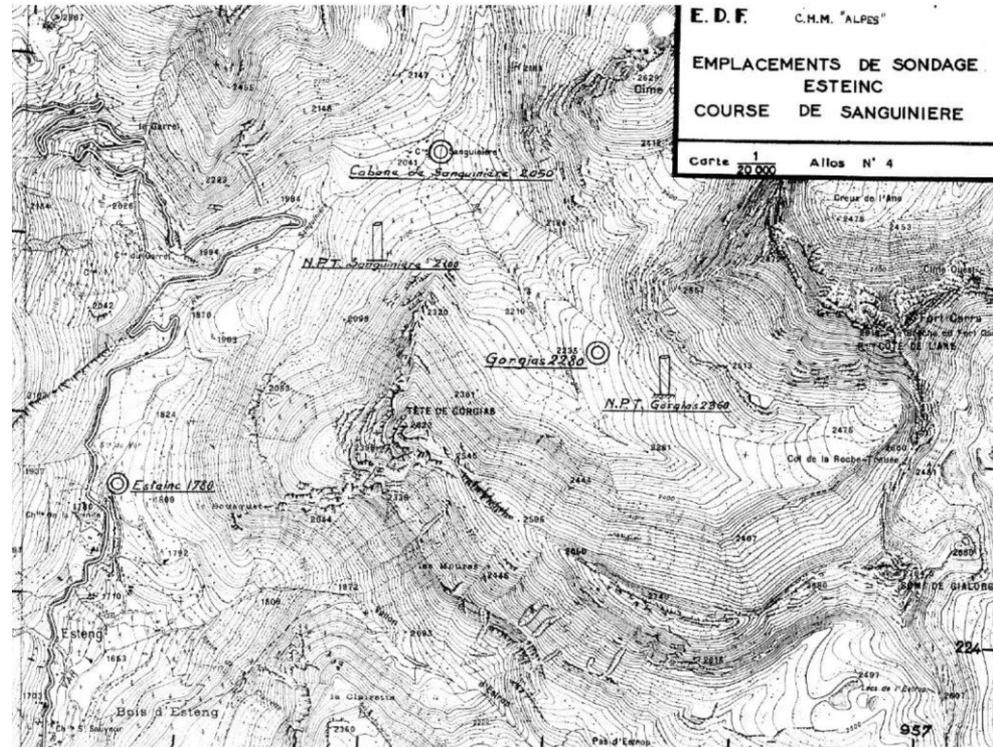


Reconstruction long terme (1900-2100) de la valeur en eau de la neige et de l'hydrologie de bassins versants du Parc national du Mercantour



Ancien N.P.T. Chastillon



T. Mathevet¹, C. Thebault², J. Mansons³, M. Le Lay¹, A. Valery¹, A. Brenot¹, J. Gailhard¹

thibault.mathevet@edf.fr

1 : EDF DTG, Grenoble,

2 : PolytechNice Sophia, Nice

3 : Parc national du Mercantour, Nice



Thématiques abordées dans cette étude

- **Contexte :**

- En **montagne**, évolution observée et attendue du régime hydrologique des bassins versant et du régime d'enneigement
- Impacts majeurs sur la **faune, la flore** et les milieux, ...
- Impacts majeurs sur l'**hydroélectricité**, l'optimisation de la production, ...
- Contexte climatique méditerranéen : « **hotspot** » du changement climatique ? ;

- **Objectifs :**

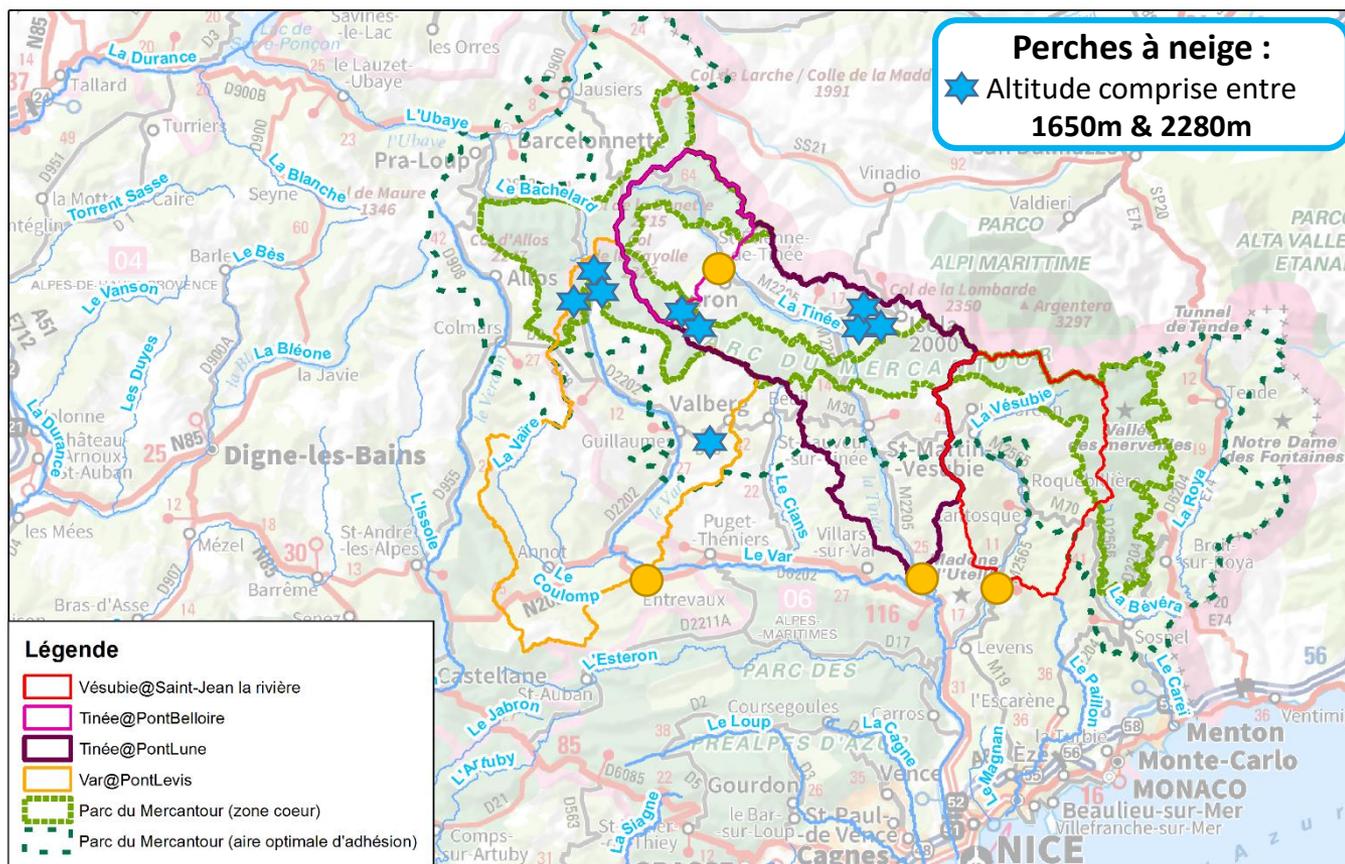
- Caractérisation de la **variabilité hydrométéorologique** passée (1900-2020) et **future** (2020-2100) sur :
 - Débits, et signatures hydrologiques ;
 - Équivalent en eau de la neige (EEN), et signatures nivales ;

- **Comment :**

- Combinaison « classique » d'**observations historiques, de modèles et de projections climatiques** (GIEC, CMIP5)
- Même chaîne de modélisation que celle utilisée pour le parc d'aménagements hydroélectriques d'EDF

Matériel et méthodes

Région de l'étude et observations disponibles



Climatologie:

Réanalyse SPAZM (P & T) + observations locales, pdt journalier, 1 km², 1948 à 2018

Hydrologie & Neige :

- 4 bassins versants jaugés (Q), pdt journalier, durée et
- ★ qualité variable

9 perches à neige (H, d, EEN), observations très discontinues (quelques décennies entre 1950 et aujourd'hui), 4 à 5 mesures par an

Matériel et méthodes

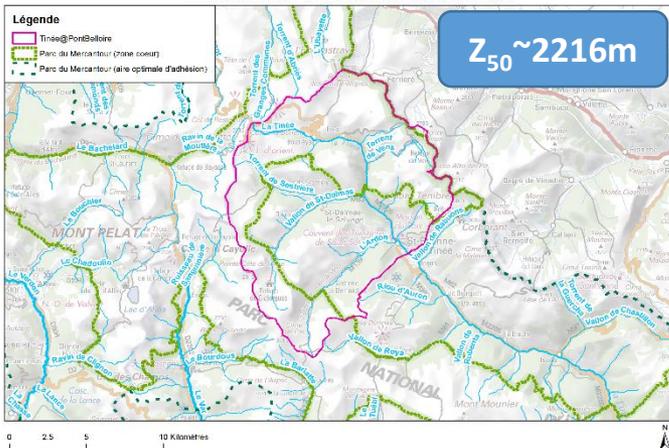
Région de l'étude et observations disponibles

Tinée : BV
+ montagneux

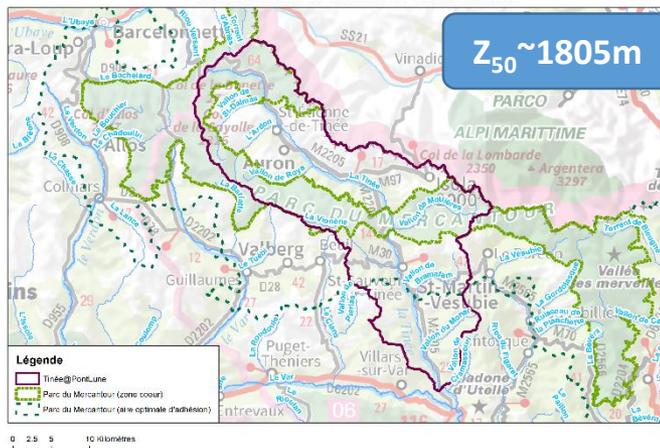


● 4 bassins versants :
170 to 700 km²
Altitude entre:
300m and 3000m
Altitude médiane
entre: 1400m and
2200m

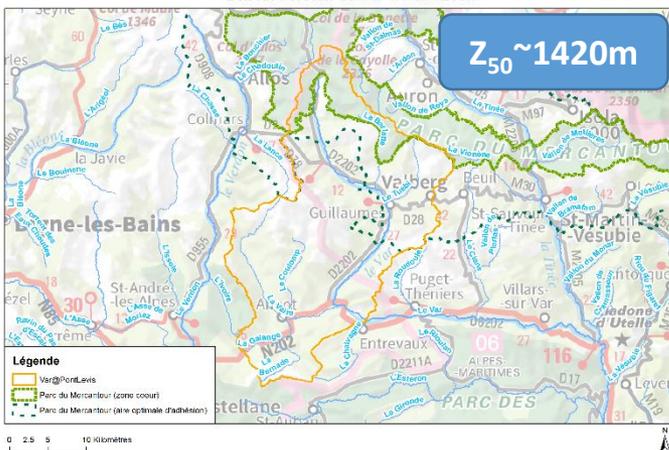
Bassin versant de la Tinée à Pont de Belleoire



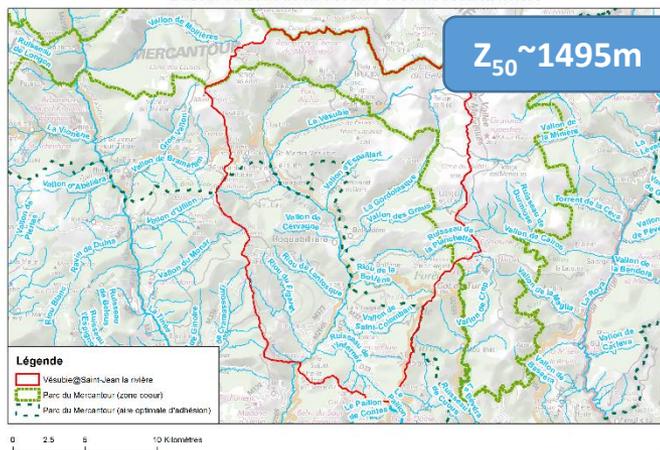
Bassin versant de la Tinée à Pont de la Lune



