[MATHEVET Thibault]

RAPPORT

Scenarii de débit et de neige sur la période 1900-2100 dans le Parc National du Mercantour

H-44200966-2020-000001 Indice : A 54 Pages annexe(s)

Entité propriétaire : Parc National du Mercantour

Documents associés :

Résumé : Ce rapport s'intéresse à la variabilité hydrométéorologique à l'échelle du Parc National du Mercantour. L'analyse porte sur la période 1900-2100, à partir d'observations historiques de 1900 jusqu'à 2018 et de simulations d'impact du changement climatique jusqu'en 2100. Deux scenarii contrastés d'émissions sont considérés : le RCP4.5 et le RCP8.5. 4 bassins versants ont été retenus dans cette étude : la Tinée au Pont de Belloire et au Pont de la Lune, le Var au Pont Levis et la Vésubie à Saint Jean la Rivière. Ces bassins versants représentent une intéressante diversité d'échelles spatiales (170 à 700 km²) et de composantes nivales (altitudes médianes allant de 1400 m à 2200 m).

Les variables hydrométéorologiques analysées sont les précipitations, la température de l'air, les débits moyens, le régime hydrologique et le régime d'enneigement (valeur maximale, date de début et de fin, durée d'enneigement). Concernant la neige, une analyse par bandes d'altitudes a également été réalisée. Afin de dégager des tendances centrales robustes, ces variables sont analysées par tranches de 30 années (±15 ans) autour des périodes « 1940 », « 1970 », « 2000 », « 2030 », « 2060 » et « 2085 ».

Les résultats sont homogènes à l'échelle du Parc National du Mercantour et dépendent de la composante nivale des bassins versant. Ils mettent notamment en évidence l'évolution du régime hydrologique des bassins versants, avec une évolution limitée du débit moyen des bassins versants à l'horizon « 2030 », mais une diminution progressive de la composante nivale dans leurs fonctionnements (qui devient anecdotique pour les bassins versants les plus bas). Ces tendances continuent jusqu'à la fin du siècle et les deux scenarii (RCP4.5 et RCP8.5) se différencient à partir de 2050, le scenario 8.5 étant plus sévère.

Catégorie : Enregistrement Accessibilité : Libre

EDF
SA au capital de 1 463 719 402 euros
552 081 317 R.C.S Paris
Le groupe EDF est certifié ISO 14001
www.edf.com

EDF Hydro
DTG
Dpt SurveillanceCentre Hydrométéorologique Alpes
134 et 200, Chemin de l'Étang38950 ST-MARTIN-LE-VINOUX

Création - Modifications

Ind.	Auteur(s)	Vérificateur(s)	Approbateur
	Nom, Visa	Nom, Visa	Nom, Visa
	MATHEVET Thibault	VALERY Audrey	CARANTA Thierry

Historique des modifications

Indice	Date	Paragraphes modifiés / Objet
A	01/2020	Création du document : Cyril THEBAULT a contribué sur les simulations nivales (§2.4 et §4.3) Alexandre BROUET a réalisé les cartes de cette étude
	03/2020	Relecture Jérôme MANSONS (Parc National du Mercantour) Relecture par Audrey VALERY (EDF)

Diffusion

Destinataire(s) pour application	Nb	Destinataire(s) pour information	Nb
Parc National du Mercantour : J. MANSONS	1	CHA : F. GOTTARDI, F. RINALDI, A. VALERY, A. BRENOT	1
		CHA : T. CARANTA	1
		DMM : M. LE LAY, J. GAILHARD, R. GARÇON	1
		CHPMC : E. LEROY, S. SOUBEYRAN	

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

1. INTRODUCTION

1.1. CONTEXTE GENERAL

Les zones de montagne font actuellement l'objet d'une attention particulière, notamment de la part de la communauté scientifique, avec une littérature abondante, dans de nombreux domaines. En effet, les zones de montagne représentent à l'échelle du globe : environ 25% des surfaces continentales, 70% des ressources en eaux douces et 12% de la population humaine. Comme d'autres milieux naturels, les montagnes représentent par ailleurs de nombreux intérêts : écologiques (notamment, ressources en eau, biodiversité), économiques (notamment, industries, tourisme, agriculture) et sociétaux (notamment, populations, risques naturels). Du fait du croisement entre ressources en eau disponibles et industries, les montagnes apparaissent aujourd'hui au cœur de ce qu'on appelle le Nexus Eau-Énergie (-Alimentation) (Magagna et al., 2019).

Par ailleurs, dans le contexte actuel de changement climatique, les zones de montagne représentent également un grand intérêt scientifique, notamment sur les thématiques des ressources en eau disponibles et de la biodiversité. En effet, une des particularités des zones de montagne est d'être le siège de cette zone de transition climatique caractérisée par l'iso 0°C, espace conceptuel qui sépare les zones sans neige, des zones avec neige et glace. En montagne, la présence de neige et glace et leur évolution du fait du changement climatique représentent un intérêt particulier d'étude car de nombreux impacts écologiques, économiques et sociétaux sont attendus.

Afin de compléter cette présentation très synthétique du contexte général, nous nous permettons de reproduire l'introduction au numéro spécial de la Revue de Géographie Alpine sur le thème ***Impact du changement climatique sur les dynamiques des milieux montagnards*** (Fort, 2015) :

> *« Les montagnes sont des écosystèmes spécifiques, caractérisés par une grande diversité et complexité (Messerli et Ives, 1997). Les gradients topographiques, climatiques et biologiques élevés se combinent à de forts contrastes saisonniers pour favoriser le déclenchement d'événements climatiques et géomorphologiques extrêmes, qui à leur tour peuvent fortement affecter les milieux écologiques et humains (Ives et Messerli,1989 ; Price, 1999 ; Beniston, 2002 ; Viviroli et al., 2007 ; Huggel et al., 2010 ; Körner, 2013). Les populations de montagne ont des modes de vie très diversifiés : les activités rurales traditionnelles comme l'agriculture, le pâturage et l'exploitation forestière, coexistent avec l'extraction minière, la production d'hydroélectricité et l'industrie du tourisme (Beniston et al., 1996). Selon le contexte socio-économique et démographique de chaque pays, ces activités sont aujourd'hui soit en déclin soit en plein essor. En fait, si 12 % de la population mondiale vit dans les montagnes, elle vit en grande majorité dans les pays en développement marginalisés (physiquement et économiquement), de sorte que toute modification des conditions environnementales peut avoir un impact sur la pauvreté et la sécurité alimentaire (Kohler et al., 2014). Les montagnes jouent également un rôle important pour leurs piémonts : elles sont de véritables « châteaux d'eau » (Liniger et al., 1998 ; Viviroli et al., 2007) qui stockent et restituent leur eau douce plus en aval, elles permettent aussi la production d'énergie par le biais d'un fort potentiel hydroélectrique (de Jong et al., 2009 ; Viviroli et al., 2011 ; Beniston et Stoffel, 2013). Mais les milieux de montagne sont « fragiles », ils peuvent être détruits par de nombreux facteurs tels que le déboisement, le surpâturage, la mise en culture de terres marginales, la progression de l'urbanisation, tous facteurs qui peuvent conduire à (1) la dégradation rapide de l'impact du changement climatique sur les dynamiques des milieux montagnards, et à (2) l'augmentation des risques naturels, et mettre ainsi les populations en danger.*
>
> *Les milieux de montagne sont particulièrement sensibles aux changements climatiques (Beniston, 2003, 2005). Ils figurent parmi les écosystèmes les plus sérieusement et rapidement touchés : ils peuvent être affectés par des changements de température et du régime des précipitations à toutes les échelles (Zemp et al., 2009). Neige et glace sont les principaux paramètres de contrôle du cycle hydrologique, en particulier des écoulements saisonniers, et peuvent influer sur la globalité du géosystème (roches, sols, végétation, débits de rivières...). Avec le changement climatique, la disponibilité en eau risque d'être réduite, avec des conséquences qui se feront sentir bien au-delà des régions de montagne (Lutz et Immerzeel, 2013). De même, le changement climatique est susceptible de provoquer davantage de catastrophes naturelles ou économiques, d'autant plus que dans de nombreuses zones de montagne, les niveaux de pauvreté sont plus élevés et l'insuffisance alimentaire plus répandue que dans les basses terres (Ives et Messerli, 1989 ;Kohler et al., 2014).*
>
> *Cependant l'évaluation des impacts potentiels des changements environnementaux n'est pas chose facile en raison de la complexité et de la diversité des systèmes de montagne, et de la variabilité intra et interannuelle naturelle des paramètres climatiques, qui font que la nature exacte du changement climatique est très difficile à prouver (Immerzeel et al., 2010 ; Salzmann et al., 2014). En effet, toute prédiction de l'évolution future du climat repose à la fois sur un vaste réseau de stations météorologiques et sur les résultats de modélisations à partir de données satellitaires, et les tendances ne peuvent être réellement dégagées qu'à l'échelle de plusieurs décennies (Beniston, 2003 ; Immerzeel et al., 2009 ; Nolin, 2010). »*

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

La Figure 1 présente une synthèse des impacts du changement climatique en zone de montagne. De manière générale :

- Les évolutions climatiques principales concernent en premier lieu :
  - Les **températures de l'air**, avec une augmentation globale des températures de l'air, et des contrastes saisonniers marqués ;
  - Les **précipitations**, avec des évolutions de leur **nature** (liquide/solide). Les évolutions de **la saisonnalité et de la quantité des précipitations** restent variables spatialement et aucun consensus ne semble émerger à l'heure actuelle ;
  - Les **évènements extrêmes**, notamment les extrêmes positifs de températures de l'air. Concernant les précipitations, aucun consensus ne semble émerger à l'heure actuelle.
- Les impacts de ces évolutions climatiques concernent principalement :
  - La **cryosphère**[1] avec une remontée de l'altitude de l'iso 0°C (diminution du permafrost), une réduction de l'enneigement à moyenne altitude et une augmentation de sa variabilité, un retrait glaciaire ;
  - Le **régime hydrologique des cours d'eau**, avec une avancée de la période de fusion, une réduction des débits du pic de fusion et l'apparition de crues automnales sur des bassins de montagne.

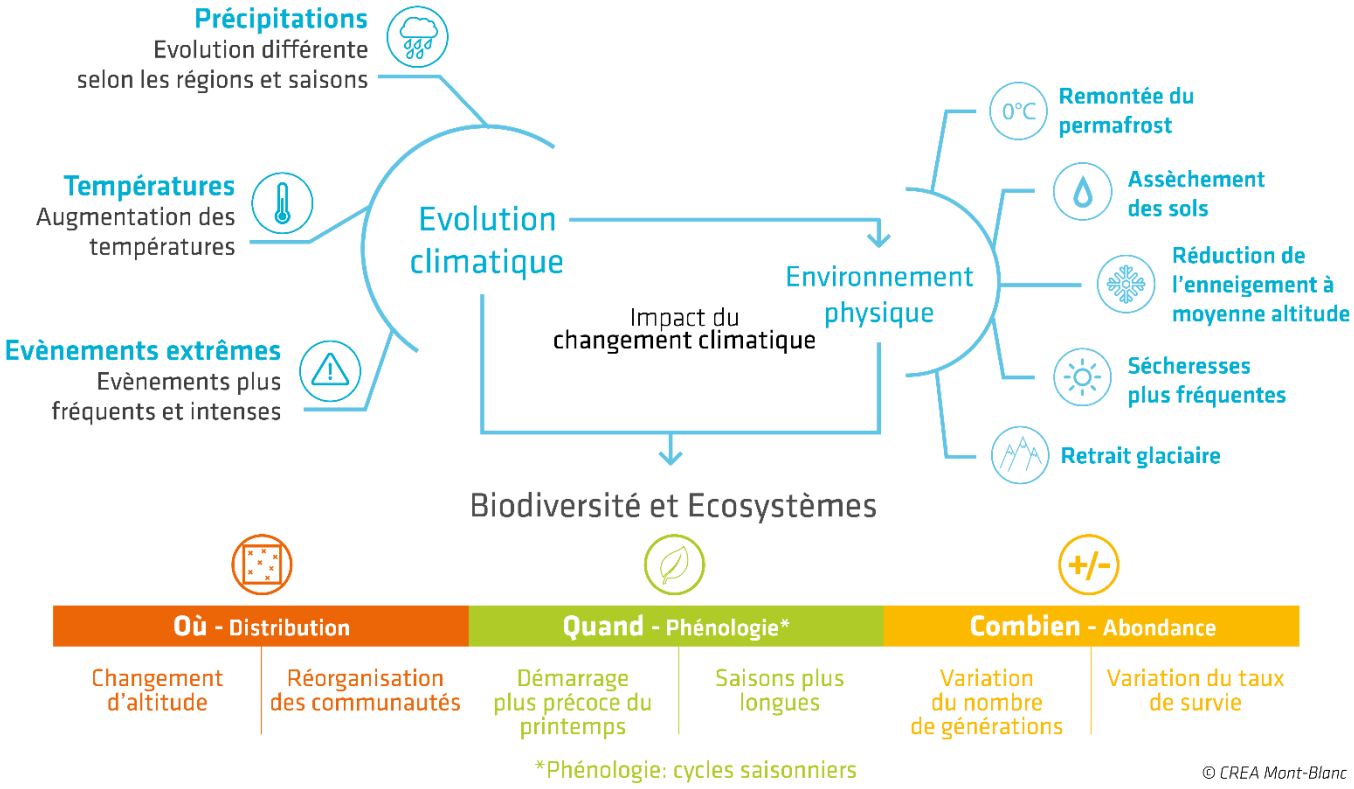


Figure 1 : Synthèse des impacts du changement climatique sur la biodiversité et les écosystèmes en zone de montagne (source : CREA Mont-Blanc)

Le territoire du Parc National du Mercantour, qui fait l'objet de cette étude, se situe dans les Alpes du Sud de la France, en région Sud Provence Alpes Côte d'Azur. D'un point de vu climatique, ce massif est sous influence alpine et méditerranéenne à la fois. La région Méditerranéenne est considérée comme un « hot spot » du changement climatique (AR5 IPCC, 2014; Cramer et al., 2018), avec notamment une augmentation des températures de l'air plus fortes que la tendance globale, une réduction probable des précipitations et une réduction des ressources en eaux douces disponibles. Ces grandes tendances s'expriment bien à l'échelle des Alpes du Sud (GREC PACA, 2016 ; GREC SUD, 2018), contrairement aux Alpes du Nord, qui se situent dans une zone des Alpes plus neutre en terme de tendances climatiques (notamment, absence de consensus quant à la réduction des précipitations).

1 La cryosphère, du grec kryos, est un terme désignant toutes les portions de la surface des mers ou terres émergées où l'eau est présente à l'état solide.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

1.2. COMMANDITE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

Compte-tenu du contexte général de changement climatique, des particularités des milieux de montagne et de la région du Mercantour, les objectifs principaux de cette étude sont de présenter les impacts du changement climatique jusqu'à l'horizon 2100 sur :

- les ressources en eau disponibles et,
- la dynamique nivale en montagne.

Pour répondre à ces deux questions, nous utiliserons conjointement :

- des observations climatologiques, hydrologiques et nivologiques ;
- des modèles hydrologiques et nivologiques ;
- des projections climatiques de la précipitation et de la température de l'air issues des simulations climatiques du GIEC (CMIP5), forcées par deux scenarii d'émission de gaz à effet de serre (RCP 4.5 et RCP 8.5).

Cet ensemble de données et de modèles nous permet de réaliser des simulations de débit et de neige sur la période 1900-2100. À partir de ces simulations, nous pouvons réaliser des analyses statistiques robustes de variables d'intérêt caractérisant les débits et la neige en temps passé, présent et futur. Compte-tenu de la variabilité climatique qui touche l'ensemble des variables hydrométéorologiques, il nous est apparu important de nous appuyer sur une analyse du passé assez lointain (jusqu'en 1900), afin de pouvoir comparer de manière robuste les scenarii climatiques futurs à la variabilité climatique passée déjà observée.

Ce rapport est organisé de la manière suivante :

- le §2 présente la zone géographique d'étude et les données disponibles ;
- le §3 présente les modèles utilisées et la méthode générale d'analyse d'impact du changement climatique, sur une ou plusieurs variables hydrométéorologiques ;
- le §4 présente l'analyse d'impact du changement climatique sur les débits ;
- le §5 présente l'analyse d'impact du changement climatique sur la neige ;
- le §6 présente la conclusion et les perspectives de cette étude.

2. ZONE D'ETUDE ET DONNEES DISPONIBLES

2.1. DOMAINE SPATIAL DE L'ETUDE

La Figure 2 présente le Sud-Est de la France, le domaine du Parc National du Mercantour et les bassins versants retenus pour cette étude. Le domaine du Parc du Mercantour s'étend, d'Est en Ouest, de la haute vallée de la Roya, jusqu'à la haute vallée du Verdon. Dans le cadre de cette étude, nous avons retenus des bassins versants situés sur ou à proximité du territoire du Parc : la Vésubie, la Tinée et le Var.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

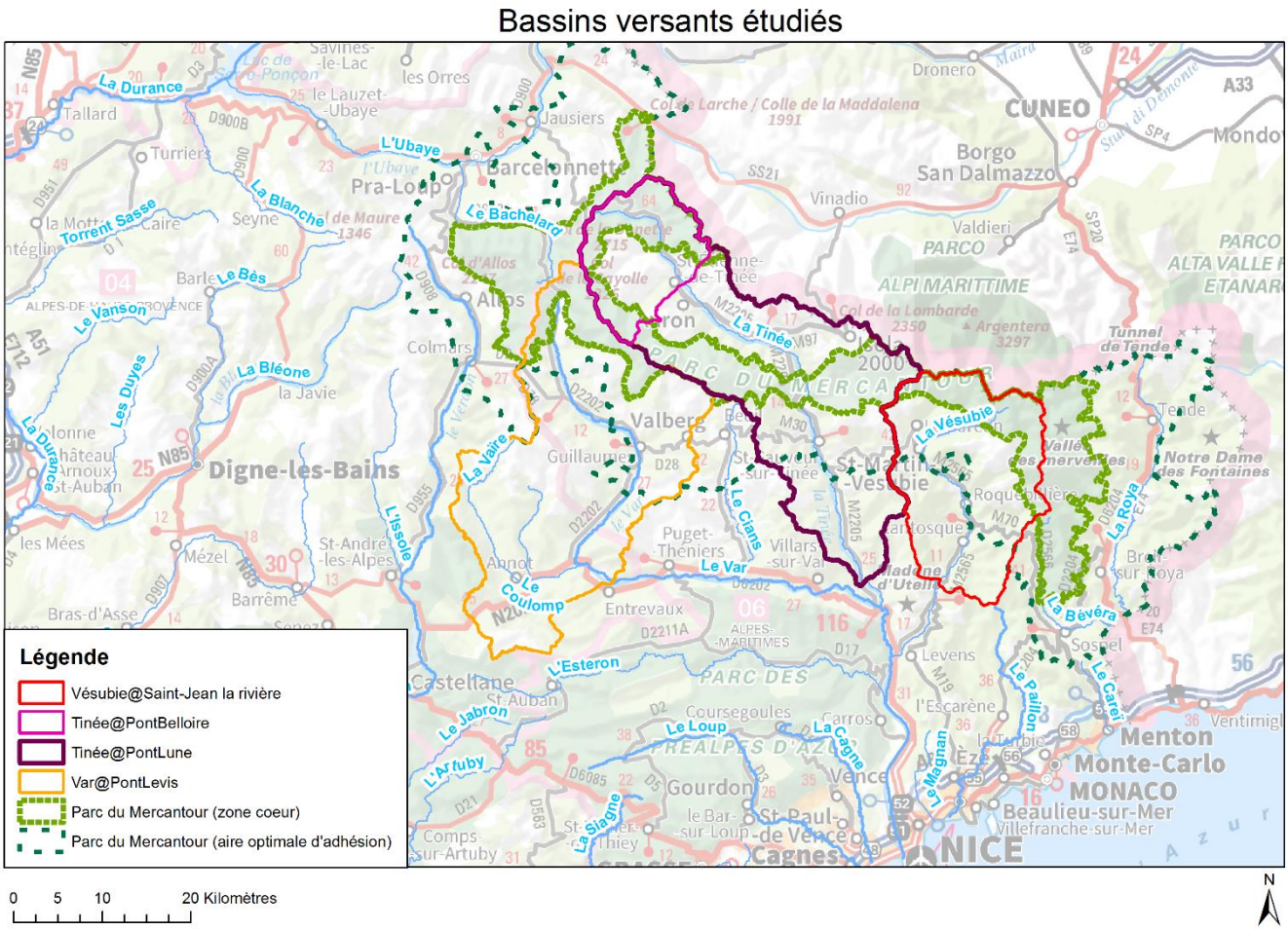


Figure 2 : Localisation de la zone cœur du Parc National du Mercantour et des bassins versants étudiés (Vésubie, Tinée, Var)

2.2. DONNEES CLIMATOLOGIQUES

La Figure 3 présente la localisation des stations climatologiques (précipitations et température de l'air) dans et à proximité du Parc du Mercantour. Les stations recensées sont celles gérées par Météo France et EDF, sachant qu'il existe probablement d'autres producteurs de données locaux en France et également en Italie (ARPA Piemonte). Cette carte montre que l'ensemble du territoire du Mercantour est relativement bien couvert, même si les stations se situent principalement dans les vallées, à plutôt basse altitude, comparativement aux massifs montagneux qui caractérisent cette région.

La Figure 4 et la Figure 5 montrent la carte de la précipitation moyenne annuelle et de la température moyenne annuelle estimées par la réanalyse SPAZM (Gottardi, 2009; Gottardi et al., 2012). Les données SPAZM représentent une réanalyse climatologique (précipitation et température de l'air) de 01/01/1948 à 31/12/2012, au pas de temps journalier et à une maille de 1 km². Cette réanalyse diffère de la réanalyse SAFRAN (Durand et al., 1993) produite par Météo France, notamment en zones de montagne où les observations les plus élevées n'ont pas été utilisées par Météo France. In fine, la réanalyse SPAZM offre une meilleure estimation des précipitations en zone de montagne, notamment grâce à l'utilisation de données en altitude du réseau EDF (nivo-pluviomètres totalisateurs), permettant de préciser les gradients de précipitation en altitude. À notre connaissance, ces données représentent la meilleure représentation que l'on a de la climatologie en montagne.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé à la fois les données SPAZM sur la période 1948-2012 et les données sol sur la période 2013-2018. L'utilisation conjointe de ces deux sources d'informations nous a permis de disposer de chroniques climatologiques au pas de temps journalier sur la période allant du 01/01/1948 au 31/12/2018, pour l'ensemble des besoins de cette étude.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

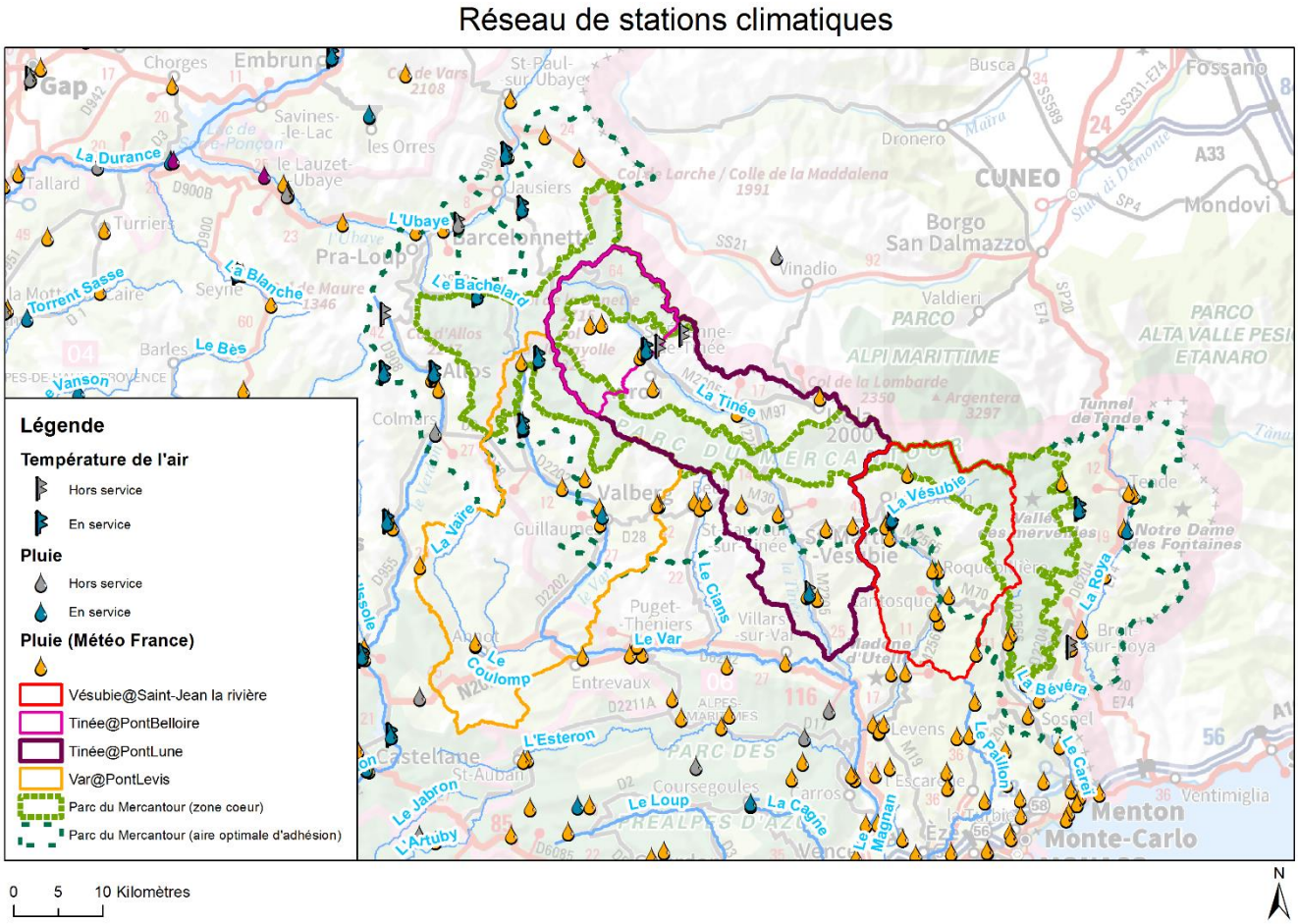


Figure 3 : Localisation des stations climatologiques (précipitation & température de l'air EDF et Météo France) à proximité du Parc du Mercantour

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

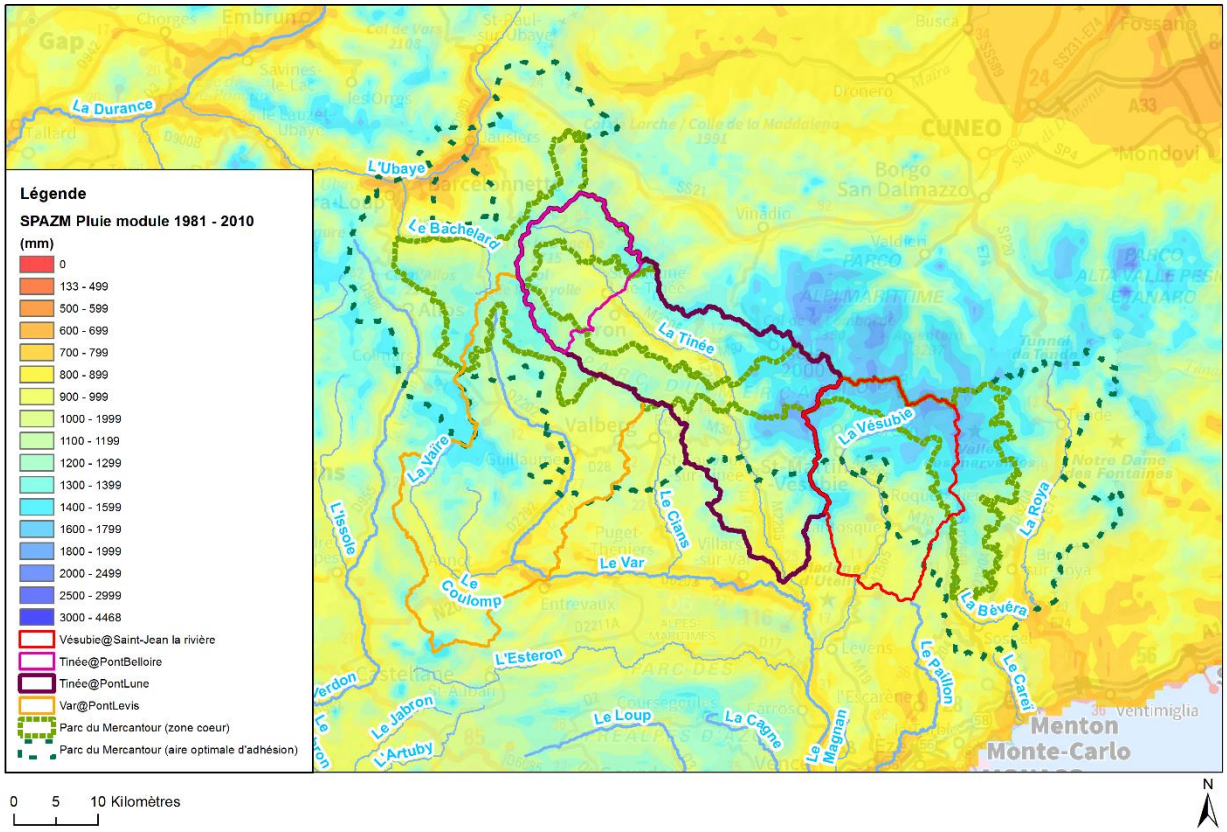


Figure 4 : Précipitation moyenne long terme SPAZM à proximité du Parc du Mercantour

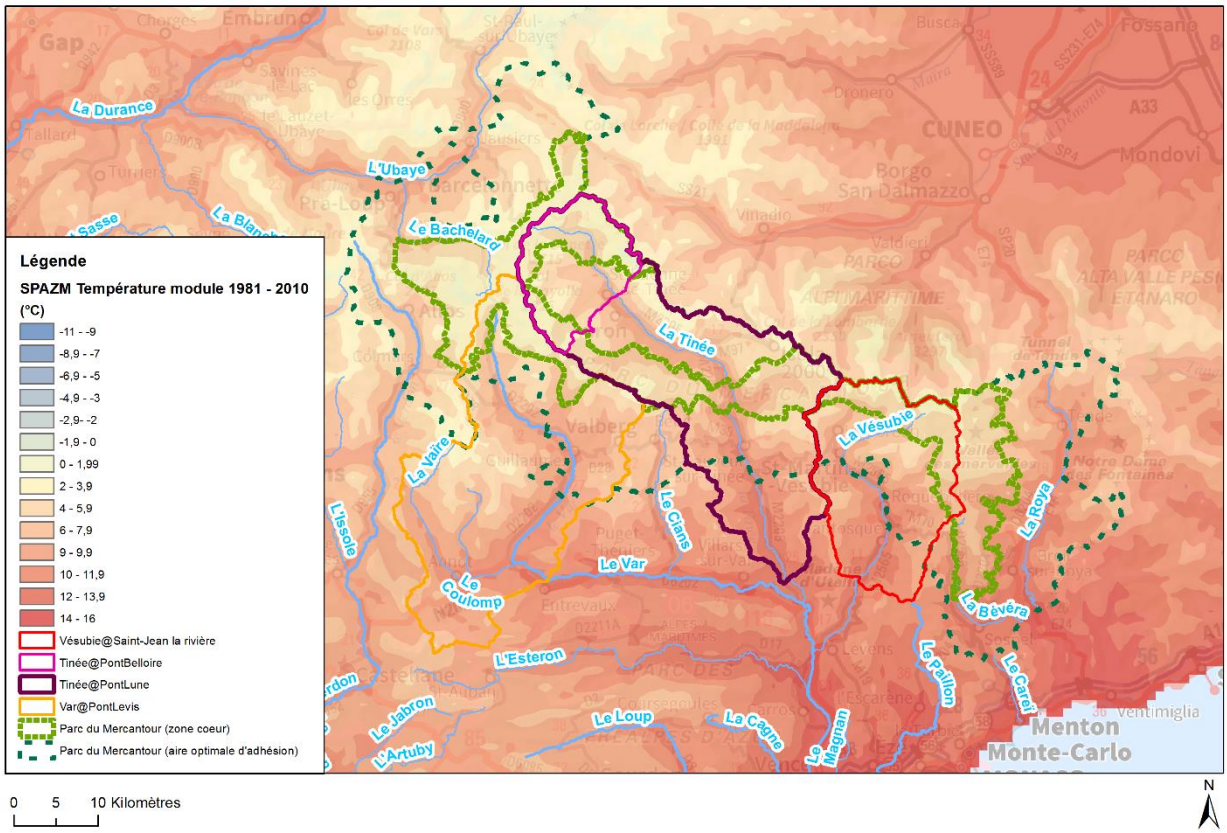


Figure 5 : Température de l'air moyenne long terme SPAZM à proximité du Parc du Mercantour

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

2.3. DONNEES HYDROLOGIQUES

Concernant les données hydrométriques, on retrouve des stations de la DREAL et d'EDF dans les vallées principales (Verdon, Var, Tinée, Vésubie, Roya : Figure 6). L'hydrométrie de cette région est caractérisée par :

- Des **bassins versants naturels** et/ou peu influencés :
  - Le Var en amont de sa confluence avec la Tinée [1083 km²] ;
  - Le Verdon en amont du barrage de Castillon [569 km²] ;
- Des **bassins versants influencés** par des usages hydroélectriques :
  - La Tinée, dès l'aval de Saint Etienne de Tinée ;
  - La Vésubie ;
  - La Roya ;
- Des **stations naturelles anciennes, abandonnées** soit du fait de difficultés d'exploitation, soit du fait des influences hydroélectriques qui ont considérablement réduit leur intérêt ;
- Une **hydrométrie complexe** avec des stations peu stables, du fait notamment du transport solide et des phénomènes extrêmes qui génèrent une instabilité hydraulique forte des sections de jaugeage et de limnimétrie ;
- Une reconstitution des débits naturels sur les bassins versants influencés, par bilan aménagement[2].

