

## Livrable PARTIE 2

### Projections hydroclimatiques et impacts sur la ressource en eau

#### **Problématique**

Évolution des ressources en eau en amont des ouvrages de captage principaux  
du système d'alimentation en eau potable

#### **Chaire Eaux et Territoires**

Dans le cadre de la thèse de doctorat de

**Ronan Abhervé**

Sous la direction de

Luc Aquilina, Jean-Raynald de Dreuzy, Stéphane Louaisil

# **Intégration du changement climatique dans la gestion de la ressource en eau : exemple du bassin rennais**



# 1 Système approvisionnement en eau potable du bassin rennais

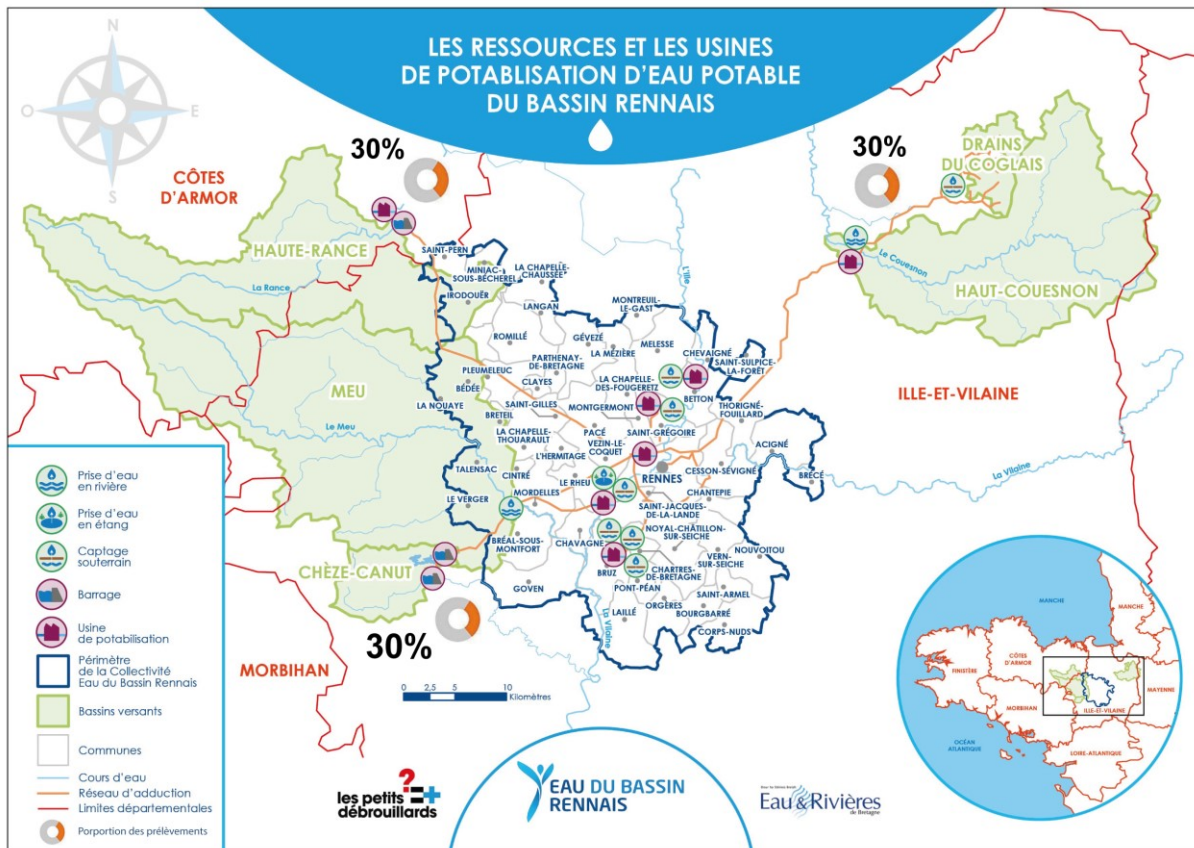


Figure 1. Système d'approvisionnement en eau potable du bassin rennais. Source : CEBR.