Bassin versant du Var à Pont Levis

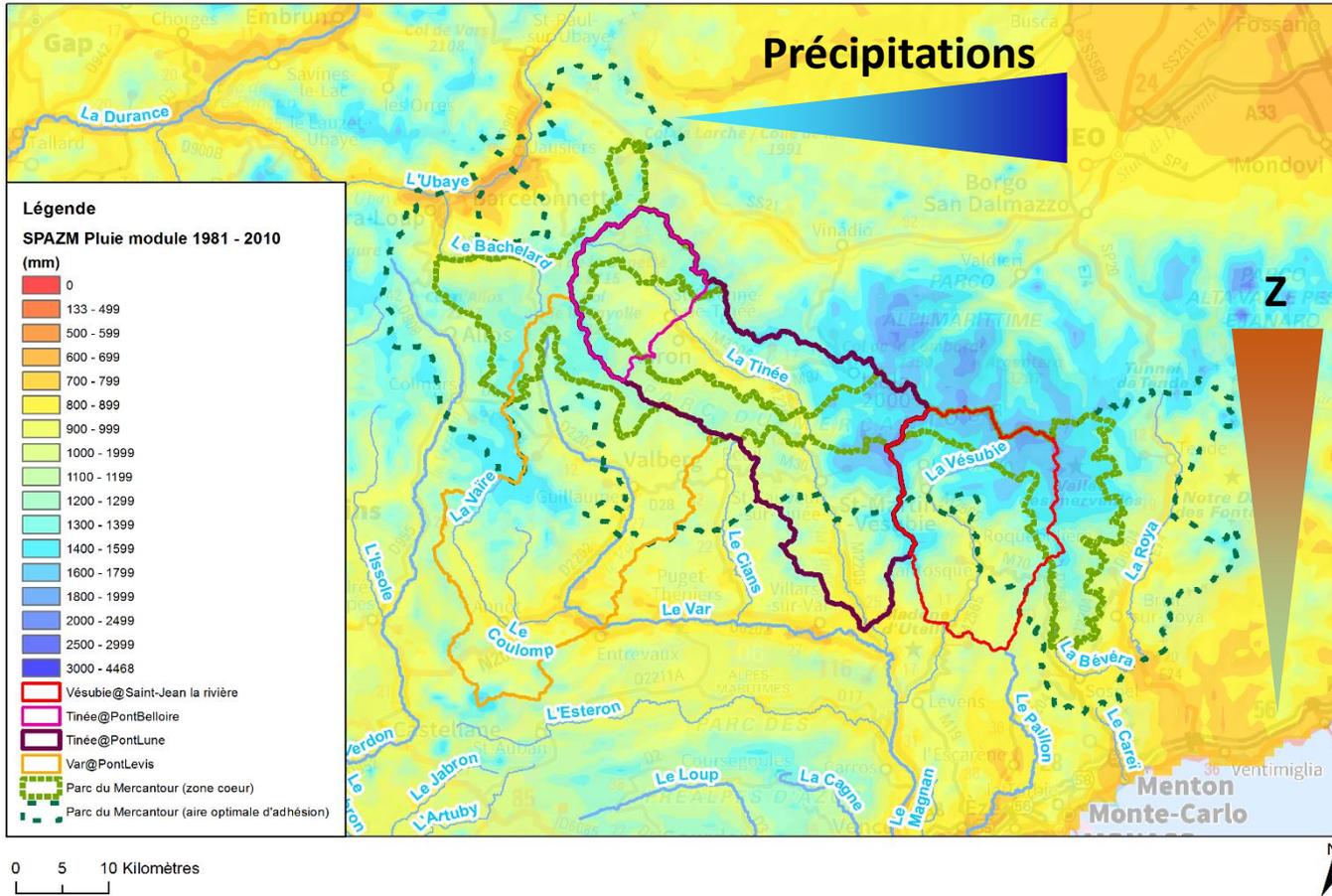


Bassin versant de la Vésubie à Saint-Jean la rivière



Matériel et méthodes

Région de l'étude et observations disponibles



Gradients
« climatiques » :
Variabilité E/O des
précipitations +
variabilité N/S des
altitudes

(Réanalyses climatologiques SPAZM, Gottardi et al., JOH, 2012)

Matériel et méthodes

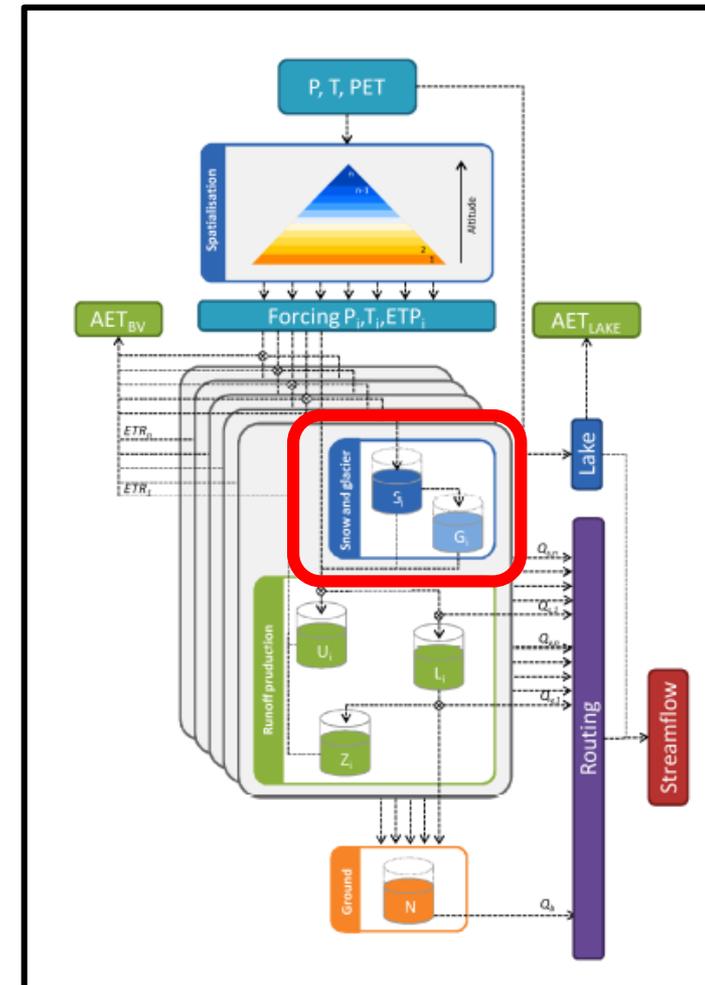
Intérêts de la neige pour EDF

- **En France, les processus nivaux sont majeurs pour la production Hydroélectrique :**
 - Les principaux barrages sont situés dans les Alpes, Pyrénées et Massif Central ;
 - Altitude moyenne des bassins versants d'alimentation: entre 1800m (Alpes du sud) et 2400m (Alpes du Nord) ;
- **Prévision et optimisation de la production hydroélectrique :**
 - Développement d'un **réseau d'observation de la neige depuis ~1950** (hauteur, densité, EEN). Courses à la journée réalisées par des observateur (généralement 3 à 4 points de mesure maxi à partir d'un même point de départ) ;
 - **Très grande hétérogénéité des observations** (durée, densité spatiale, fréquence de mesure, période de mesurer) ;
 - Action de **sauvetage des données (data rescue)** depuis 2015 et numérisation d'une grande quantité d'informations historiques (fiches d'observations manuscrites) :
 - Réseau ayant jusqu'à 600 perches à neige → pas toutes trouvées à ce jour ;
 - Environ 350 perches à neige ont été numérisées ;
 - **Depuis ~1980, mesures automatiques de la neige** au niveau de certaines perches et réduction de la densité du réseau d'observation
 - **Astreinte hydrométéorologique opérationnelle (7j/7j, 24h/24h)**, utilisant les observations temps réel de la neige et des techniques d'assimilations de données pour nos **prévisions de fonte** en zone de montagne ;

Matériel et méthodes

Modélisation hydrologique et nivale

- **MORDOR SD modèle hydrologique conceptuel (Garavaglia et al., 2017) :**
 - Principaux processus hydrologique et nivaux
 - Discrétisation verticale du bassin versant par bande d'altitude
 - Données d'entrée : précipitation et température moyenne journalière à l'échelle du bassin versant, de 1948 à 2018 ;
 - Routine nivale : paramètres calés à partir d'observations de EEN, si disponibles ;
 - Routine hydrologique : paramètres calés à partir d'observations de débits, si disponibles ;
- **Modélisation hydrologique et nivale:**
 - **Simulations journalières continues de EEN & Q du 01/01/1949 au 31/12/2018 (70 ans) ;**
 - EEN : performances statistiques bonnes, bonne représentation du régime d'enneigement ;
 - Q : performances statistiques bonnes à très bonne, bonne représentation du régime hydrologique, des crues et étiages courants ;

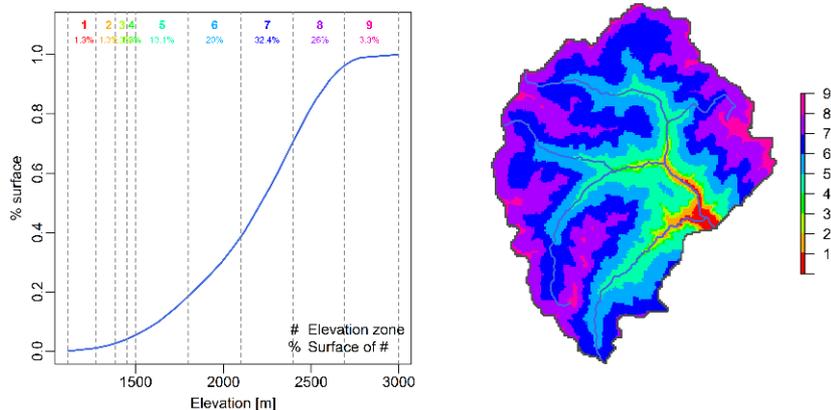


Matériel et méthodes

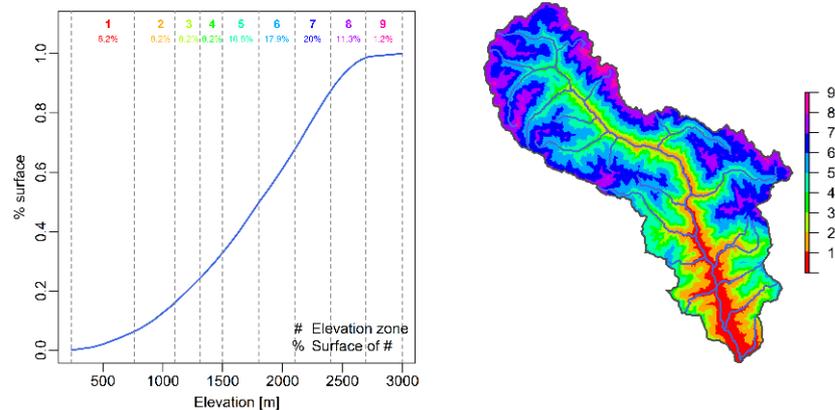
Découpage par bandes d'altitude

- **Bandes d'altitudes homogènes afin de pouvoir comparer les BV :**

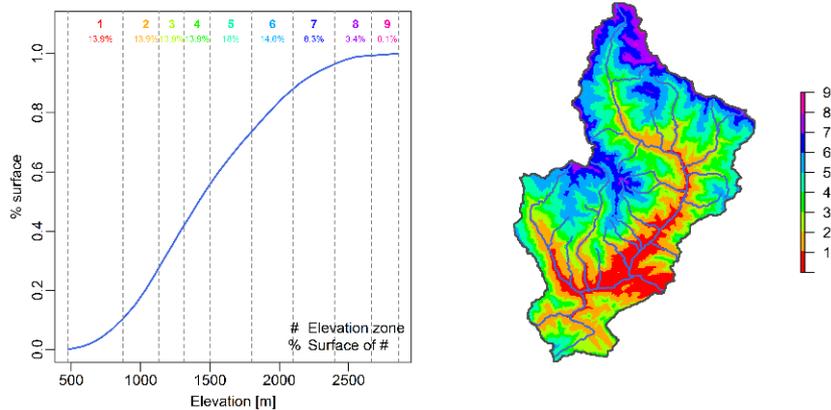
Tinée@PontBelloire



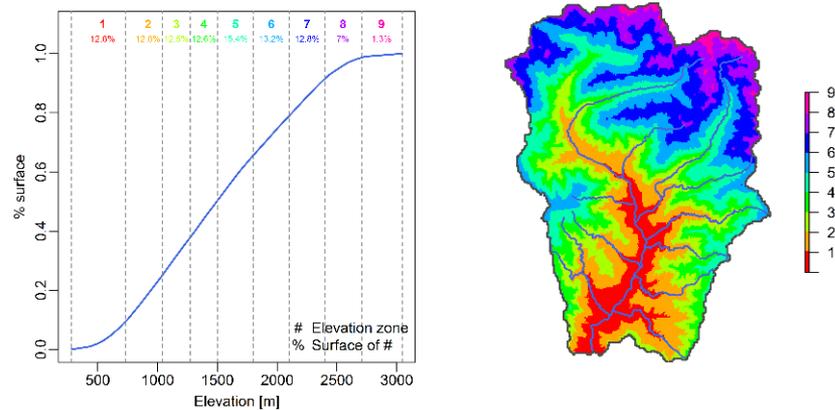
Tinée@PontLune



Var@PontLevis



Vésubie@StJeanRivière



Matériel et méthodes

Reconstructions climatiques : Passé (jusqu'en 1900) & Futur (jusqu'en 2100)

- **Reconstitution passées : méthode ANATEM**

- Mélange statistique d'observations locales/régionales et réanalyses climatologiques de grande échelle ;
- Séries P & T, journalières, jusqu'en 1900, à l'échelle locale (perche à neige) ou du bassin versant ;
- Méthode développée à EDF sur le bassin versant de la Durance et utilisée pour les études opérationnelles et recherche (Polytech Nice) ;

- **Scenarii en climat futur :**

- CMIP5, 17 modèles météorologiques ;
- RCP4.5 (+ 4.5 W/m²) & RCP8.5 (+ 8.5 W/m²) ;
- Séries P & T, journalières, jusqu'en 2099, à l'échelle locale (perche à neige) ou du bassin versant (méthode des analogues) ;

Hydrol. Earth Syst. Sci., 18, 2117–2136, 2015
www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/2117/2015/
doi:10.5194/hess-18-2117-2015
© Author(s) 2015. CC Attribution 3.0 License.