De manière synthétique, on peut retenir qu'il y a quelques séries de débits permettant de décrire le fonctionnement hydrologique des bassins versants de la région, mais que la densité des stations est plutôt faible et les données sont potentiellement entachées de fortes incertitudes.

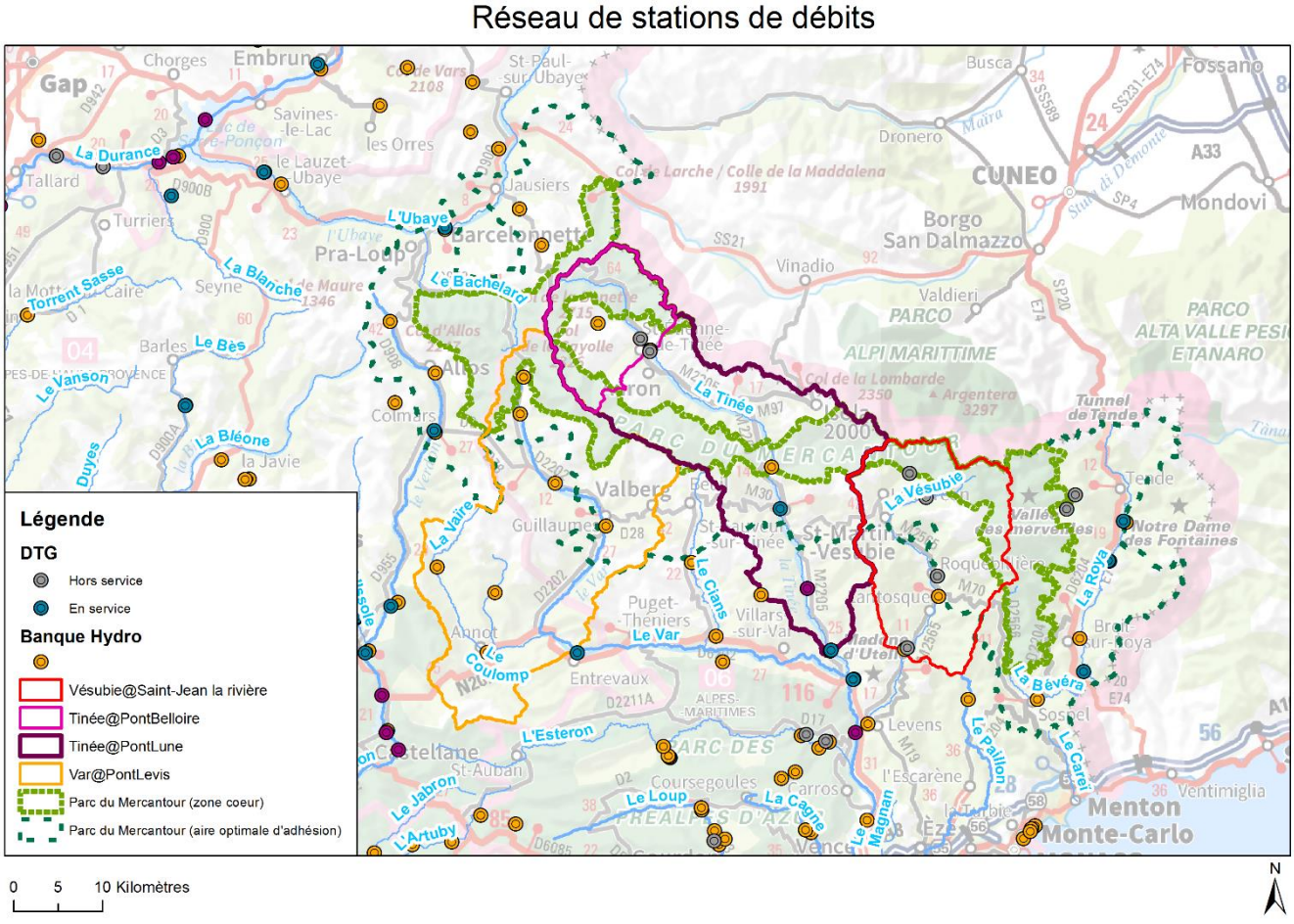


Figure 6 : Localisation des stations hydrométriques à proximité du Parc du Mercantour

Les stations hydrométriques retenues dans cette étude sont présentées au Tableau 1. Nous avons retenu 4 bassins versants allant de l'Est à l'Ouest du Mercantour, avec des données observées naturelles et des données reconstituées. Les bassins versants sont de tailles relativement homogènes, allant de 170 à 700 km².

2 Bilan aménagement ou « naturalisation » des débits : cette étape consiste à reconstituer le débit qui serait passé à l'exutoire s'il n'y avait pas d'activité humaine sur le bassin. Dans notre cas, les débits ont été reconstitués en s'affranchissant de l'influence des aménagements hydroélectriques (principalement stockage/déstockage des retenues).

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Rivière	Station	Surface du bassin versant [km²]	Code	Producteur de données	Disponibilité des données	Commentaire
Tinée	Pont de la Belloire [St Etienne de Tinée	167	Q0315 (Y6204020)	EDF	1950-1991	Station naturelle.
Tinée	Pont de la Lune	707	Q0313/Q0314 (Y6234010)	EDF	1970-2019	Station influencée. Utilisation d'une sous-période (1970-1991), dont les données semblent de meilleure qualité que sur la période récente
Var	Pont-Levis [entrevaux]	676	Y6042010	DREAL PACA	1959-2019	Station naturelle. Nombreuses lacunes et années manquantes.
Vésubie	St Jean la rivière	346	Q0306	EDF	1955-1969	Station naturelle.

Tableau 1 : Stations hydrométriques et bassins versants retenus dans cette étude

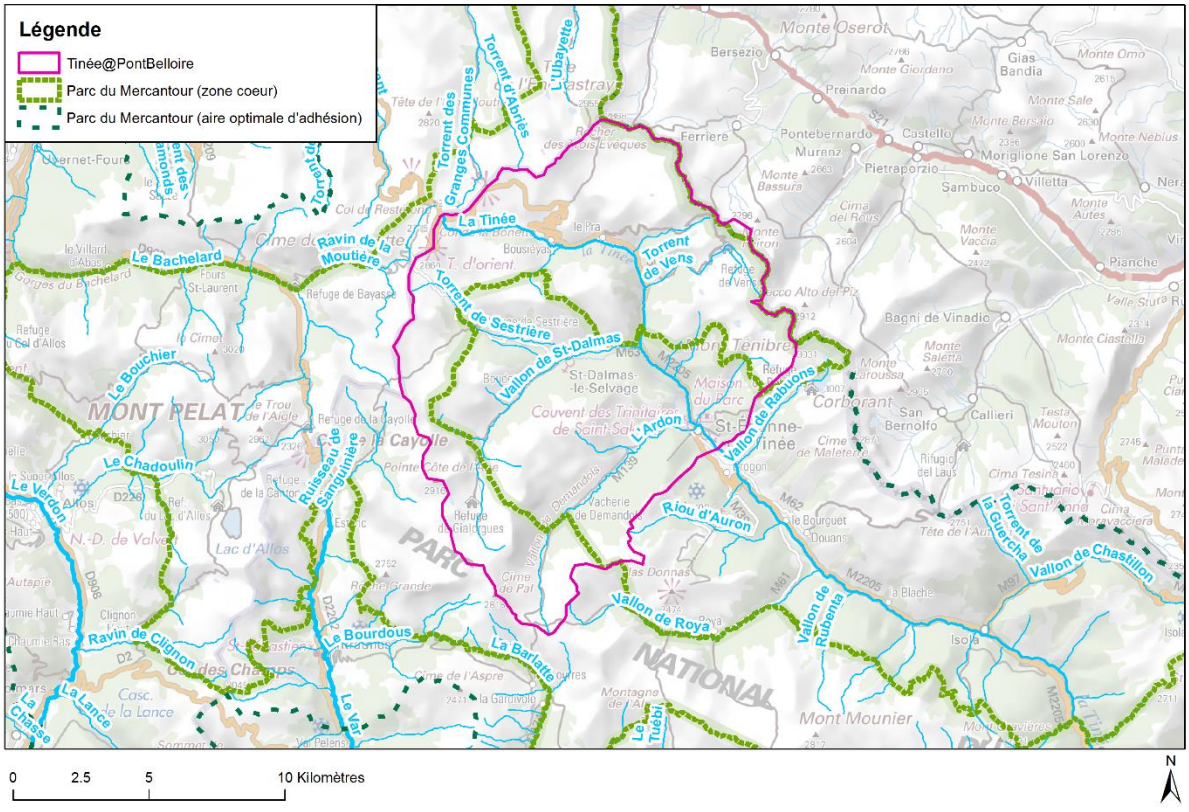


Figure 7 : Bassin versant de la Tinée au Pont de Belloire [167 km²]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

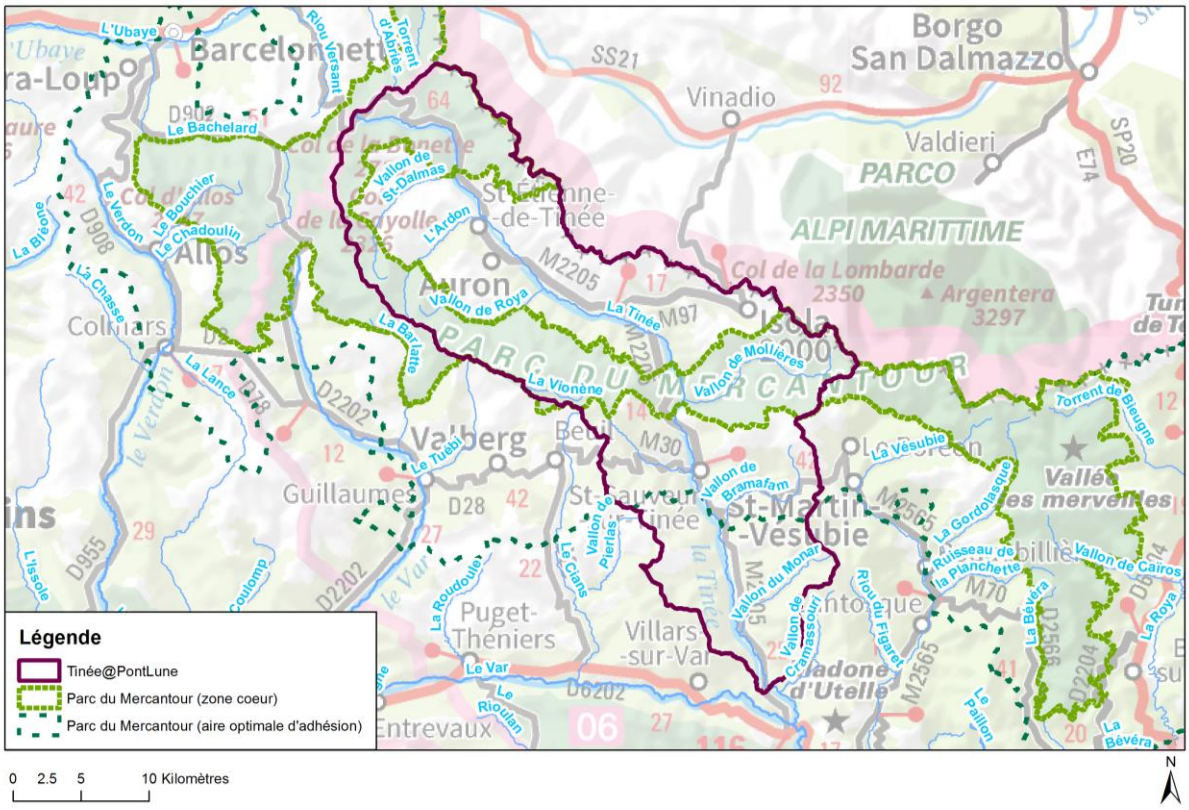


Figure 8 : La Tinée au Pont de la Lune [707 km²]

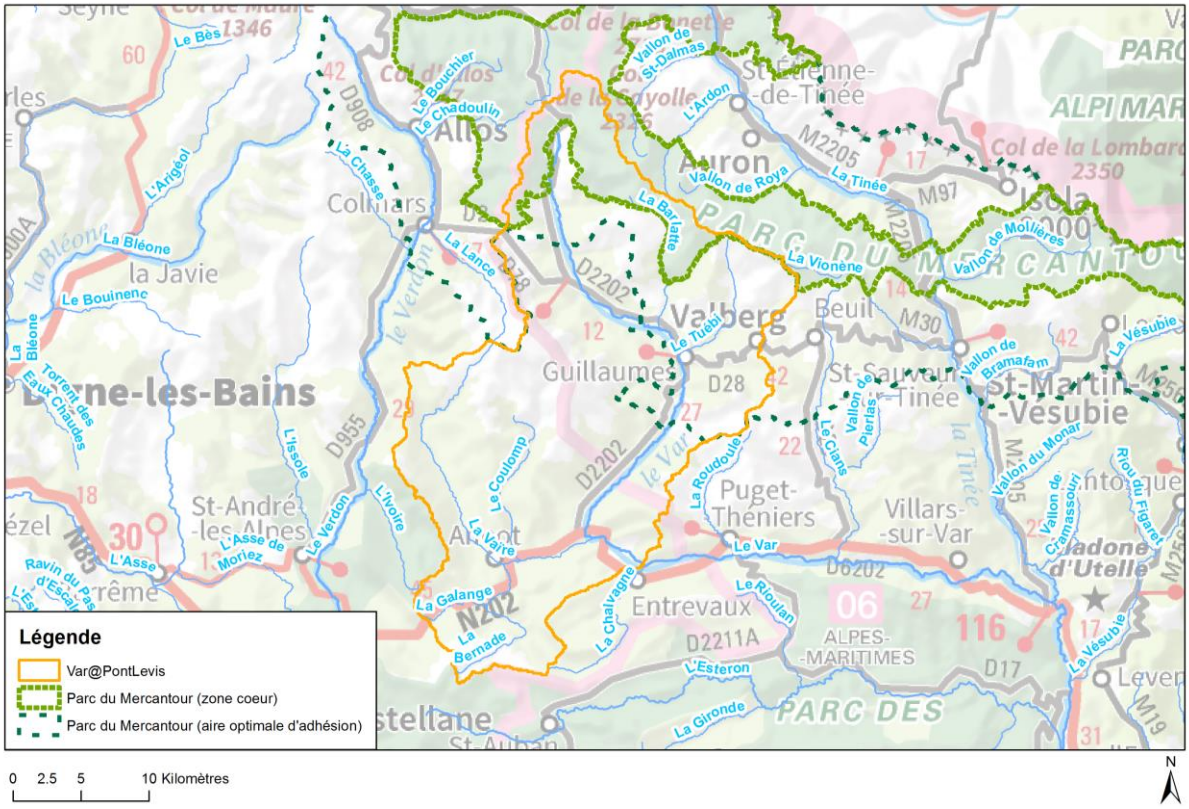


Figure 9 : Le Var à Pont Levis [676 km²]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

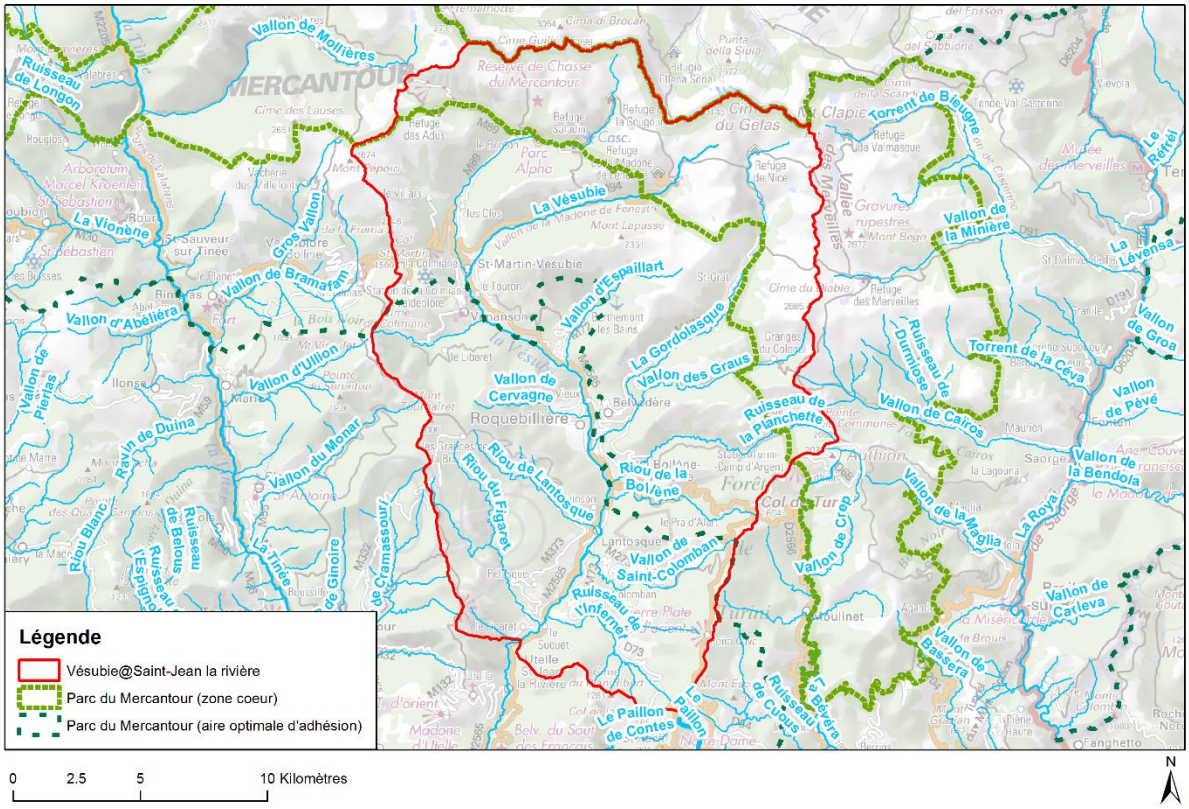


Figure 10 : La Vésubie à Saint Jean la Rivière [346 km²]

2.4. DONNEES NIVOLOGIQUES

Concernant les mesures nivologiques, EDF a mis en place dès les années 1950 des perches à neige en montagne, sur les principaux massifs de France (environ 300 perches à neige). On retrouve environ une cinquantaine de perches à neige entre le haut Verdon et la haute Roya (Figure 11). Pour faire les mesures nivologiques, les observateurs neige faisaient une course en montagne d'une journée qui permettait de relier plusieurs points d'observation. Les perches à neige servaient de point de repère, où des mesures de hauteur et de densité de la neige étaient réalisées. Ces mesures permettaient d'estimer l'équivalent en eau de la neige. De manière générale, les mesures étaient réalisées une fois par mois pendant la saison hivernale jusqu'au début de la fusion, généralement 4 à 5 mesures par an. Ces perches à neige n'ont pas été exploitées continument (période la plus couverte : des années 1950 aux années 1970) et il y a relativement peu de perches avec des mesures de plusieurs décennies allant jusqu'aux années récentes. Ces données ont été retrouvées récemment (2015) et ont été massivement numérisées depuis. Nous commençons tout juste à les exploiter (Mathevet et al., 2017a et 2017b ; Thebault, 2019). Plus récemment, d'autres systèmes d'observation de l'équivalent en eau de la neige ont été développés et utilisés : le télénivomètre des années 1985 aux années 2000 et le nivomètre à rayonnement cosmique à partir des années 2000. Actuellement, le réseau d'observation neige EDF représente environ 250 points de mesure en France. Dans la région du Mercantour, il y a moins d'une dizaine de points d'observations (EDF & Météo France).

Les stations nivologiques retenues dans cette étude sont présentées au Tableau 2. Parmi toutes les stations disponibles initialement, nous avons retenu 9 perches à neige, avec des chroniques d'observations suffisamment longues (au moins 40 ans). Ces perches à neige ont une altitude comprise entre 1600m et 2300m, et se situent principalement sur :

- Le haut Var (Sanguinière, Gorgias, Esteinc) ;
- Valberg (Croix sapet) ;
- Sud de St Etienne de Tinée (Nasbinas, Pra des pardes) ;
- À proximité d'Isola (Pont de Bonjer, Terra roubia, La Roubina) ;

Les données de valeur en eau de la neige aux perches ont été particulièrement utilisées dans le cadre d'un stage (Thebault, 2019). Les dossiers de perches à neige sur la Vésubie et la Roya ont été retrouvés à la fin de cette étude (et sont donc non valorisés dans cette étude).

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

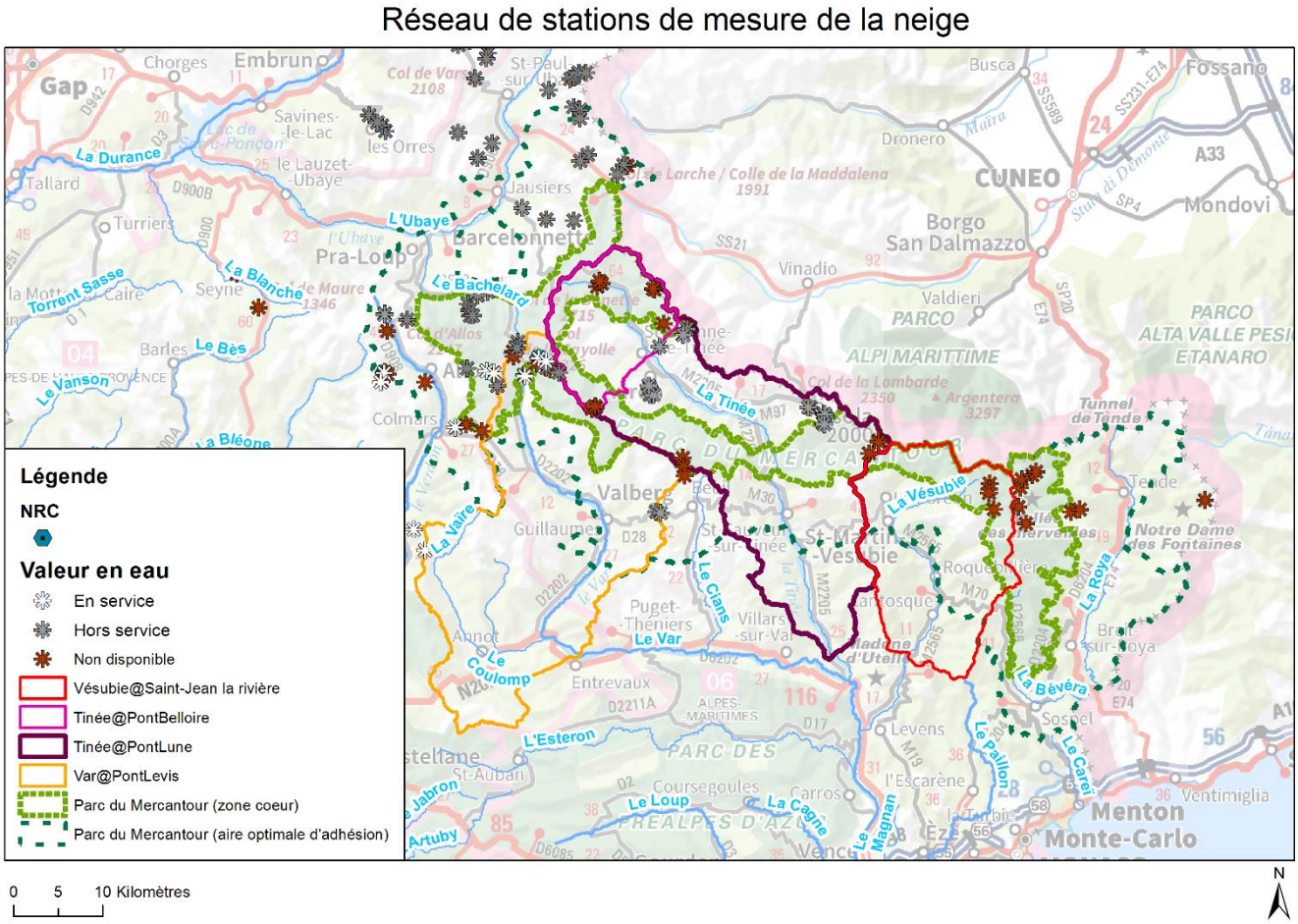
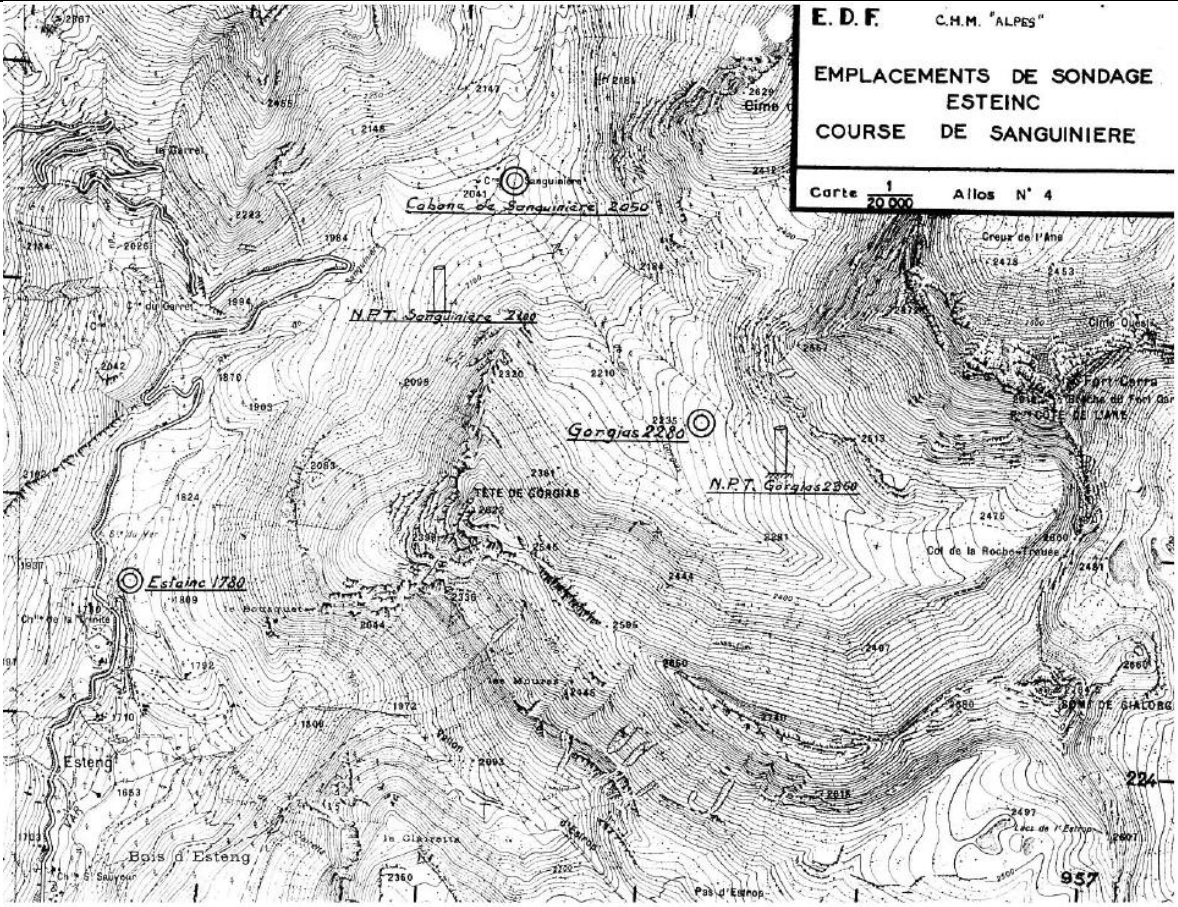