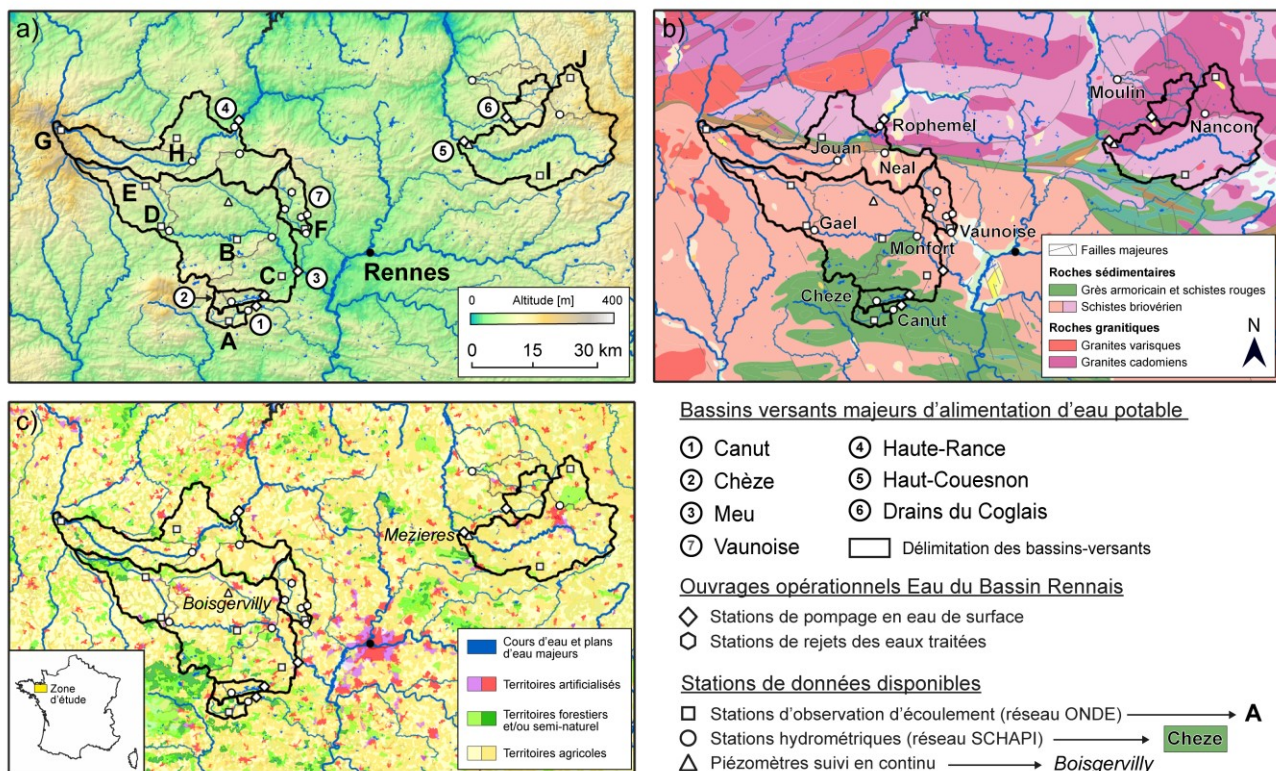


Figure 2. a) Topographie (BD ALTI 75m), b) lithologie (BRGM : 1 : 1 000 000), c) occupation du sol (Corine and Land Cover 2018) des aires d'alimentation en eau potable.