Building long-term and high spatio-temporal resolution precipitation and air temperature reanalyses by mixing local observations and global atmospheric reanalyses: the ANATEM model

A. Koenig^{1,2}, T. Minkov^{1,2}, J. Collier¹, and B. Hingray^{1,3}
¹Electronique de France, DTG, BP 41, 38040 Grenoble CEDEX 09, France
²Centre Hydrosciences and Department Research Chair (DRACH), 1 rue Pasteur-Gilles de Gennes, CS 10030, 97491 Antenne CEDEX, France
³CNRS, LESER, 5564, Grenoble, 38000, France
⁴Université Grenoble Alpes, LTHE, UMR 5564, Grenoble, 38000, France
⁵University of Swedish Environmental and Hydrological Institute, 401 76 Stockholm, Sweden

Correspondence to: A. Koenig (anna.koenig@edf.com)
Received: 2 December 2014 – Published in Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.: 12 January 2015
Revised: 10 May 2015 – Accepted: 13 May 2015 – Published: 15 June 2015

Abstract. Efforts to improve the understanding of past climate or hydrology variability have received a great deal of attention in various fields of geoscience such as paleoclimatology, dendrochronology, sedimentology and hydrology. Based on different proxies, such as tree-ring maximum densities, different kinds of climatic or hydrologic variables at different spatio-temporal scales and resolutions. When reconstructing climate or hydrology, many studies have been devoted to characterizing variability trends or trends using observed time series representing different regions or climates of the world. However, in hydrology, these studies have usually been limited to short temporal scales (usually a few decades, and more rarely a century) because they require observed time series (which suffer from a limited spatio-temporal domain).

The paper introduces ANATEM, a method that combines local observations and large-scale climate information (such as the IPCC Reanalysis) to build long-term probabilistic air temperature and precipitation time series with a high spatio-temporal resolution (1 day and a few km²). ANATEM was tested on the reconstruction of air temperature and precipitation time series of 25 weather stations in the Occitanie River basin, in the French Alps. Based on a multi-scales and multi-scale diagnosis, the results show that ANATEM improves the performance of classical statistical models –

especially concerning spatial heterogeneity – while providing an original representation of uncertainties which are considered by atmospheric circulation patterns. The ANATEM model has been also evaluated for the regional scale against independent long-term time series and was able to capture regional low-frequency variability over more than a century (1850–2010).

1 Introduction

Multi-decadal variations of climate variables, intrinsically arising from the chaotic and non-linear nature of the climate system, have long been observed for a number of time as well as local-scale climate features (Stahler, 1976).

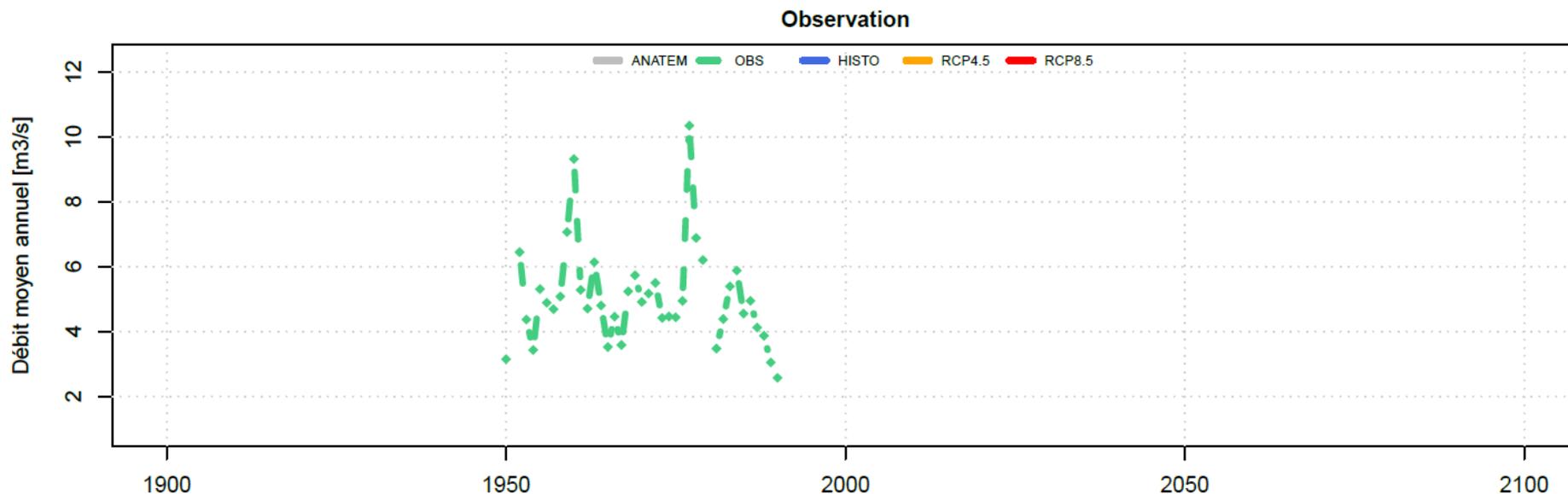
In a non-stochastic climate, multi-decadal variations can remain substantially above or below the long-term trend. In climate projections for the coming decades, they often lead to large uncertainties (e.g. Hawkins and Sutton, 2009; Deser et al., 2012). For precipitation or hydro-meteorological variables such as streamflow, these uncertainties can even impact uncertainties due to climate models (e.g. Tetter and Ben, 2011; Lefevre et al., 2014).

Undoubtedly, most climate change impact studies will fail to account for them. For example, projected climate

Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

Matériel et méthodes

Simulation hydrologiques

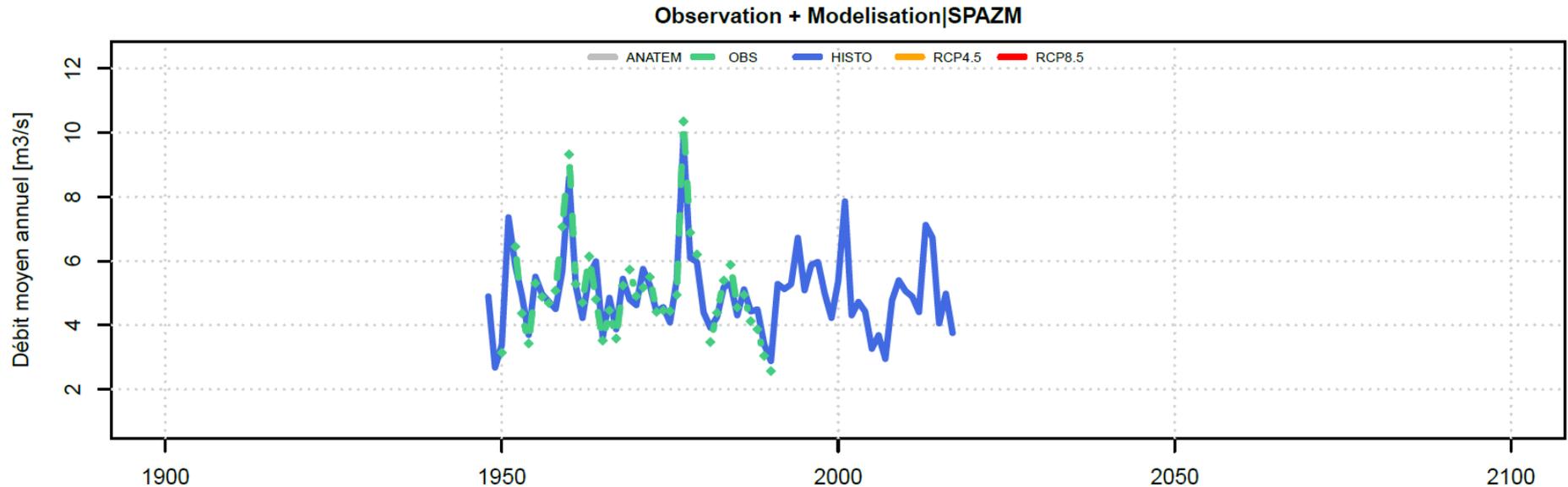


Observations :

Série journalière sur
quelques décennies
Agrégation au pas de
temps annuel

Matériel et méthodes

Simulation hydrologiques

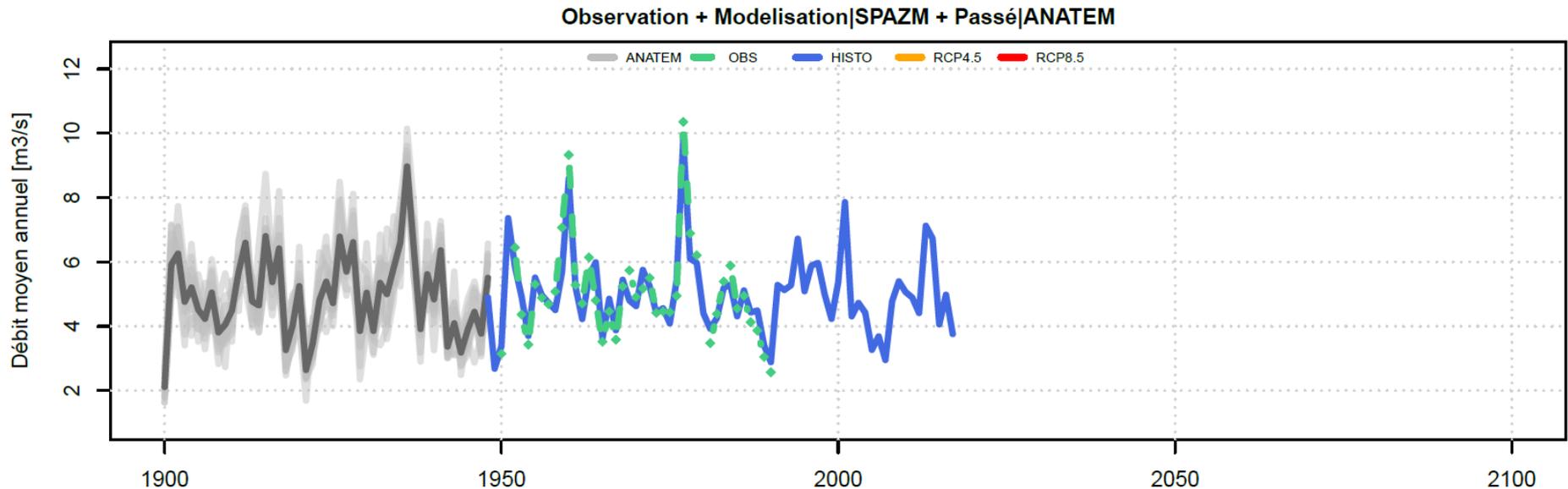


Simulations :

Séries journalières continues du
01/01/1948 au 31/12/2018, basée
sur P&T observées

Matériel et méthodes

Simulation hydrologiques

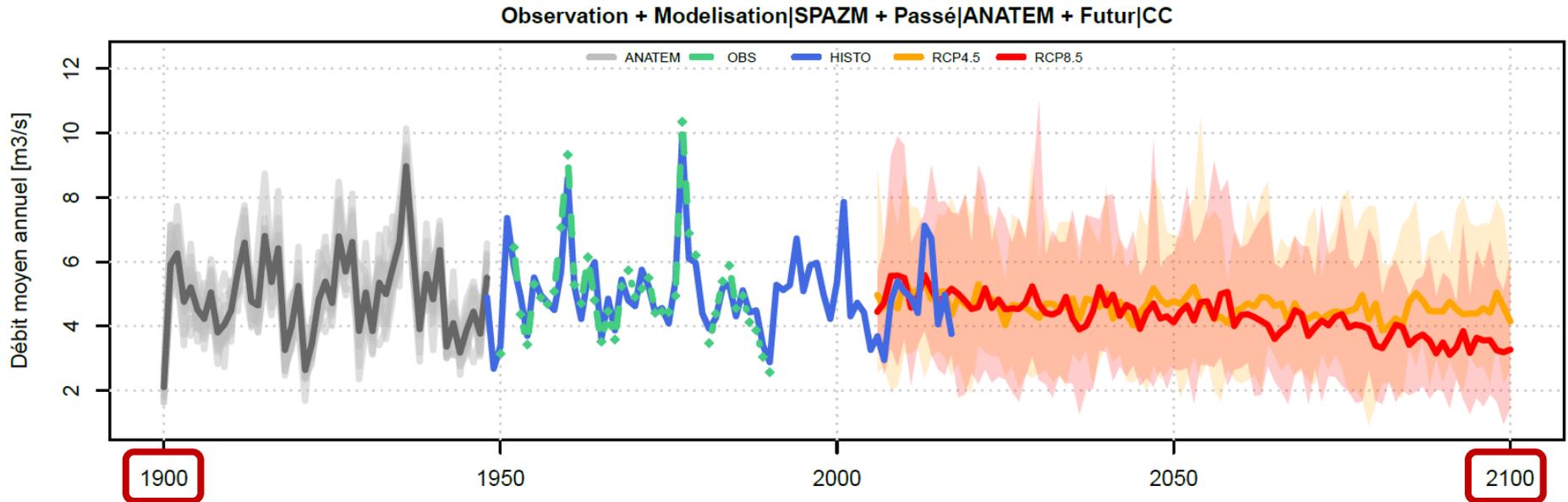


Reconstitutions passées :

Séries journalières continues
du 01/01/1901 au
31/12/1947, basée sur P&T
reconstituées (ANATEM,
Kuentz et al., HESS, 2015).