Figure 11 : Localisation des stations nivologiques (perches à neige et autres systèmes de mesures) à proximité du Parc du Mercantour

Nom	Code	Course	Date début	Date fin	X Lamb.93 [m]	Y Lamb.93 [m]	Z [m]	Bassin versant
Cabane Sanguiniere	N2804	Sanguiniere	12/03/1956	25/01/2019	1001269.3	6357634.0	2050	Var
Gorgias	N2806		19/12/1957	30/03/2018	1002118.5	6356543.0	2280	Var
Esteinc	N2807		23/11/1952	30/03/2018	999647.2	6355729.0	1780	Var
Croix Sapet	N2810	Croix Sapet	01/02/1954	02/05/1999	1014472.5	6340367.0	1710	Tinée
Pra des padres	N2820	Région Auron	28/12/1955	01/03/1999	1013783.1	6353472.0	2190	Tinée
Nasbinas	N2821		29/01/1951	01/03/1999	1013724.3	6354305.0	1650	Tinée
Pont de bonjer	N2828	Col du Chastillon	01/05/1956	28/04/1999	1031762.4	6352048.0	1920	Tinée
Terra Roubia	N2829		01/05/1956	28/04/1999	1033295.6	6351330.0	2150	Tinée
La Roubina	N2830		01/05/1956	28/04/1999	1033189.5	6350299.0	2260	Tinée

Tableau 2 : stations nivologiques utilisées dans cette étude

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation



E. D. F.

MI MOUNIER
ANNÉE 19 19

ENNEIGEMENT

TABLEAU RÉCAPITULATIF DES MESURES PÉRIODIQUES

BASSIN : VAR
EMPLACEMENT : N.P.T. Mt MOUNIER
OBSERVATEUR : Garnier. E
Altitude : 2370 m.
Station météorologique de référence :
Exposition :
Nom :
Pente moyenne du terrain :
Altitude :
Date de mise en service :
Type d'appareil de mesure : Sonde 54
Fréquence des mesures : 2 Annuel

Date des mesures	HAUTEUR DE NEIGE MESURÉE à la perche (cm)	HAUTEUR DE NEIGE MESURÉE moyenne sondage (cm)	Densité moyenne	Valeur en eau moyenne (mm)	Précipitations à la station de référence (mm) Partielles	Précipitations à la station de référence (mm) Cumulées	OBSERVATIONS
30.3.68	95	91	.43	395			
27.4.	60	71	.46	330			
1.4.69		181	.33	600			
1.2.70							
25.2	150	150	.31	465			
1.3				(470)			
21.3.	120	128	.35	450			
1.4.				(480)			
1.2.71				[380]			
20.2.	110	112	.31	345			
1.3.				[350]			
1.4.				[480]			
18.4.	160	158	.32	500			
1.5				[580]			

Figure 12 : Descriptif de la course de Sanguinière, exemple de nivo-pluviomètre totalisateur et bulletin de sondage de la neige

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

2.5. INFLUENCES DE LA MONTAGNE SUR LES BASSINS VERSANTS

Les bassins retenus dans cette étude (Tinée, Vésubie, Var) sont situés au cœur de la région du Mercantour et représentent une certaine variabilité des superficies (170-700 km²), de la composante nivale et de fonctionnement hydrologique (de nival à pluvio-nival). Pour illustrer la composante nivale de ces bassins versants, leurs courbes hypsométriques sont représentées à la Figure 13. Cette figure met en évidence le caractère montagnard très marqué pour la Tinée à Pont de Belloire (altitude médiane ~2200m) et Pont de la Lune (altitude médiane ~1800m) et un peu moins marqué pour le Var (altitude médiane ~1400m) et la Vésubie (altitude médiane ~1500m). Cette hiérarchisation des bassins versants par leur altitude se retrouve très bien dans leurs régimes hydrologiques (§4.2, Figure 23, Figure 24, Figure 25, Figure 26).

Le Tableau 3 représente la proportion des bandes d'altitudes 1500m-1800m, 1800m-2100m, 2100m-2400m, 2400m-2700m dans la superficie totale des bassins versant. Nous avons choisi de sélectionner des bandes d'altitudes communes aux quatre bassins versants afin de pouvoir comparer les tendances (plutôt qu'un découpage hétérogène des bandes d'altitudes, mais ayant une superficie homogène). Globalement, pour ces quatre bassins versants, les bandes d'altitudes 1500m-1800m, 1800m-2100m, 2100m-2400m représentent des proportions significatives de superficies (~10% à 30%). Ce découpage par bandes d'altitude est utilisé pour l'analyse des tendances d'enneigement de ces quatre bassins versants (Figure 40, Figure 44).

Bassin versant	Altitude médiane [m]	Proportion des surfaces par bandes d'altitude [%]					
		<1500m	1500m-1800m	1800m-2100m	2100m-2400m	2400m-2700m	>2700m
Tinée @ Pont de Belloire	2216	5.2	13.1	20.0	32.4	26.0	3.3
Tinée @ Pont de la Lune	1805	32.8	16.8	17.9	20.0	11.3	1.2
Var @ Pont Levis	1420	55.6	18.0	14.6	8.3	3.4	0.1
Vésubie @ St Jean de la Rivière	1495	50.3	15.4	13.2	12.8	7.0	1.3

Tableau 3 : Proportion des surfaces par bandes d'altitude [%]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

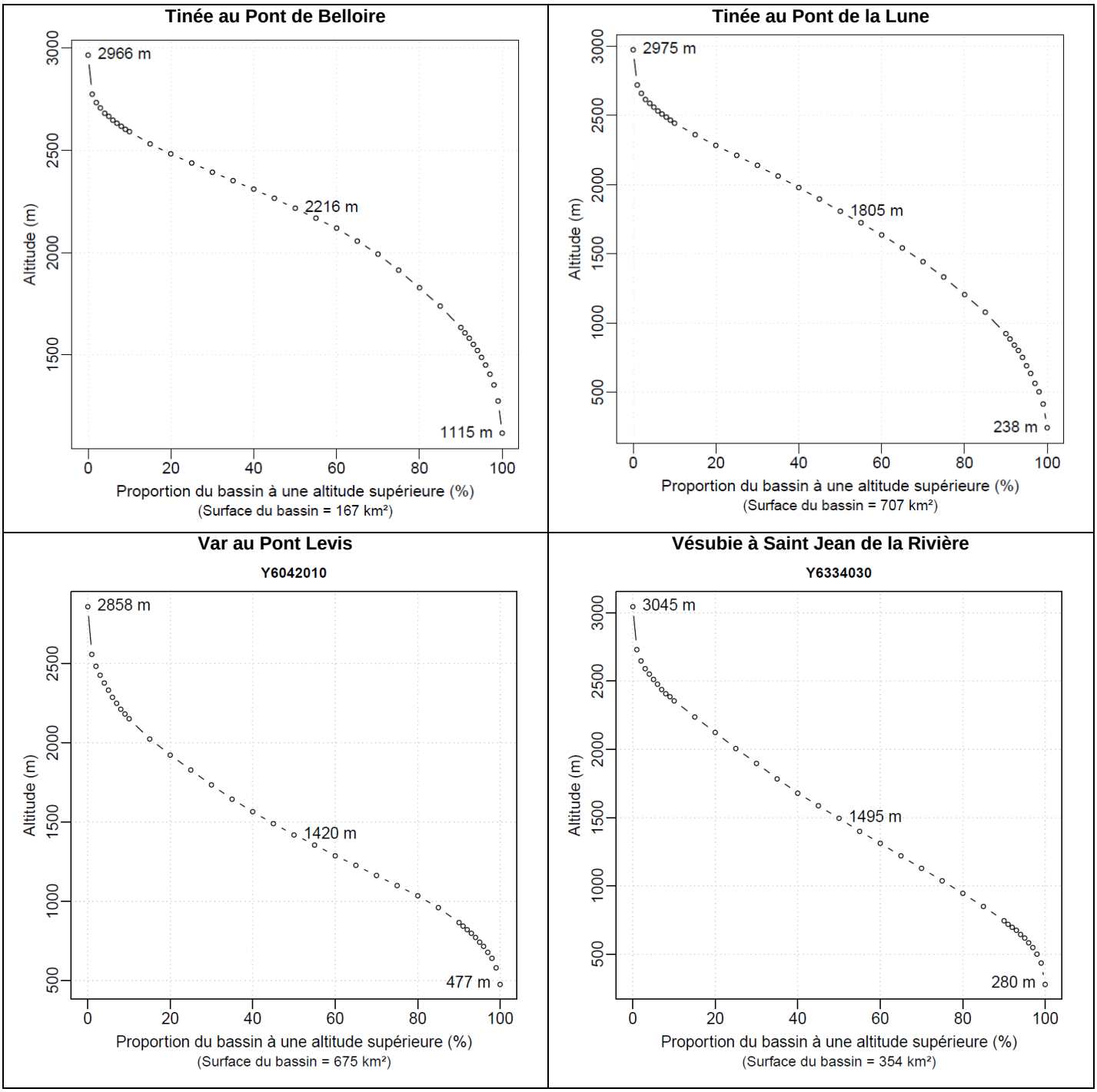


Figure 13 : Courbes hypsométriques des 4 bassins versants du Mercantour étudiés dans le présent rapport

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

3. RAPPELS METHODOLOGIQUES

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes basés sur divers développements méthodologiques, que nous allons présenter succinctement dans ce chapitre. Ces développements sont utilisés couramment dans le cadre d'études réalisées par EDF-DTG pour le parc EDF et pour réaliser des prévisions opérationnelles de débits.

3.1. NOTIONS DE MODELISATION HYDROLOGIQUE

EDF-DTG a développé et utilise couramment le modèle hydrologique MORDOR (Garavaglia, et al., 2017). Ce modèle est un modèle conceptuel à réservoirs, distribué par bandes d'altitudes. Cela veut dire :

- **Modèle conceptuel à réservoirs** :
  - modèle hydrologique qui conceptualise le fonctionnement hydrologique de manière simplifiée, en ayant pour objectifs de représenter les grands processus hydrologiques et les différentes dynamiques du fonctionnement du bassin versant (de rapides à lentes), au travers de réservoirs caractérisés par leurs lois de vidange. Ces modèles utilisent comme données d'entrée la précipitation moyenne et la température moyenne du bassin versant. Ils produisent comme données de sortie le débit, l'évapo-transpiration potentielle et réelle du bassin versant. Ces modèles possèdent également des variables d'état intéressantes, comme l'équivalent en eau de la neige ;
  - Ces modèles, aussi bien utilisés pour des applications d'ingénierie, de prévisions ou de recherche, sont généralement caractérisés par leurs paramètres qui leur permettent de s'adapter au fonctionnement du bassin versant d'intérêt. Pour caler les paramètres de ces modèles, il est généralement nécessaire de disposer d'observations de débits représentatives du fonctionnement du bassin versant. Le processus de calage du modèle hydrologique a pour objectif d'estimer les paramètres du modèle, permettant au modèle de représenter au mieux la chronique observée ;
  - Le modèle MORDOR utilisé dans cette étude est le modèle complet, avec sa routine neige (compte-tenu de l'importance des processus nivaux sur ces bassins versants).

- **Distributions par bandes d'altitude (**Figure 14**)** :
  - en zone de montagne, le fonctionnement hydrologique des bassins versants est largement conditionné par les processus nivaux, qui dépendent fortement de la température de l'air, largement corrélée à l'altitude du bassin versant. Pour simplifier la prise en compte de ce phénomène, les modèles hydrologiques sont généralement discrétisés par bandes d'altitude représentatives du bassin versant. On modélise une grande partie des processus hydrologiques par bandes d'altitude, au niveau desquelles on estime les forçages atmosphériques (précipitation et température de l'air). Pour estimer les bandes d'altitude d'un bassin versant, on utilise la courbe hypsométrique de ce bassin versant, que l'on coupe en une dizaine de bandes maximum, allant de l'altitude la plus basse à l'altitude la plus haute du bassin versant. Dans le cadre de cette étude, la discrétisation par bandes d'altitude permet de disposer d'une chronique d'équivalent en eau de la neige par gamme d'altitude. Pour les modèles utilisés dans cette étude, nous avons retenus dans nos analyses les bandes d'altitude suivantes : 1500m à 1800m, 1800m à 2100m, 2100m à 2400m, 2400m à 2700m et 2700m à l'altitude maximale du bassin versant, identiques pour les 4 bassins versants étudiés.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

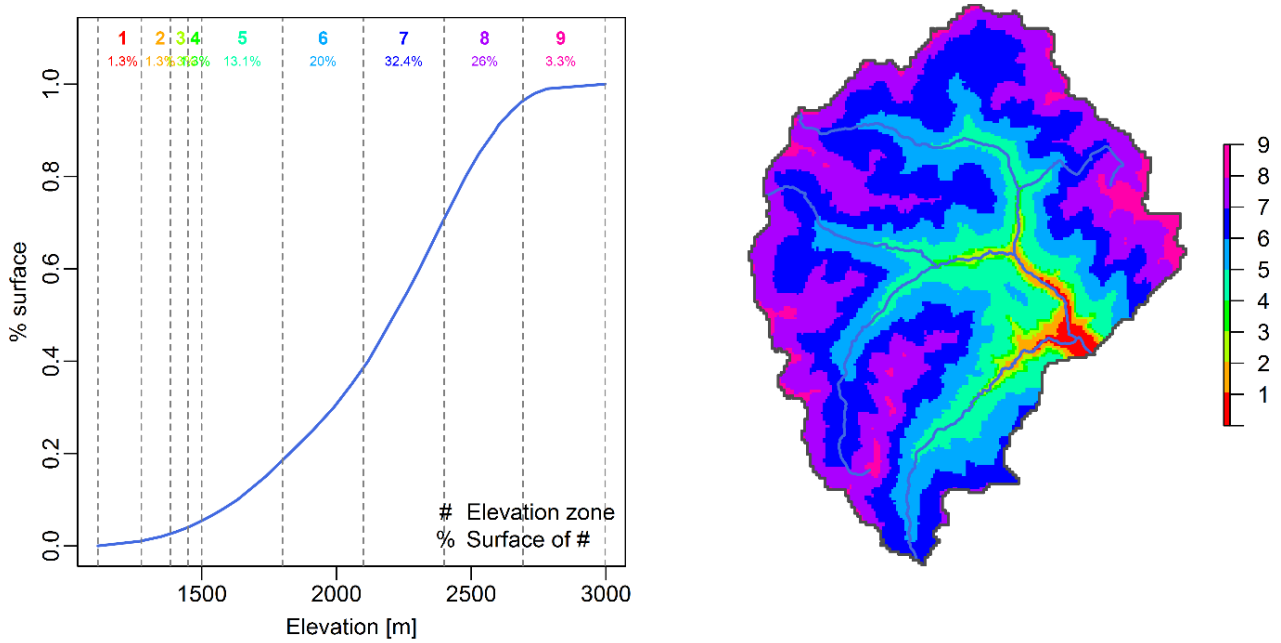


Figure 14 : Courbe hypsométrique de la Tinée au Pont de Belloire (gauche) et découpage du bassin correspondant (droite)

Les modèles hydrologiques que nous avons calés (estimer les paramètres pendant une période où on a des données que l'on juge acceptables) nous permettent également de faire une simulation au pas de temps journalier sur la période de plus grande disponibilité des données de forçage du modèle. Cette période s'étend du 01/01/1949 au 31/12/2018 (pour la période des réanalyses SPAZM) et sur la période étendue allant du 01/01/1901 au 31/12/2099 avec les estimations des forçages du modèle dans le passé et dans le futur. À titre d'exemple, la Figure 15 montre une simulation de débit (rouge), confrontée aux débits observés (bleu), sur une année. Sur l'ensemble de cette période nous disposons d'une chronique continue de débits simulés, mais aussi d'équivalent en eau de la neige simulé, par bandes d'altitude. Ce sont l'ensemble de ces données qui seront utilisées dans les analyses ultérieures.

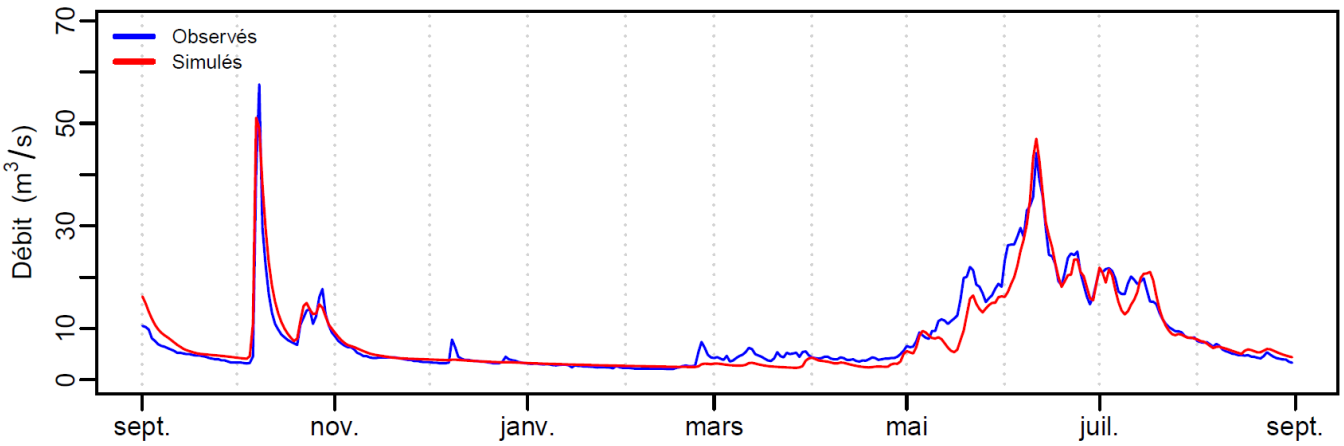


Figure 15 : Exemple de simulation hydrologique sur la Tinée@Pont de Belloire, du 01/09/1977 au 01/09/1978

3.2. NOTIONS DE MODELISATION NIVALE

La modélisation nivale conceptualise de manière simplifiée les principaux processus nivologiques, à l'échelle locale (perche à neige) ou à l'échelle d'un bassin versant ou d'une bande d'altitude d'un bassin versant. La modélisation locale peut être confrontée à des observations de neige, alors que la modélisation à des échelles plus grandes (bande d'altitude, bassin versant) est plus difficile à comparer à des observations. La modélisation nivale à de grandes échelles est néanmoins indispensable pour bien représenter les débits des bassins versants aux régimes influencés par la neige.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

La modélisation nivale utilisée dans cette étude est celle du modèle hydrologique MORDOR (Garavaglia, et al., 2017). Elle reprend les principaux processus nivaux qui sont l'accumulation de la neige, la maturation du manteau neigeux et la fonte de la neige. De la même manière que pour les modèles hydrologiques, le modèle nival possède des paramètres permettant d'adapter la représentation des processus, soit de manière directe lorsque des observations de neige sont disponibles (en l'occurrence, équivalent en eau du manteau neigeux), soit de manière indirecte lorsqu'on cale un modèle hydrologique sur des débits.

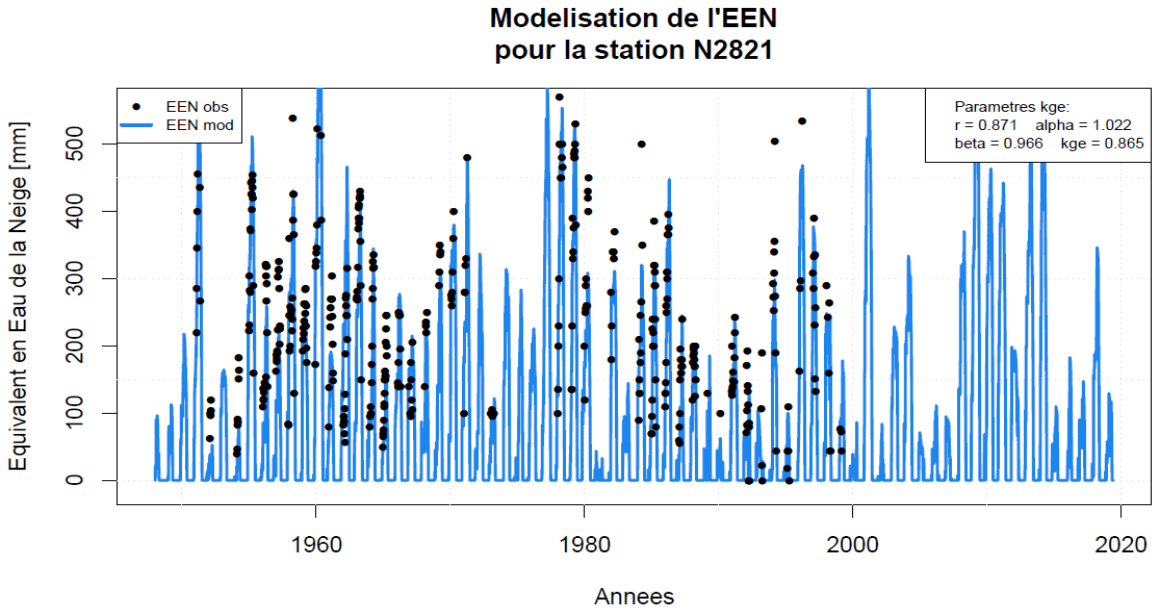


Figure 16 : Exemple de simulation nivologique sur la perche N2821 (Nasbinas, Tinée), du 01/01/1949 au 31/12/2018 : simulations en bleu et données d'observation disponibles en points rouges

Dans le cadre de cette étude (Thebault, 2019), nous avons utilisé la même routine nivale que celle utilisée dans le modèle MORDOR, en l'appliquant pour représenter les observations d'équivalent en eau de la neige au droit des perches à neige. La routine nivale utilise comme forçages les mêmes données que le modèle hydrologique, i.e. les données de précipitation et de température de l'air, à l'échelle de la perche à neige. Nous utilisons les données de la réanalyse SPAZM correspondant au pixel de la perche à neige.

3.3. METHODOLOGIE DE CONSTRUCTION DE SCENARII 1900-2100

Comme nous venons de le présenter, le modèle hydrologique ou nivologique est au cœur de notre approche. Nous sommes capable de générer des scenarii de débit ou de neige, à partir du moment où nous sommes capables d'estimer les forçages climatologiques du modèle sur une période donnée. Pour répondre à nos besoins de caractériser la variabilité hydrométéorologique passée et future, nous avons développé et utilisé deux méthodologiques différentes.

3.3.1. Forçages climatologiques et scenarii vers le passé

Au cœur de la reconstitution de forçages climatologiques vers le passé, il y a la méthode ANATEM (Kuentz, 2013 ; Kuentz et al., 2015), développée et validée sur la Durance. Cette méthode permet de combiner deux sources d'informations différentes (observations de précipitations ou température locale/régionale et observations atmosphériques décrivant la situation météorologique synoptique), afin d'étendre la période temporelle d'une chronique climatologique. Cette méthode étant incertaine, elle propose pour une même date, un ensemble de 10 valeurs équiprobables de la variable reconstituée. Dans notre cas, nous avons reconstitué les chroniques de forçage (précipitation et température de l'air) des bassins versants et des perches à neige sur la période allant du 01/01/1900 au 31/12/2016. Nous avons utilisé cet ensemble de chroniques de précipitation et température de l'air pour générer 10 simulations de débit ou d'équivalent en eau du manteau neigeux.

Sachant que la réanalyse SPAZM représente la meilleure connaissance de la climatologie que l'on a, nous utilisons les reconstitutions issues d'ANATEM sur la période allant du 01/01/1900 au 31/12/1947. Néanmoins, nous utilisons la période de concomitance des reconstitutions basées sur ANATEM avec celles basées sur SPAZM ou les observations, pour nous assurer que le processus de reconstitution des forçages climatologiques n'est pas biaisé. Les bonnes propriétés de la méthode ont été validées précédemment (Kuentz et al., 2015). La Figure 17 illustre cette comparaison des différents types de simulations hydrologiques (forcées par les données ANATEM et forcées par les données SPAZM) et observations hydrologiques. Cette figure est utilisée comme validation globale de la méthode ANATEM et montre qu'il n'y a pas de biais majeurs dans les simulations hydrologiques. Ces données ANATEM permettent donc de caractériser la variabilité hydrométéorologique long terme dans le passé.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

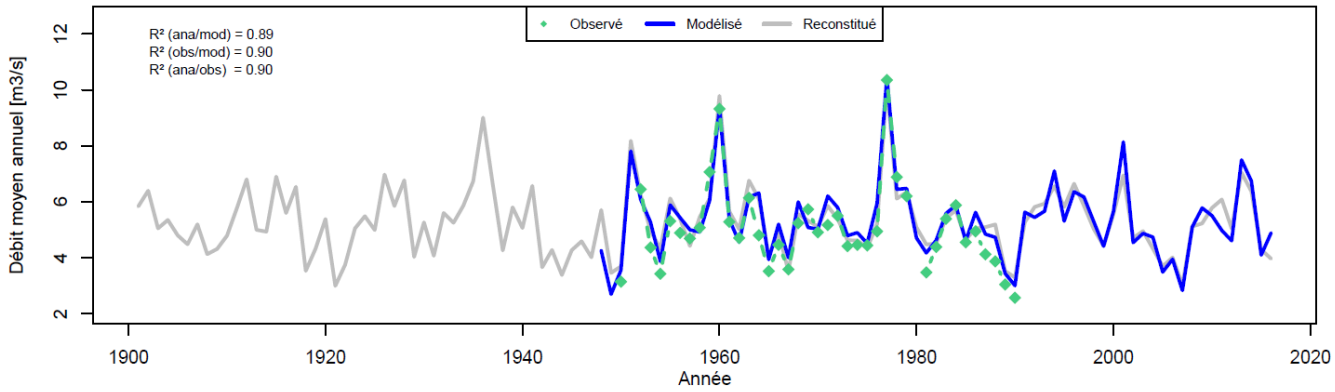


Figure 17 : Comparaison des reconstitutions du débit moyen annuel de la Tinée@PontBelloire par le modèle forcé avec les données ANATEM (gris), comparé (1) aux reconstitutions par le modèle forcé avec les données SPAZM (bleu) et (2) aux observations (points verts)

3.3.2. Forçages climatologiques et scenarii vers le futur

La construction de scenarii climatologiques dans les conditions du futur est un prérequis de toute étude sur le changement climatique. La méthode développée et utilisée par EDF est issue des travaux de recherche et développements internes EDF et dans le cadre de projet de recherche nationaux (RIWER2030, R2D2 2050).

La méthode utilisée permet de générer des projections climatiques downscalées de précipitation et de température de l'air, issues des simulations climatiques utilisées par le GIEC (CMIP5), forcés par les scénarii d'émissions de gaz à effet de serre RCP4.5 et RCP8.5. Ces projections climatiques sont adaptées à l'échelle des bassins versants ou des perches à neige. Elles sont construites à partir des données observées et d'une méthode de downscaling basée sur la méthode des analogues, qui permet de passer de l'échelle du modèle climatique, à l'échelle du bassin versant (Joly et al., 2016). Un ensemble de 17 modèles climatiques est utilisé afin de représenter les incertitudes de la modélisation climatique, l'incertitude sur le scénario d'émission est représentée par les 2 RCPs (RCP4.5 ➔ médian ; RCP8.5 ➔ « laisser faire », pessimiste). Pour chaque hypothèse de forçage radiatif (RCP) et pour tous les modèles disponibles, des chroniques journalières de précipitations et températures de l'air sont générées du 01/01/2005 au 31/12/2099. À partir de ces forçages climatiques, des simulations de débit ou d'équivalent en eau du manteau neigeux sont générées pour chaque modèle climatique disponible et pour les deux RCP.