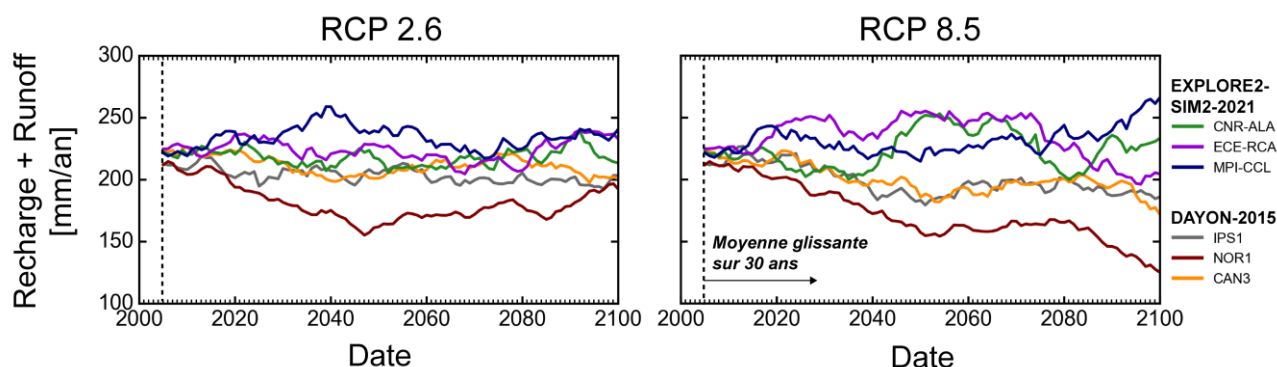
## 2 Sélection des projections climatiques et comparaison des jeux de données

À l'échelle de la France, il existe 2 jeux de données de projections climatiques\* : DAYON-2015 (Dayon, 2015) et EXPLORE2-SIM2-2021 (Météo-France, 2021) (Tableau 1). Ces projections sont initialement issues de multiples modèles climatiques globaux, du projet CMIP5 (McSweeney et al., 2015), forcés par les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre construits par le GIEC (5<sup>ème</sup> rapport, aujourd'hui le 6<sup>ème</sup> est disponible (IPCC, 2021)), allant du RCP 2.6 (le plus optimiste) au RCP 8.5 (le plus pessimiste). Météo France a traité ces données et nous donne finalement accès à des projections hydroclimatiques, à l'échelle de la France (résolution de 8 x 8 km), de 1960 à 2100.

**Tableau 1** Liste des projections climatiques disponibles à l'échelle de la France pour 2 ensembles multi-modèles : DAYON-2015 et EXPLORE2-SIM2-2021. Chaque projection climatique provient initialement d'un modèle climatique global (GCM (projet CMIP5) forcé par des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre construits par le GIEC, allant du RCP 2.6 (le plus optimiste) au RCP 8.5 (le plus pessimiste).

DAYON-2015					EXPLORE2-SIM2-2012						
Modèles (GCMs)	Labels	Historique 1960-2005	RCP2.6 2005-2100	RCP8.5 2005-2100	Institution	GCM	RCM	Scénarios	Périodes disponibles	Variables	Labels
ACCESS-3	ACC	1	-	1	CNRM	CNRM-CM5	ALADIN63	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1951-2100	9	CNR-ALA
BCC-CSM1-1-M	BCC	-	-	-	CLMcom	MPI-ESM	CCLM4-8-17	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1950-2100	7	MPI-CCL
BNU-ESM	BNU	-	-	-	ICTP	HadGEM2	RegCM4-6	RCP8.5, —, RCP2.6	1970-2099	7	HAD-REG
CAN-ESM2	CAN	3	3	3	SMHI	EC-EARTH	RCA4	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1970-2100	7	ECE-RCA
CNRM-CM5	CNR	1	1	-	IPSL	IPSL-CM5A	WRF381P	RCP8.5, RCP4.5, —	1951-2100	7	IPS-WRF
CSIRO-Mk3-6-0	CSI	1	-	1	GERICS	Nor-ESM1	REMO2015	RCP8.5, —, RCP2.6	1950-2100	7	NOR-R15
GFDL-CM3	GFD	-	-	-	CSC	MPI-ESM	REMO2009	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1970-2100	7	MPI-R09
IPSL-CM5A-MR	IPS	1	1	1	CLMcom	HadGEM2	CCLM4-8-17	RCP8.5, RCP4.5, —	1950-2099	7	HAD-CCL
MIROC5	MIR	3	-	3	KNMI	EC-EARTH	RACMO22E	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1950-2100	9	ECE-RAC
Nor-ESM1-M	NOR	1	1	1	SMHI	IPSL-CM5A	RCA4	RCP8.5, RCP4.5, —	1970-2100	7	IPS-RCA
Total	TOT	11	6	10	KNMI	CNRM-CM5	RACMO22E	RCP8.5, RCP4.5, RCP2.6	1950-2100	9	CNR-RCA
					DMI	Nor-ESM1	HIRHAM5 v3	RCP8.5, RCP4.5, —	1951-2100	7	NOR-HIR

