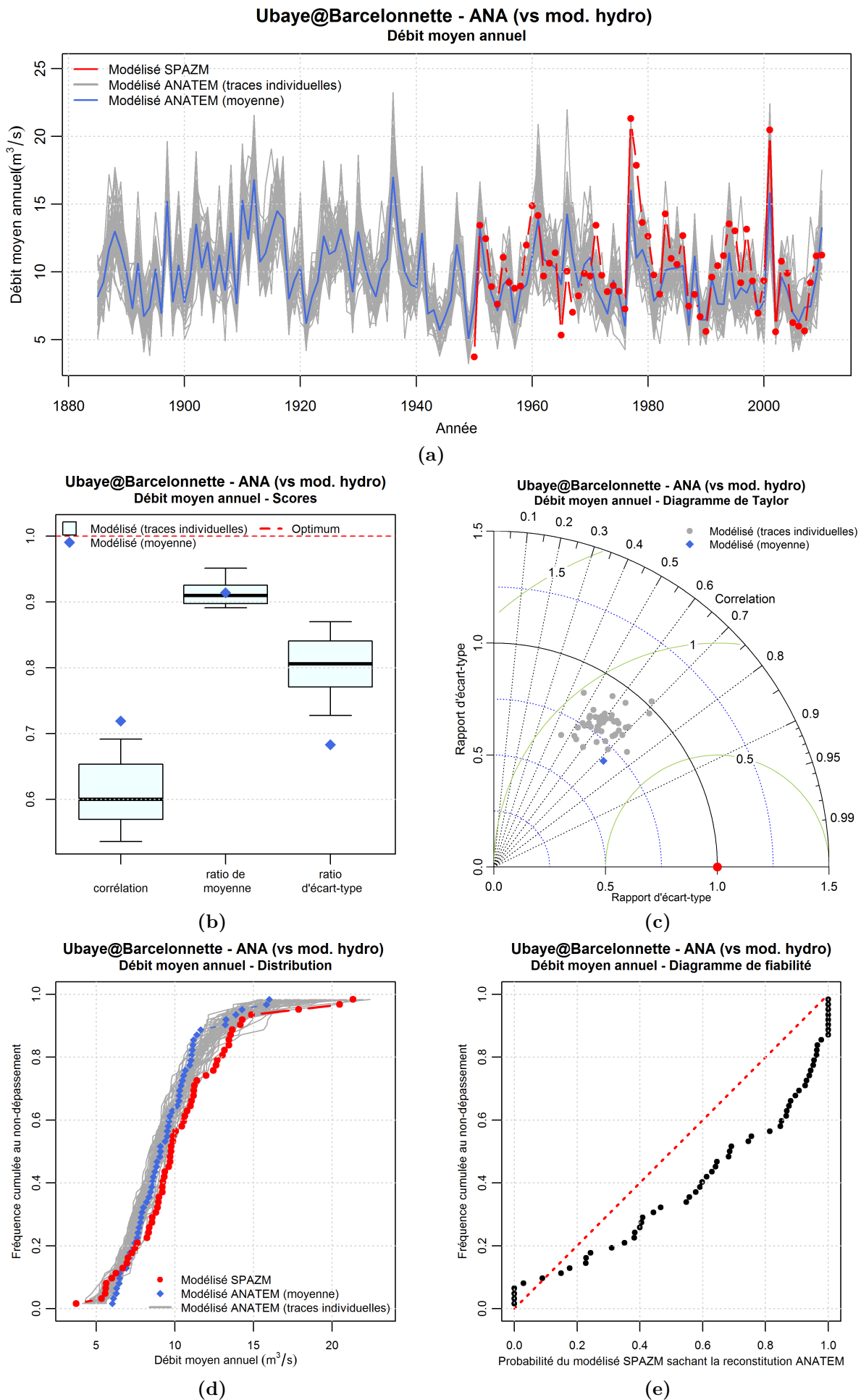


Figure E.3 – Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps annuel

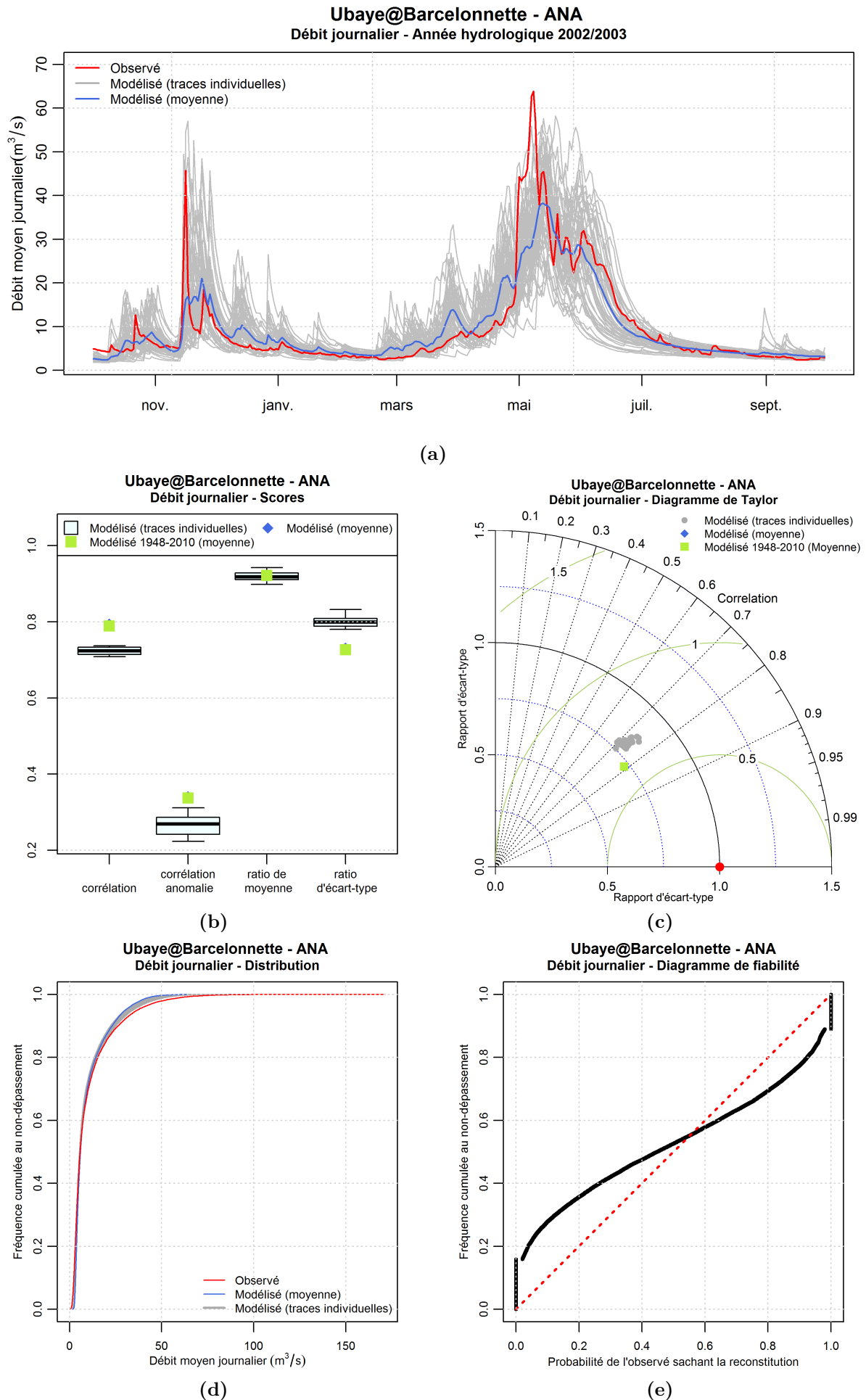


Figure E.4 – Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps journalier

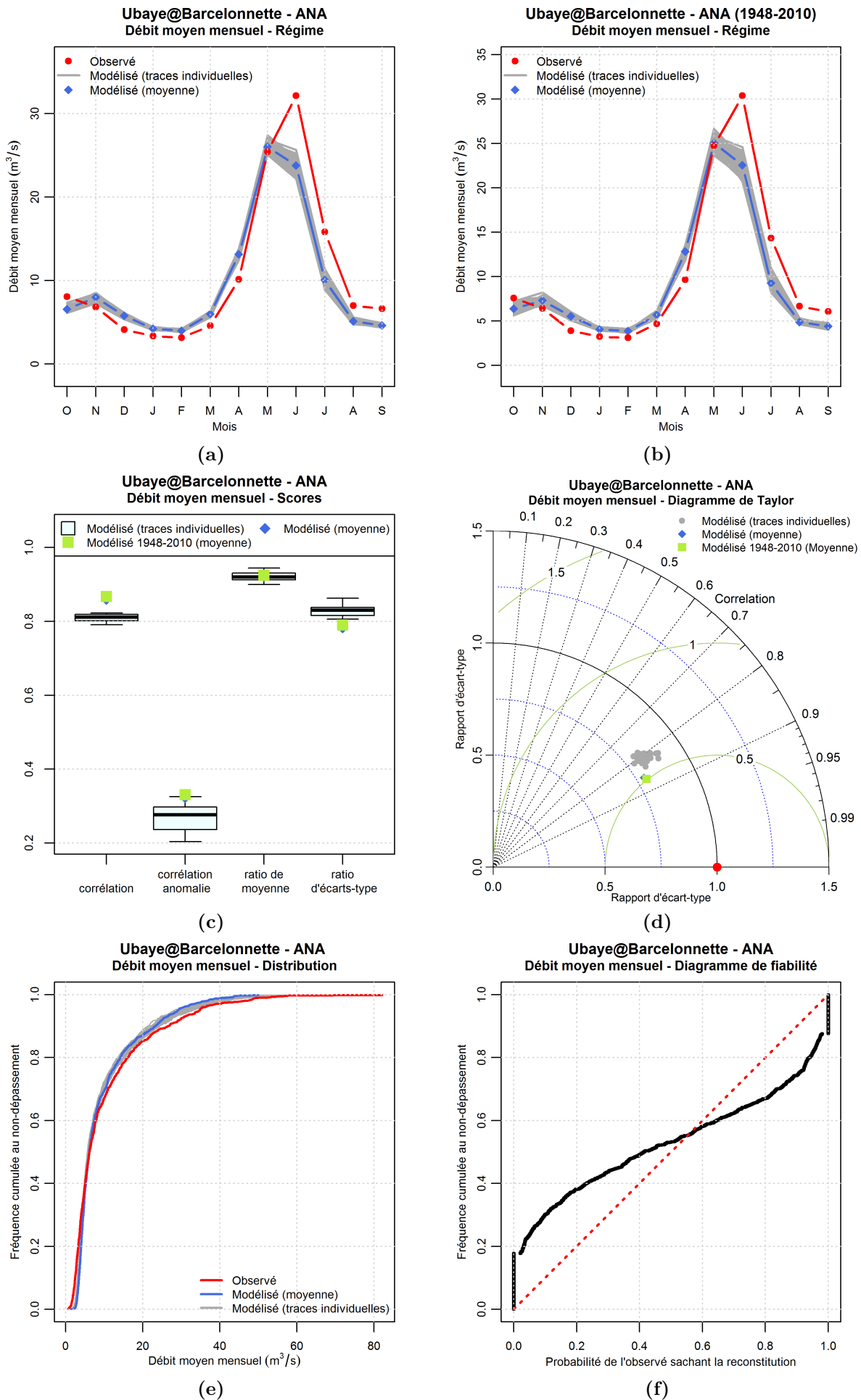


Figure E.5 – Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l’Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps mensuel