Matériel et méthodes

Simulation hydrologiques

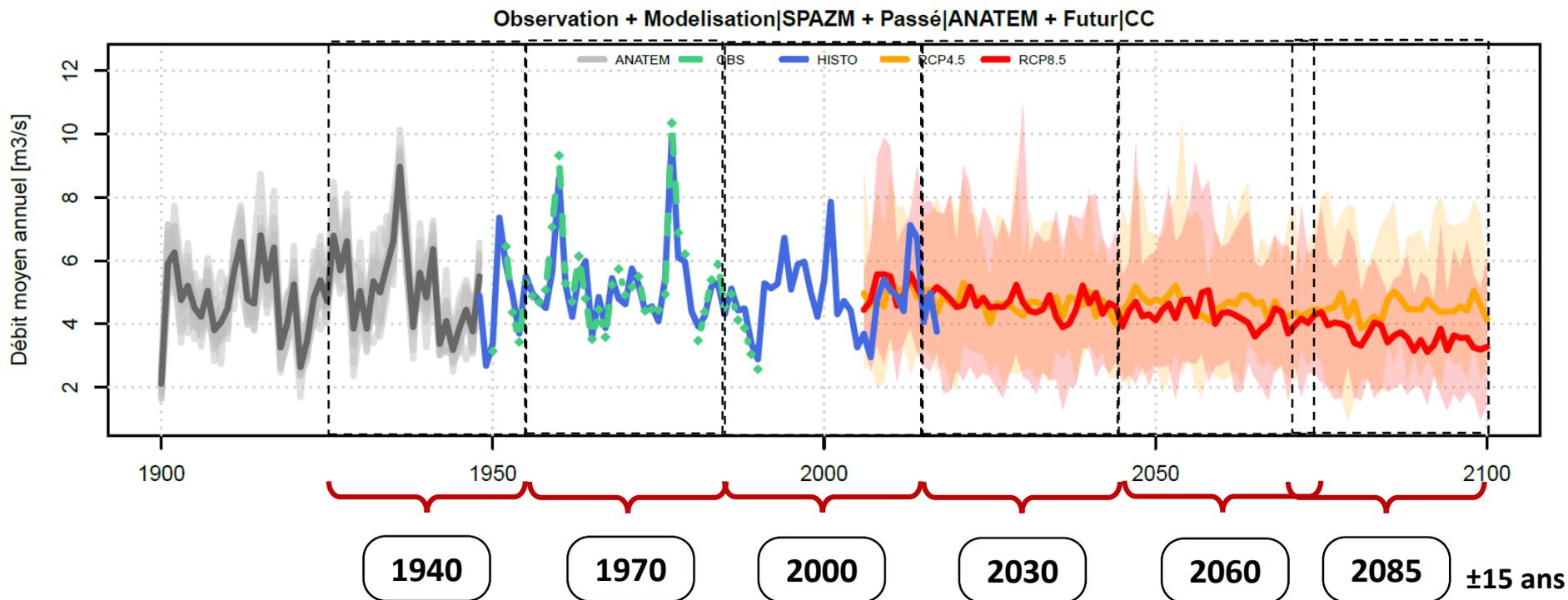


Future projection :

Séries journalières continues jusqu'au 31/12/2099, basée sur P&T projetées (GIEC CMIP5 ; 17 GCM/RCM, RCP 4.5 & 8.5 & désagrégation spatiale)

Résultats

Tranches temporelles



Tranches temporelles de 30 ans:

- Permettre une analyse statistique un peu plus robuste (moyenne et variabilité) ;
- « 1940 », « 1970 », « 2000 », « 2030 », « 2060 », « 2085 » ± 15 years ;
- « 2000 » : conditions actuelles = période de référence ;

Résultats

Variables d'intérêt

- Signatures hydrologiques d'intérêt :
 - **Débit moyen annuel;**
 - **Régime hydrologique ;**

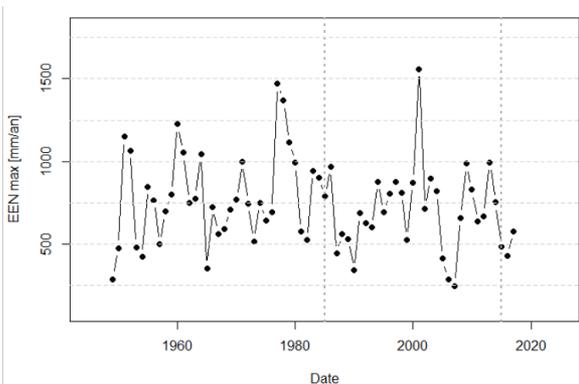
- Signatures nivologiques d'intérêt :
 - **Valeur maximale d'enneigement (EEN) ;**
 - **Régime d'enneigement ;**
 - Premier jour, dernier jour et durée de la saison nivale ;
 - Date de la valeur maximale d'enneigement ;
 - Analyses locales à l'échelle de la perche à neige ;
 - Analyses globale à l'échelle du bassin versant et/ou de la bande d'altitude ;

Résultats

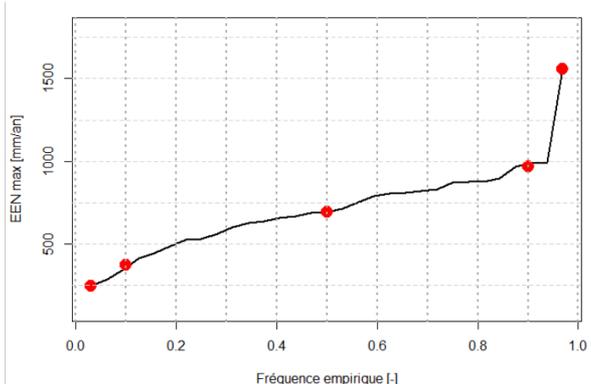
Canevas d'analyse

- **Pour chacune des périodes de 30 ans :**
 - Toujours la même couleur ;
 - On résume la variabilité des 30 valeurs par sa distribution statistique, représentée par un « boxplot » (boîte à moustaches)

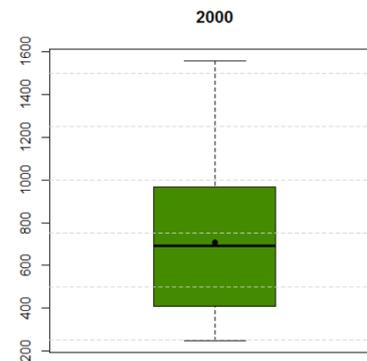
Série temporelle



Distribution



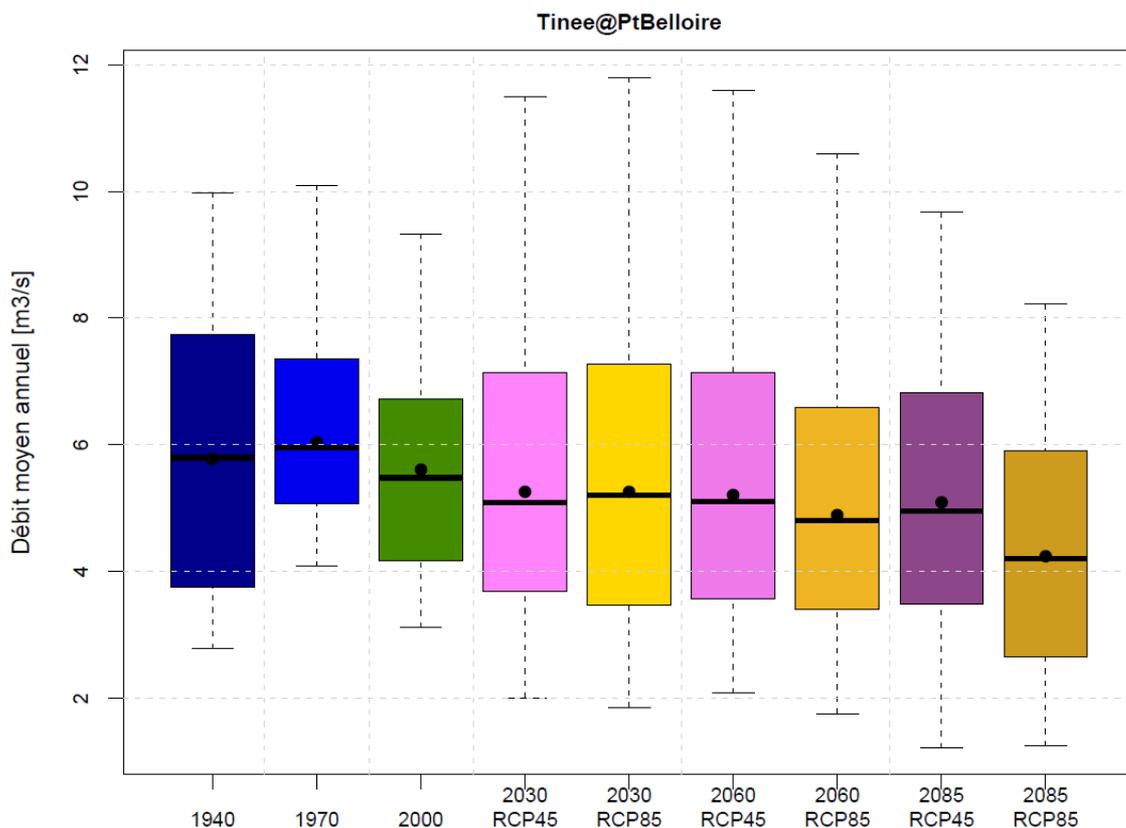
Boxplot



- On résume la saisonnalité d'une série temporelle sur une période par son régime (valeur médiane/moyenne pour chaque jour du 01/01 au 31/12)

Résultats

Débit moyen (Tinée@PtBelloire)