Sans entrer dans les détails, déjà décrits dans le manuscrit de thèse (Abhervé, 2022), bien que les modèles s'accordent sur l'évolution de la température, la variabilité est extrêmement importante pour les précipitations. Généralement, les projections de DAYON-2015 sont plus pessimistes que les projections EXPLORE2-SIM2-2021. Bien que pour ces 2 ensembles, la baisse des débits lors de la période estivale est bien représentée, les projections EXPLORE2-SIM2-2021 affichent des précipitations plus importantes en hiver (voir excessives selon certains climatologues). Il faut noter que l'évolution des précipitations est particulièrement difficile à projeter en France (et encore plus en Bretagne), située dans une zone de transition majeure simulée par les modèles climatiques : tendance à l'augmentation des précipitations au nord de l'Europe (pays scandinaves) et à la baisse au sud (bassin méditerranéen). Pour cette étude, nous retenons 3 modèles de DAYON-2015 et 3 modèles d'EXPLORE2-SIM2-2021, pour le scénario RCP 2.6 et le RCP 8.5 (Figure 3).



**Figure 3.** Evolution de la quantité de l'eau annuelle (moyenne glissante sur 30 ans) potentiellement disponible (recharge + ruissellement de surface), pour le bassin versant du Meu (représentatif du bassin rennais), pour les projections climatiques sectionnées.

Des analyses complémentaires sur ces projections climatiques sont disponibles en annexes 1 à 4.

L'augmentation des épisodes de déficit en eau – durée, fréquence et amplitude - inquiète particulièrement les gestionnaires de l'eau potable. Pour quantifier l'évolution future de ces événements, nous calculons le nombre de jours chaque année où le débit simulé est inférieur à une référence : le 10<sup>ème</sup> quantile historique (1980 à 2020).

**Nombre de jours**, chaque année, où le débit est inférieur au 10<sup>ème</sup> quantile historique ( $Q_{10}$ )  $\approx 0,01$  mm/jour  
 Combien d'**années avec au moins 60 jours** (année de sécheresse 1976) inférieurs à ce débit  $Q_{10}$ ?  
 Jusqu'à combien d'**années consécutives** ?