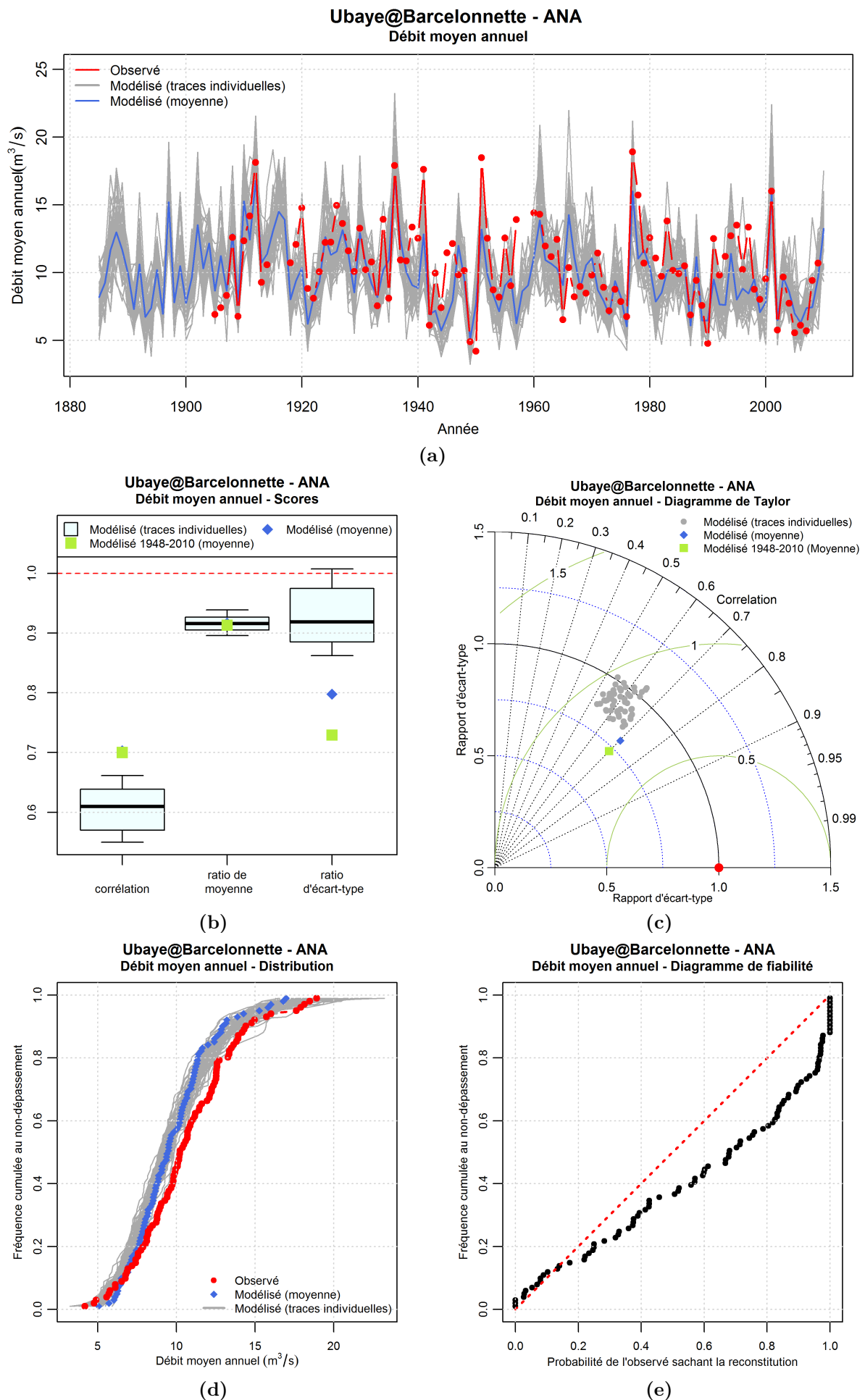


Figure E.6 – Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps annuel

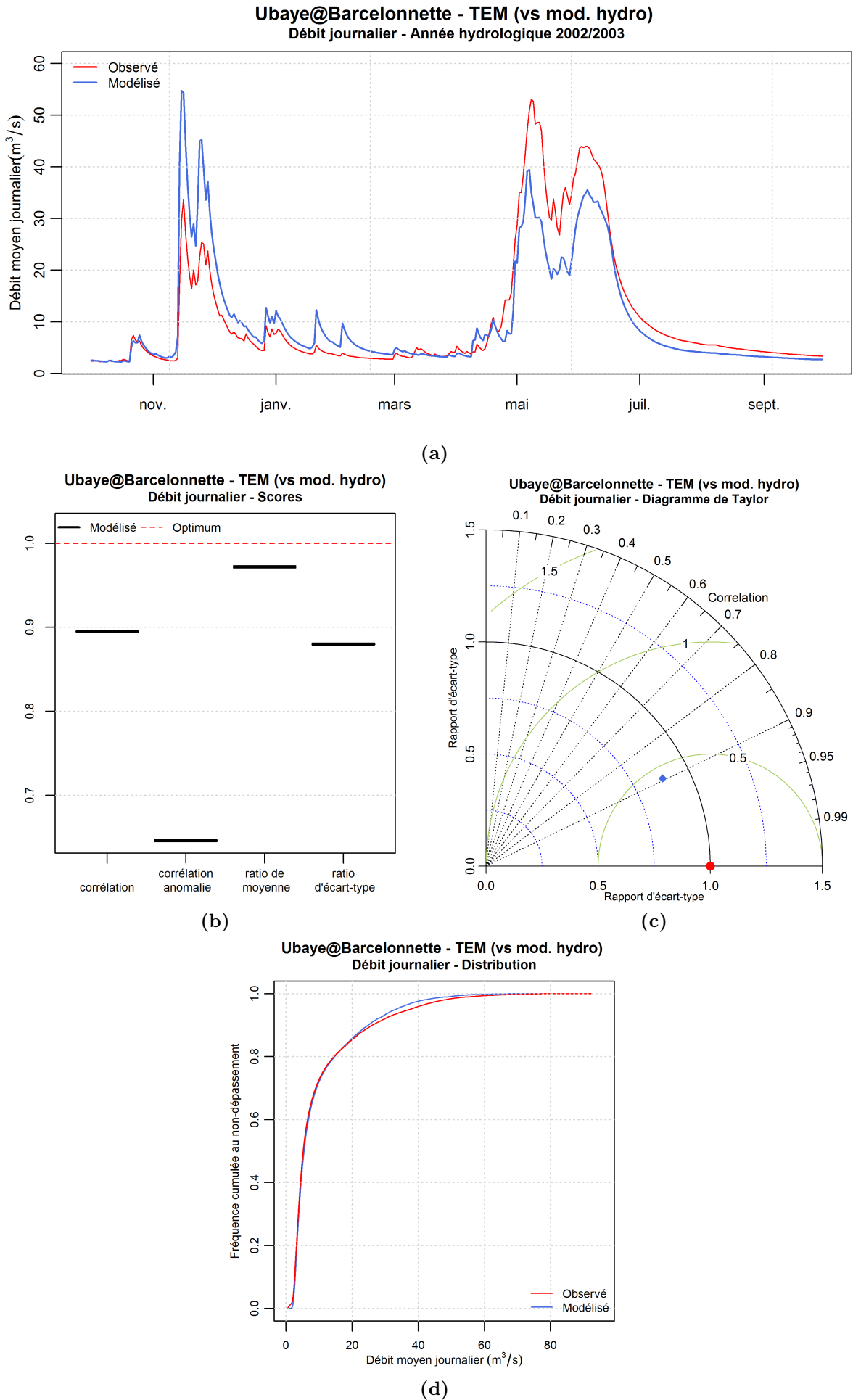


Figure E.7 – Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l’Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps journalier

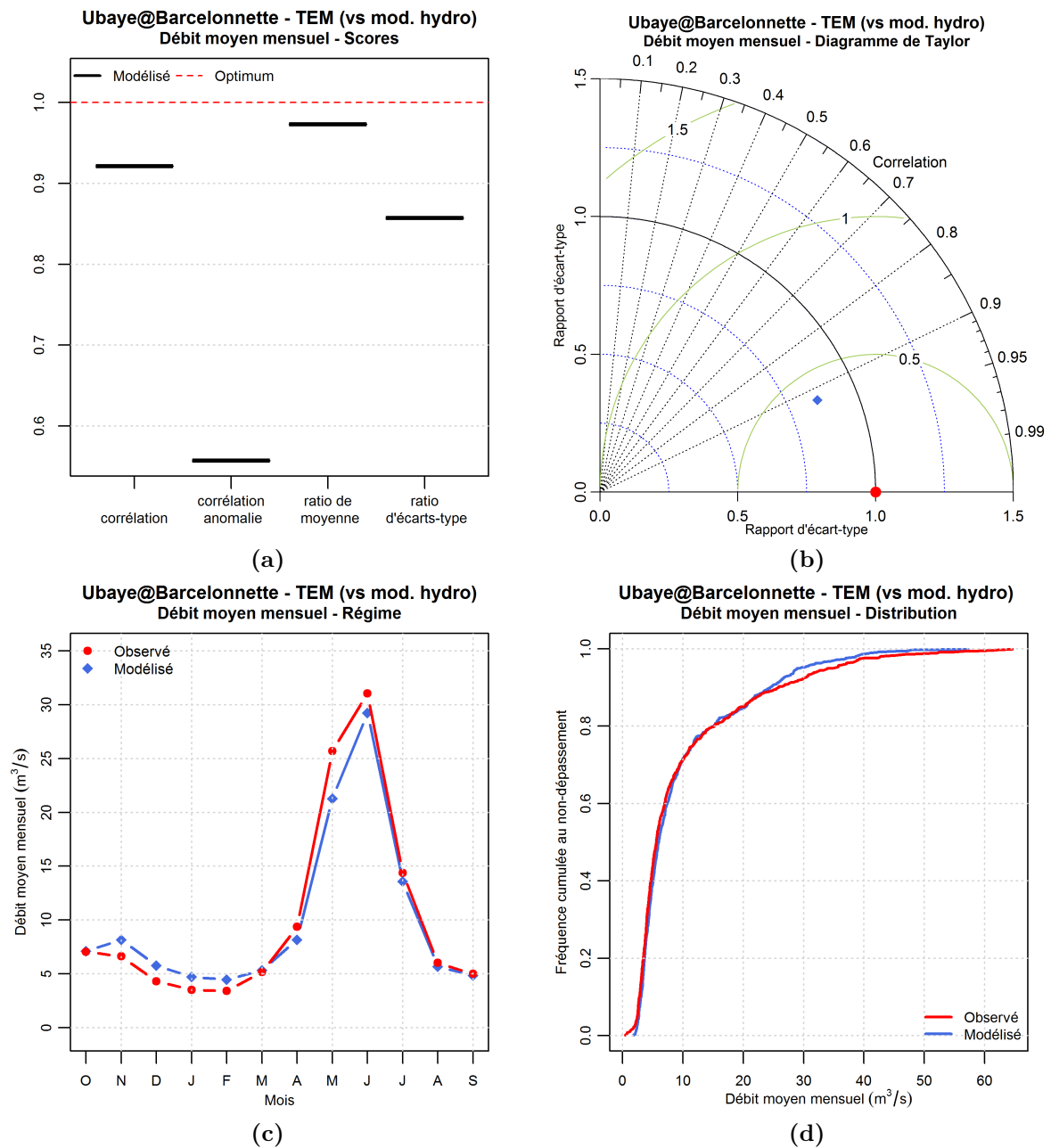


Figure E.8 – Performances du modèle ANA de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps mensuel

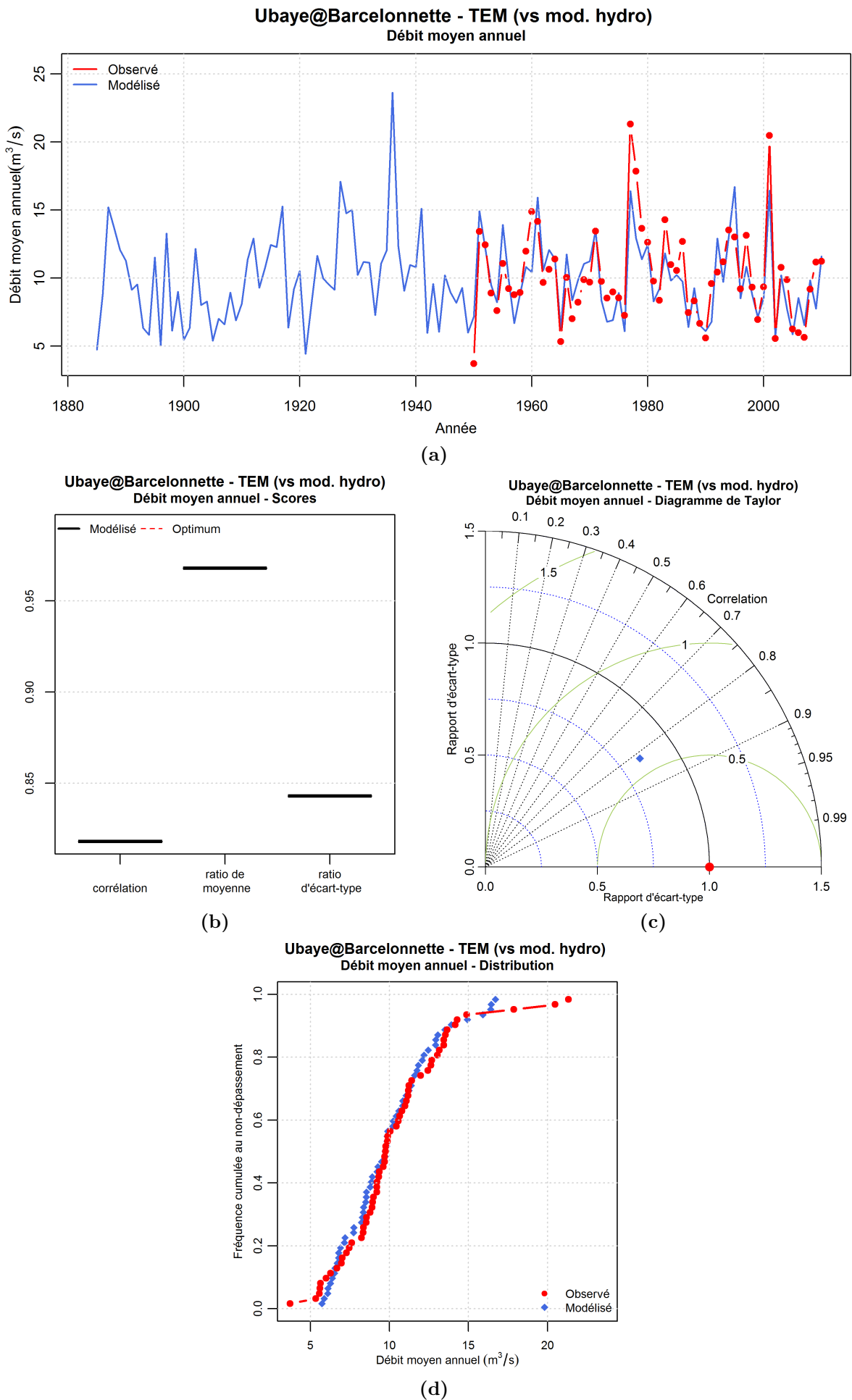


Figure E.9 – Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l’Ubaye à Barcelonnette par rapport à la simulation hydrologique de référence - Pas de temps annuel