Boxplots : min, 10%, 50%, 90% quantiles, max

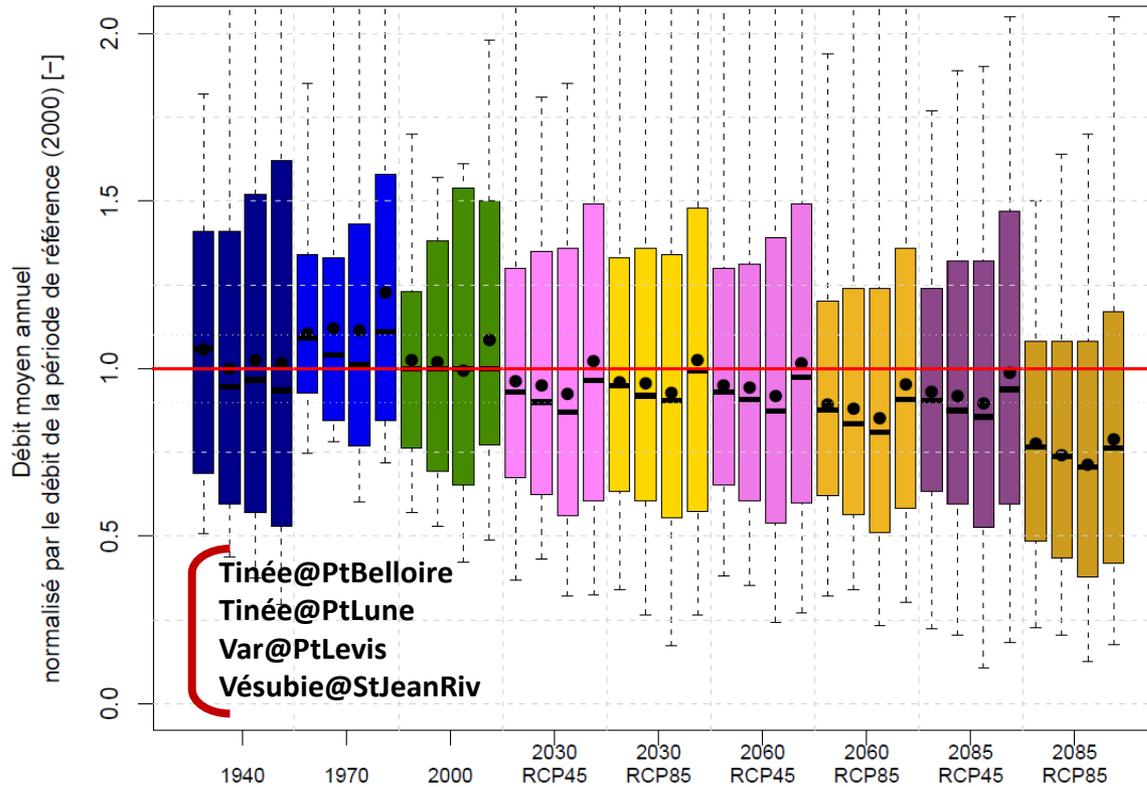
Débit moyen (\bar{Q})

- \searrow 10%, depuis \nearrow T (« 2000 » vs « 1970 ») ;
- \searrow 10% attendu dans le futur, par rapport à « 2000 », pour une majorité de scénarii CC et horizons temporels ;
- \searrow 25% attendu dans le futur, par rapport à « 2000 », pour RCP8.5 en fin de siècle ;

Résultats

Débit moyen (analyse régionale)

4 bassins versant dans le Mercantour (Alpes du Sud, France)



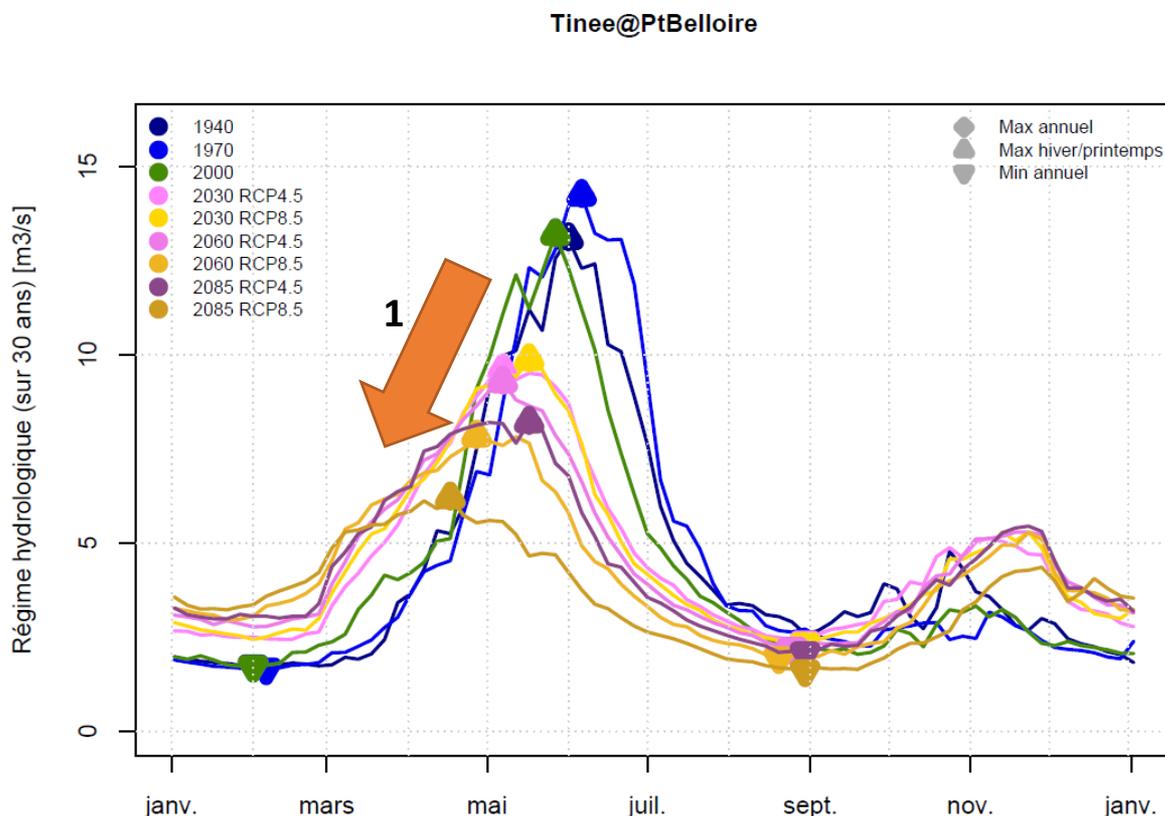
Boxplots : min, 10%, 50%, 90% quantiles, max

Débit moyen (\bar{Q})

- Relative consistance spatiale des phénomènes et des tendances

Résultats

Régime hydrologique (Tinée@PtBelloire)

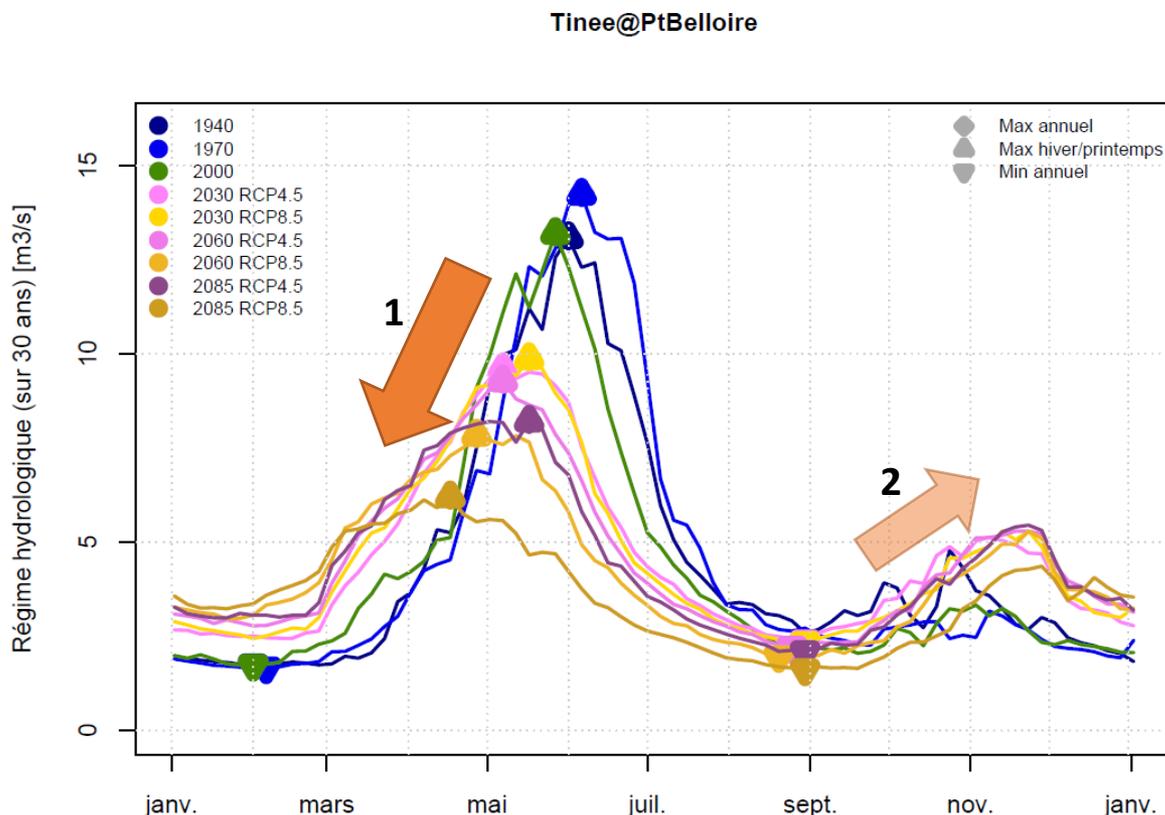


- Transition d'un régime nival à un régime pluvial:

1. ↘ de la crue de printemps et avancement de la période de crue de 4 à 6 semaines ;

Résultats

Régime hydrologique (Tinée@PtBelloire)

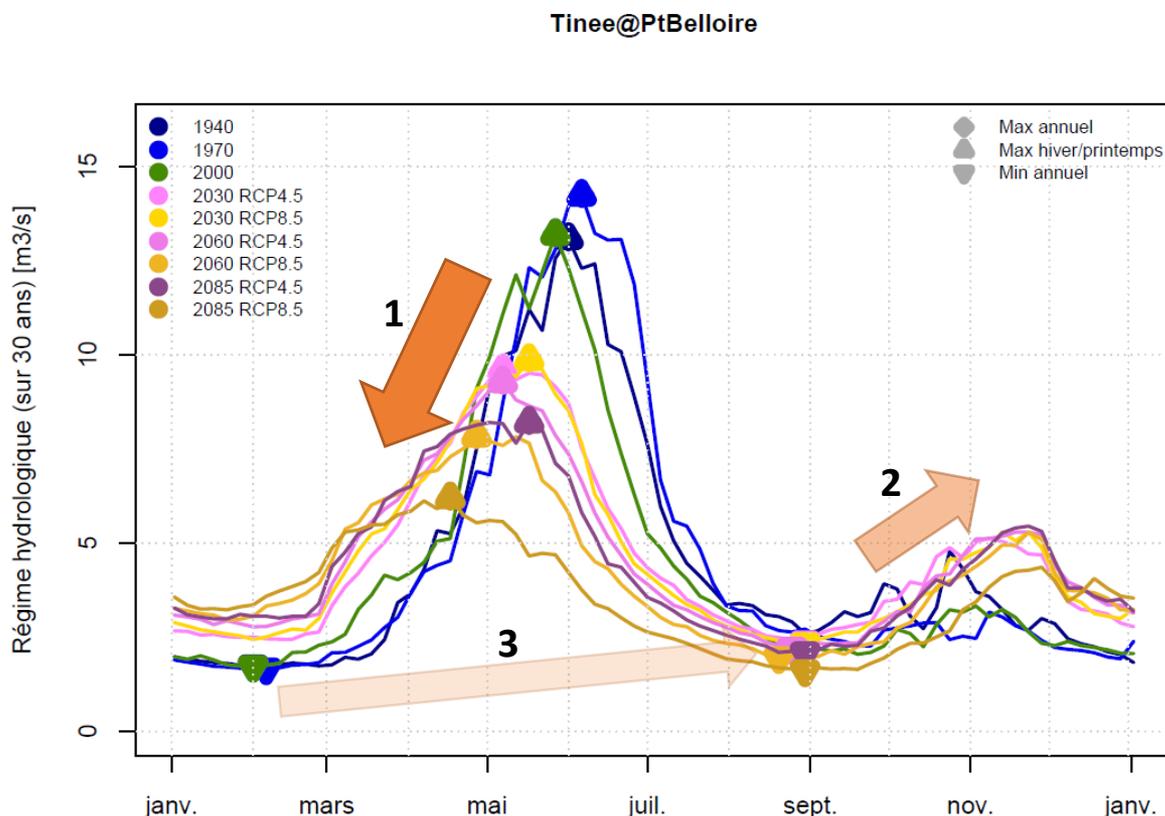


- **Transition d'un régime nival à un régime pluvial:**

1. **↘ de la crue de printemps** et **avancement** de la période de crue de 4 à 6 semaines ;
2. **↗ des crues d'automne** et **décalage** de la période de crues jusqu'en décembre ;

Résultats

Régime hydrologique (Tinée@PtBelloire)