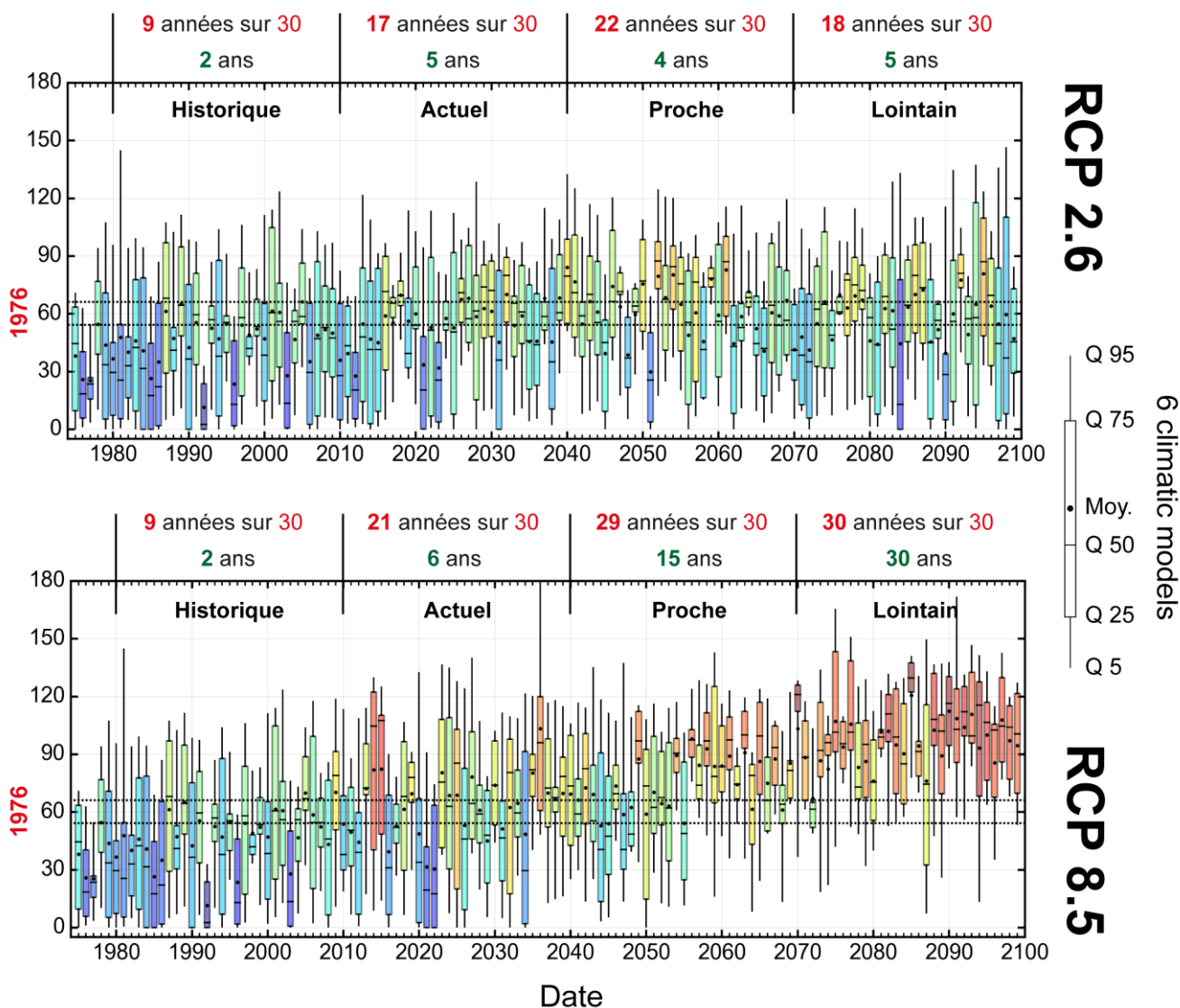


Figure 4. Nombre de jours chaque année, de 1975 à 2100, où le débit en amont du barrage de la Chèze est inférieur au 10<sup>ème</sup> quantile historique (1980-2010). Données de projections climatiques multi-modèles utilisées pour la simulation des débits futurs : 3 modèles « DAYON-2015 » et 3 modèles « EXPLORE2-2021-SIM2 », pour le scénario RCP2.6 et RCP8.5. En rouge au-dessus du graphique, probabilité de retrouver des années de type 1976 (au moins 60 jours : conditions historiques observées), et en vert, le nombre d'années consécutives.

Pour le scénario RCP8.5, les statistiques multi-modèles présentées sur la Figure 4 affichent une nette tendance à la hausse du nombre de jours avec un débit historiquement faible (1980-2010). Ce résultat indique un allongement de la période d'étiage, susceptible de démarrer plus tôt, et se terminer plus tard dans l'année. En 1976, année de sécheresse extrême à l'image de l'année 2022, le débit n'a pas dépassé la valeur de référence historiquement faible, au moins 60 jours dans l'année.