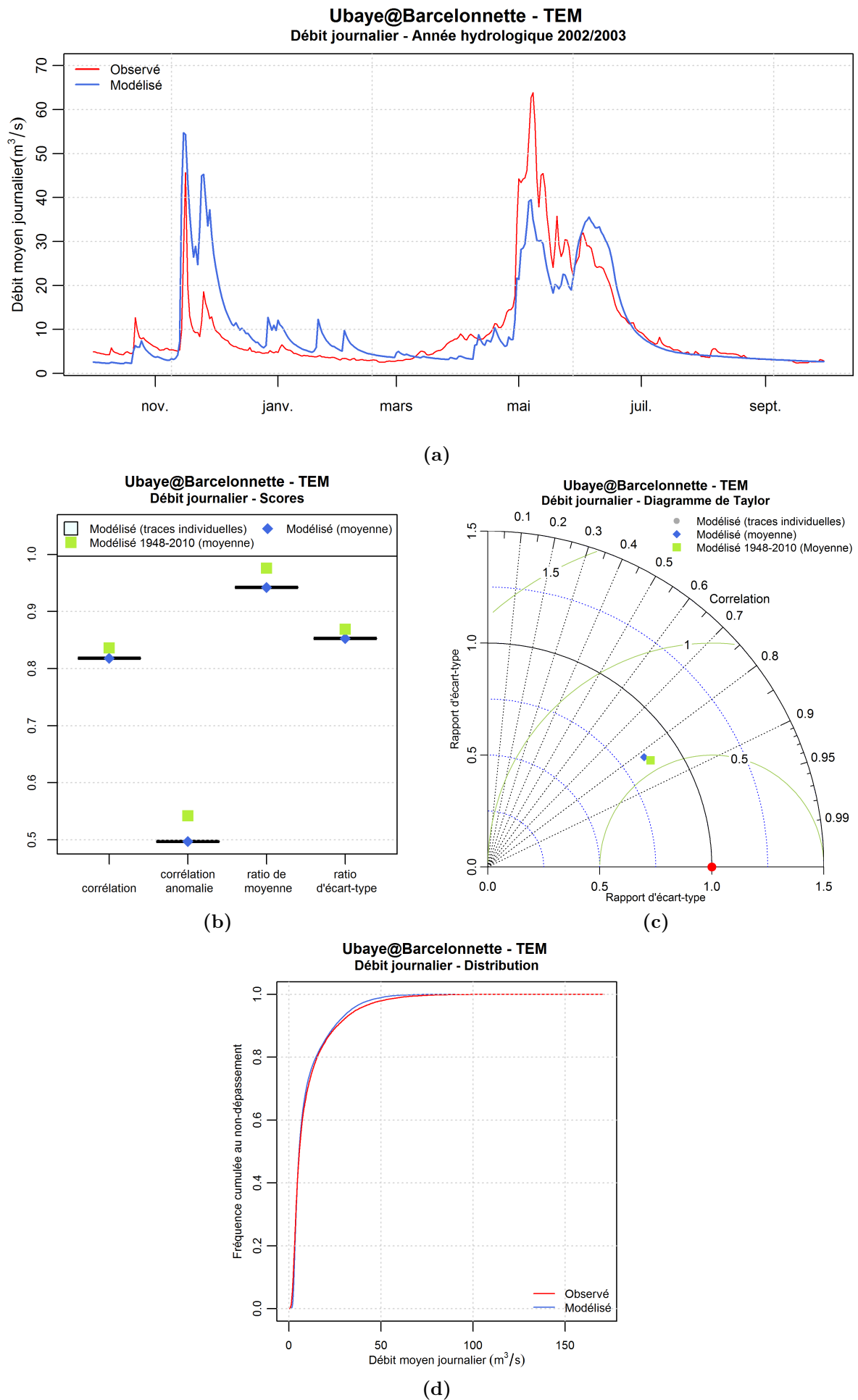


Figure E.10 – Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps journalier

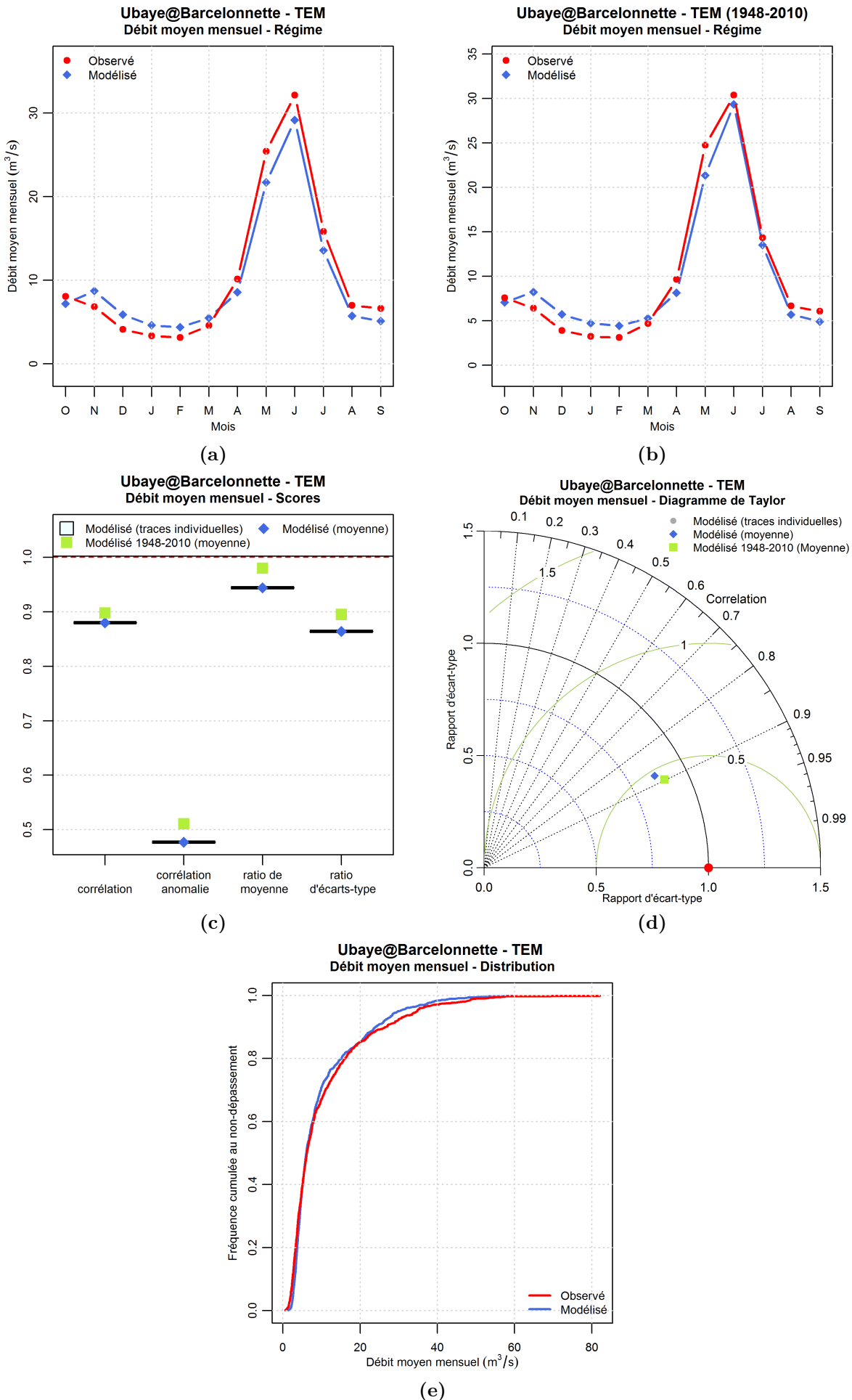


Figure E.11 – Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps mensuel

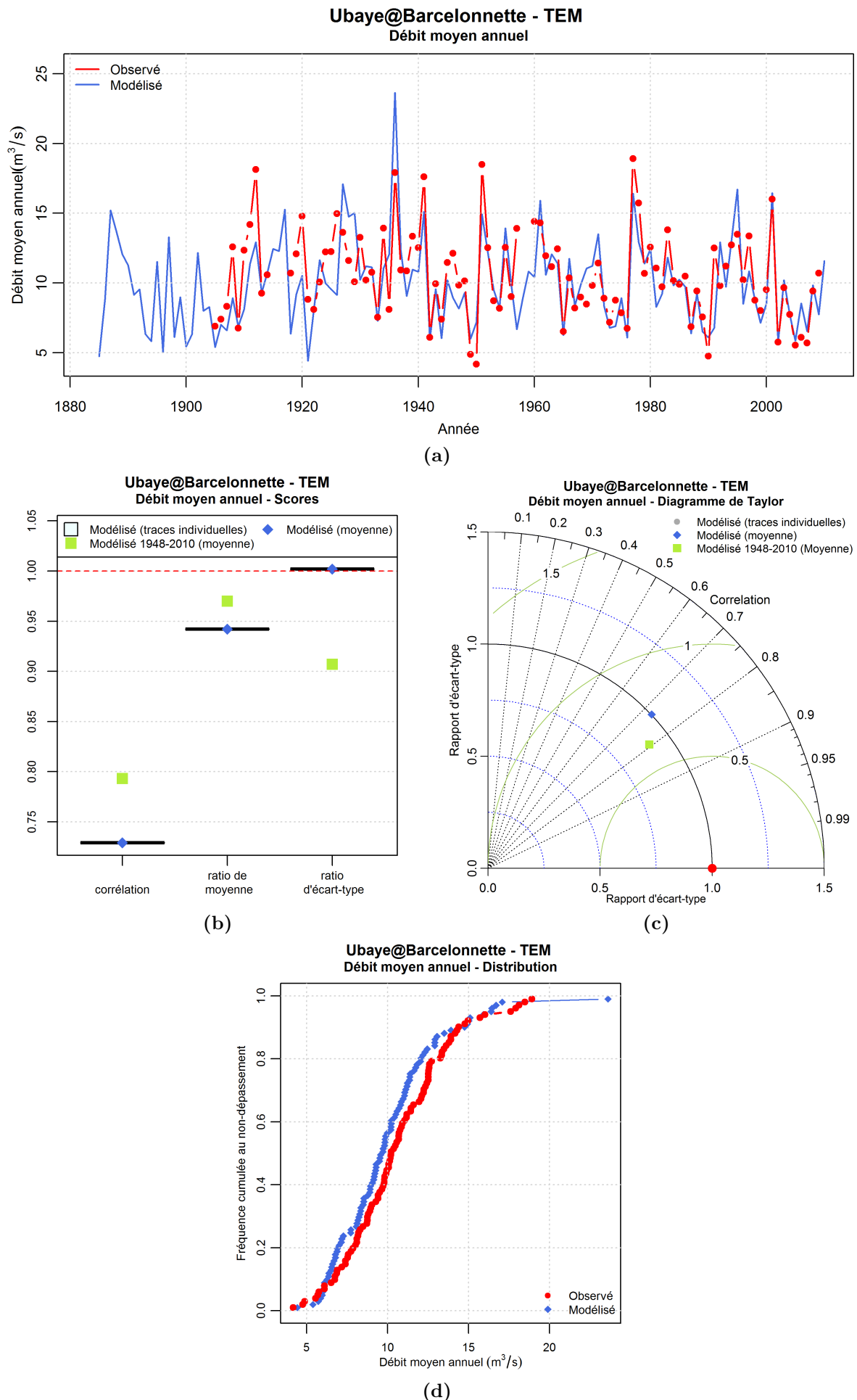


Figure E.12 – Performances du modèle TEM de reconstitution du débit de l'Ubaye à Barcelonnette par rapport aux débits observés - Pas de temps annuel



Article : Hydrométrie et hydrologie historiques du bassin de la Durance

Anna Kuentz, Thibault Mathevet, Denis Coeur, Christian Perret, Joël Gailhard, Laura Guérin, Yasin Gash, Vazken Andréassian

Article publié dans les actes du congrès SHF « Hydrométrie 2013 », Paris, 15-16 mai 2013, numéro HM-033.

HYDROMETRIE ET HYDROLOGIE HISTORIQUES DU BASSIN DE LA DURANCE

Historical hydrometry and hydrology of the Durance river watershed

Anna KUENTZ^{1,2}, Thibault MATHEVET¹, Denis CŒUR², Christian PERRET¹, Joël GAILHARD¹, Laura GUÉRIN^{1*}, Yasin GASH^{1*}, Vazken ANDRÉASSIAN³

¹ EDF-DTG, 21 avenue de l'Europe, 38040 Grenoble Cedex 9, anna.kuentz@edf.fr, thibault.mathevet@edf.fr

² ACTHYS Diffusion, 253 chemin de Plate-Roussel, 38330 Biviers, denis.coeur@wanadoo.fr

³ IRSTEA, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes CS 100 30, 92761 Antony cedex, vazken.andreassian@irstea.fr

* Étudiants en stage à EDF-DTG en 2012

Cette communication présente différents travaux que nous avons menés sur le bassin de la Durance. Ces travaux explorent l'incroyable patrimoine de données historiques en hydrologie et en hydrométrie de la Durance, où il a existé plus de 150 stations hydrométriques, avec un total de 4500 années de débits. Des séries de débits commençant au début du 20^{ème} siècle ont pu être retrouvées, ainsi que de très nombreuses informations sur les stations hydrométriques, les techniques de jaugeages, les courbes de tarage, etc. Ce patrimoine historique met en évidence le très fort investissement des personnels pour développer les techniques de mesure et faire progresser la connaissance des ressources en eau des bassins. Ensuite, nous présentons des travaux que nous avons menés pour caractériser une partie de l'incertitude des données anciennes, liée au mode d'échantillonnage des hauteurs. Ces travaux montrent que les longues séries ne sont généralement pas homogènes d'un point de vue de la mesure et que les séries anciennes peuvent être significativement biaisées pendant la période de fonte. Enfin, nous présentons des travaux sur la caractérisation de la variabilité hydrologique du bassin de la Durance au cours des 100 dernières années. Ces travaux confirment l'intérêt de ces séries séculaires pour mieux connaître le fonctionnement des bassins versants.