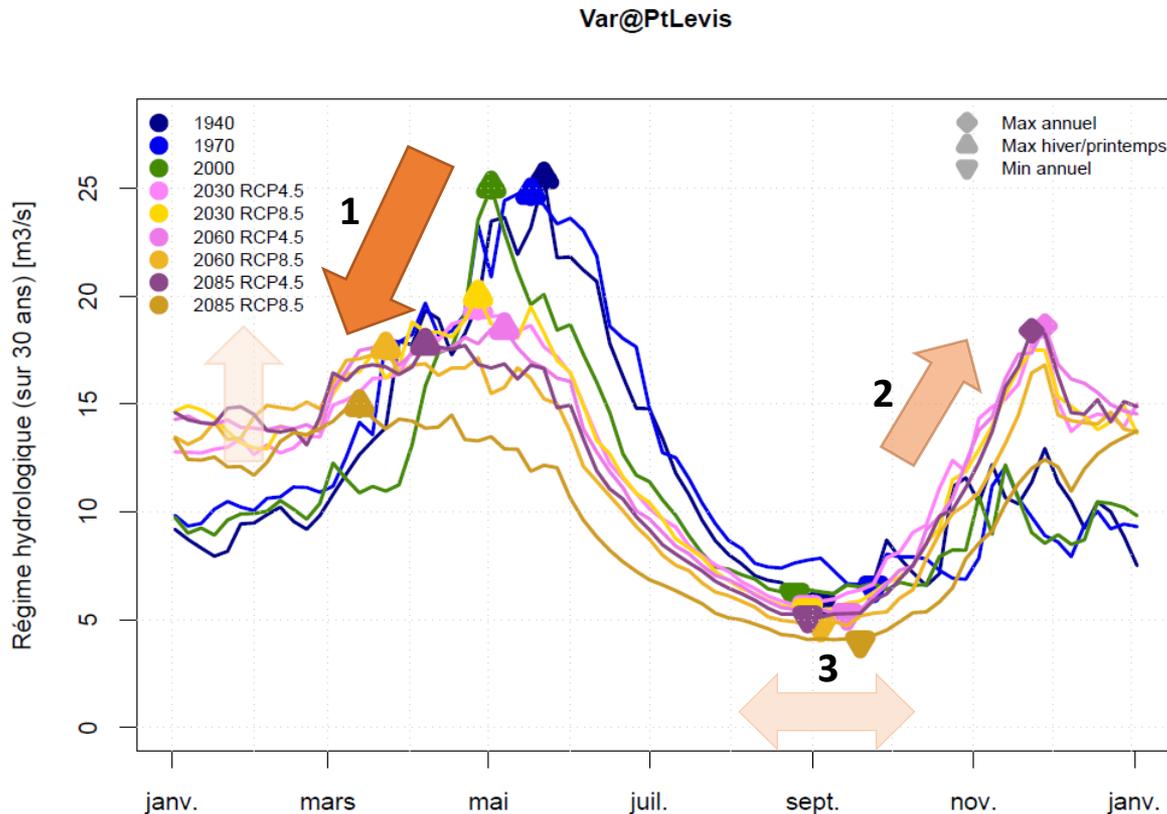


- **Transition d'un régime nival à un régime pluvial:**

1. ↘ de la crue de printemps et avancement de la période de crue de 4 à 6 semaines ;
2. ↗ des crues d'automne et décalage de la période de crues jusqu'en décembre ;
3. ↗ des débits d'hiver et décalage de l'étiage de l'hiver à l'automne ;

Résultats

Régime hydrologique (Var@PtLevis)



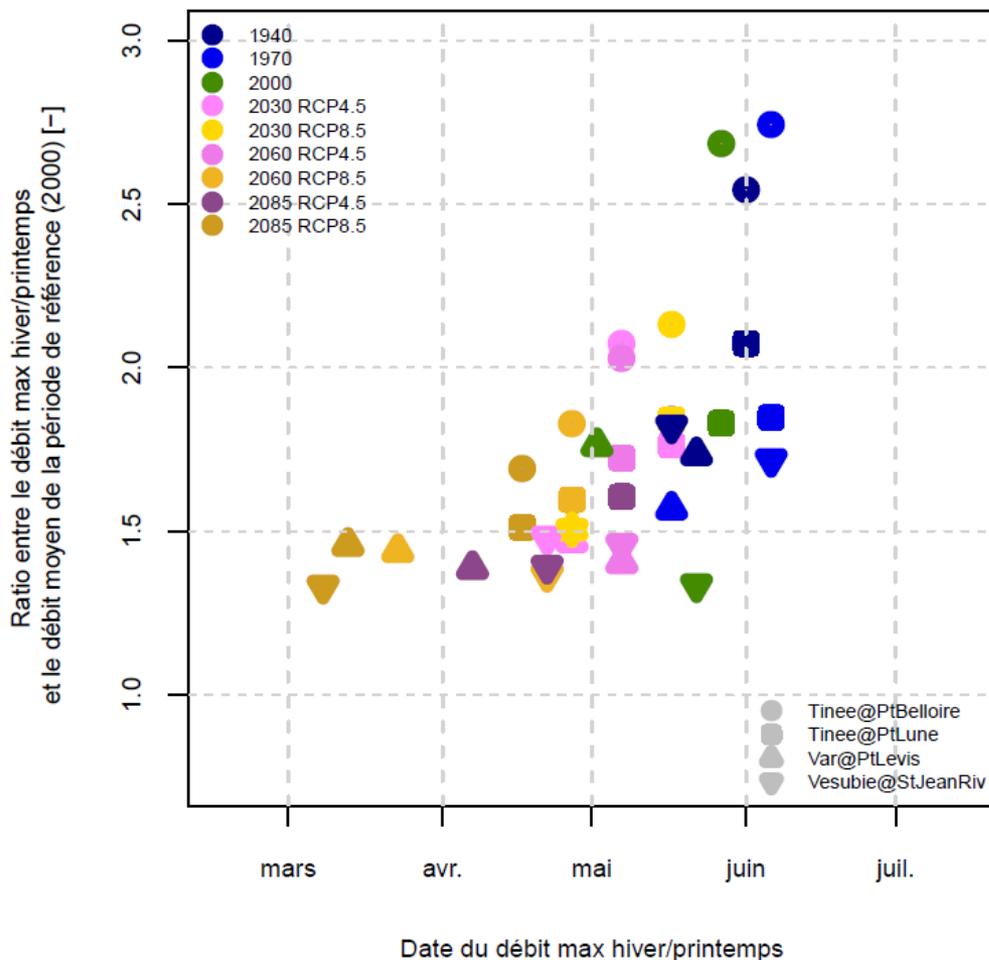
- **Transition d'un régime nivopluvial à un régime pluvial:**

1. **↘ de la crue de printemps** et **avancement** de la période de crue de 4 à 8 semaines ;
2. **↗ des crues d'automne** et **décalage** de la période de crues jusqu'en décembre ;
3. **↘ de l'étiage** à l'automne ;

Résultats

Régime hydrologique (régional)

4 bassins versants dans le Mercantour (Alpes du Sud, France)



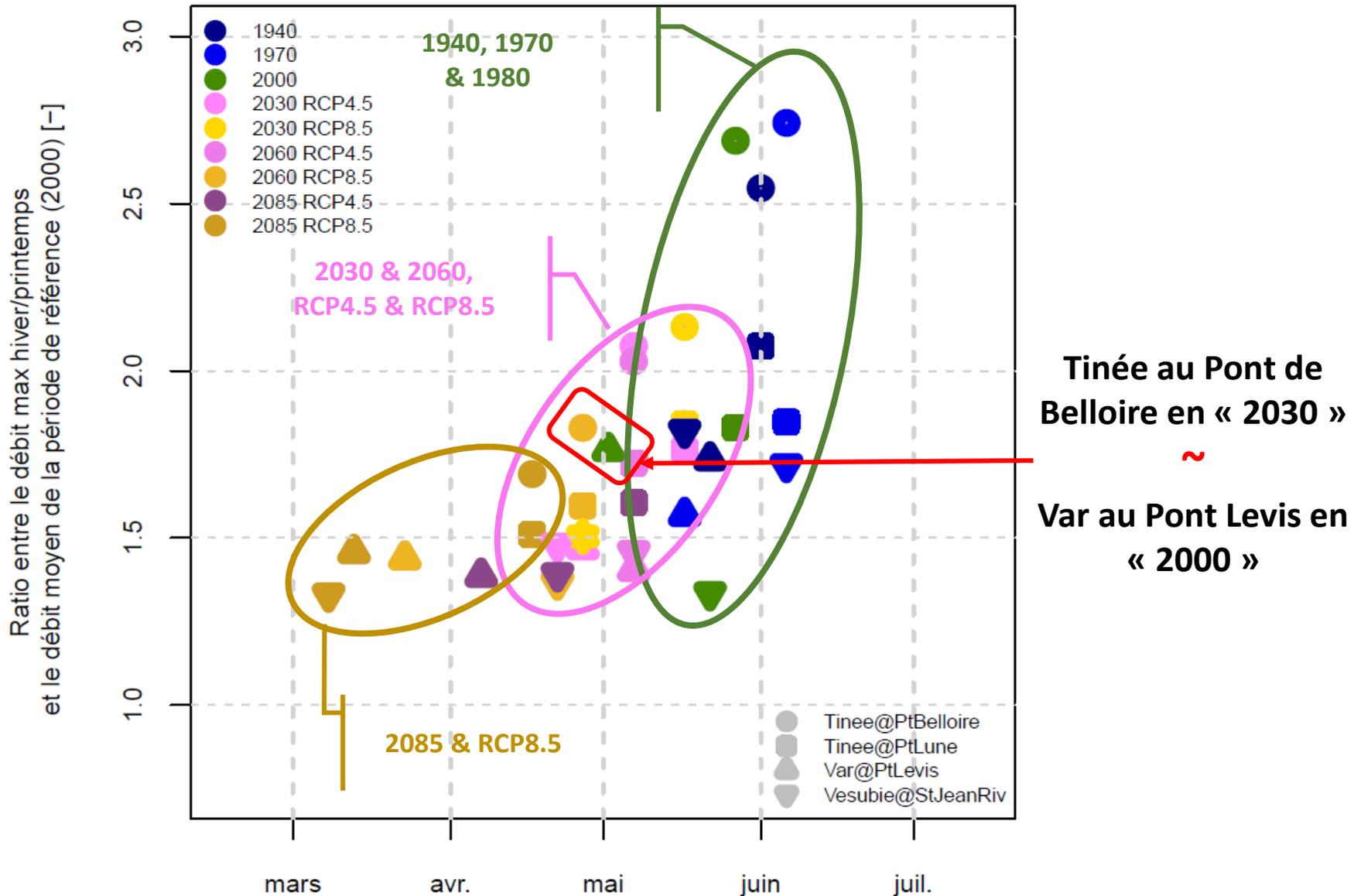
- Transition dans le futur de régime nivaux à pluvial (+ \searrow débit moyen):



Consistance spatiale

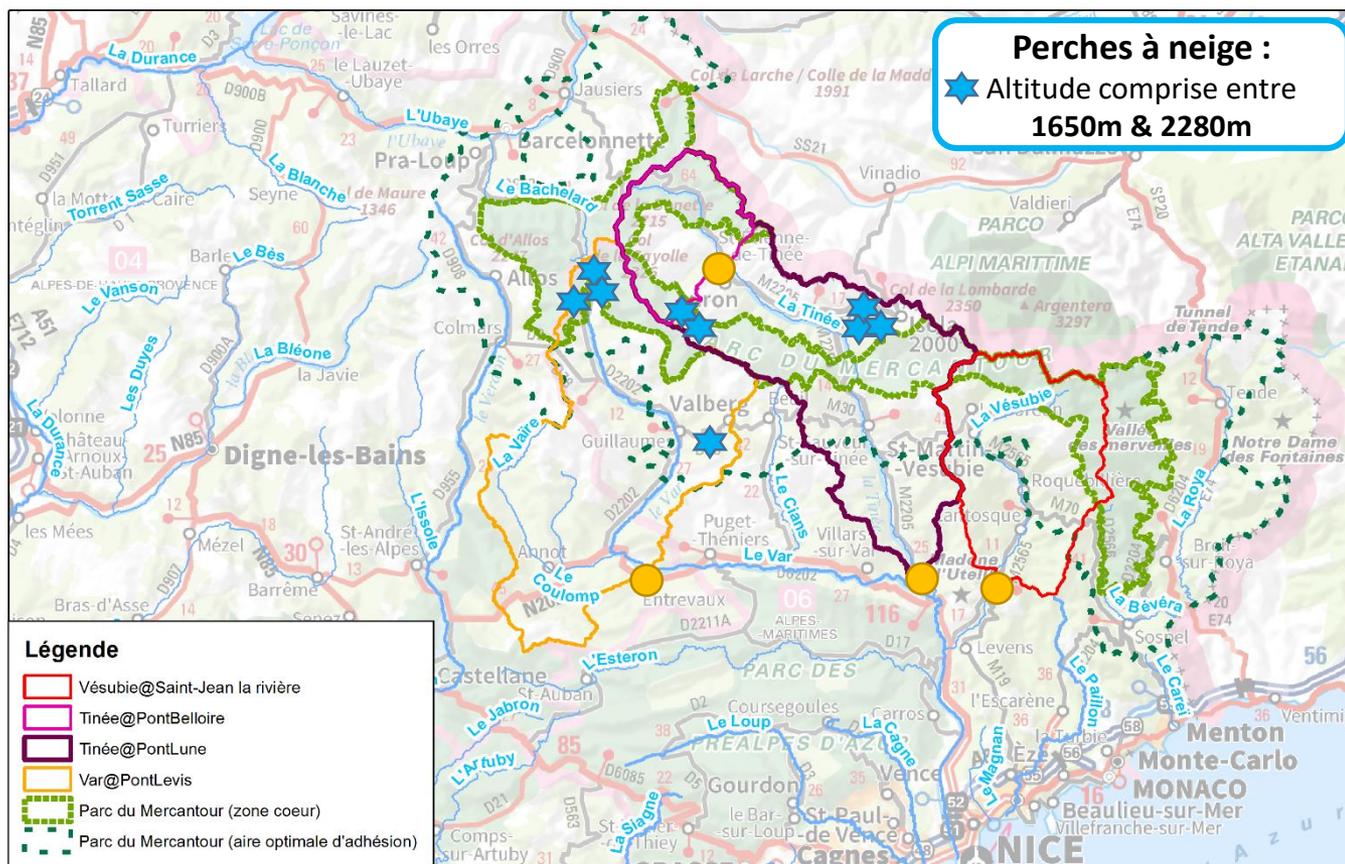
- Temps \approx \searrow altitude du bassin versant
 - L'état actuel du Var pourrait ressembler à l'état futur de la Tinée amont ?
 - **30 years \approx \searrow 600 m ?**