L'étude d'impact du changement climatique commence par une validation empirique de la méthode de downscaling sur la période de concomitance des projections climatiques et des observations (du 01/01/1979 au 31/12/2017, dans le cadre de cette étude). On considère que les projections climatiques doivent représenter les grandes propriétés statistiques de la variable qu'elles cherchent à reproduire (plage de variabilité, régime, distribution). La Figure 18 montre le type d'analyse que l'on peut faire sur les variables de forçage des modèles (précipitation et température de l'air). Cette figure montre qu'il n'y a pas de biais particulier en termes de variabilité et de tendance, ainsi qu'en termes de distributions. On peut donc considérer que la méthode de downscaling représente assez bien les forçages du modèle. La Figure 19 montre le même type d'analyse, mais sur les variables simulées par le modèle, à partir des 17 scenarii climatiques, par RCP. Dans ce cas, cette figure compare les simulations de débit et d'équivalent en eau de la neige forcées par les scenarii climatiques, aux mêmes simulations forcées par les observations. Cette figure montre que la variabilité et la distribution des débits moyens annuels est bien représentée, alors qu'il y a un léger biais de sous-estimation de l'équivalent en eau de la neige.

Une fois cette phase de validation empirique des scenarii climatiques réalisée, nous pouvons utiliser les scenarii de débits ou d'équivalent en eau de la neige en connaissance de cause et avoir une confiance subjective dans les scenarii. La Figure 20 illustre les scenarii climatiques jusqu'en 2099. On voit relativement peu de tendance sur les précipitations moyennes annuelles, alors que la tendance attendue sur les températures de l'air est très marquée. La Figure 21 illustre quant à elle l'impact du changement climatique sur les débits et l'équivalent en eau de la neige. On constate que les débits moyens annuels diminuent assez peu jusqu'en 2050 et qu'à partir de 2050 les deux RCP donnent des trajectoires assez différentes. Concernant l'équivalent en eau de la neige, on constate également une diminution de la quantité de neige. La validation empirique réalisée précédemment, nous permet d'avoir plus confiance dans les scenarii de débit, et moins dans les scenarii de neige.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

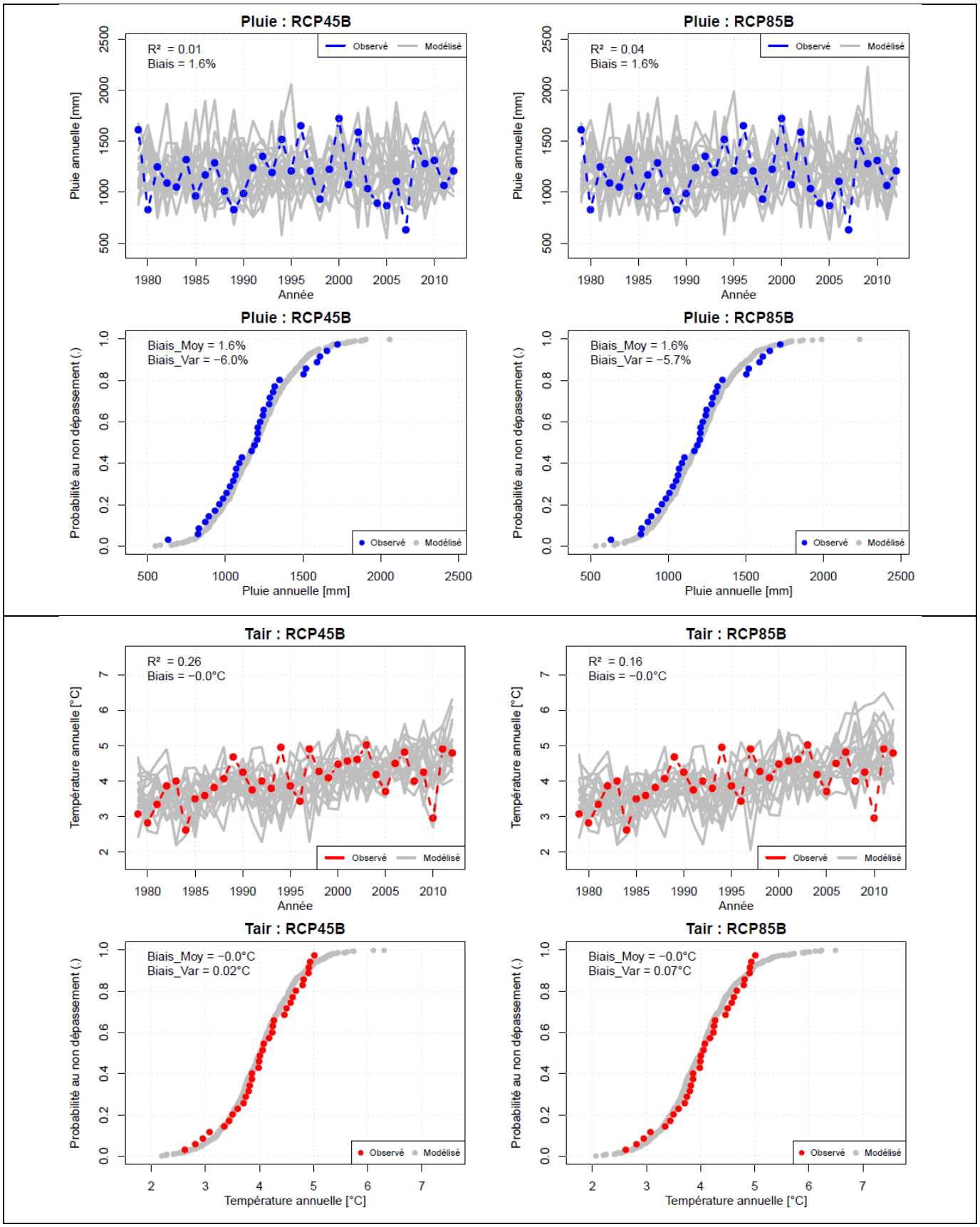


Figure 18 : Validation empirique des projections climatiques (RCP 4.5 et 8.5, 17 modèles météorologiques) sur les variables observées précipitations et température de l'air de la Tinée à Pont Belloire – période 1979 - 2017

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

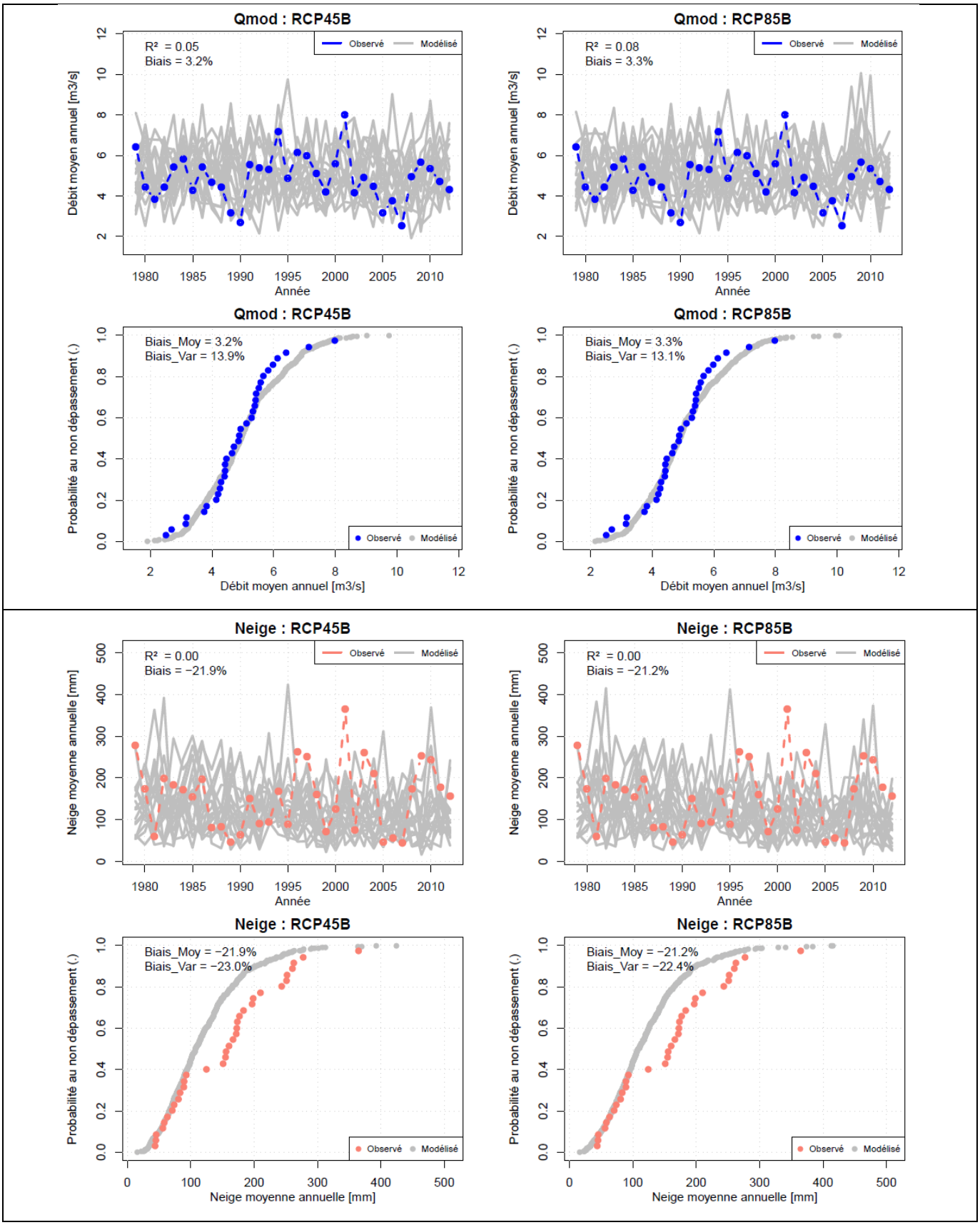


Figure 19 : Validation empirique des projections climatiques (RCP 4.5 et 8.5, 17 modèles météorologiques) sur les variables modélisées débit et équivalent en eau de la neige de la Tinée à Pont Belloire – période 1979 - 2017

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

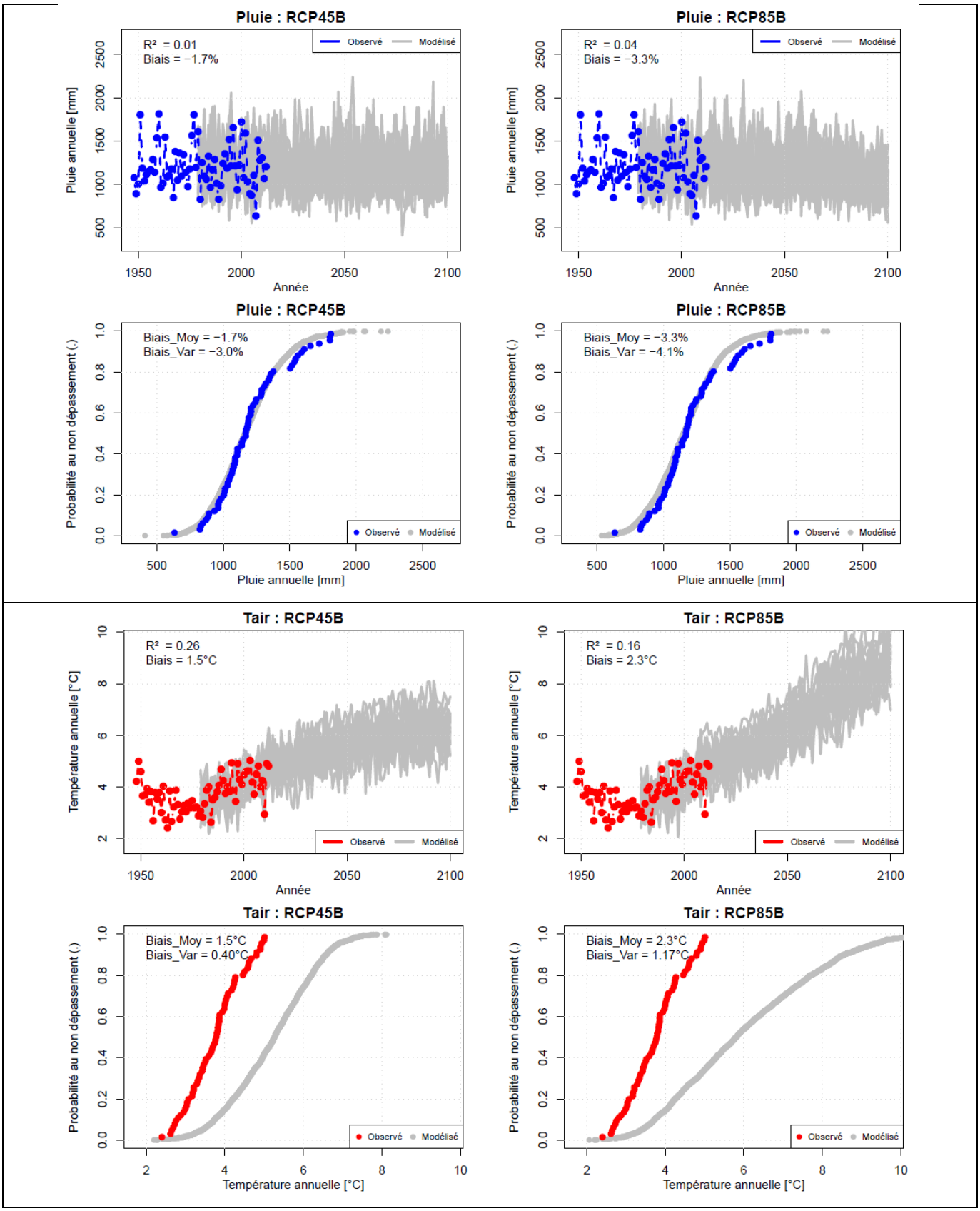


Figure 20 : observations et projections climatiques (RCP 4.5 et 8.5, 17 modèles météorologiques) sur les variables climatiques précipitations et température de l'air de la Tinée à Pont Belloire. Période 1948-2099.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

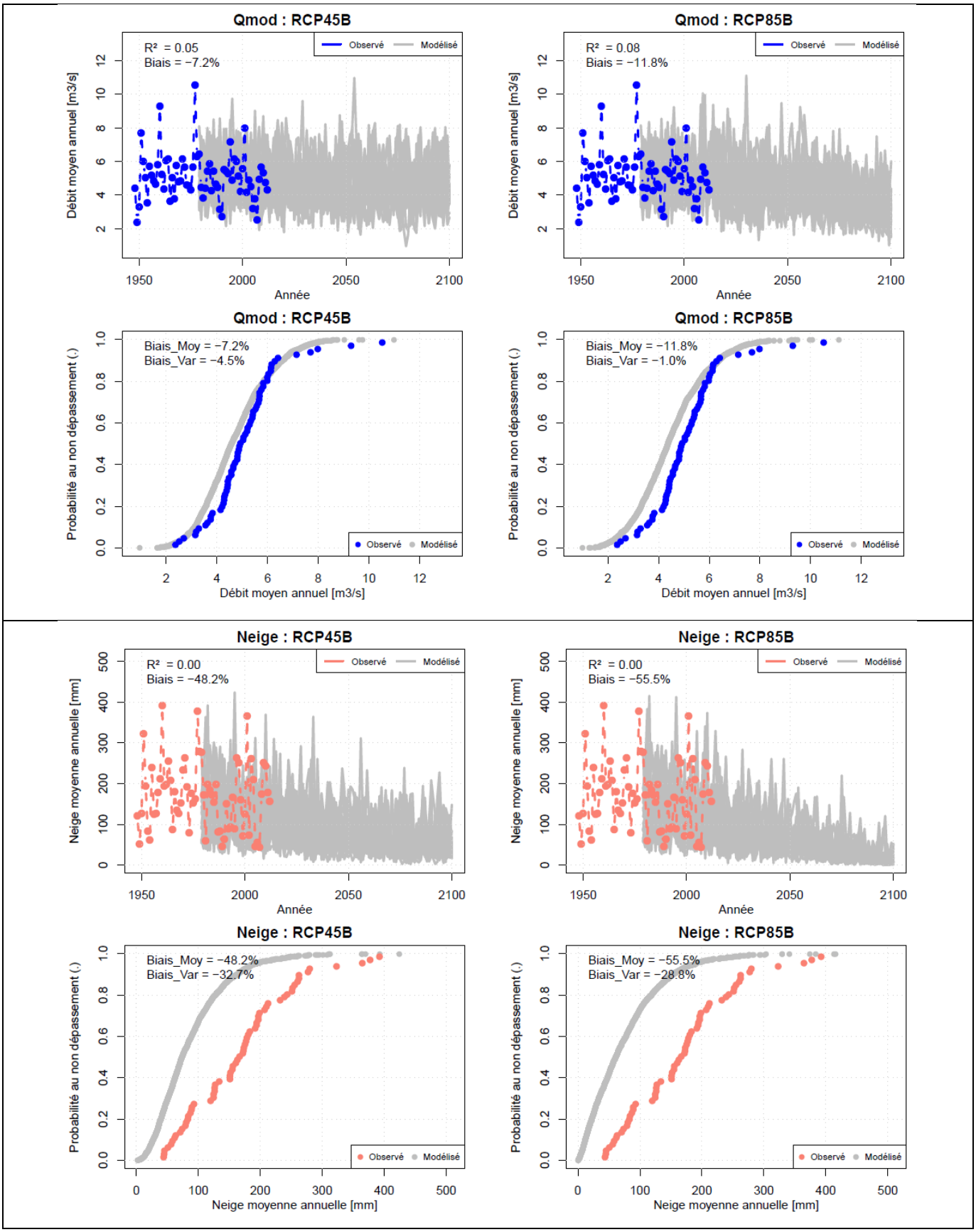


Figure 21 : « observations » (modélisations avec données observées) et projections climatiques (RCP 4.5 et 8.5, 17 modèles météorologiques) sur les variables débit et équivalent en eau de la neige de la Tinée à Pont Belloire. Période 1948-2099.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

4. MODELES HYDROLOGIQUES ET NIVOLOGIQUES

Dans cette partie nous présentons les 4 modèles utilisés dans cette étude : les données et conditions de calage, leurs performances et la confiance que l'on peut avoir en leurs simulations.

4.1. BILAN HYDROLOGIQUE GLOBAL DE LA REGION

Compte-tenu de la diversité et de la qualité des données, nous nous sommes appuyés sur une analyse régionale du bilan hydrologique, afin d'estimer les ordres de grandeur de la précipitation, du déficit d'écoulement et de l'écoulement des bassins versant retenus dans cette étude. La Figure 22 montre que les bilans hydrologiques sont globalement cohérents : les 4 bassins versants de cette étude ont des bilans indiquant un fonctionnement assez proche de celui de la Roya à Breil. Cette approche reste très globale, les données de débits étant disponibles sur des périodes et des durées assez différentes.

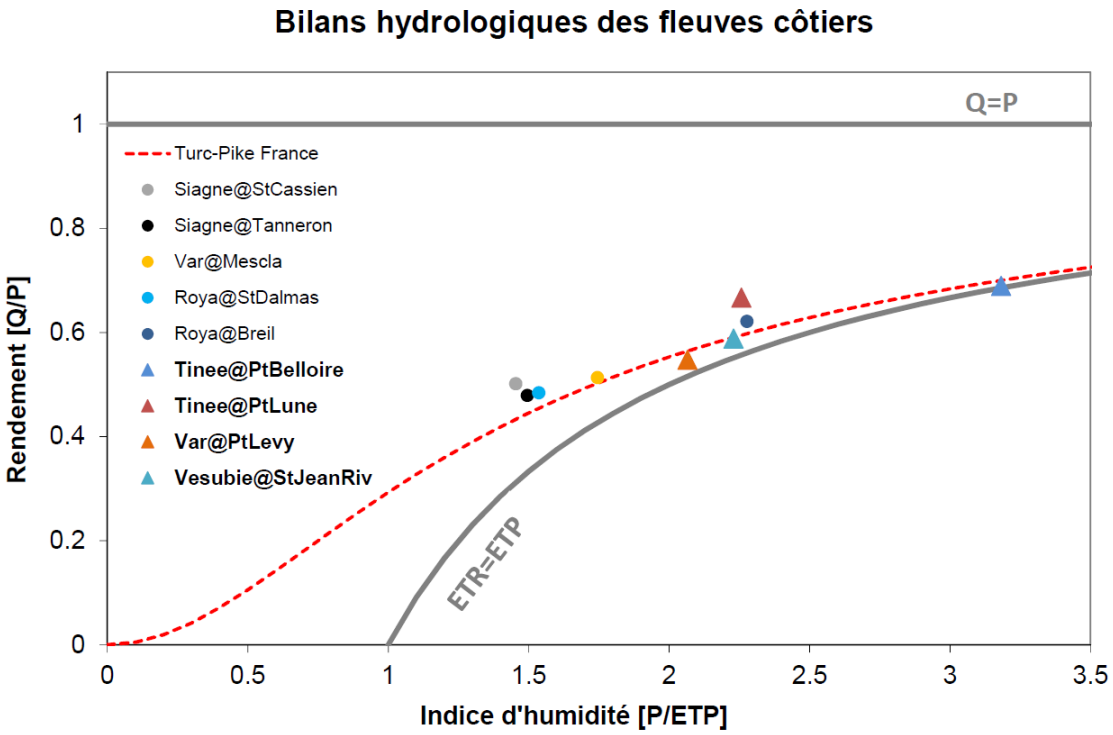


Figure 22 : Synthèse des bilans hydrologiques régionaux (bassins versants dans la région du Mercantour)

La Figure 22, met en évidence la diversité des bilans hydrologiques des bassins versants de la région, avec des rendements variables (0.6 à 0.4), en réponse à des indice d'humidité variables également (2.5 à 1.5). Les Figure 23 à Figure 26, mettent en évidence la diversité de la composante nivale sur ses bassins, illustrant la transition depuis le bassin versant au régime le plus nival (Tinée@PtBelloire), vers des régimes où la composante nivale diminue progressivement (Tinée@PtLune, Var@PtLevy et Vésubie@StJeanRiv). Cette tendance se retrouve dans la forme de l'onde de fusion qui est de plus en plus étalée et par l'accroissement de l'importance des crues d'automne.

4.2. MODELES HYDROLOGIQUES

Le Tableau 4 donne les performances globales des modèles hydrologiques, évalués avec le critère de performance de Kling-Gupta (Gupta et al., 2009), dont la valeur maximale est 1 (abréviation : KGE). Les modèles sont évalués sur leurs capacités à représenter la variabilité journalière des débits (Q), mais aussi le régime hydrologique (REG), les crues (QCL) et les étiages (ETG). Ce tableau met en évidence que :

- trois modèles sont plutôt d'assez bonne qualité sur l'ensemble des signatures hydrologiques : **la Tinée@PtBelloire la Tinée@PtLune et le Var@PtLevy** ;
- un modèle est de qualité intermédiaire : la Vésubie@StJeanRiv.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

	Tinée@PtBelloire	Tinée@PtLune	Var@PtLevy	Vésubie@StJeanRiv
KGE(Q)	0.907	0.935	0.893	0.845
KGE(REG)	0.971	0.978	0.973	0.922
KGE(QCL)	0.957	0.981	0.978	0.947
KGE(ETG)	0.858	0.942	0.848	0.814

Tableau 4 : Performances globales des 4 modèles hydrologiques utilisés dans cette étude

Ces résultats globaux reflètent aussi bien la capacité intrinsèque du modèle hydrologique, que la qualité des forçages météorologiques et des observations de débit. Le modèle étant capable d'avoir d'assez bonnes performances sur certains bassins versants, on peut faire l'hypothèse que la formulation du modèle est bien adaptée à la région. Les forçages météorologiques étant relativement homogènes entre eux (ré-analyse SPAZM), on peut également faire l'hypothèse qu'ils décrivent de manière homogène la climatologie de ces bassins versants. Il peut bien évidemment y avoir des évènements particuliers qui sont imparfaitement représentés par la ré-analyse qui ne peut contenir (et extrapoler/interpoler) seulement les évènements météorologiques qu'elle a vu. Les mesures de débits étant particulièrement hétérogènes, on peut faire l'hypothèse que, finalement, la qualité des modèles, et notamment les années ou périodes particulières où s'installent des biais persistants, nous renseigne principalement sur la qualité des observations de débit.

4.2.1. La Tinée à Pont de Belloire (167 km²)

Le calage du modèle a été réalisé sur la période 1960-1991. Les performances détaillées du modèle indique que la qualité des données peut être variable d'une année sur l'autre, mais globalement acceptable pour représenter le fonctionnement général de ce bassin versant. Le régime hydrologique est bien représenté (Figure 23). Les critères statistiques sont plutôt élevés et indiquent un modèle plutôt performant sur les débits, le régime hydrologique, les crues et les étiages (Tableau 4).

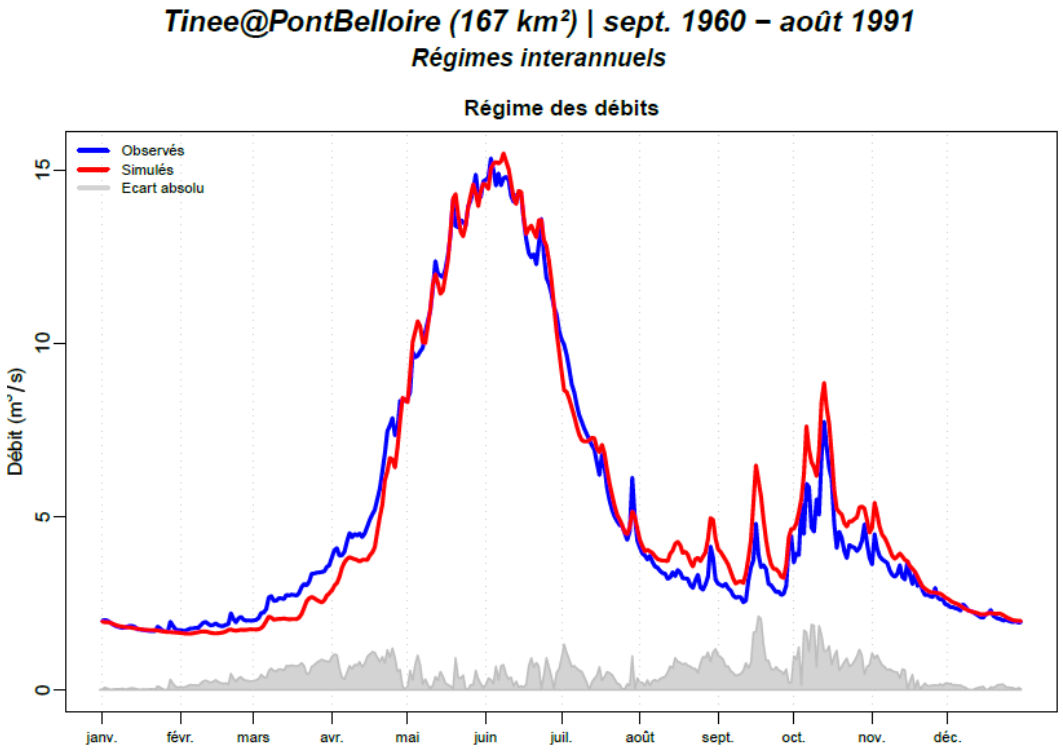


Figure 23 : Régime hydrologique de la Tinée@PtBelloire observé (en bleu) et simulé (en rouge). Période de calage : 01/09/1960 à 31/08/1991.

4.2.2. La Tinée à Pont de la Lune

Le calage du modèle a été réalisé sur la période 1970-1991, la période récente semblant de qualité bien moins bonne (périodes avec de forts biais et inconsistance du modèle par rapport aux données). Les performances détaillées du modèle indique que la qualité des données peut être variable d'une année sur l'autre. Le régime hydrologique est bien représenté (Figure 24). Les critères statistiques sont plutôt élevés et indiquent un modèle plutôt performant sur les débits, le régime hydrologique, les crues et les étiages (Tableau 4).

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

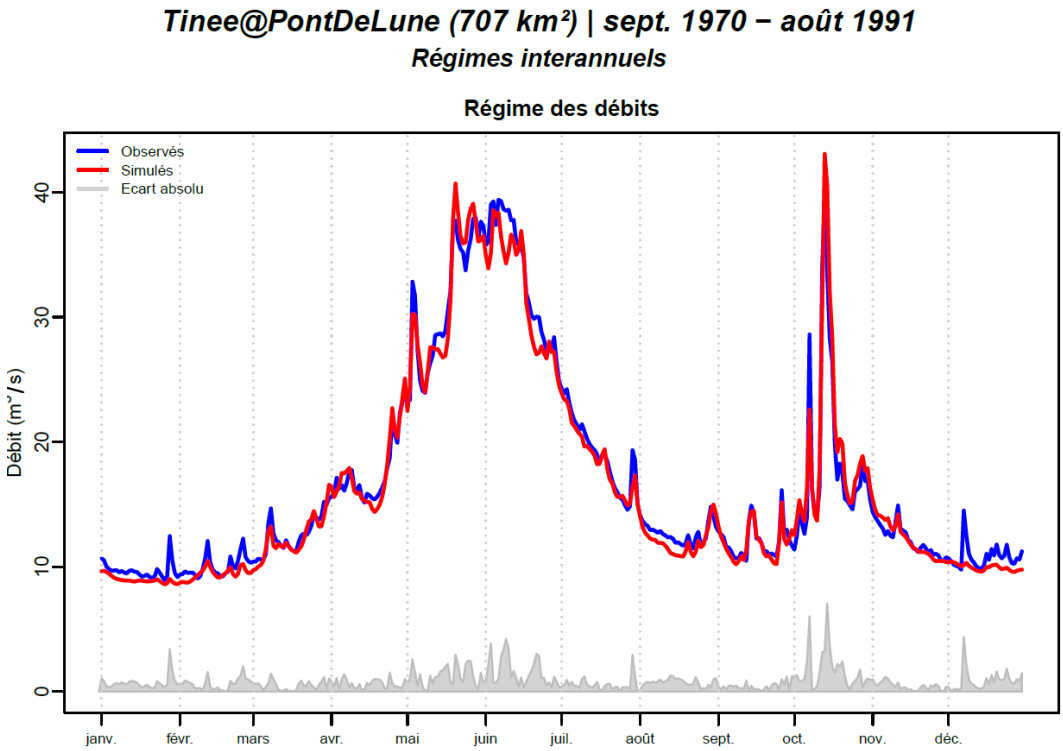


Figure 24 : Régime hydrologique de la Tinée@PtLune observé (en bleu) et simulé (en rouge) - Période de calage : 01/09/1970 à 31/08/1991.