La probabilité de retrouver ce type d'événement (nombre de jours > 60) dans le futur a été calculé pour l'ensemble des modèles. En se basant sur la moyenne multi-modèles et l'indicateur proposé, les projections montrent qu'au moins 75 % des années seraient du « type 1976 » (ou pire) dès la période 2040-2070, et jusqu'à 100 % pour le futur lointain (2070-2100). Dès la période 2010-2040 (« actuel »), 6 années consécutives de ce type pourraient survenir selon les modèles, avec des probabilités d'occurrence à la hausse jusqu'en 2100. Les gestionnaires redoutent particulièrement les conséquences de la succession d'années de sécheresse, perturbant considérablement le système d'alimentation en eau potable basé sur le remplissage de barrages.

*\*Plus d'informations sur les projets autour des ressources en eau en lien avec le changement climatique à l'échelle de la France sont disponibles sur ce site web de l'OEB : <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/43>.*

### 3 Livrables des projections hydro(géo)logiques pour chaque bassin-versant

Une planche de résultats prospectifs est produite pour chaque bassin-versant (Figure 5 à 10). Ces planches ont été conçues et organisées de manière à décrire les résultats issus des simulations hydrogéologiques et d'intérêts majeurs pour la problématique. Voici les quelques notes explicatives du contenu des planches :

- En tête et pied de page

Nom du bassin versant et de la zone modélisée. Logos des partenaires et parties prenantes du projet. Un encart avertit sur l'utilisation de ces résultats, en raison des incertitudes associées.

- Paramètres des simulations

Paramétrisation du modèle hydrogéologique, projections utilisées en forçage d'entrée, et options des simulations.

- Débits annuels

Moyenne glissante sur 5 ans, de 1975 à 2100, des statistiques calculées sur l'ensemble des simulations, pour les débits annuels simulés.

- Distribution des débits

Graphique en boîte affichant les statistiques des débits simulés pour 4 périodes de 30 ans : « historique » de 1980 à 2010, « actuelle » de 2010 à 2040, « futur proche » de 2040 à 2070 et « futur lointain » de 2070 à 2100.

- Régime des débits

Statistiques sur les débits intermensuels calculés pour la période historique (1980-2010) et future (2030-2100) pour les 2 scénarios RCP. Pourcentage de la baisse du débit dans le futur par rapport à l'historique, en moyenne, pour la période de hautes (octobre à mars, inclus) et pour la période de basses eaux (avril à septembre, inclus).

- Anomalie des débits

Tableau affichant la moyenne multi-modèles des débits intermensuels pour la période historique (1980-2010) et la période future 2030-2100 (scénario RCP2.6 et RCP8.5). De plus, sont affichées les anomalies (symbole delta «  $\Delta$  ») des débits simulés pour l'ensemble multi-modèles entre la période future (2030-2100), par rapport à l'historique (1980-2010). Pour chaque mois de l'année, les anomalies du débit minimal, de la médiane et du débit maximal sont représentées.

- QMNA

Les périodes de retour des débits (Q) mensuel (M) minimal (N) de chaque année civile (A) sont calculées de 1980 à 2010 pour la période historique, et de 2030-2100 pour la période future, pour les 2 scénarios RCP. Le QMNA5 représente le débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas être dépassé une année donnée (période de retour de 5 ans). Ce débit statistique informe sur la sévérité de l'étiage. Il est spécifiquement utilisé pour les problématiques de rejet d'eaux traitées et de prélèvement en eau en fonction de la sensibilité des milieux concernés.

- Réseau hydrographique

L'évolution du réseau hydrographique futur par rapport à la période historique est représentée par différentes couleurs. Les résultats sont présentés pour chaque mois de l'année et pour la simulation issue du modèle climatique « IPS1 », forcé par le scénario RCP8.5 (période 2030-2100).