This paper presents different studies on the Durance river watershed, situated in the south part of the Alps. Our studies explore a large collection of historical archives in hydrology and hydrometry, found by a historian. This watershed is characterised by an incredible density of hydrological stations, with more than 150 stations and 4500 years of hydrological records, since the beginning of the 20th century. As an example, the archives of 10 stations starting between 1900 and 1917 were very detailed, with all the gaugings, rating curves, and streamflows records. Archives also reveal the great scientific and technical involvement at that period to understand, develop streamflow measurements and estimate available water resources. Then, we present an estimation of streamflow uncertainty of historical series due to the height measurement strategy. Results show that long streamflow series are not homogeneous in time and that old streamflows series could be significantly biased during snowmelt. Finally, this paper shows the great interest of historical time-series to better characterise hydrometeorological variability.

I INTRODUCTION

La compréhension du fonctionnement du bassin de la Durance et de son évolution spatiale et temporelle est particulièrement intéressante pour EDF et l'ensemble des acteurs de l'eau. En effet, ce bassin, caractérisé par une grande diversité de régimes hydrologiques et d'importants enjeux liés à l'eau, fait l'objet de nombreux travaux de recherche, dont ceux du projet R2D2 « Risques, ressource en eau et gestion durable de la Durance à l'horizon 2050 » (<https://r2d2-2050.cemagref.fr/>). Ces travaux visent notamment à analyser la sensibilité du fonctionnement naturel du bassin et des usages aux variabilités climatiques passées et futures.

C'est dans ce cadre que nous nous sommes intéressés à l'hydrométrie et l'hydrologie historiques de ce bassin. En effet, la Durance est connue pour son hydrométrie [Lallement, 2002] et son hydrologie historiques [Imbeaux, 1892] et de nombreuses sources documentaires témoignent de réseaux d'observation implantés depuis la fin du 19^{ème} siècle. Les recherches de Cœur [2012] dans différents fonds documentaires ont révélé l'extraordinaire patrimoine de ce bassin.

L'objectif de cet article est de présenter une synthèse de nos travaux autour de la thématique de l'hydrométrie et l'hydrologie historiques de la Durance. Nous présentons tout d'abord le patrimoine de données historiques, qui nous renseigne autant sur l'hydrologie que l'hydrométrie et les préoccupations techniques du début du 20^{ème} siècle. Ensuite, nous présentons des travaux sur la quantification de certaines des incertitudes des données anciennes, notamment l'homogénéité dans le temps de ces séries de données. Enfin, nous concluons sur l'intérêt de la valorisation des données anciennes pour caractériser la variabilité hydrologique d'un bassin versant. Cette thématique d'actualité renforce l'intérêt d'une valorisation des données historiques qui restent des témoins précieux du fonctionnement passé des bassins versants.

II UN LARGE PATRIMOINE DE DONNEES HISTORIQUES

Les recherches de Cœur [2012] ont eu pour objectif de recenser et de valoriser le patrimoine historique en hydrométrie et en hydrologie de la Durance de la fin du 19^{ème} et du début du 20^{ème} siècle (jusqu'en 1960). En effet, les premières mesures de débit à la station du Pont de Mirabeau datent de la première moitié du 19^{ème} siècle et plusieurs dizaines de stations hydrologiques ont été installées sur l'ensemble du bassin dès le début du 20^{ème} siècle. Les recensements effectués dans différentes sources (SHF, archives départementales et nationales, École Nationale des Ponts et Chaussées, DREAL PACA, SPC Grand Delta, EDF-DTG) ont permis de mettre au jour de nombreux documents relatifs à l'hydrométrie et l'hydrologie de ce bassin. Nous nous sommes concentrés sur les stations ayant des chroniques d'enregistrements continus de 1904 à nos jours, en s'intéressant particulièrement aux hauteurs, débits, jaugeages, courbes de tarage, localisation et vie de la station, conditions de mesure des hauteurs et techniques de jaugeages utilisées. Nous avons concentré nos analyses sur les stations de la Durance à la Vachette, Briançon, la Clapière et Pont de Mirabeau, l'Ubaye à Barcelonnette, le Buëch à Serres et aux Chambons, le Verdon à Colmars, l'Asse à la Clue de Chabrière. Ces documents constituent un très large patrimoine de données que nous avons partiellement analysé.

On retrouve tout d'abord dans ces documents l'existence d'un grand nombre de stations hydrométriques (plus de 150 stations) sur l'ensemble du bassin de la Durance, dont les mesures de hauteurs et de débits commencent pour certaines dès le début du 20^{ème} siècle et couvrent jusqu'à plus de 100 ans de mesures (Figure 1). Ces données représentent environ l'équivalent de 4500 ans de débits. Cette densité de mesures dès le début du 20^{ème} siècle apparaît extraordinaire et témoigne d'une grande volonté de connaître le fonctionnement hydrologique de ces bassins, afin de se protéger contre les crues exceptionnelles suite aux événements du milieu du 19^{ème} siècle (création en 1876 du Service Hydrométrique et d'Annonce des Crues du Rhône et de ses affluents, SHAC) et de prospector le potentiel hydraulique de cette région. Nous avons également retrouvé des données relatives aux régimes des hauteurs d'eau établis dès la fin du 19^{ème} siècle à partir de mesures journalières (l'Ubaye à Barcelonnette, le Verdon à Colmars), sans pouvoir retrouver les séries journalières. Sur les 8 stations examinées en détail, nous avons retrouvé un total d'environ 1500 jaugeages et 150 courbes de tarage effectués avant 1960. Les jaugeages étaient principalement réalisés par exploration du champ des vitesses et par la méthode de la dilution, apparue à partir des années 1950 aux stations de la Vachette et Colmars.

Les documents retrouvés témoignent d'une correspondance régulière entre les observateurs, chefs de stations, ingénieurs du bassin, ingénieurs en chef (Tableau 1). Ces documents montrent le fort investissement de l'ensemble du personnel pour le développement des matériels et techniques de mesures, des configurations des stations et d'un souci constant de la qualité des mesures. Ce fort investissement est sans doute la caractéristique essentielle de la mission des services hydrométriques, qui est de veiller en permanence à la qualité des observations, des mesures et aux progrès techniques dans le domaine. Cela concerne tous les champs d'activité, du plus théorique au plus concret et technique, en passant également par des considérations administratives et humaines. Les notions de progrès et d'innovations scientifiques et techniques sont ainsi de fait au cœur de la pratique des agents des services hydrométriques, sans forcément d'ailleurs qu'ils en aient eu toujours conscience. La diversité et la dynamique des conditions naturelles, les caractéristiques particulières des bassins de montagne avec un fort transport solide, ont également largement conditionné cette nécessité d'entretenir et d'adapter sans cesse les systèmes d'observation et de mesure, sans parler de l'intégration des progrès techniques eux-mêmes.

L'amélioration des stations se retrouve dans de nombreux documents qui témoignent de ces soucis permanents. Ces améliorations se sont concrétisées, au début du 20^{ème} siècle, lors du passage de stations du SHAC d'observation des hauteurs et d'annonce des crues, à des stations hydrométriques avec une estimation quantitative des débits. Cette transformation, qui a eu lieu au moment de la mise en place du réseau des grandes forces hydrauliques, avait pour objectif de connaître les régimes des débits sur l'ensemble du bassin tout au long de l'année (pas seulement pendant les crues). Ensuite, on retrouve également de nombreux documents sur les évolutions des matériels de la station : passerelles, treuils, limnigraphes, chariots de manœuvre, bateaux avec câble. Les constructeurs de matériels entretiennent des correspondances avec les ingénieurs du SHAC pour améliorer les techniques et matériels. La question de la sécurité est régulièrement évoquée pour faire progresser les conditions de la mesure, notamment sur les passerelles.

Ensuite, on retrouve de nombreux documents relatifs à la qualité des mesures de hauteurs. Concernant les mesures de hauteurs, la qualité de l'échelle, son emplacement, son accessibilité ou sa lisibilité sont souvent évoquées. La qualité de l'observateur, ses capacités à bien comprendre les instructions de lecture de l'échelle

ou son assiduité sont parfois questionnées pour juger de la qualité d'estimations de débits. Des indications particulières sont données lorsque la rivière et l'échelle de mesure des hauteurs sont en glace.

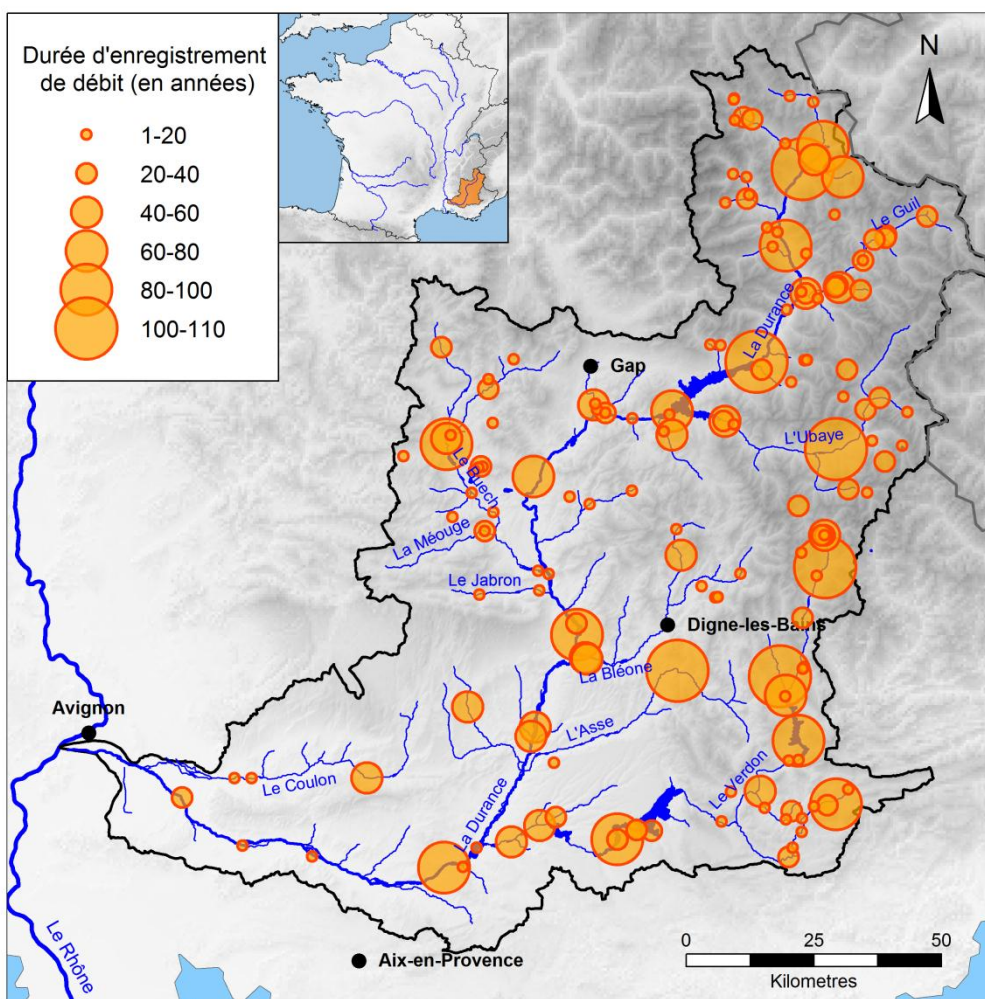


Figure 1 : Localisation et durée d'enregistrement des stations hydrométriques sur la Durance

Concernant les jaugeages, on retrouve de nombreux documents relatifs aux matériels utilisés : flotteurs (très rarement), tube de Pitot (ponctuellement pour les étiages), plus couramment les moulinets de Woltman, le moulinet Richard à deux hélices ou les moulinets Ott (nombreuses références différentes). A partir du début des années 1950, on retrouve l'apparition des jaugeages par dilution chimique sur la station de Colmars et la Vachette. Pour chaque station, on est capable de retrouver la liste des jaugeages effectués depuis leur création (environ 200 par station en 60 ans), les matériels utilisés, le dépouillement des verticales (parfois, avec la vérification des calculs et la validation du jaugeage par un supérieur). Comme pour la configuration de certaines stations, la dangerosité des jaugeages est évoquée. La question du choix de la bonne section de jaugeage (en fonction du débit et du lit de la rivière) est largement évoquée, les nombreux problèmes de transport solide et d'instabilité sont souvent évoqués (Verdon à Colmars, Asse à la Clue de Chabrière) pour regretter la difficulté de l'exercice et de l'obtention de données fiables de débits.

A partir des jaugeages à disposition, des courbes de tarages sont tracées et on en trouve de très nombreuses (10 à 20 par station en 60 ans). Encore une fois, de nombreuses correspondances et discussions portent sur la représentativité des courbes de tarage en fonction du régime des eaux (étiages, crue), des gammes trop limitées de débits jaugés ou de l'instabilité des sections de jaugeage et de mesure de hauteurs. Les difficultés climatiques sont rappelées pour dire que les périodes de jaugeages sont trop limitées dans le temps pour être capable de jauger les extrêmes de débits. Au-delà des considérations sur la qualité des jaugeages, des courbes de tarage et de la stabilité du fond des rivières, la qualité des débits était également estimée par comparaison graphique entre stations amont-aval ou par de simples modèles linéaires. Ces analyses permettaient d'incriminer les observateurs, les mesures de hauteurs, l'instabilité du lit des rivières ou la représentativité des courbes de tarages.