4 bassins versants dans le Mercantour (Alpes du Sud, France)



Matériel et méthodes

Région de l'étude et observations disponibles



Climatologie:

Réanalyse SPAZM (P & T) + observations locales, pdt journalier, 1 km², 1948 à 2018

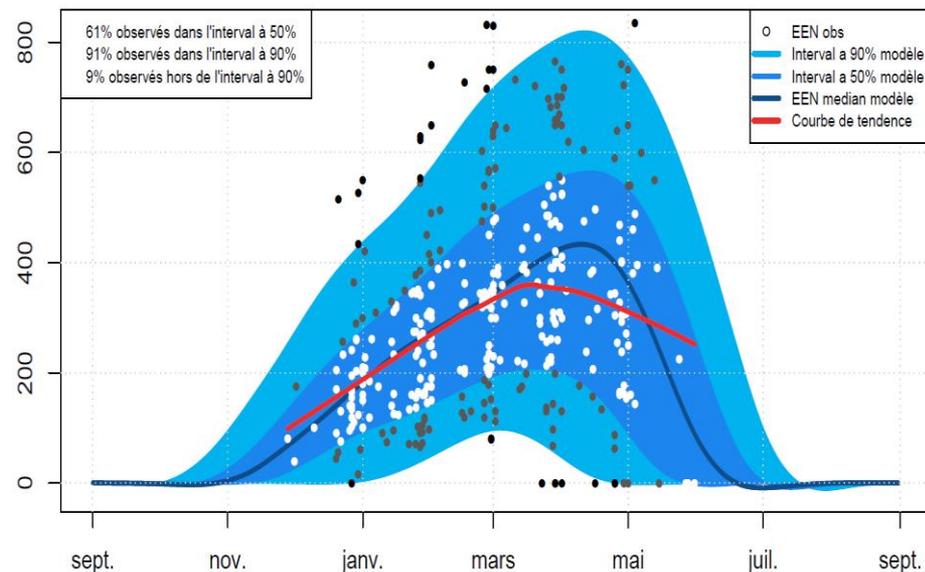
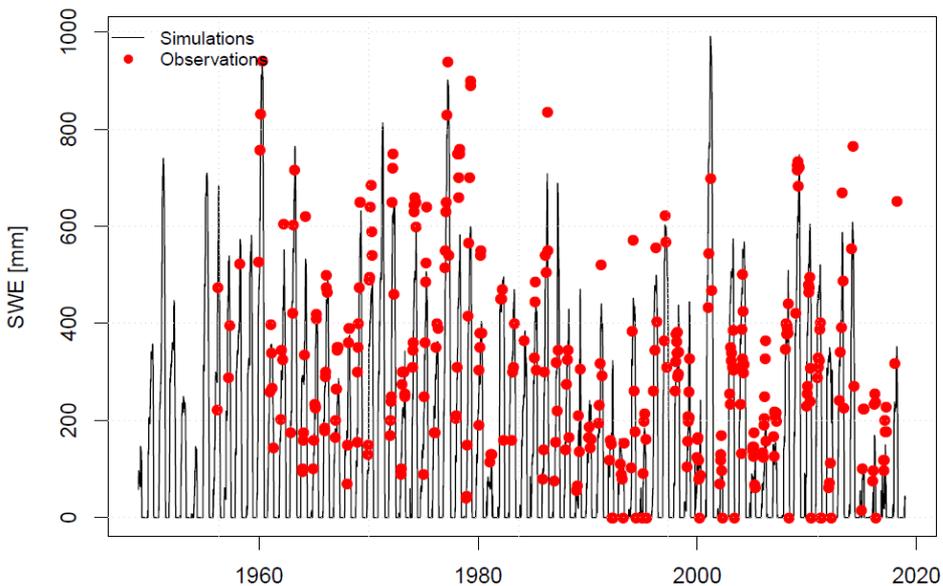
Hydrologie & Neige :

- 4 bassins versants jaugés (Q), pdt journalier, durée et
- ★ qualité variable

9 perches à neige (H, d, EEN), observations très discontinues (quelques décennies entre 1950 et aujourd'hui), 4 à 5 mesures par an

Résultats

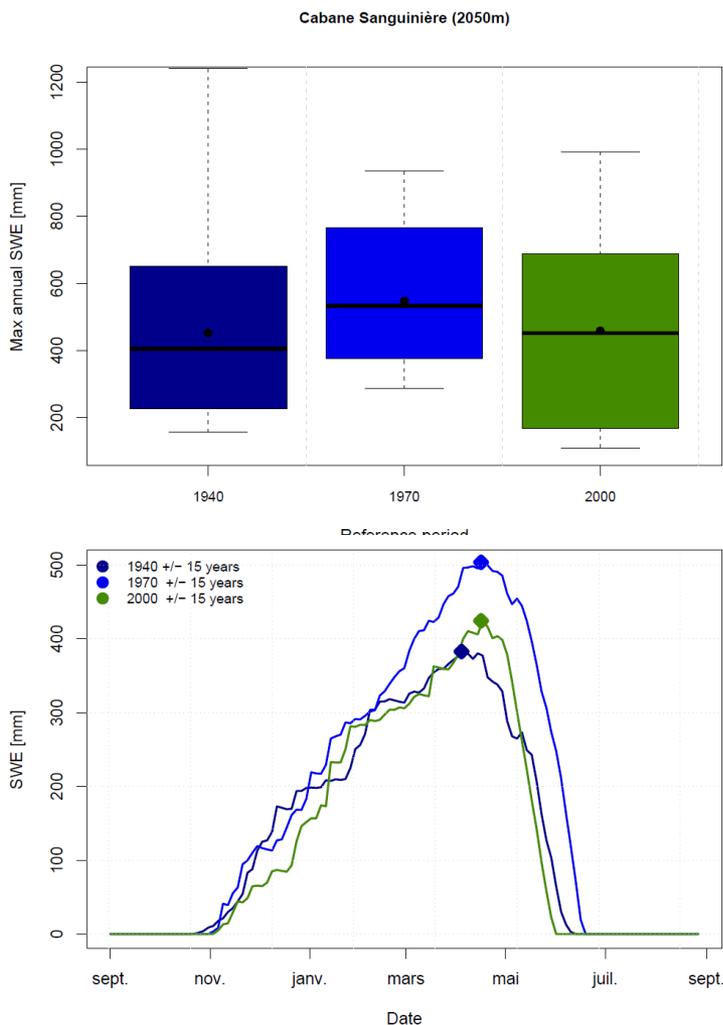
Neige : modélisation de l'EEN à la perche



- Performances des modèles acceptables ;
- Bonne corrélation ($EEN_{obs} | EEN_{mod}$)
- Bonne représentation du régime d'enneigement et de sa variabilité dans le temps

Résultats

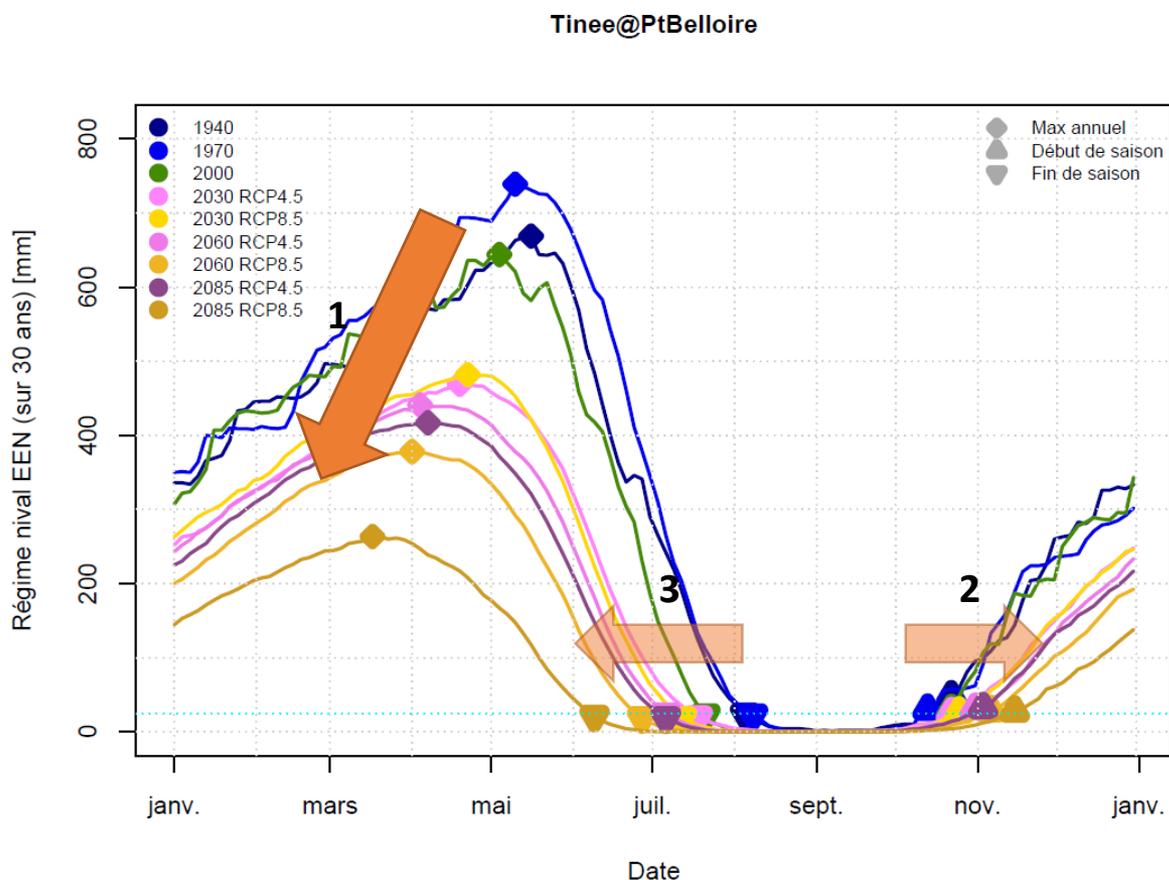
Neige : modélisation de l'EEN à la perche



- Variabilité de la valeur max de l'enneigement sur plusieurs décennies ;
- « 1970 » vs « 2000 » :
 - \searrow 15% de la valeur médiane ;
 - \searrow 50% du quantile 10% et de la valeur min : \nearrow variabilité de l'enneigement & années sèches ;
 - Débit de la saison nivale : + 10 days ;
 - Fin de la saison nivale : - 15 days ;