4.2.3. Le Var à Pont Lévis

Le calage du modèle a été réalisé sur la période 1959-2019. Les performances détaillées du modèle indique que la qualité des données peut être variable d'une année sur l'autre. Le régime hydrologique est bien représenté (Figure 25). Les critères statistiques sont plutôt élevés et indiquent un modèle plutôt performant sur les débits, le régime hydrologique, les crues et les étiages (Tableau 4).

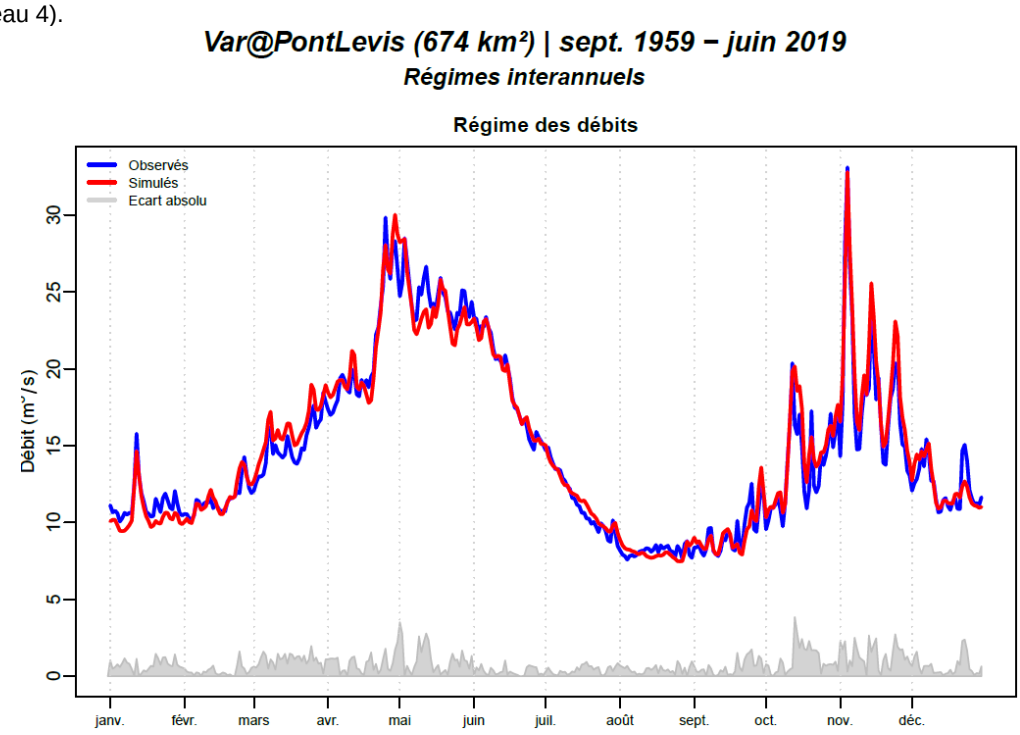


Figure 25 : Régime hydrologique du Var@PtLevis observé (en bleu) et simulé (en rouge) - Période de calage : 01/09/1959 à 30/06/2019.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

4.2.4. La Vésubie à Saint Jean la Rivière

Le calage du modèle a été réalisé sur la période 1955-1969. Les performances détaillées du modèle indique que la qualité des données peut être variable d'une année sur l'autre. Le régime hydrologique est moyennement bien représenté (Figure 25), par rapport aux autres modèles. Les critères statistiques sont plutôt moyens et indiquent un modèle aux performances acceptables sur les débits, le régime hydrologique, les crues et les étiages (Tableau 4). Sans pouvoir l'objectiver plus clairement, il est probable que les données de cette station hydrométriques soient un peu plus incertaines que sur les autres bassins versants (cela resterait à étudier). La période de calage assez courte (par rapport aux autres modèles) impacte potentiellement les performances du modèle.

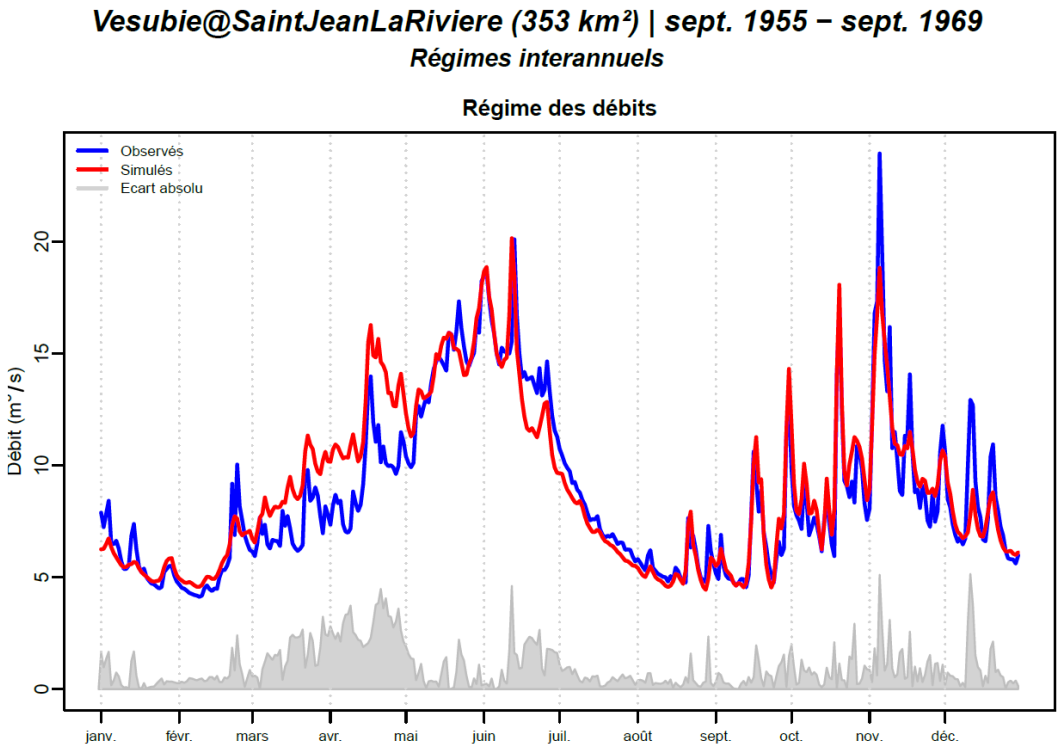


Figure 26 : Régime hydrologique de la Vésubie@StJeanRivière observé (en bleu) et simulé (en rouge) - Période de calage : 01/09/1955 à 31/08/1969.

4.3. MODELES NIVOLOGIQUES

La modélisation nivale à la perche a fait l'objet d'une étude particulière (Thébault, 2019). Nous ne reprendrons pas les résultats de cette étude en détail dans ce rapport.

5. SCENARII DE DEBIT SUR LA PERIODE 1900-2100

5.1. CONSTRUCTION DES SIMULATIONS 1900-2100 ET STRATEGIE D'ANALYSES

Comme présentée précédemment, la construction des simulations sur la période 1900-2100 se fait par superposition de différentes sources et natures de données :

- Qobs : Des débits observés (et naturels) sur la période de disponibilité des données ;
- Q|SPAZM : Des débits simulés, avec comme données d'entrée (précipitation et température de l'air) les observations et la réanalyse SPAZM (généralement 1948-2018) ;
- Q|ANATEM : Des débits simulés dans le passé, avec comme données d'entrée les reconstitutions ANATEM (généralement, 1900-2016) ;
- Q|CC : Des débits simulés dans le futur, avec comme données d'entrée les projections climatiques générées à l'échelle du bassin versant (généralement, 1979-2100).

Compte-tenu de la variabilité des données observées, nous considérerons les données simulées Q|SPAZM comme les données les plus fiables et nous utiliserons les données Q|ANATEM et Q|CC sur les périodes non couvertes par Q|SPAZM, respectivement 1900-1947 et 2019-2100. Les périodes de recouvrement permettent de qualifier la qualité des reconstitutions Q|ANATEM et Q|CC.

La Figure 27 présente la construction progressive de la série 1900 – 2100, en prenant l'exemple de la Tinée au Pont de Belloire.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

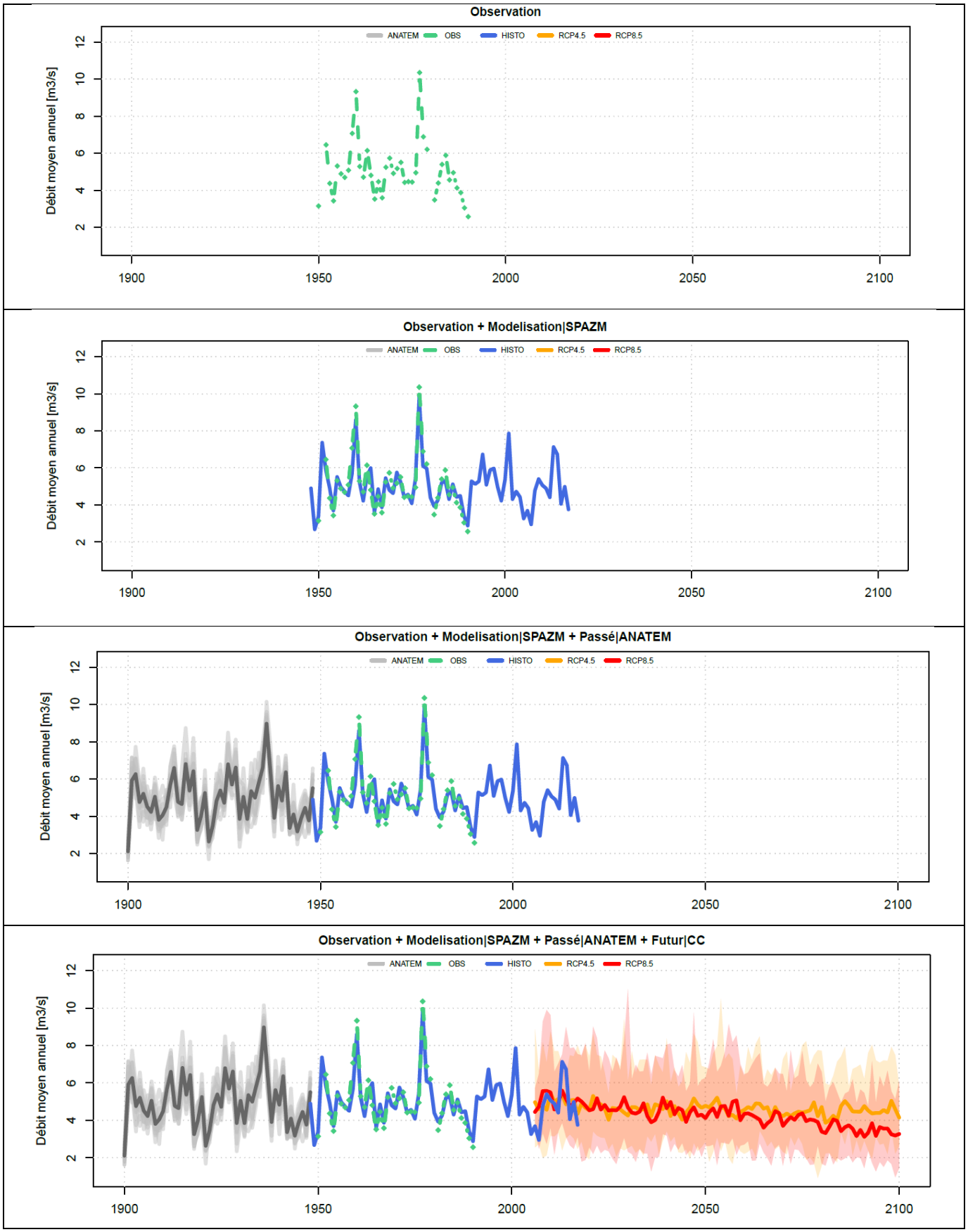


Figure 27 : Description de la construction progressive de séries 1900-2100 sur la Tinée à Pont de Belloire

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

De manière classique, dans les études d'impacts du changement climatique, l'analyse des variables d'intérêt se fait sur des « tranches temporelles » de plusieurs années, afin d'être statistiquement plus robuste. Dans notre cas, l'analyse des chroniques de débits journaliers sur la période 1900-2100 se fait par périodes de 30 années. Nous avons retenu les périodes suivantes (Figure 28) :

- **« 1940 »** (1940 ± 15 ans, passé lointain) : cette période représente les conditions du milieu du siècle dernier, avec une période connue pour avoir été particulièrement sèche ;
- **« 1970 »** (1970 ± 15 ans, passé proche) : cette période représente les conditions juste avant la mise en place d'une tendance sur les températures de l'air (généralement vers 1985 en France), avec une période connue pour avoir été plutôt humide (années 1970) ;
- **« 2000 »** (2000 ± 15 ans, climat actuel) : cette période représente les conditions actuelles, depuis le début de la tendance sur les températures de l'air, avec notamment des périodes assez sèches et avec une forte variabilité de l'enneigement (1990 et 2007 années déficitaires, 2001 et 2013 années excédentaires …) ;
- **« 2030 »** (2030 ± 15 ans, futur proche) : cette période représente les conditions dans un futur proche, avant le point pivot des différents scenarii climatiques aux environs de 2050 ;
- **« 2060 »** (2060 ± 15 ans, futur lointain) : cette période représente les conditions dans un futur lointain ;
- **« 2085 »** (2085 ± 15 ans, fin de siècle) : cette période représente les conditions de fin de siècle.

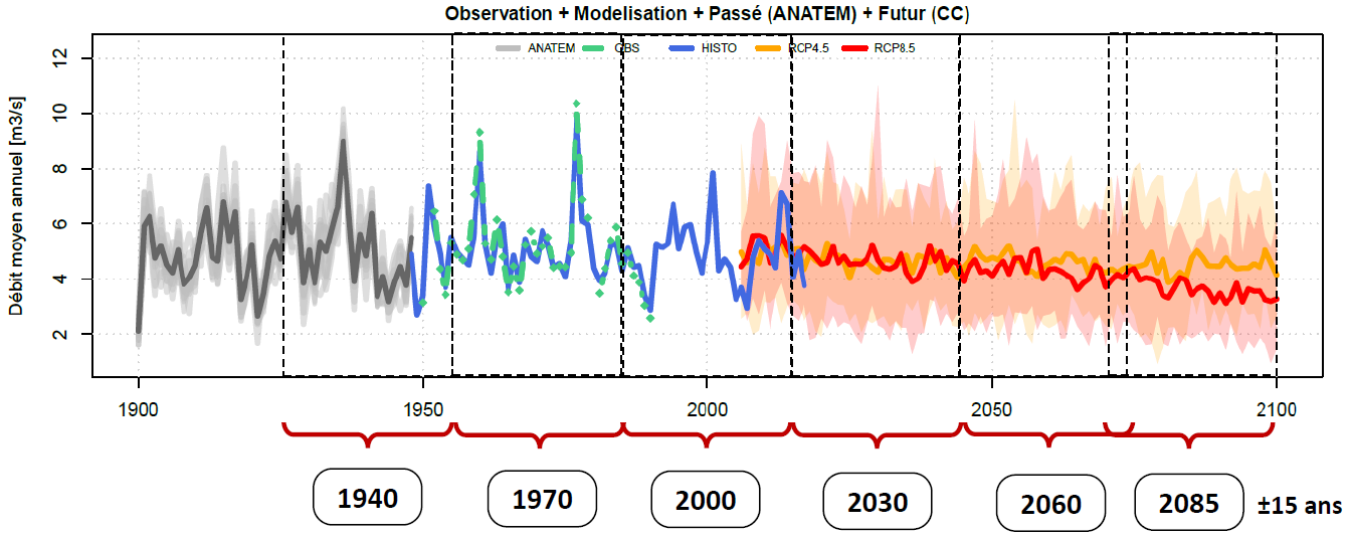


Figure 28 : Séries 1900-2100 sur la Tinée à Pont de Belloire et découpage temporel en 6 périodes

5.2. ANALYSE DE LA CLIMATOLOGIE

5.2.1. Précipitation

La Figure 29 présente l'évolution des cumuls annuels de précipitations sur la Tinée à Pont de Belloire de « 1940 » à « 2085 ». Chaque période regroupe 30 années et la distribution des cumuls annuels est représentée sous forme de boîtes à moustache (valeur min, quantile 10%, 50%, 90% et valeur max). Cette figure présente le cumul annuel moyen (a) et en valeur relative au cumul median de la période 2000 (b). Cette figure montre qu'à l'échelle d'une période il y a une forte variabilité des cumuls (distance inter quantiles 10% et 90% >700 mm/an) et que la faible tendance détectée dans le futur (baisse de quelques %) apparaît faible devant la grande variabilité de la précipitation au sein d'une période donnée de 30 ans. Concernant la précipitation, on n'observe pas de différence marquée dans le futur entre les RCP 4.5 et RCP 8.5.

La Figure 30 reprend le même type de représentation (mais en écart relatif à la période de référence « 2000 ») pour les quatre bassins versants d'intérêt du Mercantour. Les Tableau 5 et Tableau 6 donnent les valeurs numériques correspondant aux valeurs médianes. Les résultats obtenus pour la Tinée au Pont de Belloire sont similaires pour les trois autres bassins versants. Le signal de stabilité des cumuls de précipitation est robuste avec une majorité des écarts à la période « 2000 » inférieurs à ±5%. Cette variabilité des cumuls de précipitation apparaît homogène spatialement et temporellement.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

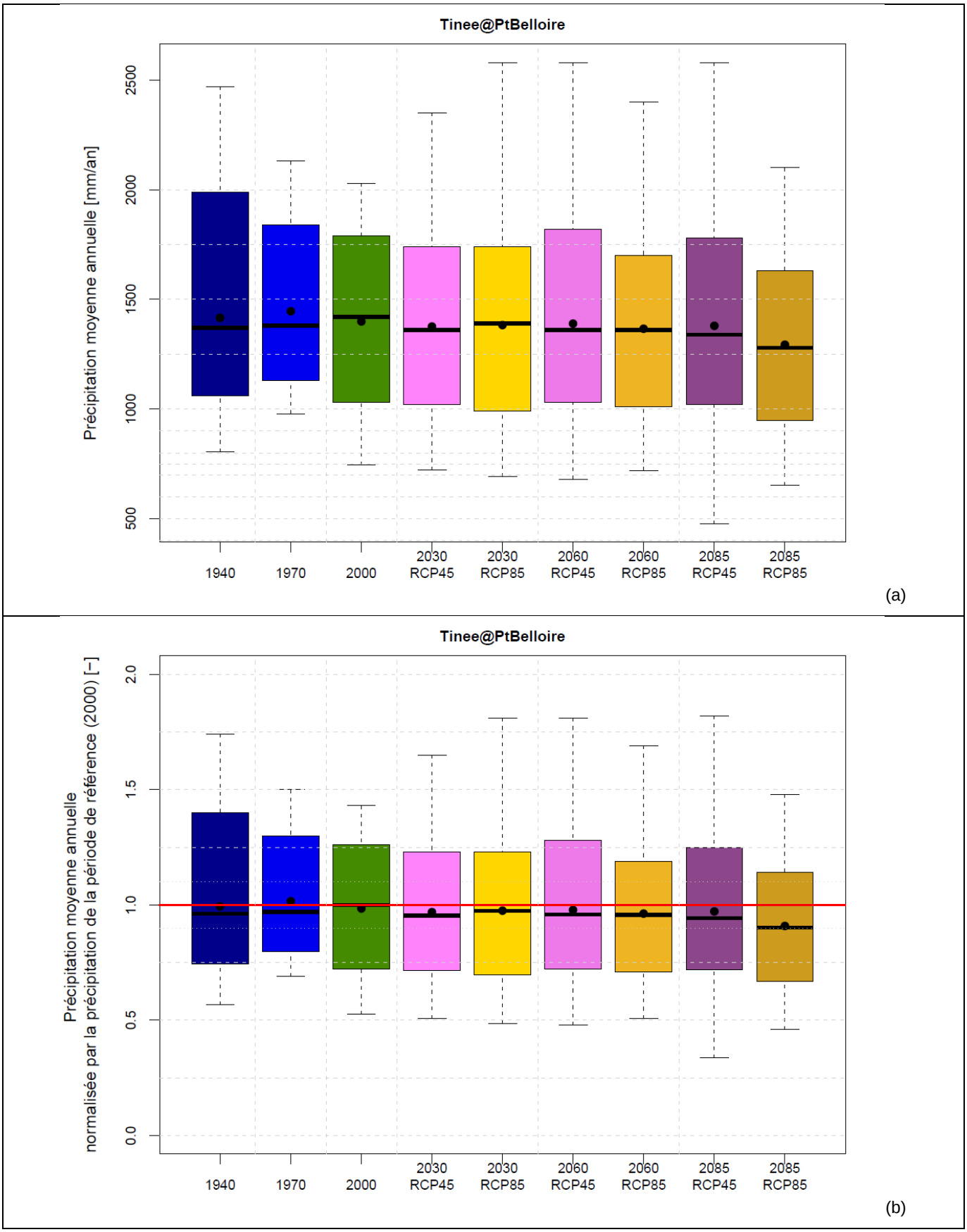


Figure 29 : Évolution des cumuls annuels de précipitation de la Tinée à Point de Belloire entre « 1940 » et « 2085 », (a) en valeur absolue et (b) en valeur relative à la période « 2000 »

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

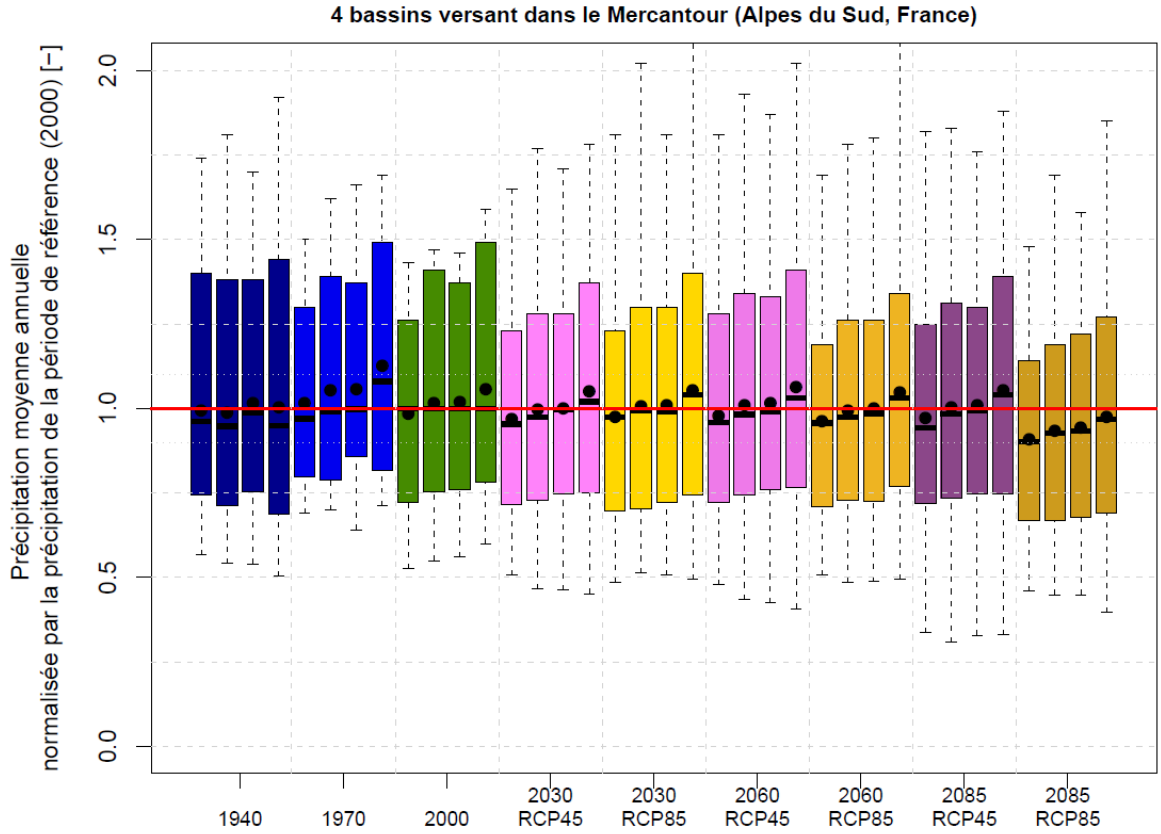


Figure 30 : Évolution des cumuls annuels de précipitation entre « 1940 » et « 2085 ». Synthèse sur les quatre bassins versants du Mercantour (de gauche à droite : Tinée à Pont de Belloire, Tinée au Pont de la Lune, Var au Pont Levis et Vésubie à Saint Jean de la Rivière)

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	1370	1380	1420	1360	1390	1360	1360	1340	1280
Tinée @ Pont de la Lune	1270	1320	1340	1300	1330	1310	1300	1320	1240
Var @ Pont Levis	1190	1200	1210	1200	1190	1190	1190	1200	1120
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	1130	1290	1190	1210	1240	1230	1230	1240	1150

Tableau 5 : Médiane des précipitations par bassin versant et par période [mm/an]

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	-3.5	-2.8	0.0	-4.2	-2.1	-4.2	-4.2	-5.6	-9.9
Tinée @ Pont de la Lune	-5.2	-1.5	0.0	-3.0	-0.7	-2.2	-3.0	-1.5	-7.5
Var @ Pont Levis	-1.7	-0.8	0.0	-0.8	-1.7	-1.7	-1.7	-0.8	-7.4
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	-5.0	8.4	0.0	1.7	4.2	3.4	3.4	4.2	-3.4

Tableau 6 : Écart de la médiane des précipitations à la période de référence « 2000 » par bassin versant et par période [%]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

5.2.2. Température de l'air

La Figure 31 présente l'évolution des températures annuelles sur la Tinée à Pont de Belloire de « 1940 » à « 2085 ». Chaque période regroupe 30 années et la distribution des températures annuelles est représentée sous forme de boîtes à moustaches (valeur min, quantile 10%, 50%, 90% et valeur max). Cette figure présente la valeur (a) et en valeur relative (b) à la moyenne de la période « 2000 ». Cette figure montre qu'à l'échelle d'une période il y a une faible variabilité des températures moyennes annuelles (distance inter quantiles 10% et 90% inférieure à 1.5°C mm/an). Par contre, la tendance depuis « 1970 » est très claire et on retrouve bien la différence des trajectoires entre le RCP 4.5 (+ 2°C par rapport à « 2000 » ; + 3°C par rapport à « 1970 ») et le RCP 8.5 (+ 4°C par rapport à « 2000 » ; + 5°C par rapport à « 1970 ») à l'horizon du fin de siècle (« 2085 »).

La Figure 32 reprend le même type de représentation (en écart en °C, par rapport à la période de référence « 2000 ») pour les quatre bassins versants d'intérêts du Mercantour. Les Tableau 7 et Tableau 8 donnent les valeurs numériques correspondant aux valeurs médianes. Les résultats obtenus pour la Tinée au Pont de Belloire sont similaires pour les trois autres bassins versants. Le signal d'augmentation des températures de l'air est significatif, il apparaît homogène spatialement et temporellement, avec un contraste fort entre les RCP 4.5 (+ 2°C en fin de siècle, par rapport à « 2000 ») et 8.5 (+ 4°C en fin de siècle, par rapport à « 2000 »).