Thématique	Station de jaugeage	Commentaire et date
Matériel	La Durance à la Vachette	« Nous avons ramené à Grenoble pour vérification et tarage le moulinet de M. Jarrel, chef de station. Cet instrument n'avait pas été étalonné depuis 1931 » (Inspection de la station par les GFH, 11/1945)
Matériel	L'Ubaye à Barcelonnette	« Passerelle légère, constituée par 2 à 3 échelles recouvertes de madriers et soutenues du pont par des cordes amarrées aux poutres. Médiocre et peu sûre, à améliorer» (21/06/1908)
Matériel/ Hauteur	L'Asse à la Clue de Chabrière	« La rigueur de la température s'est opposée pendant le premier trimestre à la mise en place du treuil tracteur. Conformément aux instructions, la glace a été cassée tous les jours par le cantonnier observateur qui débarrassait soigneusement les abords de l'échelle avant de faire les lectures » (1 ^{er} trimestre 1914)
Hauteur	L'Asse à la Clue de Chabrière	« il est possible qu'au début l'observateur ne lisait pas correctement les cotes, surtout les négatives. Je me rappelle fort bien le lui avoir expliqué » (15/06/1912)
Jaugeage	Le Buëch aux Chambons	Concernant les jaugeages : « la difficulté de leur mise en place dû au régime torrentiel de l'écoulement ainsi que de son irrégularité à l'emplacement du jaugeage » « pour les basses eaux, les jaugeages sont effectués en aval en un point variable à chaque opération, là où les eaux se trouvent le plus concentrées » (1909)
Jaugeage	Le Verdon à Colmars	« Il me paraît utile, pour la sécurité des opérateurs, de pourvoir la passerelle d'un garde corps à l'aval. On pourrait peut être se contenter d'un fort fil de fer tendu entre deux crochets scellés au culées du pont. » « Le Lit paraît se maintenir fixe depuis 1907 ; mais quelques gros blocs roulent à chaque crue. Il est nécessaire de les enlever pour assurer dans le profil de jaugeage un écoulement régulier sans lequel les mesures sont très imprécises » (22/08/1910)
Hauteur et jaugeage	La Durance au Pont de Mirabeau	« les variations de débits ne correspondent pas aux hauteurs d'eau lues à l'échelle », « la nécessité de faire des jaugeages à l'emplacement de l'échelle » (1901)
Période de jaugeage	La Durance à la Vachette	« un relâchement dans les périodes de transition, les eaux basses ne paraissent être observées que de temps en temps » (1953)
Période de jaugeage	L'Asse à la Clue de Chabrière	« La mauvaise saison étant passée, je prie M. Canton de réaliser sans plus tarder la mise en place du nouveau treuil et de reprendre les opérations activement. Je rappelle que pour déterminer la courbe de tarage, il manque plusieurs points à l'extrême étiage et aux crues » (22/04/1914)
Qualité de la station	L'Ubaye à Barcelonnette	« La station paraît médiocre en raison de l'instabilité du lit et de l'imprécision des jaugeages. La courbe de tarage est médiocre à tous les débits. La sensibilité de l'échelle est faible en basse eaux. »
Qualité de la station	L'Asse à la Clue de Chabrière	« irrégularité du lit de la rivière où de gros blocs sont échoués dans le voisinage du profil de jaugeage » (1944)
Qualité des débits et mesure des hauteurs	Le Verdon à Colmars	« Une étude comparative entre les différentes stations du bassin en 1952 signale des résultats médiocres de débits à cette station. Ces erreurs auraient pour origine soit un détarage du moulinet soit une erreur systématique de lecture à l'échelle. Il apparait par la suite que l'échelle serait devenue illisible car n'ayant jamais été changée sur toute la période, serait à l'origine de ces écarts » (1953)
Vie de la station	La Durance à la Vachette	« Le matériel de la station de jaugeage de la Vachette a été emporté ou détruit par les allemands lors de leur retour à la Vachette au début septembre 1944 » (24/11/1944)

Tableau 1 : Extrait des commentaires et correspondances retrouvées dans les archives des stations hydrologiques

Ces documents révèlent également les nombreuses inspections et tournées des ingénieurs des grandes forces hydrauliques. Ces inspections avaient pour objectif d'évaluer l'état physique et technique des stations de mesures, en pointant les améliorations à apporter au matériel (configuration de la passerelle, des limnigraphes, étalonnage des moulinets, etc.), la nécessité d'arrêter l'exploitation d'une station ou de déplacer une station (tout en conservant pendant une durée les deux stations afin d'assurer une période de recouvrement). Enfin, ces tournées servaient également à évaluer la qualité des données produites (mesures de hauteurs, jaugeages, courbes de tarage, débits), ainsi que la compétence et la disponibilité des agents.

III ANALYSE DE LA QUALITE DE LONGUES SERIES DE DEBITS

III.1 Mode de construction des séries historiques de débits

L'analyse des données contenues dans les dossiers-stations constitués lors des recherches décrites dans la partie précédente a permis de mettre en évidence, sur la plupart des stations, une succession de trois principales méthodes de construction de séries journalières de débits.

- Au début du vingtième siècle, les séries étaient pour la plupart construites par lecture quotidienne à heure fixe de la hauteur d'eau à l'échelle : un observateur était chargé de lire chaque jour à la même heure la hauteur d'eau à l'échelle de la station. Cette hauteur était ensuite convertie en débit via une courbe de tarage et le débit obtenu était consigné comme débit journalier.
- Des limnigraphes ont ensuite été mis en place petit à petit aux différentes stations. La hauteur d'eau était enregistrée graphiquement de manière continue grâce à cet appareil, et les limnigrammes ainsi obtenus étaient dépouillés manuellement pour en déduire une valeur de débit journalier. Plusieurs méthodes ont été utilisées pour le dépouillement des limnigrammes, principalement la moyenne des hauteurs « à vue » et la moyenne de n valeurs de débits infra-journaliers (souvent $n=6$ ou $n=12$). Les dates d'installation des limnigraphes sont très variables d'une station à une autre, ainsi on en trouvait un dès 1904 à la station de Briançon sur la Durance, alors que la station de Colmars sur le Verdon n'en a été équipée qu'en 1958.
- Actuellement, la hauteur d'eau est mesurée en continu, enregistrée et convertie en débit à un pas de temps horaire, le débit journalier est obtenu par moyenne des 24 valeurs horaires.

On voit bien par cette courte description que l'évolution des méthodes de construction des séries journalières de débits a été très importante au cours du siècle. Dans une même série de débit considérée à première vue comme continue, on trouve ainsi souvent une juxtaposition de séries de variables qui peuvent être différentes : le débit obtenu par la méthode (a) est par exemple un débit instantané à heure fixe, tandis que le débit obtenu par la méthode (c) est un débit moyen journalier.

Il paraît important d'analyser l'impact de cette évolution des méthodes sur la valeur finale des débits journaliers, puisqu'elle impacte potentiellement l'homogénéité des séries continues de débits, l'incertitude des données anciennes et les tests de tendance ou rupture que l'on peut faire sur de longues séries.

III.2 Impact de la méthode de lecture quotidienne à l'échelle

III.2.1 Mode de comparaison

Afin de quantifier l'impact de la méthode de lecture quotidienne à l'échelle sur la valeur finale du débit journalier, nous nous proposons de simuler cette méthode sur la période récente sur laquelle nous disposons de données horaires. Il sera ainsi possible de comparer le débit obtenu par la simulation de la méthode (a) à celui obtenu par la méthode (c), prise comme référence. Ainsi, pour chaque jour de la chronique simulée, l'erreur relative $\varepsilon_{j,t}$ entre le débit $\widehat{Q}_{j,t}$ obtenu par la simulation de la méthode (a) pour une heure de mesure t donnée et le débit moyen journalier \overline{Q}_j obtenu par la méthode (c) est calculée de la manière suivante :

$$\varepsilon_{j,t} = \frac{\widehat{Q}_{j,t} - \overline{Q}_j}{\overline{Q}_j} \quad (1)$$

III.2.2 Analyse sur la station de Colmars

A titre d'exemple, la Figure 2 représente, pour la période du printemps 2004 à la station du Verdon à Colmars, les séries de débit horaire, débit moyen journalier et débit journalier obtenu par simulation de la méthode (a) pour deux heures de lecture différentes. Dans la partie inférieure du graphique sont tracées les courbes de l'erreur relative journalière correspondant aux deux heures de mesure simulées.

Sur la courbe des débits horaires, on observe un cycle infra-journalier très marqué, lié aux variations infra-journalières de la fonte des neiges puis des glaciers. En raison de ce cycle, le débit moyen journalier peut être significativement éloigné du débit à une heure donnée de la journée. En effet, on peut constater par exemple que le débit correspondant à une lecture quotidienne à midi (comme c'était le cas à cette station avant 1958), est globalement situé sur l'enveloppe inférieure de la courbe des débits horaires. L'écart relatif $\varepsilon_{j,t}$ entre ce débit et le débit moyen journalier est donc globalement négatif, et peut atteindre -30% du débit moyen journalier. En revanche, si la mesure quotidienne était faite à 5 heures plutôt qu'à midi, la valeur obtenue serait plus proche du débit moyen journalier, le biais est dans ce cas proche de zéro.

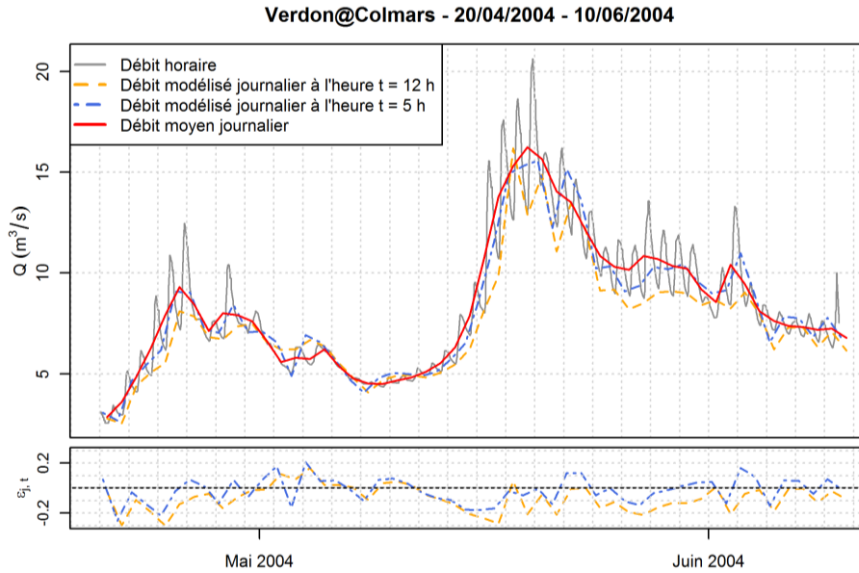


Figure 2: Évolution des débits horaires et journaliers moyens ou par lecture quotidienne à la Station de Colmars sur le Verdon, erreurs liées à la méthode de lecture quotidienne

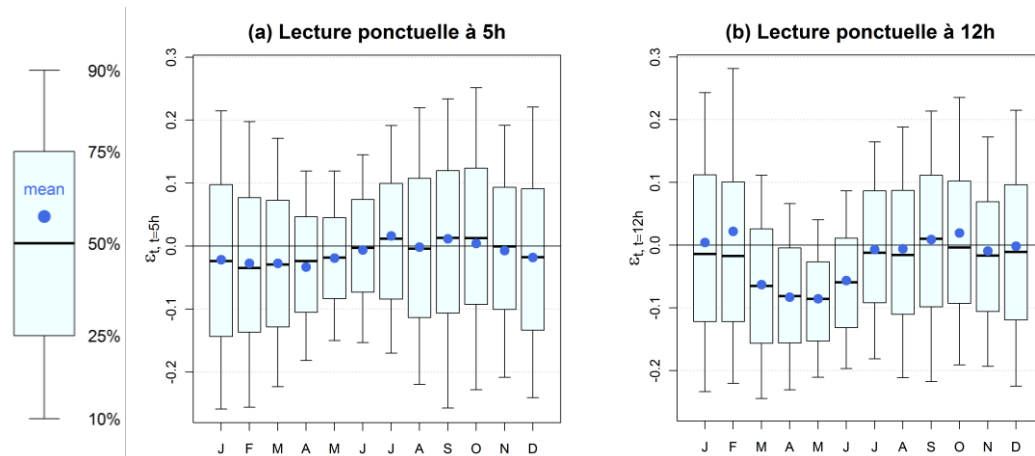


Figure 3 : Distributions mensuelles des erreurs relatives liées à la méthode de lecture ponctuelle à la station de Colmars sur le Verdon

L'erreur relative $\varepsilon_{j,t}$ étant calculée pour chaque jour de la chronique simulée, on peut analyser statistiquement l'impact de la méthode (a) sur la valeur du débit journalier, et ce pour différentes périodes de l'année et différentes heures de mesure. La Figure 3 montre les distributions des erreurs $\varepsilon_{j,t}$ pour chaque mois de l'année et pour deux heures de lecture à l'échelle : 5h du matin et midi. Ces deux graphes montrent que les propriétés statistiques de l'erreur relative entre débit moyen journalier et débit obtenu par simulation de la méthode de lecture quotidienne à l'échelle dépendent fortement de l'heure de mesure et de la période de l'année. Par ailleurs, on peut observer sur la Figure 3 que les distributions des erreurs pour le mois de mai sont très différentes selon l'heure de lecture. Pour une lecture à 5h, l'erreur moyenne du mois de mai est de -1% environ, avec un intervalle interquantiles 10-90% allant de -15% à +12% ; Si la lecture est faite à midi, toujours pour le mois de mai l'erreur moyenne vaut -9%, et l'intervalle interquantiles 10-90% est beaucoup moins centré autour de zéro puisqu'il va de -21% à +4%.