Résultats

Neige : modélisation de l'EEN à l'échelle du bassin versant

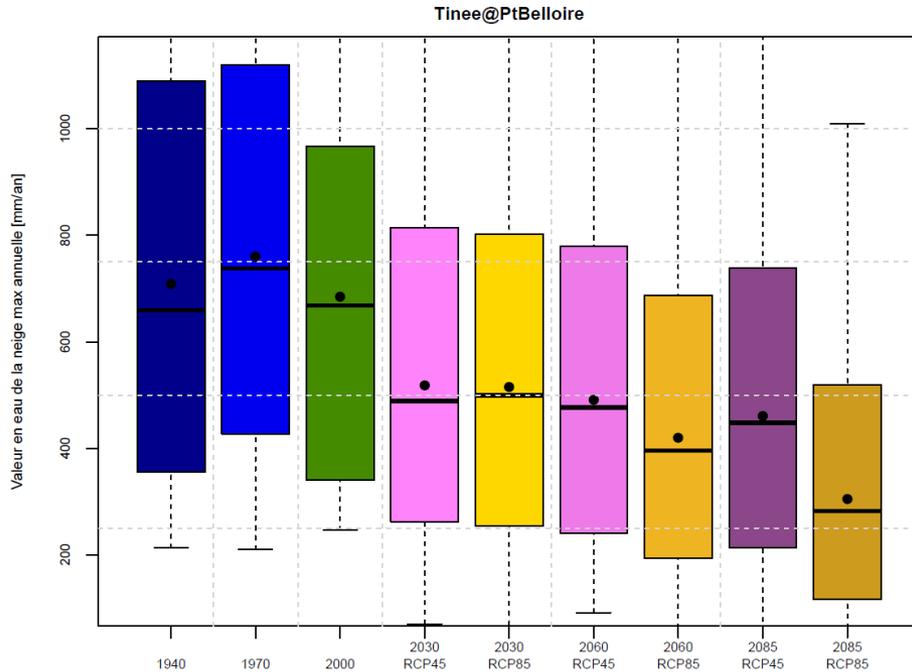


- **Réduction de la composante nivale:**

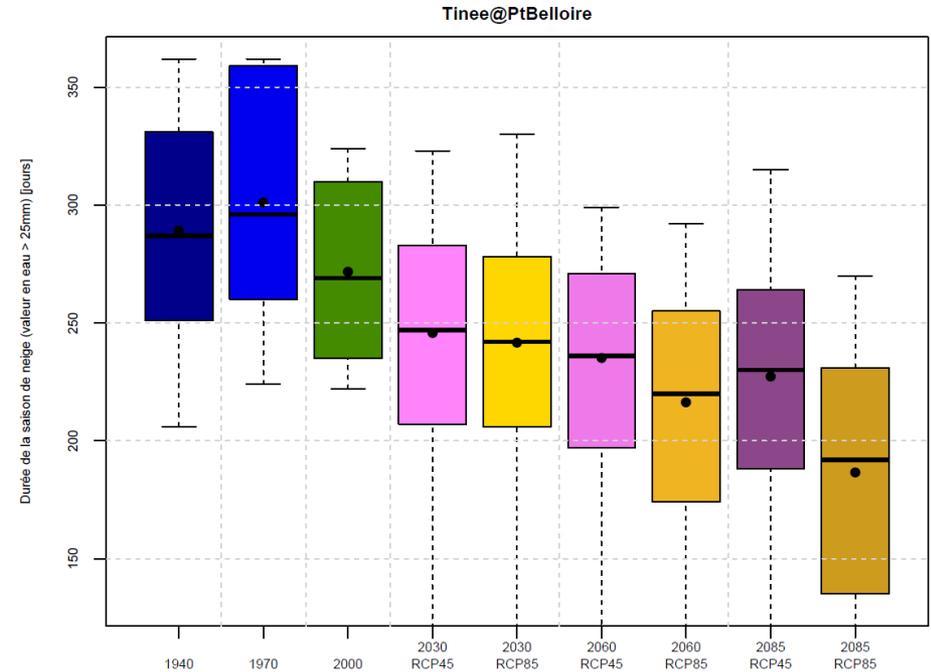
1. ↘ de la valeur max de l'EEN & avance de la date du max d'EEN (1 à 2 mois)
2. Retard du début de la saison nivale (1 mois) ;
3. Avance de la fin de la saison nivale (1 à 2 mois) ;

Résultats

Neige : EEN et durée (Tinée@PtBelloire)



Quantité (EEN max)
(Valeur en eau max mm/an)

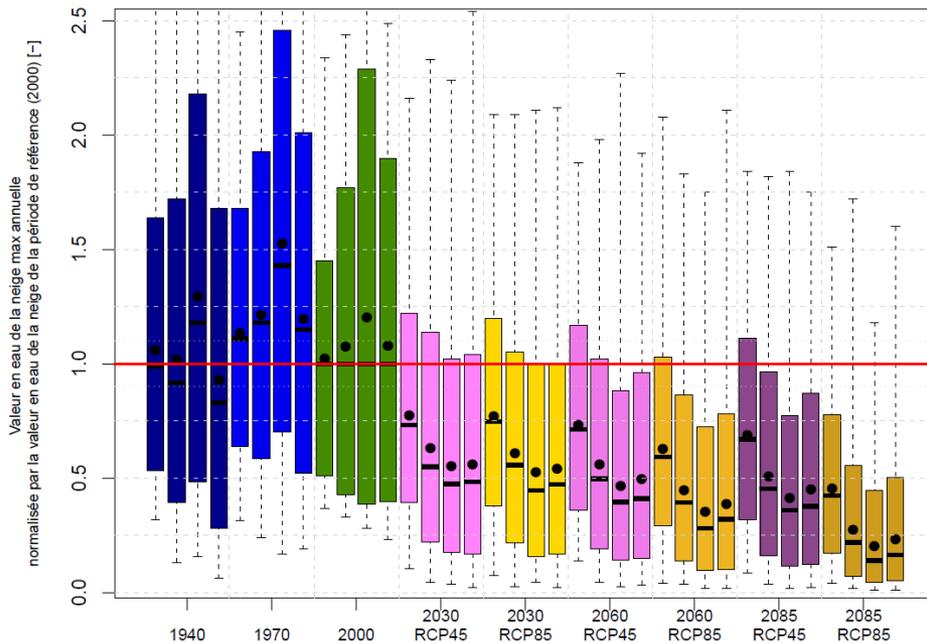


Durée
(jours/an)

Résultats

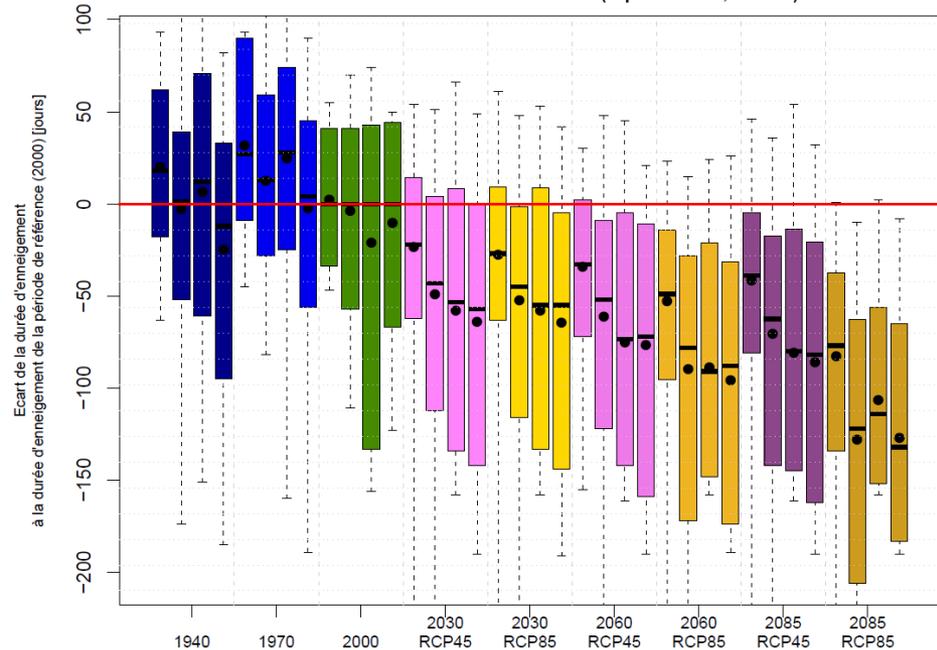
Neige : EEN et durée (régional)

4 bassins versants dans le Mercantour (Alpes du Sud, France)



Quantité
(Valeur en eau max mm/an)

4 bassins versants dans le Mercantour (Alpes du Sud, France)



Durée
(jours/an)

Synthèse

Impacts du CC à l'échelle du Parc national du Mercantour

- Simulations de débit et d'EEN sur la période 1900-2100
- Analyses statistiques homogènes et robustes, au mieux des connaissances & modélisations actuelles
- **Concernant l'hydrologie:**
 - Réduction progressive des débits (\searrow 10% « 2000 » vs « 1970 » & \searrow 10% « 2030 » vs « 2000 ») ;
 - Résultats consistant spatialement ;
 - Transition de régime dominés par la neige à des régimes dominés par la pluie ;
 - Aujourd'hui, les bassins versants les plus bas sont de bons proxy dans le futur des bassins versants les plus hauts ;
- **Concernant la neige :**
 - Réduction de la valeur max d'EEN (\searrow 15% « 2000 » vs « 1970 » & \searrow 50% « 2030 » vs « 2000 ») ;
 - Réduction de la durée de la saison nivale (\searrow 3 semaines « 2000 » vs « 1970 » & \searrow 7 semaines « 2030 » vs « 2000 ») ;
 - Analyses par bandes d'altitudes (dans le rapport) ;
 - *Impacts du CC d'autant plus forts que le BV est bas ;*

Perspectives

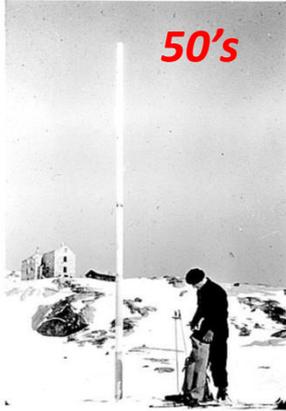
Impacts du CC à l'échelle du Parc national du Mercantour

1. **Augmenter le nombre de bassins versants témoins, pour représenter une plus grande diversité de conditions hydrologiques** (*BV plus haut : Verdon, Roya, Ubaye à BV plus bas : Issole, Var, Loup, Artuby*) ;
2. **Améliorer les simulations neige à la perche, notamment en CC ;**
3. **Valoriser d'autres informations sur la neige (images MODIS, notamment) ;**
4. **Comparer les longues simulations avec d'autres proxy (hydrologie, dendrochronologie) ;**
5. **Améliorer la modélisation hydrologique : de modèle distribués par bande d'altitude (Garavaglia et al., 2017) à un modèle spatialisé (Rouhier et al., 2017) ;**

Merci!



Plan de la Meule



Lac des Pareils

E. D. F. **ENNEIGEMENT** MI MOUNIER ANNÉE 19 19

TABLEAU RÉCAPITULATIF DES MESURES PÉRIODIQUES

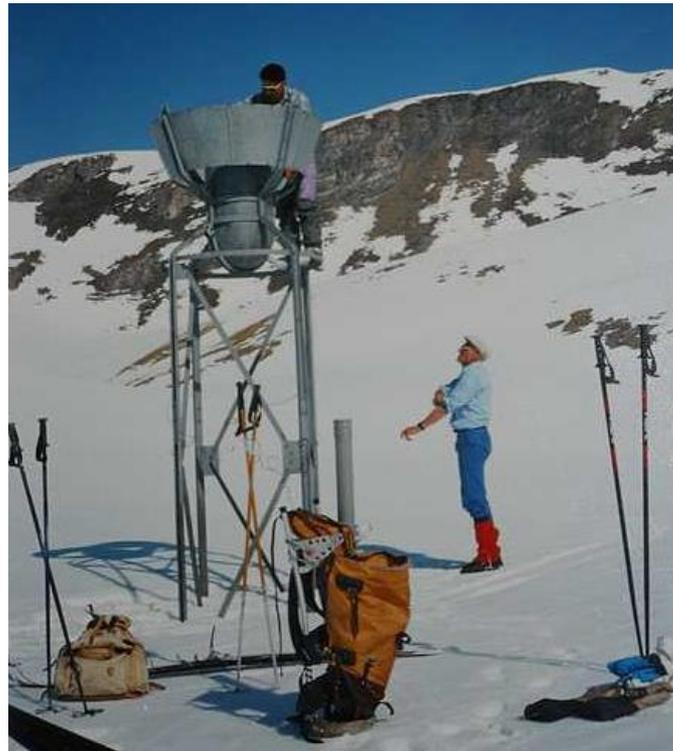
BASSIN : VAR EMPLACEMENT : **N.P.T. M^T MOUNIER**

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		Densité moyenne	Niveau de neige (mm)	Précipitation à la station de référence	OBSERVATIONS
	à la pente (cm)	sur neige (cm)				
30.3.68	95	91	.43	295		
27.4.	60	71	.46	330		
1.4.68		181	.33	600		
1.2.70						
25.2	150	150	.31	465		
1.3.				(470)		
21.3.	120	123	.35	450		
1.4.				(480)		
1.2.71				[330]		
20.2.	110	112	.31	345		
1.3.				[360]		
1.4.				[480]		
18.4.	160	158	.32	500		
1.5.				[510]		

70's



70's



00's