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	3.7	3.2	4.2	5.3	5.6	6.0	7.0	6.4	8.4
Tinée @ Pont de la Lune	6.0	5.9	6.6	7.5	7.8	8.3	9.2	8.6	10.6
Var @ Pont Levis	7.5	7.2	8.2	9.1	9.4	9.8	10.8	10.2	12.2
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	8.1	8.2	8.7	9.7	10.0	10.4	11.4	10.7	12.7

Tableau 7 : Médiane des températures de l'air par bassin versant et par période [°C]

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	-0.5	-1.0	0.0	1.1	1.4	1.8	2.8	2.2	4.2
Tinée @ Pont de la Lune	-0.6	-0.7	0.0	0.9	1.2	1.7	2.6	2.0	4.0
Var @ Pont Levis	-0.7	-1.0	0.0	0.9	1.2	1.6	2.6	2.0	4.0
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	-0.6	-0.5	0.0	1.0	1.3	1.7	2.7	2.0	4.0

Tableau 8 : Écart de la médiane des températures de l'air à la période de référence « 2000 » par bassin versant et par période [°C]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

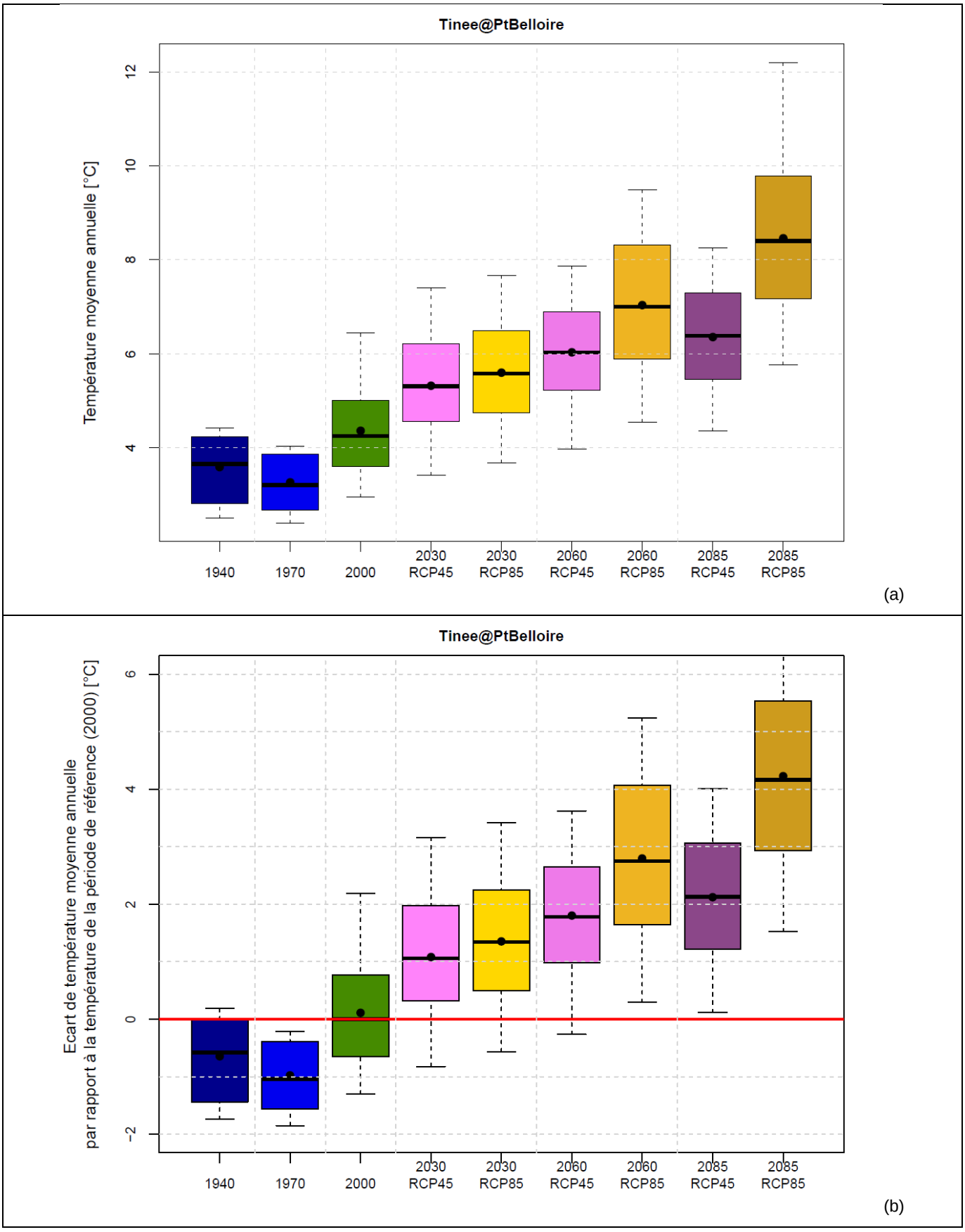


Figure 31 : Évolution des températures de l'air de la Tinée à Point de Belloire entre « 1940 » et « 2085 », (a) en valeur absolue et (b) en valeur relative à la période « 2000 »

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

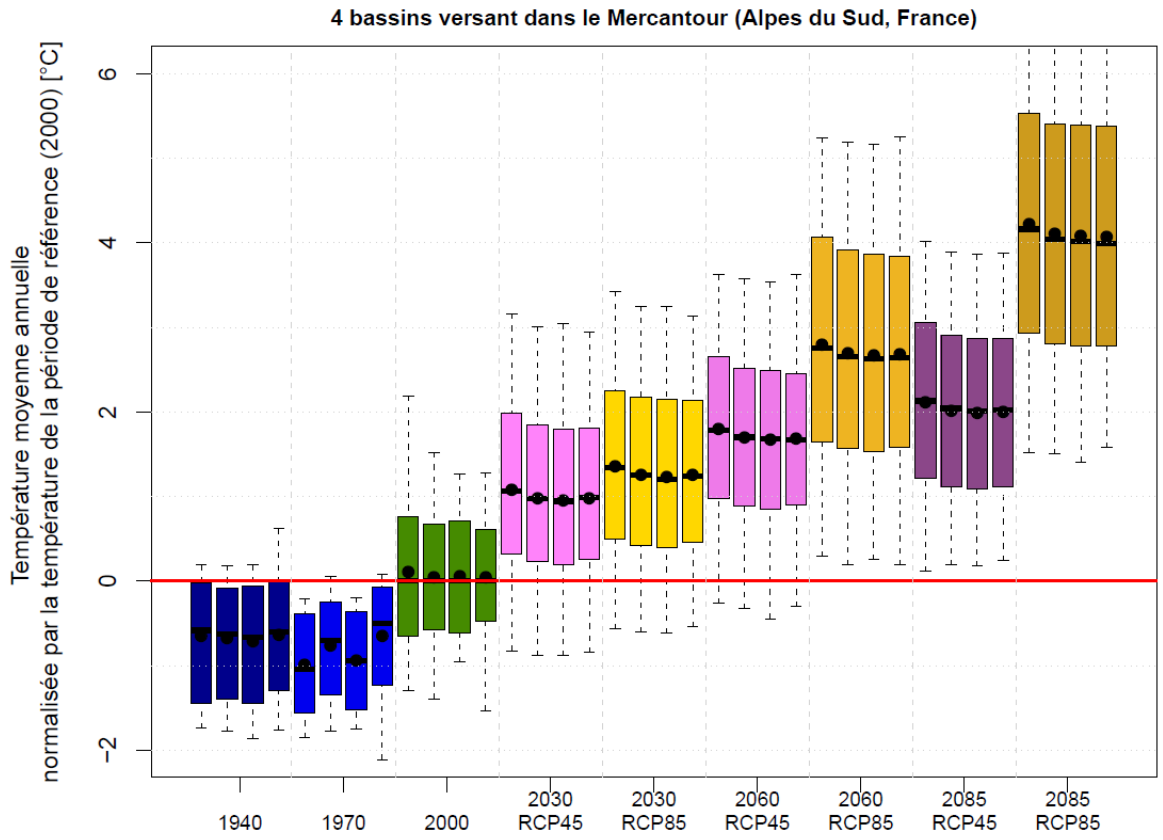


Figure 32 : Évolution de la température moyenne annuelle entre « 1940 » et « 2085 ». Synthèse sur les quatre bassins versants du Mercantour (Tinée à Pont de Belloire, Tinée au Pont de la Lune, Var au Pont Levis et Vésubie à Saint Jean de la Rivière)

5.3. IMPACTS SUR LES DEBITS MOYENS

La Figure 33 présente l'évolution des débits moyens annuels sur la Tinée à Pont de Belloire de « 1940 » à « 2085 ». Chaque période regroupe 30 années et la distribution des débits moyens annuels est représentée sous forme de boîtes à moustaches (valeur min, quantile 10%, 50%, 90% et valeur max). Cette figure présente la valeur moyenne (a) et en valeur relative à la moyenne de la période « 2000 » (b). Cette figure montre qu'à l'échelle d'une période il y a une certaine variabilité des débits moyens annuels (distance inter quantiles 10% et 90% d'environ ±30%). Par contre, il y a une tendance à la baisse depuis la période « 1970 » avec un écart de 10% entre les périodes « 1970 » et « 2000 ». Par rapport à « 2000 », cette tendance semble continuer dans le futur avec une diminution de l'ordre de -10% en fin de siècle pour le RCP 4.5, et une augmentation du déficit jusqu'à -25% en fin de siècle pour le RCP 8.5. Cette différence entre les deux RCP est en lien avec les trajectoires contrastées d'augmentation de la température de l'air (impactant l'évapo-transipiration en premier lieu, et le débit in fine).

La Figure 33 reprend le même type de représentation (en écarts relatifs, par rapport à la période de référence « 2000 ») pour les quatre bassins versants d'intérêts du Mercantour. Les Tableau 9 et Tableau 10 donnent les valeurs numériques correspondant aux valeurs médianes. Les résultats obtenus pour la Tinée au Pont de Belloire sont similaires pour les autres bassins versants. Le signal de réduction des débits moyens est significatif, il apparaît homogène spatialement et temporellement, avec un contraste fort entre les RCP 4.5 et 8.5 à l'horizon de la fin du siècle.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

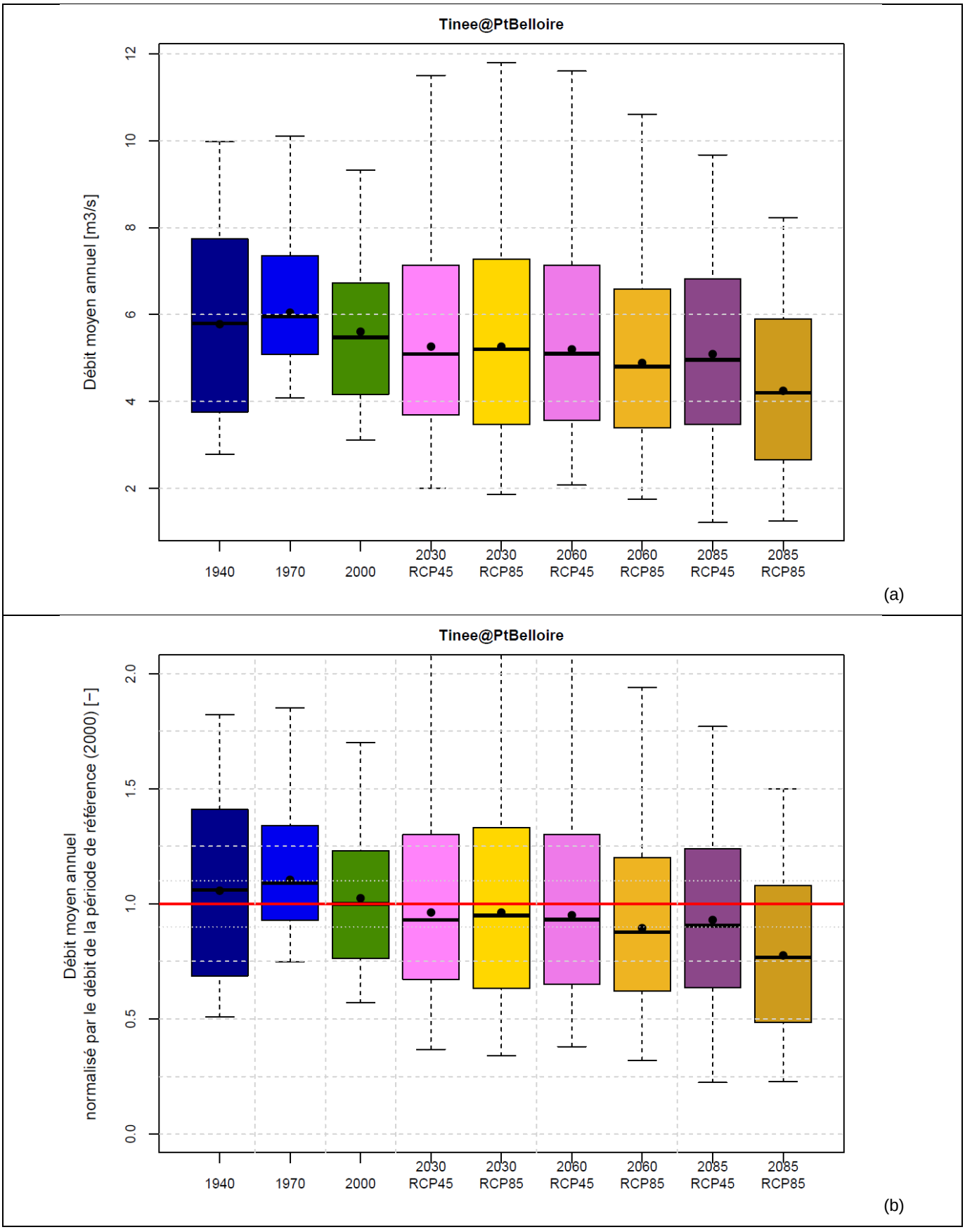


Figure 33 : Évolution des débits moyens de la Tinée à Point de Belloire entre « 1940 » et « 2085 », (a) en valeur absolue et (b) en valeur relative à la période « 2000 »

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

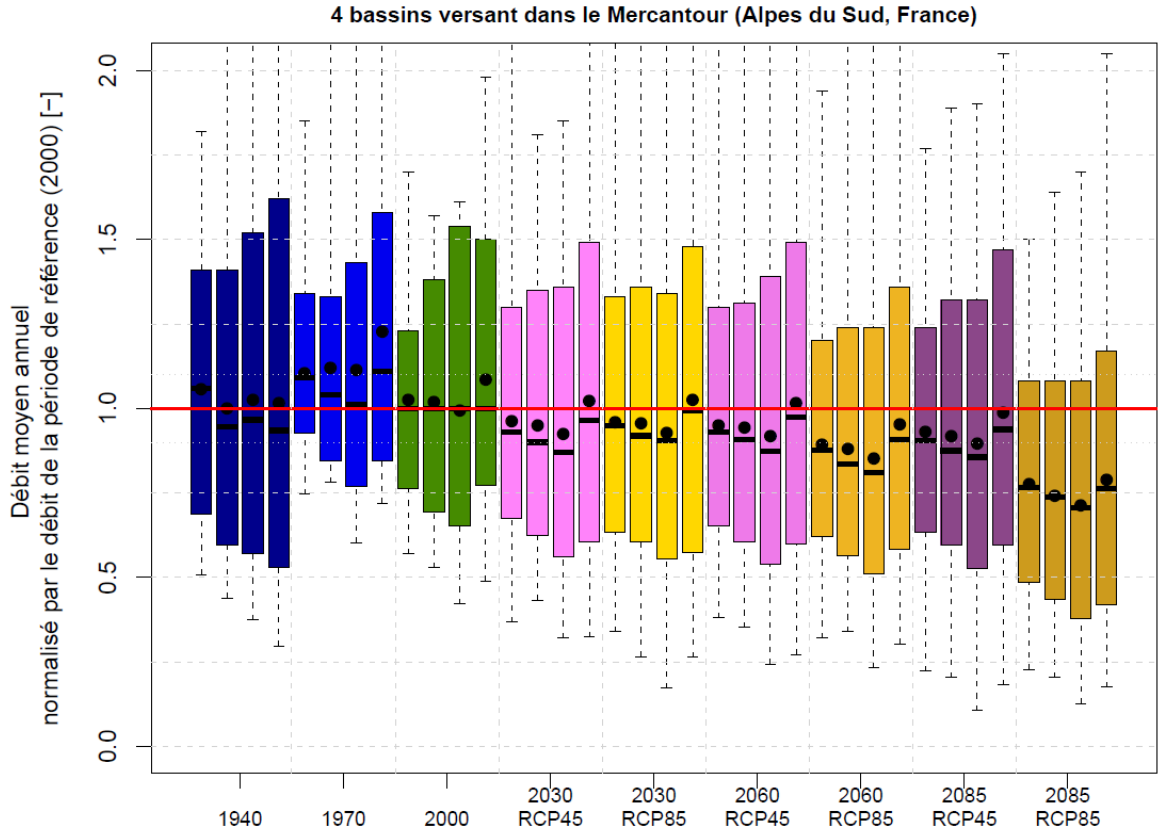


Figure 34 : Évolution des débits moyens annuels entre « 1940 » et « 2085 ». Synthèse sur les quatre bassins versants du Mercantour (Tinée à Pont de Belloire, Tinée au Pont de la Lune, Var au Pont Levis et Vésubie à Saint Jean de la Rivière)

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	5.8	6.0	5.5	5.1	5.2	5.1	4.8	5.0	4.2
Tinée @ Pont de la Lune	17.1	18.9	18.1	16.3	16.7	16.5	15.1	15.9	13.4
Var @ Pont Levis	13.7	14.3	14.1	12.3	12.8	12.4	11.4	12.1	10.0
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	6.7	8.0	7.2	6.9	7.1	7.0	6.5	6.8	5.5

Tableau 9 : Médiane des débits moyens par bassin versant et par période [m^3/s]

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	5.5	9.1	0	-7.3	-5.5	-7.3	-12.7	-9.1	-23.6
Tinée @ Pont de la Lune	-5.5	4.4	0	-9.9	-7.7	-8.8	-16.6	-12.2	-26
Var @ Pont Levis	-2.8	1.4	0	-12.8	-9.2	-12.1	-19.1	-14.2	-29.1
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	-6.9	11.1	0	-4.2	-1.4	-2.8	-9.7	-5.6	-23.6

Tableau 10 : Écart de la médiane des débits moyens à la période de référence « 2000 » par bassin versant et par période [%]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

5.4. IMPACTS SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE

Les impacts du changement climatique sur les régimes sont présentés :

- à la Figure 35 en prenant exemple sur la Tinée au Pont de Belloire ;
- à la Figure 36 en prenant exemple sur le Var au Pont Levis.

Ces figures montrent les régimes hydrologiques calculés sur 30 ans, pour les périodes « 1940 » et « 1970 » (bleu), la période actuelle (vert) et les périodes futures (violet pour le RCP 4.5 et jaune pour le RCP 8.5).

Sur un bassin versant avec une composante nivale marquée, la Figure 35 (Tinée au Pont de Belloire) montre :

- Des régimes hydrologiques passés et actuels (« 1940 », « 1970 » et « 2000 ») avec une composante clairement nivale. La période printanière de hautes eaux domine le régime hydrologique, les étiages sont en hiver et on observe peu de crues d'automne. Le pic de crue se situe autour du 1er juin, et l'étiage hivernal autour du 1er février.
- Une certaine variabilité des régimes hydrologiques passés et actuels (« 1940 », « 1970 » et « 2000 »). Cette variabilité reste relativement limitée, mais le régime des années « 1940 » (connues pour être sèches et chaudes) est assez proche de celui des années « 2000 », alors que le régime des années « 1970 » met en évidence une période avec des débits (et certainement de la neige) supérieurs aux autres périodes.
- **Une évolution des régimes hydrologiques dans le futur avec une réduction de la composante nivale, au profit d'un fonctionnement pluvio-nival :**
  - **Le pic de crue printanière est réduit en volume (de -30% à -60%, par rapport à la période de référence) et s'avance progressivement (début mai pour le scenario RCP4.5 et fin avril pour RCP 8.5). La crue de printemps représente 2.5 fois le débit moyen annuel en période passée ou actuelle et 1.5 à 2 fois le débit moyen annuel en période future ;**
  - **Les débits d'hiver augmentent sensiblement (de +30% à +70%, par rapport à la période de référence, « 2000 »), alors que la période d'étiage passe de l'hiver à l'automne (début septembre) ;**
  - **L'apparition de crues d'automne (peut-être similaire aux crues de l'automne 2019), avec des débits qui augmentent sensiblement (jusqu'à +75%, par rapport à la période de référence), jusqu'à la fin novembre.**

Sur un bassin versant avec une composante nivale moins marquée, la Figure 36 (Var au Pont Levis) montre :

- Des régimes hydrologiques passés et actuels (« 1940 », « 1970 » et « 2000 ») avec une composante nivale, moins marquée que sur la Tinée au Pont de Belloire. La fonte de la neige domine le régime hydrologique, mais les étiages sont en fin d'été et on observe des crues d'automne possibles jusqu'en décembre. La période de hautes eaux de printemps se situe début mai et l'étiage se situe entre le 1er et 15 septembre.
- **Une évolution des régimes hydrologiques dans le futur avec une réduction de la composante nivale, au profit d'un fonctionnement pluvio-nival de plus en plus marqué :**
  - **La crue de printemps est réduite en volume (de -20% à -40%, par rapport à la période de référence) et s'avance progressivement (fin avril pour le scenario RCP4.5 et mi-mars pour RCP 8.5). La crue de printemps représente 1.8 fois le débit moyen annuel en période passée ou actuelle et 1.4 fois le débit moyen annuel en période future ;**
  - **Les débits d'hiver augmentent sensiblement (de +30% à +70%, par rapport à la période de référence) ;**
  - **Les débits d'étiage de fin d'été diminuent (de -10% à -40%, par rapport à la période de référence) ;**
  - **Apparition des crues d'automne, avec des débits qui augmentent sensiblement (jusqu'à +50%, par rapport à la période de référence), jusqu'à la fin novembre.**

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

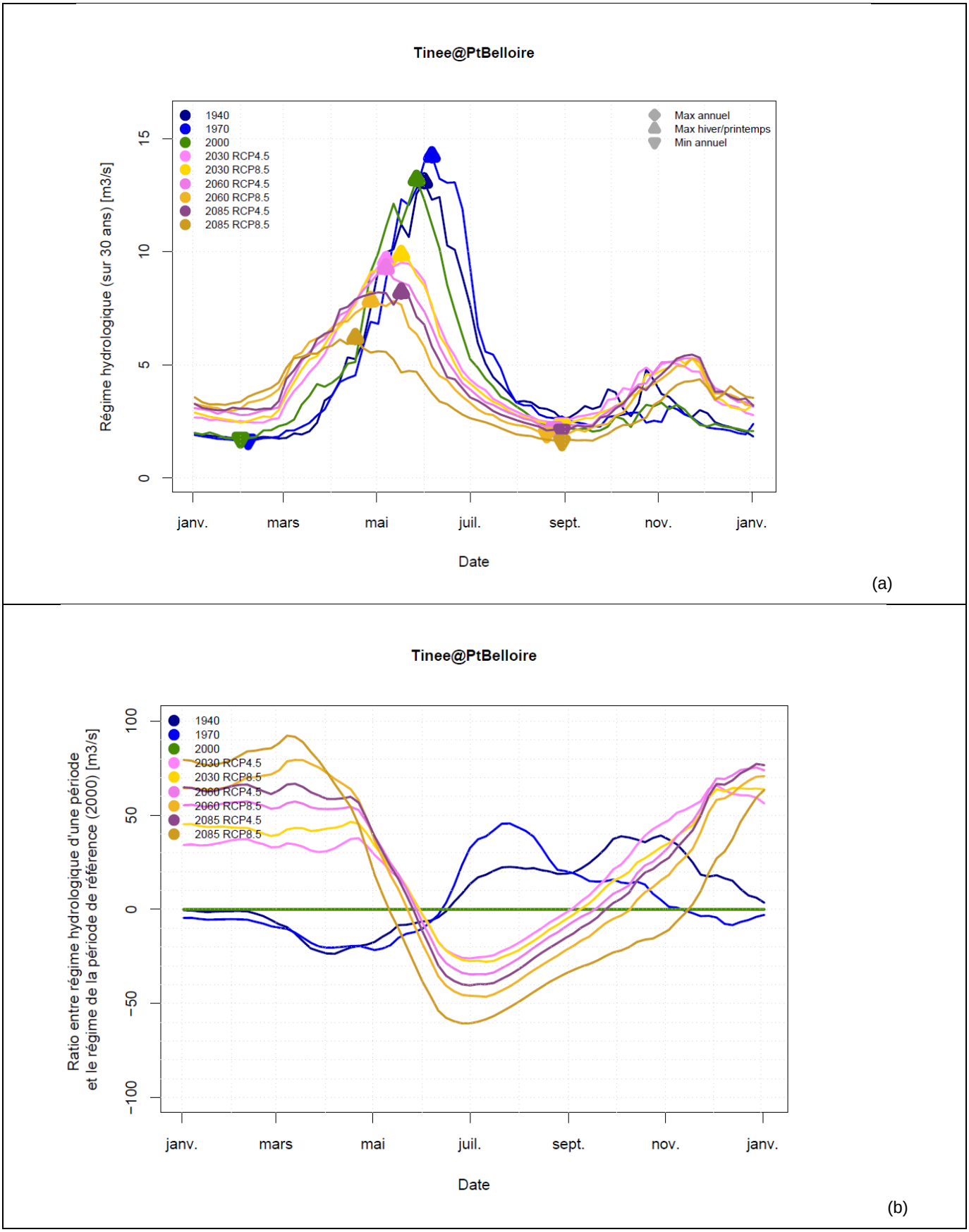


Figure 35 : Évolution des régimes hydrologiques de la Tinée à Point de Belloire entre « 1940 » et « 2085 », (a) en valeur absolue et (b) en valeur relative à la période « 2000 »

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

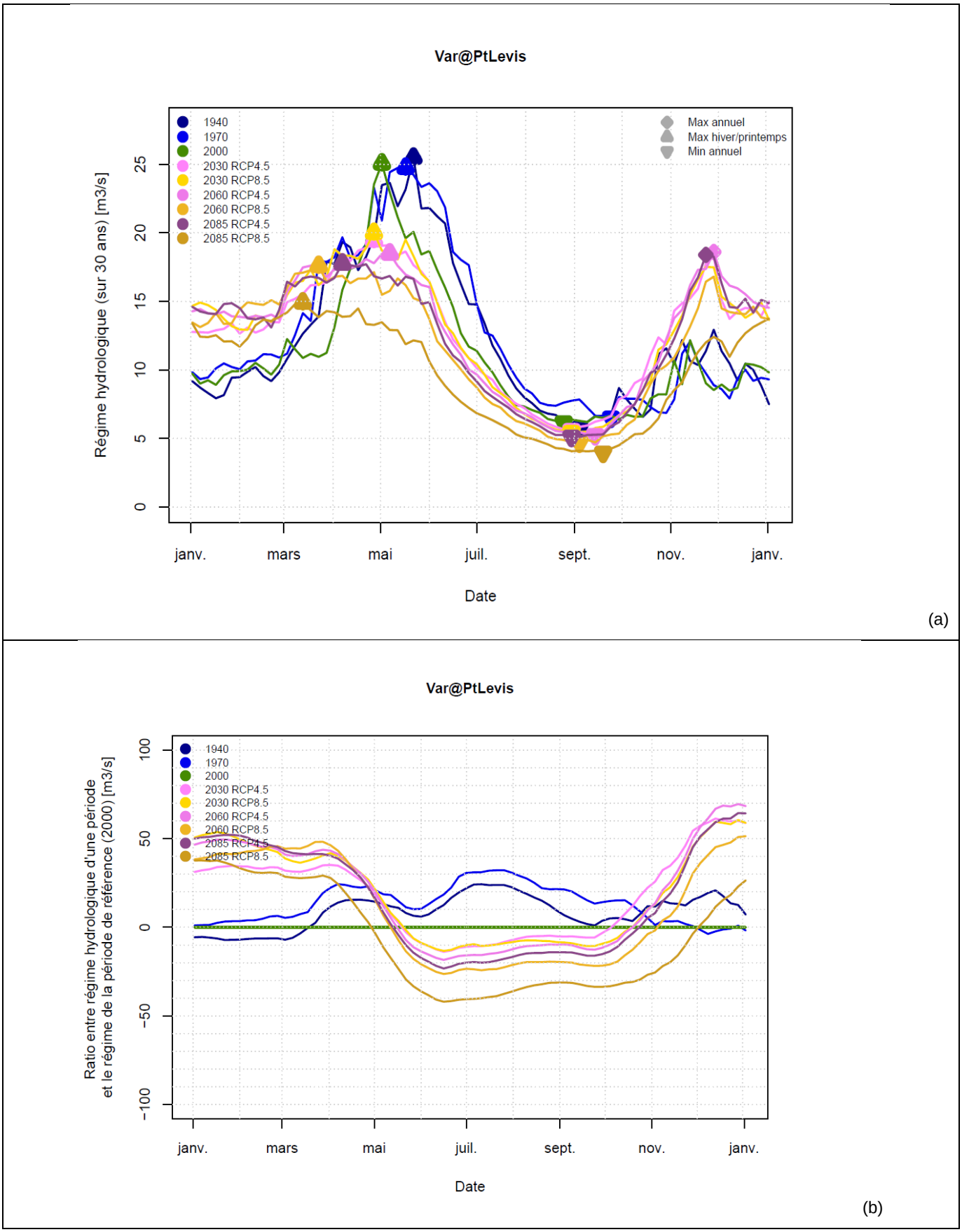


Figure 36 : Évolution des régimes hydrologiques du Var à Pont Levis entre « 1940 » et « 2085 », (a) en valeur absolue et (b) en valeur relative à la période « 2000 »

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

La Figure 37 présente une synthèse régionale des évolutions des régimes hydrologiques des quatre bassins versants, en comparant la valeur du débit maximum d'hiver/printemps et la date de ce débit maximum. Cette figure synthétise à l'échelle régionale les résultats obtenus avec les Figure 35 et Figure 36. La synthèse concernant la date médiane de la crue de printemps est présentée aux Tableau 11 et Tableau 12. Cette figure apporte de nombreuses informations :

- Tout d'abord, on peut hiérarchiser en climat passé ou présent, le fonctionnement nival des quatre bassins versants avec, du plus nival au moins nival, la Tinée au Pont de Belloire, la Tinée au Pont de la Lune, le Var au Pont Levis et la Vésubie à Saint Jean la rivière. Ce classement vient de la comparaison entre les ratios débit max / débit moyen et la date de ce débit max ;
- On retrouve le fonctionnement des bassins versants en climat passé et actuel, avec une date du débit max de printemps autour de la fin mai, avec des débits de crues représentant 1.5 à 2.5 fois le débit moyen de la période de référence ;
- Dans une perspective de futur proche (« 2030 »), la date du débit max glisse progressivement à début mai, avec des débits de crues représentant 1.5 à 2.0 fois le débit moyen de la période de référence. Il y a peu de différence entre les scenarii RCP 4.5 et RCP 8.5 ;
- Dans une perspective de futur lointain (« 2060 » et fin de siècle), la date du débit max glisse progressivement à mi-avril pour le scenarii RCP4.5 et début avril pour le RCP 8.5, avec des débits de crues représentant environ 1.5 fois le débit moyen de la période de référence.