La répartition annuelle de l'erreur est également intéressante : que ce soit pour une lecture faite à 5h ou à midi, l'erreur relative est plus élevée pendant l'hiver et le printemps, saisons où les débits sont alimentés par la fonte des neiges. Des observations similaires ont pu être effectuées sur d'autres stations du bassin de la Durance, où l'on constate que l'impact de la méthode de lecture quotidienne de la hauteur à l'échelle est généralement plus fort sur les stations dont le régime possède une composante nivale. Par exemple, sur les bassins versant au régime nivale, le biais sur le module peut atteindre 5 à 10%.

III.2.3 Correction des séries construites par la méthode de lecture ponctuelle à l'échelle

Les observations précédentes ont permis de constater que la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle peut significativement biaiser le débit journalier, cela en fonction de l'heure de lecture et de la période de l'année. Afin de pouvoir homogénéiser les longues séries de débits dont une partie a été construite par cette méthode, nous proposons ici une méthode de correction de ce biais. Il s'agit simplement de s'appuyer sur le régime de l'erreur observée sur la simulation de la méthode sur la période récente de disponibilité de données horaires pour corriger la partie ancienne de la série.

A la station du Verdon à Colmars, la méthode de lecture quotidienne de la hauteur d'eau à l'échelle a été utilisée de 1904 à 1956, avec une lecture à midi. La Figure 4 montre, pour cette période, les régimes hydrologiques de la série d'origine, obtenue par lecture quotidienne à midi, de la série corrigée à l'aide de l'erreur moyenne mensuelle observée sur la période de simulation, et l'intervalle interquantiles 10-90% de correction.

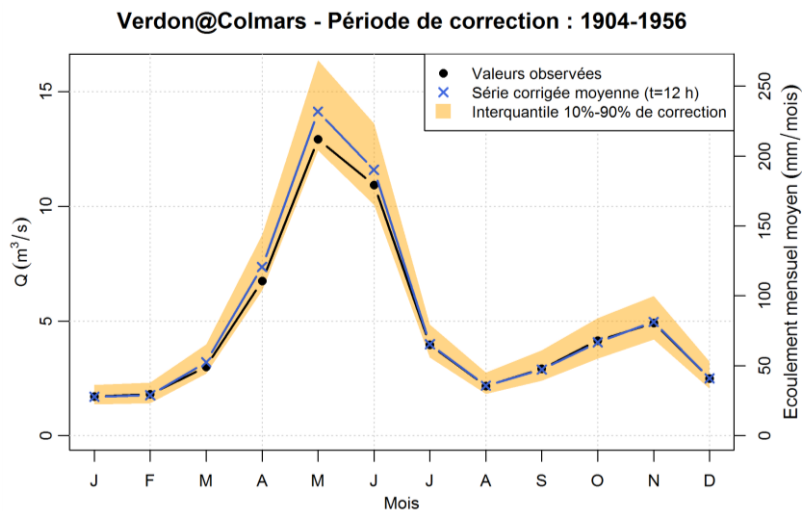


Figure 4 : Impact de la méthode de lecture des hauteurs sur le régime hydrologique du Verdon à Colmars.

Le régime hydrologique du Verdon à Colmars est de type nivo-pluvial, avec un maximum du débit moyen mensuel en mai-juin, et un maximum secondaire lié aux pluies d'automne en novembre. On remarque à nouveau le biais important lié au cycle de fonte pendant la période de hauts débits au printemps. L'intervalle interquantiles 10-90% est plus large pendant le printemps (~65 mm/mois en mai) et l'automne (~30 mm/mois en novembre) qu'en hiver et en été. Cela peut s'expliquer par les crues qui ont principalement lieu pendant ces deux périodes et peuvent induire de fortes variations infra-journalières de débit, sans qu'il n'y ait de systématisme sur l'heure du pic de crue.

IV TEMOIGNAGES DE LA VARIABILITE HYDROLOGIQUE PASSEE

Les longues séries de débits ainsi retrouvées et numérisées au cours de nos travaux représentent un patrimoine de données exceptionnel, en tant que témoin direct de la variabilité hydrologique de la Durance au cours du siècle dernier, sur une diversité de témoins hydrologiques. Ces séries permettent ainsi de contextualiser et relativiser les études d'impacts de changement climatique, sachant ce qu'on a déjà observé depuis plus de 100 ans. Par exemple, la Figure 5 présente la variabilité du débit moyen annuel (normé par rapport au débit moyen 1900-2010) sur 22 stations de débits du projet R2D2. Ces séries de débits ont été obtenues par une méthode de simulation hydro-climatique développée par Kuentz et al. (2013) qui a été validée sur le passé uniquement grâce aux données anciennes que nous avons trouvées. Cette figure montre la relative homogénéité du signal hydrologique entre les bassins, malgré une différence de régimes hydrologiques. On y observe une forte variabilité hydrologique au cours des 100 dernières années et on retrouve ainsi très clairement des épisodes documentés de forte hydraulité et de crues (1915-1920, 1935-

1936, début 1960) ou des périodes de faible hydraulicité et d'étiages (1921, années 1940, fin des années 1970 et 1980, 2003-2005).

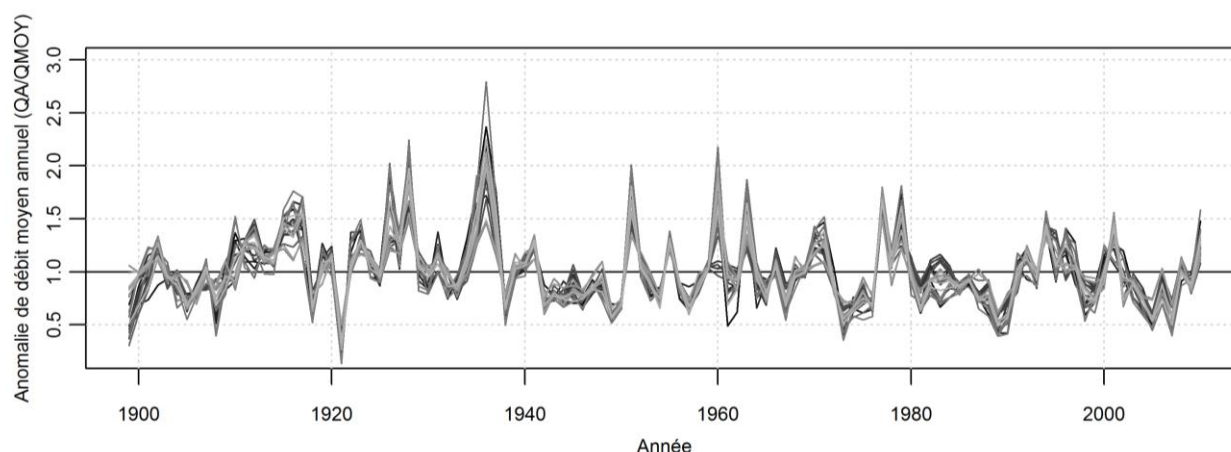


Figure 5 : Caractérisation de la variabilité du débit moyen annuel sur le bassin de la Durance (débits simulés sur la période 1900-2012 sur 22 bassins versants du projet R2D2).

V CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cet article présente un ensemble de travaux qui permettent de valoriser un large patrimoine d'informations et de données anciennes relatives à l'hydrologie et l'hydrométrie de la Durance depuis le début du 20^{ème} siècle. Ces recherches nous ont tout d'abord permis de témoigner de l'extraordinaire patrimoine de données sur ce bassin, où l'on retrouve entre autres une dizaine de séries séculaires de débit. Ensuite, concernant l'hydrométrie, ces travaux nous ont permis de nous rendre compte du fort avancement des connaissances dans ce domaine dès le début du 20^{ème} siècle, puisque la plupart des considérations de cette époque (incertitude des jaugeages, représentativité des courbes de tarage, stabilité de la section de mesure, transport solide, sécurité, etc.) restent encore et toujours d'actualité. Enfin, bien qu'il reste encore beaucoup à faire pour caractériser la qualité et l'incertitude de ces données, nous avons pu mesurer que le mode d'échantillonnage des hauteurs pouvait sensiblement biaiser les débits des séries anciennes de bassins à régime nival.

Cet article permet également de montrer la richesse des longues séries d'observations et la chance de posséder de telles données pour contribuer aux débats sur les impacts du changement climatique. Actuellement, de nombreux travaux cherchent à caractériser la sensibilité des ressources en eau disponibles et de leurs usages aux scénarii climatiques du 21^{ème} siècle. Les données anciennes permettent de témoigner d'une certaine variabilité déjà observée à l'échelle du siècle dernier. Ces longues séries d'observations permettront ainsi de servir de références pour quantifier, relativiser ou rendre plus robuste la significativité des changements probables auxquels on peut s'attendre au cours de ce siècle.

VI REFERENCES

- Cœur, D. (2012). Enquête documentaire sur les données hydrologiques et hydrométriques anciennes du bassin de la Durance. Commanditaire : EDF-DTG. Rapport 1. 29 p. et rapport 2. 33 p.
- Kuentz, A., Mathevet, T., Gailhard, J ; Perret, C., Andréassian, V. (2013). More than 100 years of climatic and hydrologic variability of a mediterranean and mountainous watershed : the Durance river. Cold and Mountain Region Hydrological Systems Under Climate Change: Towards Improved Projections, Proceedings of H02, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013, *IAHS Publ.* **360**.
- Imbeaux, E. (1892). *La Durance : régime, crues et inondations*. Paris, France: Vve Ch. Dunod, 200 p.
- Lallement, C. (2002). Quelques enseignements tirés de l'étude d'une longue série hydrométrique : la Durance au Pont de Mirabeau (1832-1959). *La Houille Blanche*, **4-5**, pp. 51-55 DOI: 10.1051/lhb/2002058.

G

Article: More than 100 years of climatic and hydrologic variability of a Mediterranean and mountainous watershed: the Durance River

Anna Kuentz, Thibault Mathevet, Christian Perret, Joël Gailhard, Christian Perret, Vazken Andréassian

Article publié dans la publication « *Cold and Mountain Region Hydrological Systems Under Climate Change: Towards Improved Projections* », Proceedings of H02, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013, IAHS Publ. Red Books 360, 2013.

Over 100 years of climatic and hydrologic variability of a Mediterranean and mountainous watershed: the Durance River

ANNA KUENTZ^{1,2}, THIBAUT MATHEVET¹, JOEL GAILHARD¹,
 CHRISTIAN PERRET¹ & VAZKEN ANDREASSIAN²

¹ Electricité de France – DTG, 21 avenue de l'Europe, BP41, 38040 Grenoble cedex 09, France
anna.kuentz@gmail.com

² Hydrosystems and Bioprocesses Research Unit, IRSTEA, 1 rue Pierre-Gilles de Gennes CS 10030, 92761 Antony cedex, France

Abstract This paper presents a methodology to build long climatic and hydrologic time-series, based on the downscaling of large-scale climatic data and local observations. This method has been applied on the Durance watershed, on which long historical daily streamflow series have been recently brought to light. These long series allow a validation of the reconstruction method, which show very promising performances on both calibration and validation periods. Finally, 22 1900–2010 streamflow series have been built and used to illustrate the hydrological variability on the Durance watershed over the last century.

Key words hydrological variability; historical time-series; streamflow reconstruction; analogues method; Alps

INTRODUCTION

Improving the understanding of mountain watersheds hydrological variability is a great scientific issue, for both researchers and water resources managers. This paper presents a methodology to build long climatic (air temperature and precipitation) and hydrologic time-series, based on large-scale climatic data and local observations. This methodology has just been applied to the case study of the Durance watershed (14 000 km²), situated in the French Alps, which is characterized by a variety of hydrological processes (from snowy to Mediterranean regimes) and a wide range of anthropogenic influences (hydropower, irrigation, industries, drinking water, etc.).

A sample of long historical series of daily streamflows beginning in the early 20th century, which have recently been found, is also presented. Then, these series allow us: (1) to validate our reconstruction methodology of hydrometeorological time-series, and (2) to better understand the temporal and spatial hydrological variability of the Durance River over the last century.

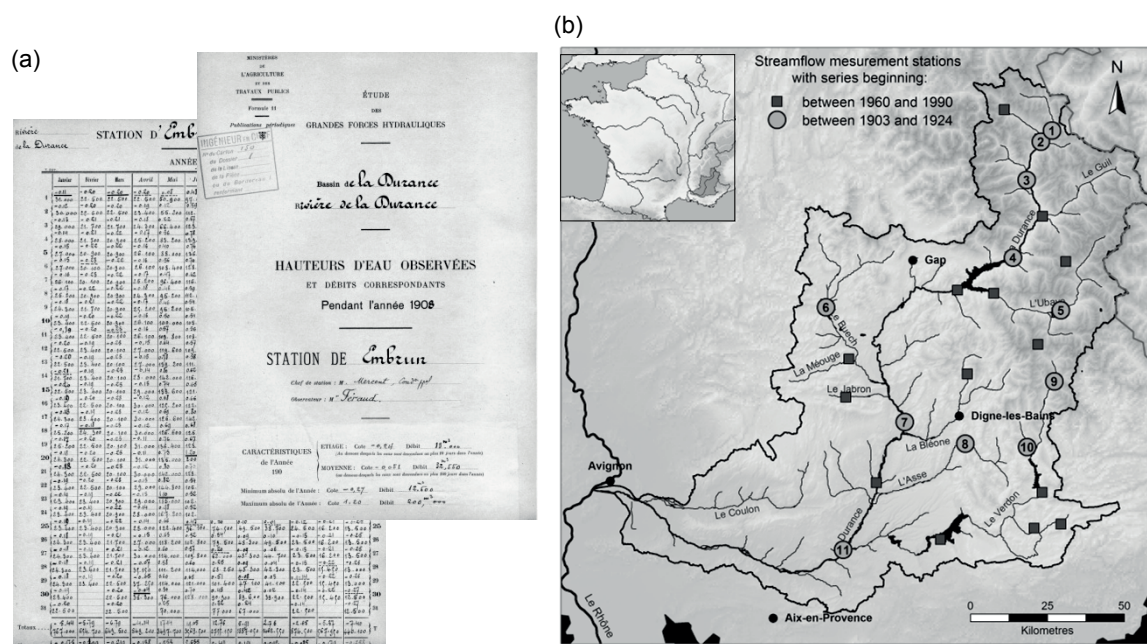


Fig. 1 (a) Historical data sample and (b) map of the long streamflow series collected for the Durance watershed.

Table 1 Characteristics of the long streamflow series collected for the Durance watershed.

No.	River	Station	Area (Km ²)	Alt. (m)	Start	End	Length (years)
1	Durance	Val-des-Près - La Vachette	210	1352	1917	2011	95
2	Durance	Briançon	548	1187	1904	2011	108
3*	Durance	L'Argentière-La-Bessée	984	950	1910	2011	102
4	Durance	Embrun – La Clapière	2170	787	1904	2011	108
5	Ubaye	Barcelonnette	549	1132	1904	2011	108
6	Buech	Serres – Les Chambons	771	657	1906	2011	106
7*	Durance	Oraison l'Escale	6760	415	1924	2011	88
8	Asse	Clue de Chabrieres	375	605	1908	2011	104
9	Verdon	Colmars	158	1230	1903	2011	109
10	Issole	Saint-Andre-Les-Alpes – Mourefrey	137	931	1904	2011	108
11*	Durance	Pont de Mirabeau / Jouques-Cadarache	11700	247	1918	2011	94

*Stations whose number is marked with a star will not be used in the following study.

Long time-series of daily streamflows on the durance watershed

In order to improve knowledge on the hydrological variability of the Durance River watershed, the first source of information explored would be streamflow measurements over time. With the aim of extending our database of historical daily streamflow series, a search in various sources of hydrological archives was carried out in association with an historian. This work allowed the discovery of several 100-year-old daily streamflow series, kept in the form of hand-written annual tables, as shown in Fig. 1(a). If some of these series were still available and used in a digital form, most of them could be considered as “new” data. These new series have been digitized and 11 historical series beginning between 1904 and 1924 are now available on the Durance watershed. These series are presented in Table 1 and localized in Fig. 1(b). On the same figure another set of 14 streamflow stations beginning between 1960 and 1990 are also shown.

In parallel with the search for data itself, information on the methods used to construct these series have been looked for (such as instrumentation, gauging, rating curves, etc.). This type of information is useful to assess data quality and homogeneity over time (Kuentz *et al.*, 2012).

RECONSTRUCTION OF STREAMFLOW SERIES: THE ANATEM METHOD

Three steps to obtain daily streamflow series

As streamflow is an integrator of a wide range of global and local hydrometeorological processes and variables, such as precipitation, air temperature, watershed configuration or river layout, it is difficult to make a direct reconstruction of this variable. Climatic variables such as precipitation and air temperature have more regional patterns and are generally easier to model.

The streamflow reconstruction method presented here is hence composed of three steps: (1) reconstruction of climatic variable time-series, by the method detailed below, (2) rainfall–runoff calibration on a common period of streamflow and climatic data availability, (3) reconstruction of streamflow series using reconstructed climatic series as inputs for hydrological models.

Reconstruction of climatic series: a combination of two classical methods

Usually, reconstructions of climatic variables are based on the use of observed (control) series. A reconstruction model is built with calibration on a common period of available data on the target series. Generally, the models used are multiple linear models between variables (for precipitation series), or monthly ranges between inter-annual regimes (for air temperature series).

The analogues method (Obled *et al.*, 2002) is traditionally used to produce climatic series for weather forecasts or for climate projections downscaling (Bourqui *et al.*, 2011). This method is

based on a classical hypothesis of meteorology saying that similar atmospheric pressure fields generate similar local climatic variables. Starting from this hypothesis, the method builds a climatic series on a period A by using observed data available at the same point on a period B. It uses geopotential fields data that must be available daily during both periods A and B. For each day of the period A, called target day, similar days in terms of geopotential fields, called analogue days, are found in period B. The observed data of these analogue days are directly used as the target day value. In order to take into account the uncertainty of this reconstruction, an ensemble of analogue days is selected for each target day (50 in our case).

To build a climatic series on period A, the ANATEM method combines these two methods: the linear model based on a local control series and the analogues ensembles. As a simplification it could be said that the model is the control series model corrected and dressed by the uncertainty of analogues ensembles. The error made by the control series model on each analogue day is then transferred to the target day.

A simplified formulation of the ANATEM model is given by formula (1) for air temperature and formula (2) for precipitation. Note that formula (2) is only a theoretical formula, since it does not exclude the possibility of dividing by zero. In our application, some numerical treatments are made to avoid this problem.

$$\left[\hat{T}_d^k \right]_{k=1..n} = CS_d + \left[T_{ANA_d^k} - CS_{ANA_d^k} \right]_{k=1..n} \quad (1)$$

$$\left[\hat{P}_d^k \right]_{k=1..n} = CS_d \cdot \left[\frac{P_{ANA_d^k}}{CS_{ANA_d^k}} \right]_{k=1..n} \quad (2)$$

where d is the considered day, k is the rank of the analogue day, n is the number of searched analogue days (50 in our application), \hat{T} and \hat{P} are the estimated values, T_{ANA} and P_{ANA} are the air temperature and precipitation values of the analogue days, CS is the value of the control series, and CS_{ANA} are the control series values for the analogue days.

The control series can be local or regional series, or other variables such as, for air temperature reconstruction, the thickness of the atmosphere layer between the 700 and 1000 hPa geopotentials.

STREAMFLOW RECONSTRUCTION ASSESSMENT ON THE DURANCE

Data and model

For this application, various types of data are needed. Climatic series are the 1 km × 1 km precipitation and air temperature extracted from the climatic reanalysis by Gottardi (2012), on the 1948–2010 observation period (B). Climatic series used for simulations at a given streamflow station are the mean daily areal precipitation and air temperatures over the watersheds.

As presented in the first part, historical daily streamflow data are available on both observation and reconstruction periods for eight stations. To improve our analyses, another sample of 14 stations with streamflow series starting between 1960 and 1990 has also been used.

Geopotential fields are taken from the 20th Century Reanalysis by the NOAA (Compo *et al.*, 2011): an archive of 700 and 1000 hPa geopotential fields is available from 1871 to 2010. As control series, two long climatic series have been used: a daily observed precipitation series at Gap, available from 1883 to the present, and a daily series of atmosphere thickness between the 700 and 1000 hPa geopotentials, extracted from the 20CR NOAA re-analysis (Compo *et al.*, 2011).

The ANATEM method is then used to reconstruct precipitation and air temperature on the 1 January 1899 to 31 December 2010 period. fifty continuous climatic time series are randomly generated from the 50 analogue ensembles, available every day.

The streamflow reconstruction is made by a conceptual rainfall–runoff model (MORDOR model developed at Électricité De France by Garçon (1996) and applied worldwide), forced by

precipitation and air temperature reconstruction. On a sample of 22 watersheds, rainfall–runoff models were calibrated on the 1980–1994 period, using the Kling-Gupta Efficiency (KGE, Gupta *et al.*, 2009) criterion (equation (3)) as the objective function.

$$KGE = \sqrt{(1-R)^2 + (1-\alpha)^2 + (1-\beta)^2} \quad (3)$$

where R is the coefficient of correlation, α is the bias of variance and β is the bias of mean.

Rainfall–runoff model performances on the calibration period are rather satisfactory with a mean KGE of 0.86 (mean Nash-Sutcliffe Efficiency of 0.78) at a daily time-step.

One simulation example: the Barcelonnette station on the Ubaye River

In order to give an illustration of the simulation results, the complete process previously described have been applied to the Barcelonnette station on the Ubaye River. For this station, the historical streamflow record began in 1904 and the data availability is very good, since only 3 years are completely missing.

As detailed before, the first part of the simulation process is to simulate climatic series, which will then be used as input for the hydrological model to produce streamflow series. The annual aggregations of the daily series obtained by these steps are shown in Fig. 2. As the ANATEM method produce ensembles, for each simulated hydrometeorological variable (air temperature, precipitation and streamflow), 50 simulated series are available and plotted on the figure.

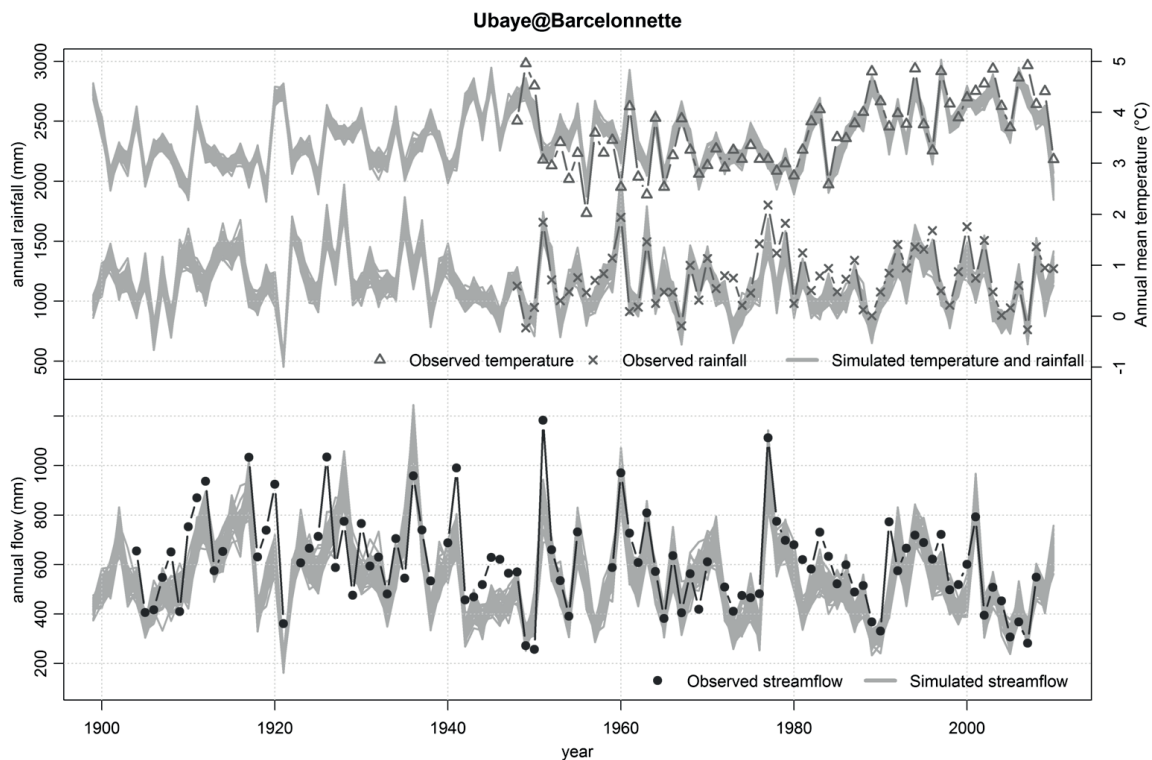


Fig. 2 Climatic and hydrologic simulated and observed annual series for the Barcelonnette station on the Ubaye River.

Figure 2 shows a good reconstruction for the two climatic variables. The interannual variability is well represented, as well as historical dry, wet, cold or warm years. Since air temperature has a lower spatio-temporal variability than precipitation, the spread of reconstructed series is narrower and appears to be more reliable for the air temperature than for the precipitation.

Streamflow simulations, only based on climatic reconstructions, are also quite good, with a good reconstruction of historical low-flow (1921, end of 1940s) or high-flow periods (mid 1910s, 1935–1936). Simulations appear to be better during the last period (1948–2010), where climatic reconstructions are probably better, and streamflow series is known to be more homogeneous.

Simulation performance

The simulation process has been applied to our sample of 22 streamflow stations. The evaluation of reconstructed series has been done in a deterministic mode, based only on the mean daily reconstructed series. Then, these reconstructed series are compared to observed ones, for which the availability period depends on each station. The simulation performance is evaluated in terms of correlation, bias, KGE and NSE (Table 2) for daily, monthly and annual time-steps.

On the A (historical) and B (observation) periods, Table 2 shows rather good performances in terms of correlation and KGE, i.e. a good representation of the variability at different time-steps. However, NSE values are poor to moderate due to a strong mean and variance bias, even worse during the A period.