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	01-juin	06-juin	27-mai	07-mai	17-mai	07-mai	27-avr	17-mai	17-avr
Tinée @ Pont de la Lune	01-juin	06-juin	27-mai	17-mai	17-mai	07-mai	27-avr	07-mai	17-avr
Var @ Pont Levis	22-mai	17-mai	02-mai	27-avr	27-avr	07-mai	23-mars	07-avr	13-mars
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	17-mai	06-juin	22-mai	22-avr	27-avr	07-mai	22-avr	22-avr	08-mars

Tableau 11 : Dates médiane de la crue de printemps par bassin versant et par période

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	5	10	0	-20	-10	-20	-30	-10	-40
Tinée @ Pont de la Lune	5	10	0	-10	-10	-20	-30	-20	-40
Var @ Pont Levis	20	15	0	-5	-5	5	-40	-25	-50
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	10	22	0	-23	-18	-8	-23	-23	-68

Tableau 12 : Écart de la date médiane de la crue de printemps par rapport à la période de référence « 2000 » par bassin versant et par période [jours]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

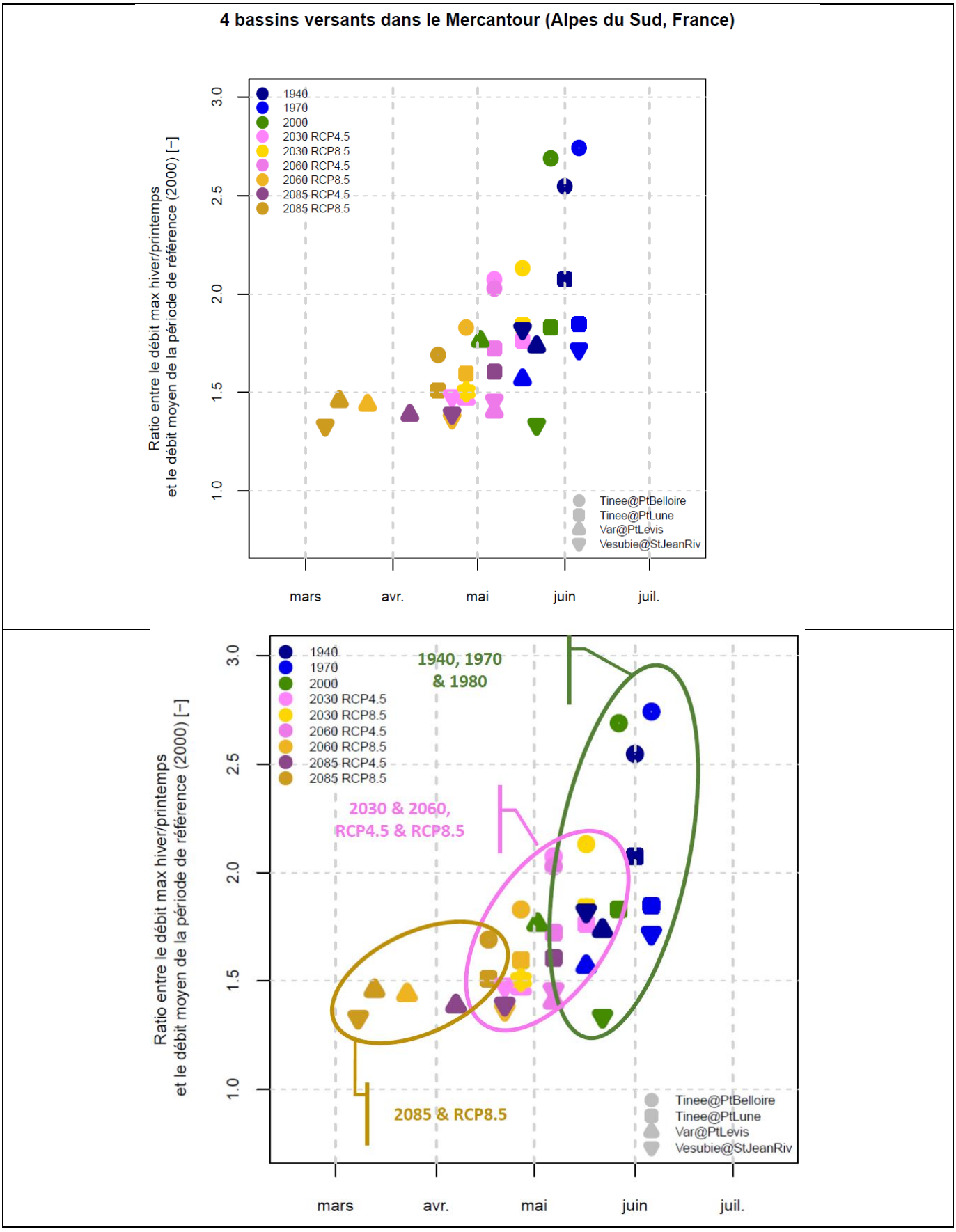


Figure 37 : Synthèse de l'évolution des régimes hydrologiques de bassins versants du Mercantour

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

6. SCENARII DE NEIGE SUR LA PERIODE 1900-2100

6.1. CONSTRUCTION DES SIMULATIONS 1900-2100

La construction des simulations de la valeur en eau de la neige sur la période 1900-2100 a été réalisée de trois manières :

- à l'échelle du bassin versant, à partir de la variable intermédiaire du modèle MORDOR SD représentant le stock de neige (modèle calé globalement) ;
- à l'échelle d'une bande d'altitude du bassin versant, à partir de la variable intermédiaire du modèle MORDOR SD représentant le stock de neige, pour une bande d'altitude donnée. Afin que les simulations des différents bassins versants soient comparables, nous avons retenus des bandes d'altitudes communes sur tous les bassins versants : {1500-1800}, {1800-2100}, {2100-2400}, {2400-2700} et {>2700}. Ces bandes d'altitudes représentent des proportions de bassin versant différentes en terme de superficie ;
- à l'échelle de la perche à neige, à partir de la simulation de la valeur en eau de la neige de la routine nivale du modèle MORDOR SD, calée sur des observations neige [Thebault, 2019].

Dans la suite de ce rapport, nous allons concentrer notre analyse sur les simulations nivales par le modèle hydrologique complet (échelle globale ou par bande d'altitude). Les simulations nivales obtenues à partir des observations locales à la perche se sont révélées plutôt performantes pour les reconstitutions historiques, mais avec certains biais, qui restent à explorer, concernant les simulations d'impacts du changement climatique.

6.2. IMPACT SUR LA VALEUR MAXIMALE D'ENNEIGEMENT

6.2.1. À l'échelle du bassin versant

La Figure 38 présente l'évolution de la valeur en eau max de la neige sur la Tinée à Pont de Belloire de « 1940 » à « 2085 ». Cette figure présente la valeur moyenne (a) et en valeur relative à la médiane de la période « 2000 » (b). Cette figure montre qu'à l'échelle d'une période il y a une certaine variabilité de la valeur en eau max de la neige et des différences entre les périodes du passé (période « 1970 » plus enneigée que « 1940 » ou « 2000 »). Par contre, il y a une tendance à la baisse depuis les années « 1970 » avec un écart de 10% entre les périodes « 1970 » et « 2000 ». Par rapport à « 2000 », cette tendance semble s'accentuer dans le futur avec une diminution de l'ordre de -20% en « 2030 » à -35% en fin de siècle pour le RCP 4.5, et une augmentation du déficit jusqu'à -60% (par rapport à « 2000 ») en fin de siècle pour le RCP 8.5. Cette différence entre les deux RCP est en lien avec les trajectoires contrastées d'augmentation de la température de l'air.

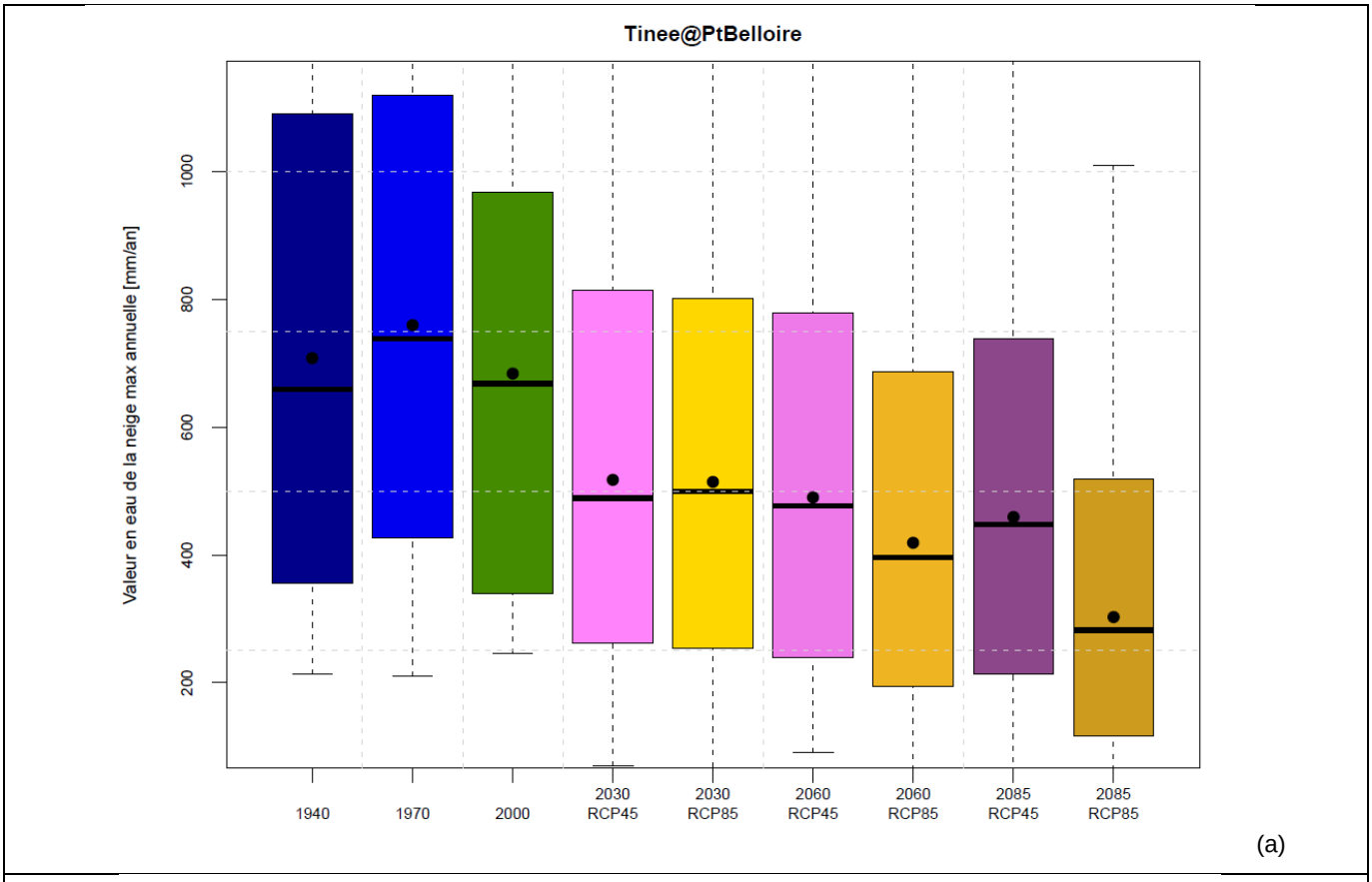
La Figure 39 reprend le même type de représentation (en écart relatifs, par rapport à la période de référence « 2000 ») pour les bassins versants d'intérêts du Mercantour. Les Tableau 14 et Tableau 15 renvoient les valeurs numériques. Les résultats obtenus pour les quatre bassins versants sont bien contrastés, avec une réduction de la valeur en eau maximale d'autant plus forte que les bassins versants sont bas en altitude (du moins impacté au plus impacté : Tinée à Pont de Belloire, Tinée au Pont de la Lune, Var à Pont Levis, Vésubie à Saint Jean la Rivière). Pour les trois derniers bassins versants, la diminution de la valeur en eau max de la neige est de l'ordre de -50% en « 2030 » à -65% en fin de siècle pour le RCP 4.5, et une augmentation du déficit jusqu'à -85% (par rapport à « 2000 ») en fin de siècle pour le RCP 8.5.

À partir des médianes de précipitations (totales) au Tableau 5 et de neige au Tableau 14, on peut caractériser également la proportion de la neige dans le fonctionnement global des bassins versants. Le Tableau 13 montre que, par le passé et jusqu'au climat actuel, la neige représente environ 50% des précipitations totales sur la Tinée à Pont de Belloire, environ 25% sur la Tinée au Pont de la Lune et environ 25% sur le Var à Pont Levis et la Vésubie à St Jean la Rivière. À l'horizon de la fin de siècle, la neige représentera encore environ 30 % des précipitations totales sur la Tinée au Pont de Belloire, sera devenue négligeable sur la Tinée au Pont de la Lune, anecdotique sur le Var et la Vésubie.

Bassin versant	« 1940 », « 1970 », « 2000 »	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	50	34	23
Tinée @ Pont de la Lune	25	11	06
Var @ Pont Levis	13	04	02
Vésubie @ Saint Jean de la Riv.	16	06	03

Tableau 13 : Proportion des précipitations solides (neige) dans les précipitations totales [%]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation



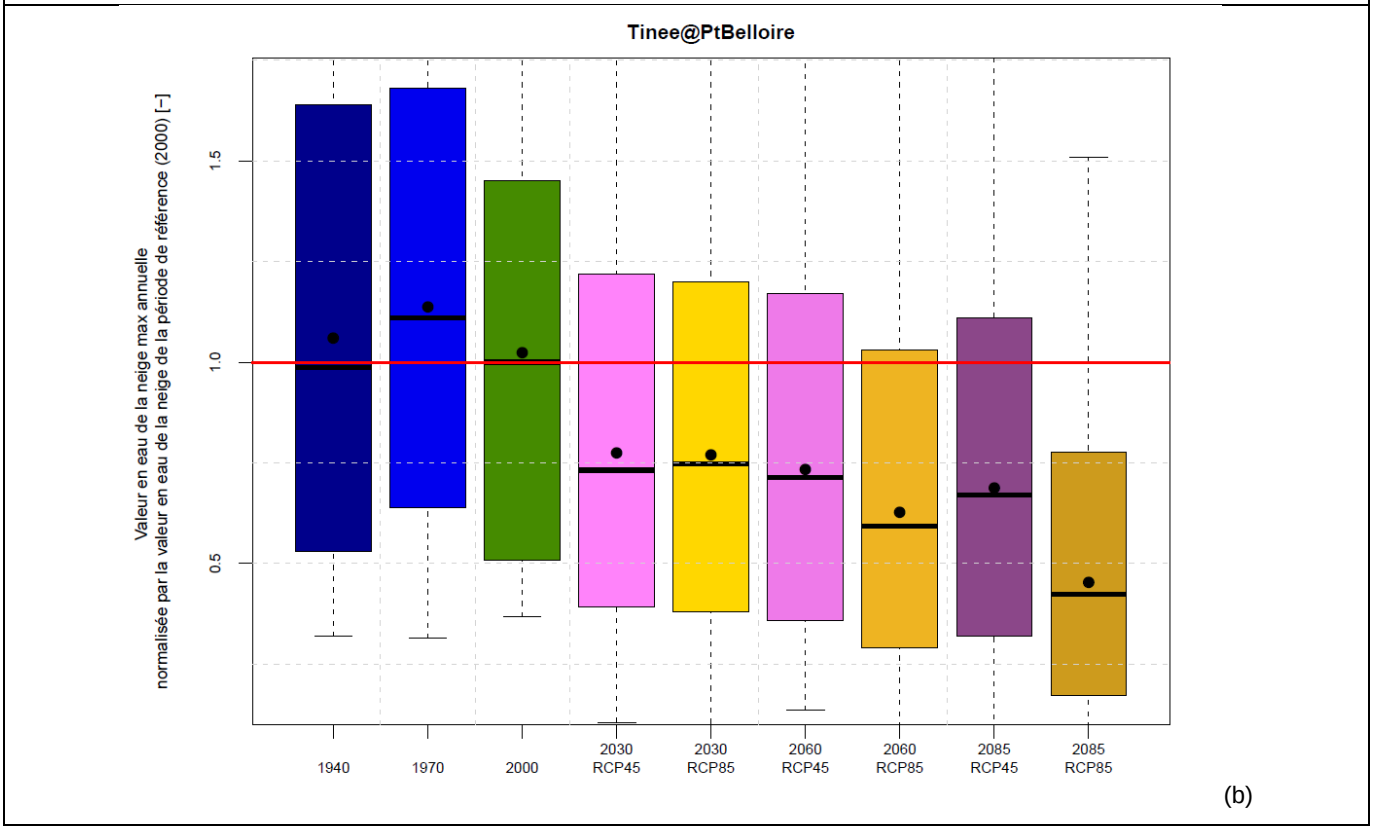


Figure 38 : Évolution de la valeur en eau max de la neige de la Tinée au Pont de Belloire entre « 1940 » et « 2085 » , (a) en valeur absolue et (b) en valeur relative à la période « 2000 »

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

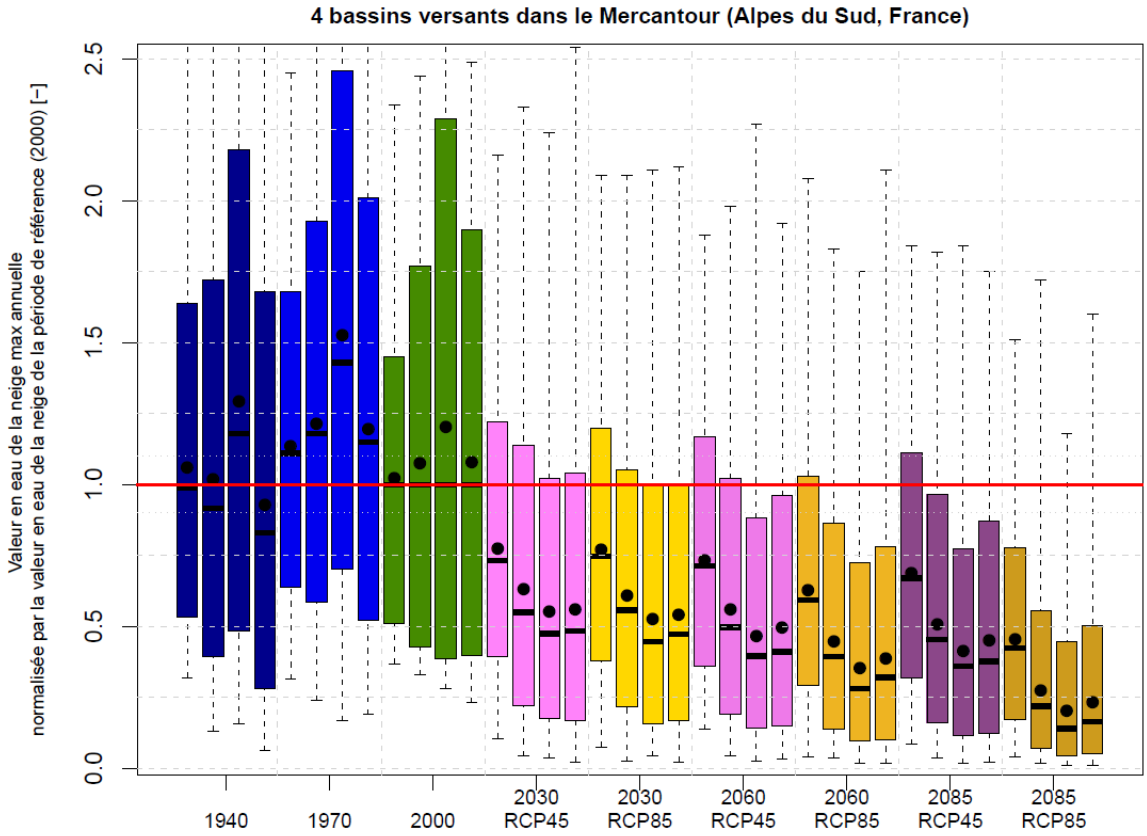


Figure 39 : Synthèse de l'évolution de la valeur en eau max de la neige des bassins versants du Mercantour

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	677	764	691	500	505	492	412	458	292
Tinée @ Pont de la Lune	300	365	346	186	177	161	132	146	74
Var @ Pont Levis	150	193	131	62	58	53	36	44	18
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	170	212	190	102	93	84	66	77	35

Tableau 14 : Médiane de la valeur en eau de la neige bassin versant et par période [mm/an]

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	-2	11	0	-28	-27	-29	-40	-34	-58
Tinée @ Pont de la Lune	-13	5	0	-46	-49	-53	-62	-58	-79
Var @ Pont Levis	15	47	0	-53	-56	-60	-73	-66	-86
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	-11	12	0	-46	-51	-56	-65	-60	-82

Tableau 15 : Écart de la valeur en eau de la neige à la période de référence « 2000 » par bassin versant et par période [%]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

6.2.2. Par bandes d'altitudes

La Figure 40 présente l'évolution de la médiane d'enneigement par bande d'altitude et par bassin versant. Nous nous sommes concentrés sur les bandes les plus hautes, allant de 1500m à 2700m. Nous n'avons pas représenté la dernière bande d'altitude, dont les surfaces sont très faibles (quelques % de la surface totale du bassin versant, Tableau 3) et pour lesquelles les simulations sont en limite d'extrapolation. Cette figure met en évidence des impacts du changement climatique :

- Proportionnellement plus forts en basse altitude (« 1650m » : >-60% à l'horizon fin de siècle, par rapport à « 2000 »), qu'en haute altitude (« 2550m » : -30% à – 50% à l'horizon fin de siècle, par rapport à « 2000 ») ;
- De manière globale, le scenario RCP4.5 représente une remontée de la zone d'enneigement d'environ 300m en fin de siècle, par rapport à « 2000 » et le scenario RCP8.5 représente une remontée d'environ 600m en fin de siècle, par rapport à « 2000 » ;
- Un impact plus fort à l'échelle du Var@Pont Levis et de la Vésubie@StJeanRiv, dont les altitudes sont représentées par les bandes les plus basses.

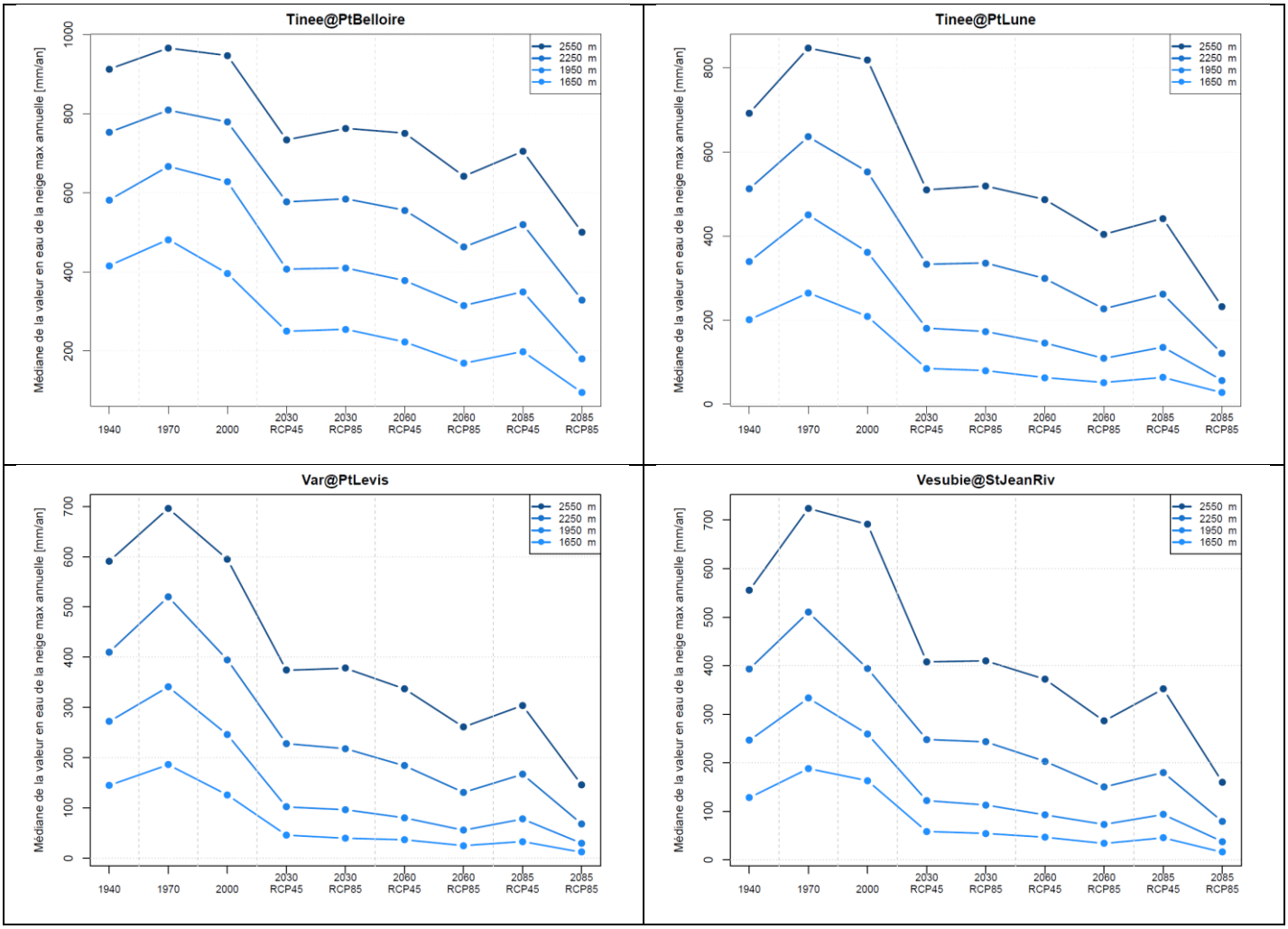


Figure 40 : Médiane de la valeur max d'enneigement (>25mm de valeur en eau) par bandes d'altitudes (1650m : 1500m-1800m / 1950m : 1800m-2100m / 2250m : 2100m-2400m / 2550m : 2400m-2700m) et par période

6.3. IMPACT SUR LE REGIME D'ENNEIGEMENT

6.3.1. À l'échelle du bassin versant

La Figure 41 (a) présente l'évolution de la date de la valeur en eau max de la neige sur la Tinée à Pont de Belloire de « 1940 » à « 2085 ». Cette figure montre que pour les périodes « 1940 », « 1970 » et « 2000 », la valeur médiane de la valeur max d'enneigement est autour de la première semaine de mai, avec une variabilité de 2 à 4 semaines autour de cette date. Par rapport à « 2000 », les tendances dans le futur sont à un avancement de la date d'enneigement max, avec une avancée de l'ordre de 2 semaines en « 2030 » à 4 semaines en fin de siècle pour le RCP 4.5, et une avancée jusqu'à 6 semaines en fin de siècle pour le RCP 8.5. Cette différence entre les deux RCP est en lien avec les trajectoires contrastées d'augmentation de la température de l'air.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

La Figure 41 (b) et la Figure 42 présentent l'évolution de la durée, de la date de début et de la date de fin de la saison nivale de la Tinée à Pont de Belloire de « 1940 » à « 2085 ». La saison nivale est définie (arbitrairement) par la période où la valeur en eau de la neige est supérieure à 25mm (à l'échelle du bassin versant). Ces figures montrent qu'à l'échelle d'une période il y a une certaine variabilité de la saison nivale et des différences entre les périodes du passé (« 1970 » plus longue que « 1940 » ou « 2000 »). Par contre, il y a une tendance à la baisse depuis les années « 1970 » avec une saison nivale passant de 300 jours à 270 jours environ actuellement. Par rapport à « 2000 », cette tendance semble continuer dans le futur avec une diminution de l'ordre de 20 jours en « 2030 » à 40 jours en fin de siècle pour le RCP 4.5, et diminution jusqu'à 80 jours en fin de siècle pour le RCP 8.5. Si on souhaite regarder dans le détail ces tendances sur la durée de la saison nivale (Figure 42), il semble que la date de début de saison nivale évolue proportionnellement moins (1/3 environ de la réduction totale) que la date de la fin de la saison nivale (2/3 de la réduction totale).