As an example, the Barcelonnette station on the Ubaye River shows good performances with correlation coefficients (resp. NSE) ranging from 0.77 to 0.90 (resp. 0.42 to 0.80) on the A+B period. However, other stations, e.g. the Clue de Chabrières station on the Asse River, show lower performances with correlation coefficients (resp. NSE) ranging from 0.64 to 0.76 (resp. –0.30 to 0.40) on the A+B period. In this case, this could be explained by the relative lower quality of the streamflow measurements at this very unstable station, and by a more rainfall-influenced hydrological regime.

These results show a strong mean and variance bias, which are not due to biases on the climatic reconstructions, but due to rainfall–runoff model transposition on a very large time period. Sensitivity analyses to the rainfall–runoff model calibration time period have shown that the reconstructed streamflow series are rather sensitive to the selected periods (as shown by Coron *et al.*, 2012). In fact, the correlation coefficients are rather stable, but the simulated water balance could be significantly biased. This difficulty with respect to the long-term water balance of reconstructed streamflow series on a 100 years range is a major issue and has to be put into perspective with climate impact studies, usually using rainfall–runoff models also calibrated on short time periods.

In conclusion, Table 2 shows promising results for the reconstruction method at different time-steps. This performance on a daily to monthly time-step shows that the reconstruction method is able to provide hydrological time-series useful for a wide range of management and water resources applications.

Table 2 Performance criteria of streamflow simulations at three time-steps: mean values and standard deviations on a sample of 8 and 22 stations.

Period	A Period: 1900–1947 (8 stations)			B Period: 1948–2010 (22 stations)		
	Daily	Monthly	Annual	Daily	Monthly	Annual
R	0.78 (\pm 0.10)	0.85 (\pm 0.07)	0.66 (\pm 0.12)	0.78 (\pm 0.09)	0.86 (\pm 0.06)	0.78 (\pm 0.15)
α	0.80 (\pm 0.15)	0.82 (\pm 0.12)	0.88 (\pm 0.18)	0.78 (\pm 0.11)	0.81 (\pm 0.11)	0.88 (\pm 0.13)
β	0.82 (\pm 0.12)	0.82 (\pm 0.12)	0.83 (\pm 0.12)	0.90 (\pm 0.18)	0.90 (\pm 0.18)	0.90 (\pm 0.18)
KGE	0.64 (\pm 0.18)	0.70 (\pm 0.16)	0.56 (\pm 0.15)	0.63 (\pm 0.15)	0.69 (\pm 0.14)	0.66 (\pm 0.16)
NSE	0.58 (\pm 0.16)	0.66 (\pm 0.17)	–0.22 (\pm 0.78)	0.59 (\pm 0.15)	0.69 (\pm 0.13)	0.19 (\pm 0.66)

R , coefficient of correlation; α , bias of variance; β bias of mean; KGE, Kling-Gupta Eff., NSE, Nash-Sutcliffe Eff.

HYDROLOGICAL VARIABILITY OVER 100 YEARS

The previous sections allowed presentation and evaluation of a new method to reconstruct streamflow series on long historical periods. Finally, 22 long streamflow series have been built on the 1900 to 2010 period using this method. In Fig. 4 the annual streamflow anomaly of these series

(ratio between annual streamflow and interannual mean streamflow) is presented. This figure shows a rather pronounced consistency of the hydrological variability within the Durance watershed during the last century, despite the wide range of snowy- to rainfall-influenced regimes. The interannual variability on the Durance watershed is quite important, with annual streamflow varying from almost 50% to 300% of their mean value. Some well-known extreme events, e.g. the 1921 and late 1940s droughts, or the 1935–1936 floods, clearly appear.

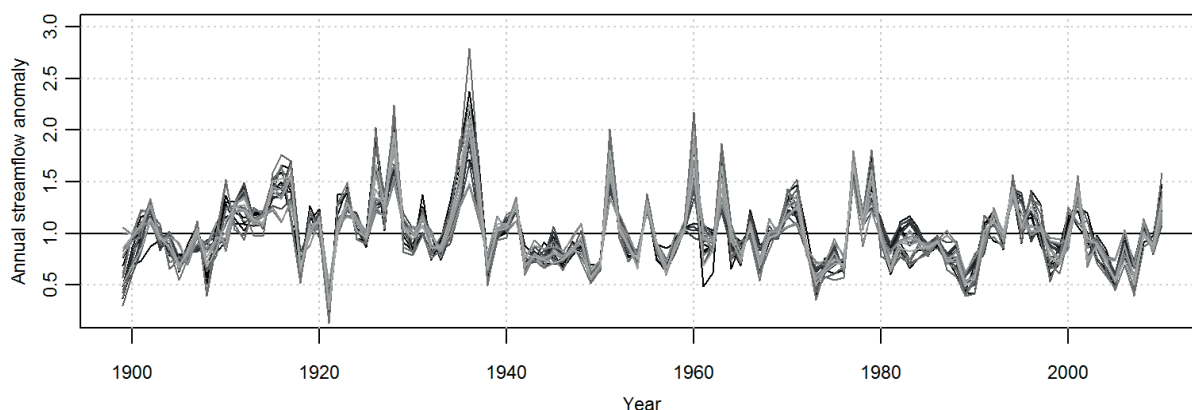


Fig. 4 Annual simulated streamflow anomaly (annual streamflow divided by the mean interannual streamflow) on 22 stations in the Durance watershed.

CONCLUSIONS

This paper presents a simple but efficient method (ANATEM) to reconstruct climatic and hydrologic time-series over the last 100 years. This method is based on an analogue search in geopotential fields, a modern climatic archive, long-term regional observations and a rainfall–runoff model. The ANATEM method has been applied to reconstruct streamflow series of 22 watersheds within the Durance watershed during the 1900–2010 period.

Recent research in historical hydrological archives allowed us to unearth long streamflow time-series (from the beginning of the 20th century) that allowed us to validate the ANATEM method. The mean correlation coefficient between observed and reconstructed time-series was rather high (from 0.6 to 0.9 for different aggregation time periods). However, streamflow reconstructions are significantly biased, due to rainfall–runoff model transposition difficulties over such a long period.

Finally, the 22 1900–2010 reconstructed streamflow series allowed characterisation of the Durance watershed’s hydrological variability over the last century. These streamflow series highlight the high temporal variability of hydrometeorological processes on a long term basis, that should be taken into account in future management and water resources applications.

Acknowledgements This work has been partially done within RIWER2030 (“Regional Climate, Water, Energy Resources and uncertainties from 1960 to 2030”) and R2D2 (“Risk, water Resources and sustainable Development within the Durance river basin in 2050”) projects. Support for the Twentieth Century Reanalysis Project dataset is provided by the US Department of Energy, Office of Science Innovative and Novel Computational Impact on Theory and Experiment (DOE INCITE) program, and Office of Biological and Environmental Research (BER), and by the National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Program Office.

REFERENCES

- Bourqui, M., Mathevet, T., Gailhard J. & Hendrickx, H. (2011) Hydrological validation of statistical downscaling methods applied to climate model projections. In: *Hydro-climatology: Variability and Change* (ed. by Stewart W. Franks), 32–38. Proceedings of symposium J-H02 held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011. IAHS Publ. 344. IAHS Press, Wallingford, UK.

- Compo, G. P., Whitaker, J. S., Sardeshmukh, P. D., Matsui, N., Allan, R. J., Yin, X., Gleason, B. E., Vose, R. S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R. I., Grant, A. N., Groisman, P. Y., Jones, P. D., Kruk, M., Kruger, A. C., Marshall, G. J., Maugeri, M., Mok, H. Y., Nordli, Ø., Ross, T. F., Trigo, R. M., Wang, X. L., Woodruff, S. D. & Worley, S. J. (2011). The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly J. Roy. Meteorol. Soc.* 137, 1–28.
- Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M. & Hendrickx, F. (2012) Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resour. Res.* 48, W05552.
- 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* (5), 71–76.
- Gottardi, F., Oblé, C., Gailhard, J. & Paquet, E. (2012). Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *J. Hydrol.* 432–433 (0), 154–167.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. & Martinez, G. F. (2009) Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *J. Hydrol.* 377(1–2), 80–91.
- Kuentz, A., Mathevet, T., Perret, C., Gailhard, J. & Andréassian, V. (2012) Uncertainty estimation and reconstruction of historical streamflow records. EGU General Assembly, Vienna (poster session).
- Oblé, C., Bontron, G. & Garçon, R. (2002) Quantitative precipitation forecasts: a statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach. *Atmos. Res.* 63(3–4), 303–324.

THESE DE DOCTORAT AGROPARISTECH

Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance

Recherches historiques et reconstitutions

Anna KUENTZ

Dans un contexte de variabilité climatique et de multiplication des usages de l'eau, la compréhension et la prévision de la variabilité des débits des cours d'eau est aujourd'hui un enjeu majeur pour améliorer la gestion des ressources en eau à l'échelle des bassins versants. En France, le bassin versant de la Durance (Alpes du Sud), lieu de multiples usages de l'eau (hydroélectricité, agriculture, alimentation en eau potable, loisirs), fait l'objet d'une attention particulière en ce qui concerne les impacts du changement climatique qui pourraient être importants du fait de sa situation géographique et de son régime partiellement nival, et remettre en question les équilibres en place permettant le partage de la ressource.

Dans l'optique d'une meilleure anticipation de la variabilité hydrologique d'un bassin versant, bien connaître le passé est une étape fondamentale permettant à la fois une meilleure connaissance du fonctionnement hydrologique du bassin et une mise en perspective des projections hydro-climatiques futures. Cette thèse a pour objectif et résultat principal de faire progresser l'état des connaissances sur la variabilité hydrologique du bassin de la Durance à l'échelle du dernier siècle. Deux axes principaux ont été développés pour remplir cet objectif.

Une première étape a été la recherche et la mise au jour d'un ensemble de longues séries hydrométriques concernant la Durance et ses affluents, permettant d'élever à 11 le nombre de séries centenaires de débits journaliers aujourd'hui disponibles sur ce bassin. Les nombreux documents accompagnant les données retrouvées nous ont par ailleurs permis de retracer, pour une partie de ces séries, l'évolution des méthodes utilisées pour les construire. Un processus de simulation des méthodes anciennes à partir de données horaires disponibles sur la période récente nous a permis de quantifier l'incertitude associée à ces méthodes et de mettre en évidence des biais importants causés par celles-ci sur certaines portions de séries. Une méthode de correction a été proposée et appliquée à plusieurs séries.

Le deuxième axe de notre travail a consisté en la reconstitution de séries hydrologiques en différents points du bassin. À cette fin, nous avons présenté et appliqué une méthode originale appelée ANATEM de reconstitution de séries climatiques à l'échelle du bassin versant à partir de données climatiques de grande échelle (champs de pressions atmosphériques), combinées à des informations plus régionales (séries de précipitations ou de températures observées). Les séries climatiques ainsi reconstituées ont ensuite été utilisées en entrée d'un modèle hydrologique pour construire des séries de débits. Ce processus nous a permis d'obtenir une vingtaine de séries hydrologiques couvrant la période 1884-2010 sur le bassin de la Durance. La comparaison des reconstitutions hydro-climatiques avec les longues séries de débits observés aujourd'hui disponibles a permis de valider la chaîne de reconstitution sur une période de plus d'un siècle.

Les séries observées et reconstituées illustrent finalement la variabilité hydrologique du bassin de la Durance qui se caractérise par une alternance de périodes sèches et humides à l'échelle de la décennie, ainsi que par une légère tendance à la baisse des débits. Ces longues séries de l'hydrologie du passé permettront de mettre en perspective les études prospectives sur les ressources en eau disponibles à l'échelle du siècle prochain.

Understanding and predicting hydrological variability is becoming a major issue to improve water resources management at the watershed scale, as climate variability and multipurpose use of water increase stress on the available resources. In France, the Durance watershed (South part of the Alps) is both characterised by numerous water-related activities such as hydropower, irrigation, water supply, tourism, and by a wide range of meteorological contexts ranging from mountainous to dry Mediterranean watersheds. As a consequence, this watershed appears as very sensitive to observed and projected climate variability, with an impact on water resources sufficient to question the current balance between users.

In order to better forecast the Durance watershed hydrological variability, tracing back its past evolution is an essential step. Indeed, historical knowledge provides a better understanding of how the watershed works, and put into perspective hydro meteorological projections for the next century. The main goal of this Ph.D. thesis is then to improve our knowledge of the hydrological variability of the Durance watershed over the last century. Two main themes have been developed.

The first step focused on historical research, bringing to light 11 centennial time-series of daily streamflow on the Durance watershed. Those data were quite well documented, allowing us to follow the evolution of the methods used to construct some of those time-series. Based on recent streamflow time-series, a simulation process allowed us to quantify the uncertainty associated to the methods used in the past, and to highlight the significant biases they carried on some periods of time. A correction process was then developed, leading to the partial revision of some of the time-series.

A second step involved reconstructing hydrological time-series at different points of the watershed. An original method, called ANATEM, has been introduced and exhaustively applied to rebuild climatological time-series at the watershed scale. This method is based on the use of large scale climatological variables (atmospheric pressure fields) combined with regional scale observations (observed precipitation or air temperature). Those reconstructed climatological time-series were then prescribed in a rainfall-runoff model, allowing the computation of hydrological simulations on the 1884-2010 period. The comparison of the simulated data with our 11 centennial observed time series allowed us to validate our hydro-climatological reconstruction chain over more than a century.

Finally, the observed and simulated time-series illustrate the climatological and hydrological variability of the Durance watershed. This variability is characterised by the succession of alternatively dry and humid periods lasting for ten to fifteen years, and by a slight trend to streamflow decrease. These long-term hydrological time-series will then put into perspective future investigations on water resources available over the next century.