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	283	292	265	243	238	232	216	226	188
Tinée @ Pont de la Lune	226	238	225	182	180	173	147	163	103
Var @ Pont Levis	172	188	160	107	105	87	69	80	46
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	183	199	195	138	140	123	107	113	63

Tableau 16 : Médiane de la durée de la saison d'enneigement par bassin versant et par période [jours]

Bassin versant	« 1940 »	« 1970 »	« 2000 »	« 2030 » RCP 4.5	« 2030 » RCP 8.5	« 2060 » RCP 4.5	« 2060 » RCP 8.5	« 2085 » RCP 4.5	« 2085 » RCP 8.5
Tinée @ Pont de Belloire	18	27	0	-22	-27	-33	-49	-39	-77
Tinée @ Pont de la Lune	1	13	0	-43	-45	-52	-78	-63	-122
Var @ Pont Levis	12	28	0	-54	-55	-74	-91	-80	-114
Vésubie @ Saint Jean de la Rivière	-12	4	0	-57	-55	-72	-88	-82	-132

Tableau 17 : Écart de la durée de la saison d'enneigement par bassin versant et par période [jours]

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

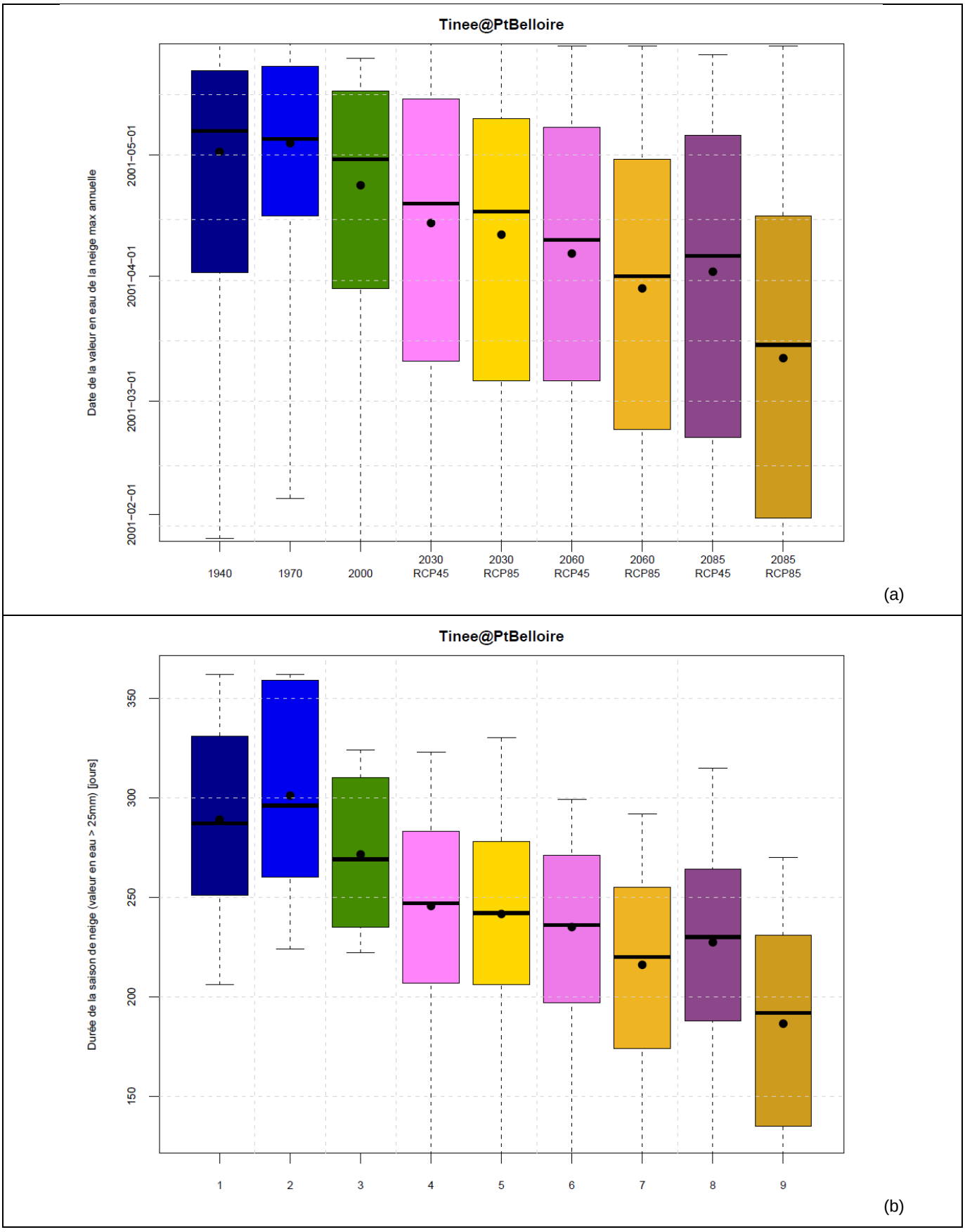


Figure 41 : Évolution de la date de la valeur en eau max de la neige (a) et de la durée (b) de la saison nivale (>25mm) de la Tinée au Pont de Belloire entre « 1940 » et « 2085 »

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

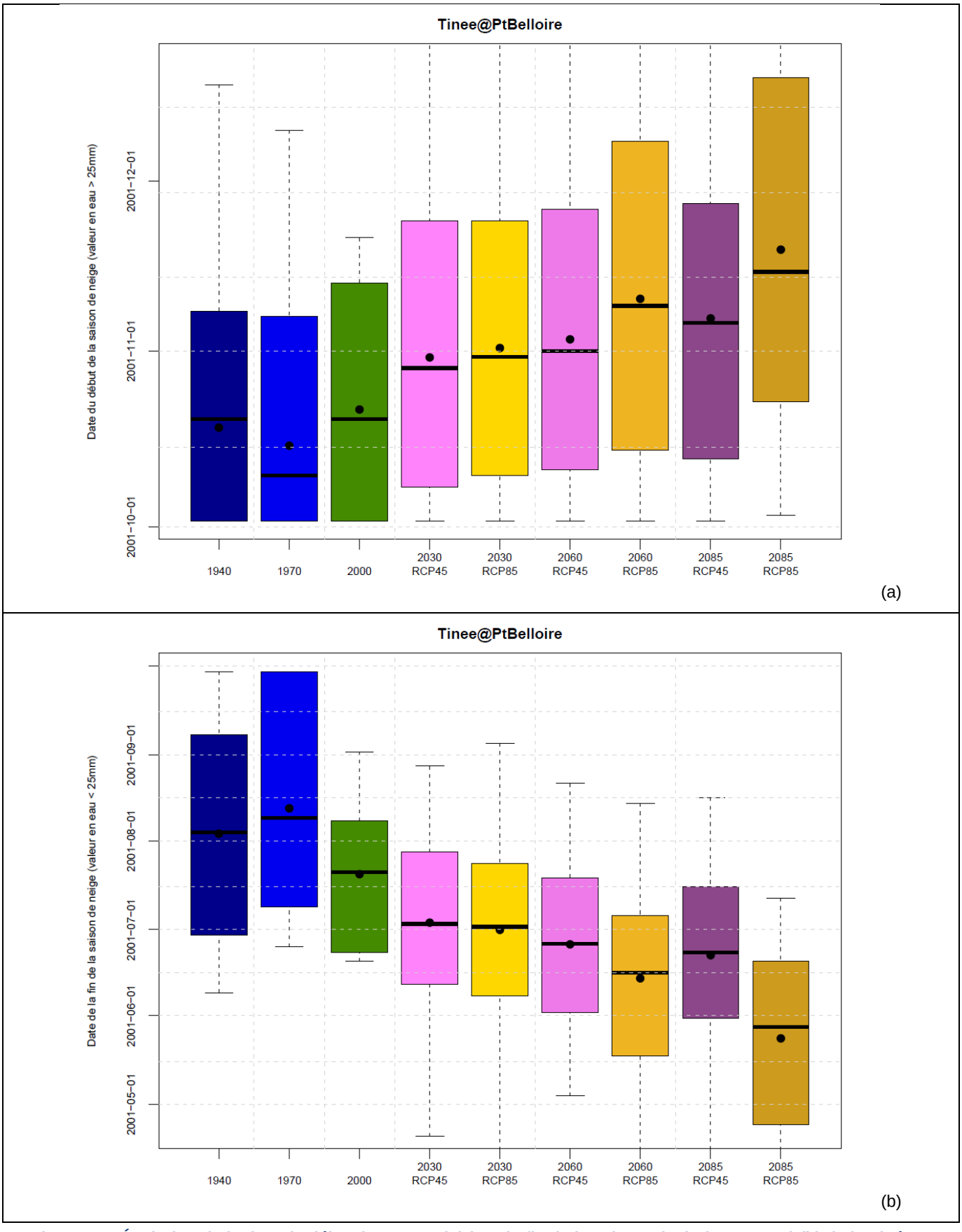


Figure 42 : Évolution de la date de début (VE>25mm) (a) et de fin de la saison nivale (VE<25mm) (b) de la Tinée au Pont de Belloire entre « 1940 » et « 2085 »

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

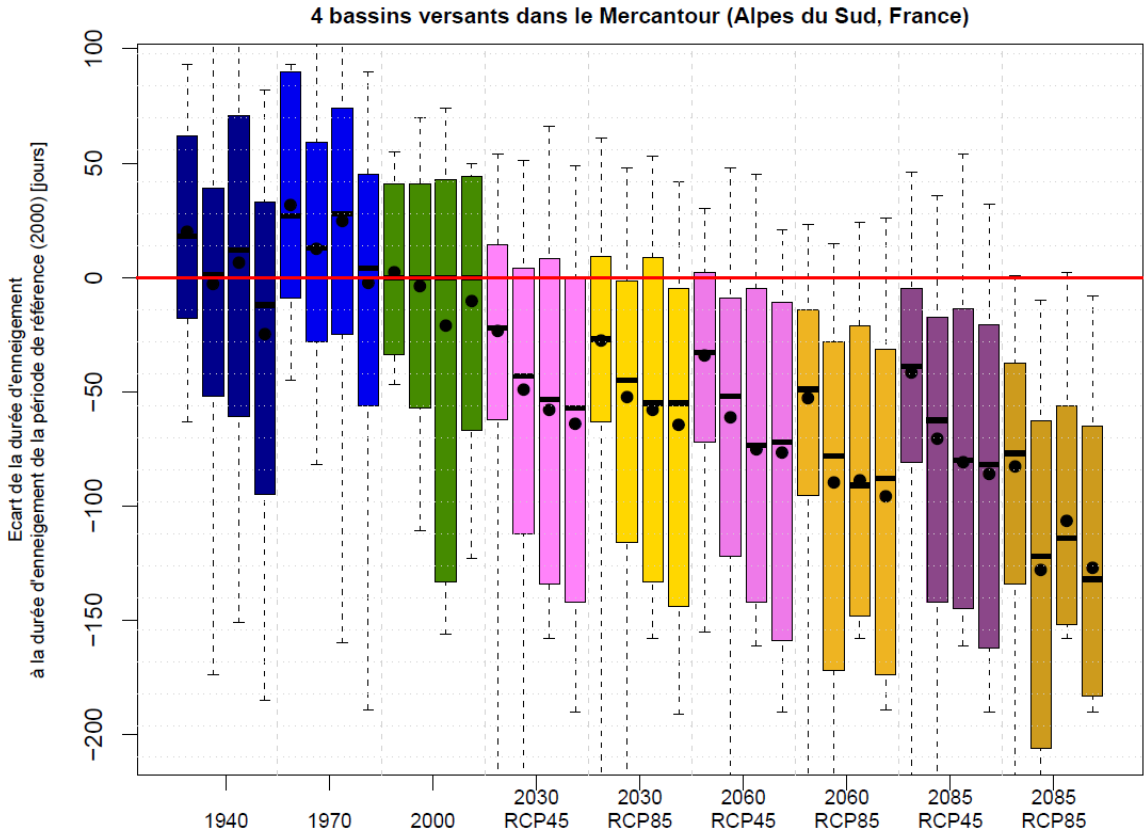


Figure 43 : Synthèse de l'évolution de la durée de la saison nivale des bassins versants du Mercantour

La Figure 43 reprend le même type de représentation (en écart, par rapport à la période de référence « 2000 ») pour les quatre bassins versants d'intérêt du Mercantour. Les Tableau 16 et Tableau 17 présentent les valeurs numériques de la médiane de la durée de la saison nivale. Les résultats obtenus pour les quatre bassins versants sont bien contrastés, avec une réduction de la durée de la saison nivale d'autant plus forte que les bassins versants sont bas en altitude (du moins impacté au plus impacté : Tinée à Pont de Belloire, Tinée au Pont de la Lune, Var à Pont Levis, Vésubie à Saint Jean la Rivière). Pour les trois derniers bassins versants, la diminution de la durée de la saison nivale est de l'ordre de 50 jours en « 2030 » à 75 jours en fin de siècle pour le RCP 4.5, et une réduction de cette durée jusqu'à 120 jours (par rapport à « 2000 ») en fin de siècle pour le RCP 8.5.

6.3.2. Par bandes d'altitudes

La Figure 44 présente l'évolution de la médiane de la durée d'enneigement (>25 mm de valeur en eau) par bande d'altitude et par bassin versant. Comme pour la valeur en eau max de la neige, nous nous sommes concentrés sur les bandes les plus hautes, allant de 1500m à 2700m. Cette figure met en évidence des impacts du changement climatique :

- La saison d'enneigement est aujourd'hui de 200 à 270 jours entre 1500m et 2700m pour la Tinée au Pont de Belloire et de 100 à 210 jours entre 1500m et 2700m pour la Vésubie à St Jean la Rivière ;
- En fin de siècle, pour le scenario RCP 4.5, la durée d'enneigement serait de 130 à 240 jours entre 1500m et 2700m pour la Tinée au Pont de Belloire et de 20 à 150 jours entre 1500m et 2700m pour la Vésubie à St Jean la Rivière ;
- En fin de siècle, pour le scenario RCP 8.5, la durée d'enneigement serait de 80 à 210 jours entre 1500m et 2700m pour la Tinée au Pont de Belloire et de 15 à 100 jours entre 1500m et 2700m pour la Vésubie à St Jean la Rivière ;
- Proportionnellement les impacts sont plus forts en basse altitude qu'en haute altitude (« 2550m » : -30% à – 50% à l'horizon fin de siècle, par rapport à « 2000 ») ;
- De manière globale, le scenario 4.5 représente une remontée d'environ 300m de la zone d'enneigement en fin de siècle, par rapport à « 2000 » et le scenario 8.5 représente une remontée d'environ 600m en fin de siècle, par rapport à « 2000 » ;
- Un impact plus fort à l'échelle du Var@Pont Levis et de la Vésubie@StJeanRiv, dont les altitudes sont représentées par les bandes les plus basses.

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

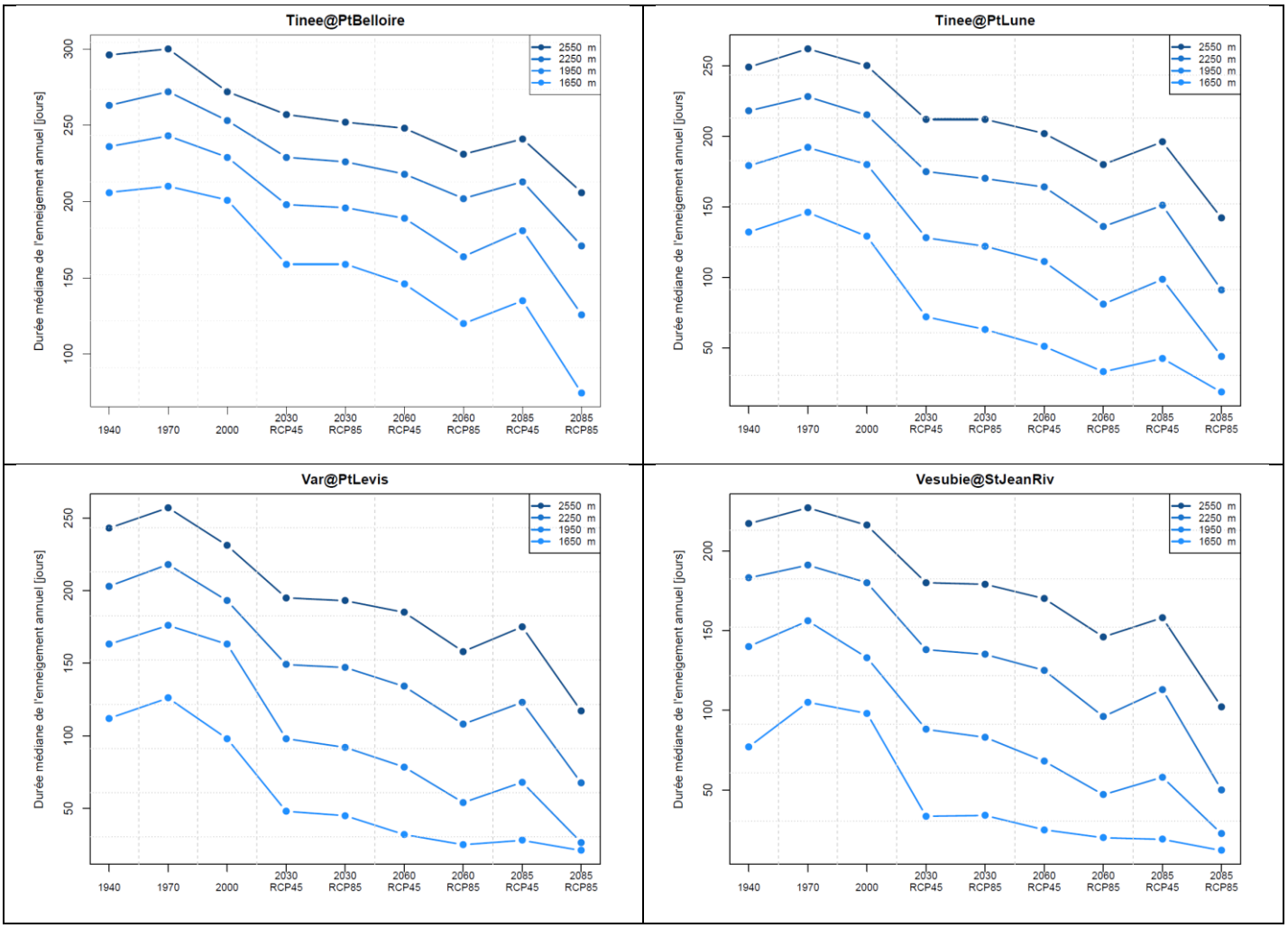


Figure 44 : Médiane de la durée d'enneigement (>25 mm valeur en eau) par bandes d'altitudes (1650m : 1500m-1800m / 1950m : 1800m-2100m / 2250m : 2100m-2400m / 2550m : 2400m-2700m) par période

7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

7.1. CONCLUSIONS

Les objectifs principaux de cette étude sont de présenter les impacts du changement climatique jusqu'à l'horizon 2100 sur :

- les ressources en eau disponibles et,
- la dynamique nivale en montagne.

Pour cela, nous avons mis en œuvre une chaîne de modélisation complexe avec :

- **Des observations locales et régionales**, de la climatologie (précipitation et température de l'air), de la neige (valeur en eau) et des débits. Nous avons considérés **4 bassins versants du Mercantour** sur la Tinée, le Var et la Vésubie. Ces bassins versants représentent différents degrés d'influences nivales et des régimes hydrologiques différents ;
- **Des outils de modélisation à l'état de l'art,** aussi bien concernant la modélisation hydrologique et nivale, que la génération de chroniques climatologiques sur la période 1900-2100 et la simulation des impacts du changement climatique, à partir de deux scenarii d'émissions (**RCP4.5** ➔ réductions des émissions dans l'atmosphère avec stabilisation des impacts à partir de 2050 et **RCP8.5** ➔ « Business as usual », pas de réduction des émissions dans l'atmosphère) ;
- **Des analyses statistiques**, aussi synthétiques que possible, concernant les ressources en eau et la neige. Compte-tenu de la quantité de données à analyser, nous nous sommes concentrés sur quelques signatures hydrologiques (**débit moyen et régime hydrologique**) et nivale (**valeur en eau maximale, dates de début, de max et de fin de la saison nivale, durée de la saison nivale**), en accord avec les besoins du Parc National du Mercantour. Ces analyses statistiques ont été faites sur différents horizons temporels de 30 ans : **« 1940 », « 1970 », « 2000 », « 2030 », « 2060 », « 2085 »** (date centrale ±15 ans).

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Cette étude permet d'apporter les conclusions suivantes :

1. **À l'échelle régionale (Mercantour), les impacts du changement climatique sont globalement homogènes entre les différents bassins versants étudiés, avec des impacts plus ou moins forts sur le fonctionnement nival des bassins versants.** Les différences de résultats et de tendances s'expliquent principalement par les différences d'altitudes médianes des bassins versants (cette variable traduit indirectement l'importance deu caractère nival dans le fonctionnement d'un bassin versant) ;

2. **La réalisation de cette étude sur une période de 200 ans (1900-2100) permet de mettre en perspective les tendances actuelles et futures, par rapport au climat passé, déjà observé**. Par exemple, la période actuelle (« 2000 ») ressemble fortement à la période (« 1940 ») en termes de débits et valeur en eau max de la neige. La période « 1970 » apparaît comme une période avec des débits et un enneigement plus forts. **Cette variabilité passée constatée sur le Mercantour a déjà été observée à une échelle régionale, de la Durance notamment** (Kuentz, 2013 ; GREC-PACA, 2017) ;

3. **Concernant la climatologie :**
   a. Les évolutions des précipitations au cours du XXI^{ème} siècle apparaissent peu significatives. **On peut considérer les précipitations globalement stables** (en cumul annuel) ;
   b. Les **évolutions de la température de l'air** sont très claires, aussi bien sur les températures observées (à partir des années 1980), qu'au travers des projections climatiques au XXIème siècle. Par rapport à la période actuelle (« 2000 »), **le scenario RCP 4.5 représente une augmentation de température de l'air de + 2 °C** et **le scenario RCP 8.5 représente une augmentation de température de l'air de + 4 °C**. Par rapport à la période stationnaire avant les années 1980, la période « 1970 », il faut rajouter + 1°C à ces tendances (soit : + 3 °C pour le RCP 4.5 et + 5 °C pour le RCP 8.5 à l'horizon fin de siècle) ;

4. **Concernant les débits médians :**
   a. À l'horizon « 2030 », les deux RCP prévoient une baisse des débits de -5% à -10% ;
   b. À l'horizon fin de siècle, le RCP 4.5 prévoit une baisse des débits de -10% et le RCP 8.5 prévoit une baisse significative des débits de -25% à -30% ;

5. **Concernant les régimes des débits :**
   a. Les simulations d'impact du changement climatique prévoient une érosion progressive du caractère nival du fonctionnement des bassins versant, avec :
      i. **une baisse de l'intensité de la crue printanière liée à la fusion nivale ;**
      ii. **un avancement de la date de la crue de fusion nivale ;**
      iii. **le changement de la saison d'étiage (de l'hiver vers l'automne) avec une aggravation des étiages d'automne ;**
      iv. **l'apparition de crues d'automne (pouvant aller jusqu'à fin novembre).**
   b. Cette érosion du caractère nival du fonctionnement des bassins versants peut être représentée comme un **glissement de l'altitude des bassins versants (ou une remontée de l'Iso 0°C)**, i.e. le fonctionnement futur des deux bassins de la Tinée ressemblera probablement au fonctionnement actuel des bassins versants du Var et de la Vésubie (concept « trading space for time ») ;

6. **Concernant les valeurs maximales d'enneigement :**
   a. Actuellement (« 2000 »), les valeurs médianes d'enneigement max vont de **700 mm/an** (Tinée au Pont de Belloire) à **130 mm/an** (Var au Pont Levis) ;
   b. En fin de siècle, pour le bassin versant de la **Tinée au Pont de Belloire, les précipitations solides chutent de 30% (RCP 4.5) à 50% (RCP 8.5)** pour atteindre les proportions actuelles sur le bassin versant de la Tinée au Pont de la Lune. Pour les bassins versants de la Tinée au Pont de la Lune, du Var et de la Vésubie, la proportion de précipitations solides (neige) devient négligeable (<10%) ;
   c. En fin de siècle, pour la **Tinée au Pont de Belloire, les valeurs de maximum d'enneigement chutent de 35% (RCP 4.5) à 60% (RCP 8.5)**. Pour les bassins versants de la **Tinée au Pont de la Lune, du Var et de la Vésubie, les valeurs de maximum d'enneigement chutent de 60% (RCP 4.5) à 80% (RCP 8.5)** ;
   d. À l'échelle des bandes d'altitudes, la synthèse est plus difficile, mais on peut retenir que les valeurs en eau maximales chutent sur toutes les bandes d'altitude, que cette chute est proportionnellement plus forte à basse altitude qu'à haute altitude. **En fin de siècle, pour avoir une valeur en eau max de la neige similaire à celle observée en « 2000 », il faut remonter d'environ 300 m pour le RCP 4.5 et de 300m à 600m pour le RCP 8.5** ;

7. **Concernant la durée d'enneigement :**
   a. Actuellement (« 2000 »), les valeurs médianes de la durée d'enneigement (>25 mm de valeur en eau) vont de **265 jours** (Tinée au Pont de Belloire) à **160 jours** (Var au Pont Levis) ;
   b. En fin de siècle, cette **durée d'enneigement chute de 40 jours (Tinée au Pont de Belloire) à 80 jours (Var et Vésubie) pour le scenario RCP 4.5 et de 80 jours à 130 jours pour le scenario RCP 8.5** ;

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

c. En fin de siècle, **entre 1500m et 2700m, les durées chutent plus fortement à basse altitude** (environ -70 à -80 jours pour le RCP 4.5, environ -85 à -120 jours pour le RCP 8.5), **qu'à forte altitude** (environ -30 à -60 jours pour le RCP 4.5, environ -60 à -110 jours pour le RCP 8.5).

7.2. PERSPECTIVES

Afin de rendre plus robustes les conclusions de cette étude, e les perspectives qu'elle soulève et les pistes à creuser sont nombreuses. On pourrait proposer notamment :

1. **Valoriser les simulations de neige à la perche et résoudre les problèmes de biais rencontrés dans la simulation de l'impact du changement climatique à l'échelle de la perche (ajouter la ref du stage de Cyril)**.

2. **Augmenter la densité spatiale des bassins versants et des perches à neige étudiées** : cette augmentation de densité spatiale permettrait de mieux couvrir la diversité des altitudes médianes des bassins versants et de rajouter quelques bassins versants plus bas, qui deviendraient des témoins actuels des tendances futures. Dans les bassins versants cibles, on retrouve plusieurs bassins versants jaugés qui feraient de bons témoins sur la Roya à l'Est, le Verdon et l'Issole à l'Ouest, l'Ubaye au Nord et le Var, le Loup ou l'Artuby au Sud. Les dossiers de perches à neige sur la Vésubie et la Roya ont été trouvés à la fin de cette étude. On pourrait étudier la pertinence de les utiliser.

3. **Utiliser d'autres indicateurs de la neige** pour décrire les tendances spatiales actuelles et contraindre/améliorer les simulations nivales (notamment, produits MODIS).

4. **Passer d'une modélisation hydrologique par bande d'altitude (Garavaglia et al., 2017) à l'échelle d'un bassin versant, à une modélisation hydrologique spatialisée (Rouhier et al., 2017) à l'échelle du Sud-Est** (de la Roya au Verdon, par exemple). Cette modélisation distribuée permettrait de valoriser l'ensemble des données de débit disponibles et de rendre homogènes les simulations hydrologiques et nivales, en temps passé, temps présent et temps futur.

5. **Croiser les résultats sur le passé avec d'autres proxy (dendrochronologie notamment)**.

6. **Analyser les simulations sur d'autres variables** (tendances saisonnières, bilan hydrologique, étiages,…).

8. REFERENCES

Cramer W, Guiot J, Fader M, Garrabou J, Gattuso J-P, Iglesias A, Lange MA, Lionello P, Llasat MC, Paz S, Peñuelas J, Snoussi M, Toreti A, Tsimplis MN, Xoplaki E., 2018, Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. Nature Climate Change 8, 972-980, doi: 10.1038/s41558-018-0299-2

Durand, Y., Brun, E., Mérindol, L., Guyomarc'h, G., Lesaffre, B. & Martin, E., 1993, A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, A. of Glaciol., 18, 65-71.

Fort, M., 2015, « Impact du changement climatique sur les dynamiques des milieux montagnards », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 103-2 | 2015, mis en ligne le 31 août 2015, consulté le 06 janvier 2020. URL : http://journals.openedition.org/rga/2875 ; DOI : 10.4000/rga.2875

Garavaglia, F., Le Lay, M., Gottardi, F., Garçon, R., Gailhard, J., Paquet, E., and Mathevet, T., 2017. Impact of model structure on flow simulation and hydrological realism: from a lumped to a semi-distributed approach, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 3937-3952, https://doi.org/10.5194/hess-21-3937-2017.

Gottardi, F., 2009, Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauche par type de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 261 pages.

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

GREC-PACA, 2016, Climat et changement climatique en région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR), mai 2016, 44 pages. ISBN : 9782956006015

GREC-PACA, 2017. Les ressources en eau et le changement climatique en Provence-Alpes-Côte d'Azur. Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR), juillet 2017, 52 pages. ISBN : 9782956006053

GREC-SUD, 2018, Impacts du changement climatique et transition(s) dans les Alpes du Sud. Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR), octobre 2018, 48 pages. ISBN : 9782956006060

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Gupta, H. V., H. Kling, K. K. Yilmaz and G. F. Martinez-Baquero, 2009. Decomposition of the Mean Squared Error & NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling, J. Hydrol., Vol. 377, pp. 80-91, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Joly, A., Meier, L., Chastaing, G., Gailhard, J., Martinet, C., 2016, Validation de la méthode des analogues en France pour un climat non stationnaire. Rapport interne EDF, 6125-3019-2016-14836-FR.

Kuentz, A.: Un siècle de variabilité hydro-climatique sur le bassin de la Durance: recherches historiques et reconstitutions, Thèse de doctorat, AgroParisTech, Paris, France, 2013.

Kuentz, A., Mathevet, T., Gailhard, J., & Hingray, B. (2015). Building long-term and high spatio-temporal resolution precipitation and air temperature reanalyses by mixing local observations and global atmospheric reanalyses: the ANATEM method. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 12(1), 311-361.

Mathevet, T., Gailhard, J., Gottardi, F., Nemoz, B., 2017. Long-term analyses of snow dynamics within the french Alps on the 1900-2100 period. Analyses of historical snow water equivalent observations, modelisations and projections of a hundred of snow courses. American Geophysical Union, Fall Meeting 2017, abstract #C13A-0936.

Mathevet T., Gailhard, J., Gottardi, F., 2017. Analyse des tendances hydrométéorologiques passées et futures du haut bassin versant de l'Arc (Haute Maurienne): Impacts quantitatifs sur la neige. Présentation aux journées nivo-glacio de la SHF, Grenoble.

Magagna D., Hidalgo González I., Bidoglio G., Peteves S., Adamovic M., Bisselink B., De Felice M., De Roo A., Dorati C., Ganora D., Medarac H., Pistocchi A., Van De Bund W. and Vanham D., 2019. Water – Energy Nexus in Europe, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-03385-1, doi: 10.2760/968197, JRC115853.

Rouhier, L., Le Lay, M., Garavaglia, F., Le Moine, N., Hendrickx, F., Monteil, C., and Ribstein, P, 2017. Impact of mesoscale spatial variability of climatic inputs and parameters on the hydrological response, Journal of Hydrology, 553, 13–25.

Thebault, C., 2019. Hydrologie nivale dans le Sud-Est de la France (Mercantour). Rapport de stage (06 à 08/2019), Polytech Nice-Sophia, EDF-DTG, 40p. 1

Copyright EDF - 10/04/2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation

Page d'approbation

Scenarii de débit et de neige sur la période 1900-2100 dans le Parc National du Mercantour

Réf. : H-44200966-2020-000001 Indice : A Date : 14/04/2020 Accessibilité : Libre

Rédacteur(s) :

- MATHEVET Thibault - 10/04/2020

Vérificateur(s) :

- VALERY Audrey - 10/04/2020

Approbateur(s) :

- CARANTA Thierry - 14/04/2020

EDF
SA au capital de 924 433 331 euros
552 081 317 R.C.S. Paris
Le groupe EDF est certifié ISO 14001
www.edf.com

© EDF -2020. Ce document est la propriété d'EDF. Toute communication, reproduction, publication, même partielle, est interdite sauf autorisation.