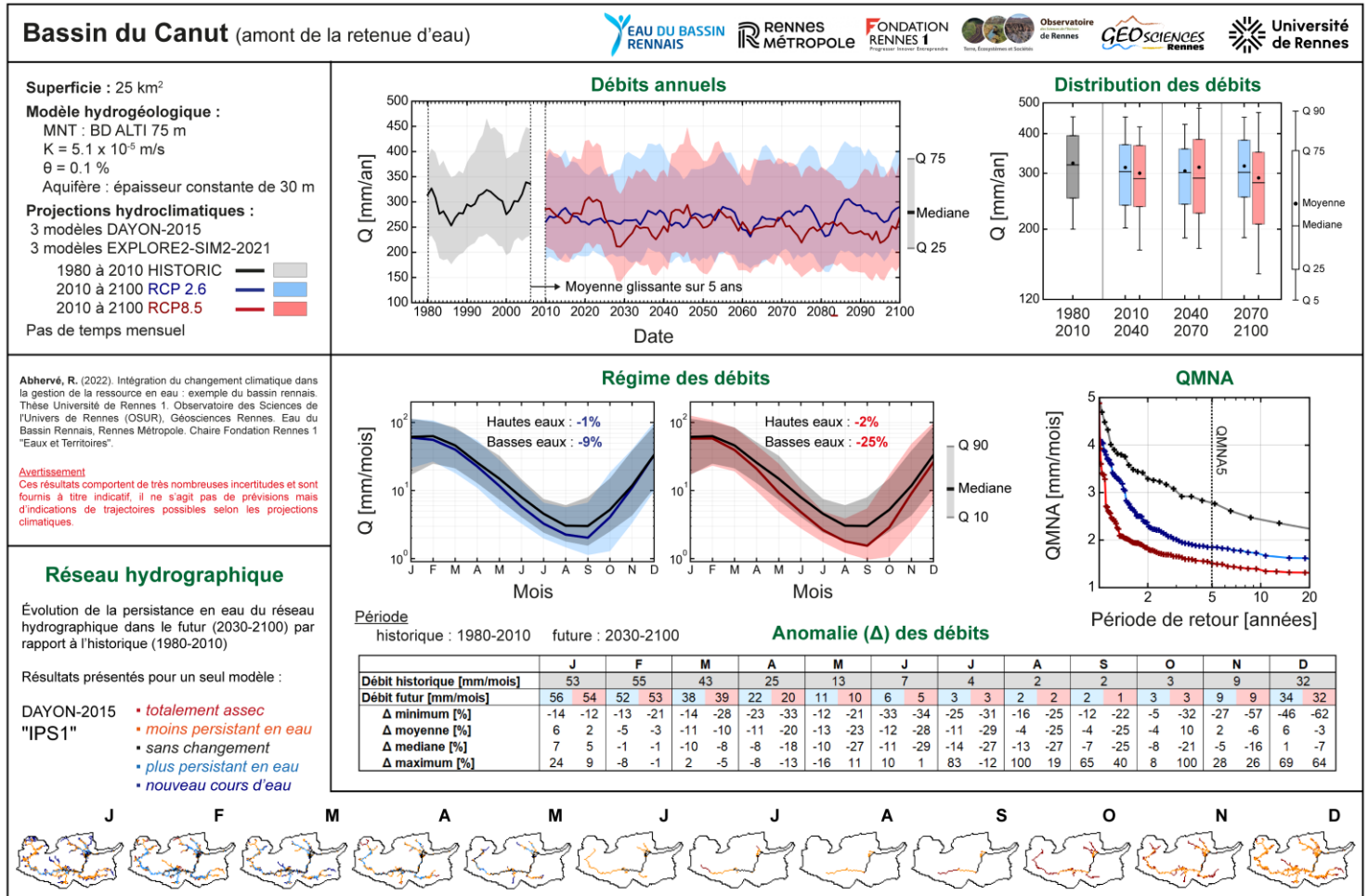


Figure 5. Projections hydro(géo)logiques des débits et du réseau hydrographique pour le bassin du Canut.



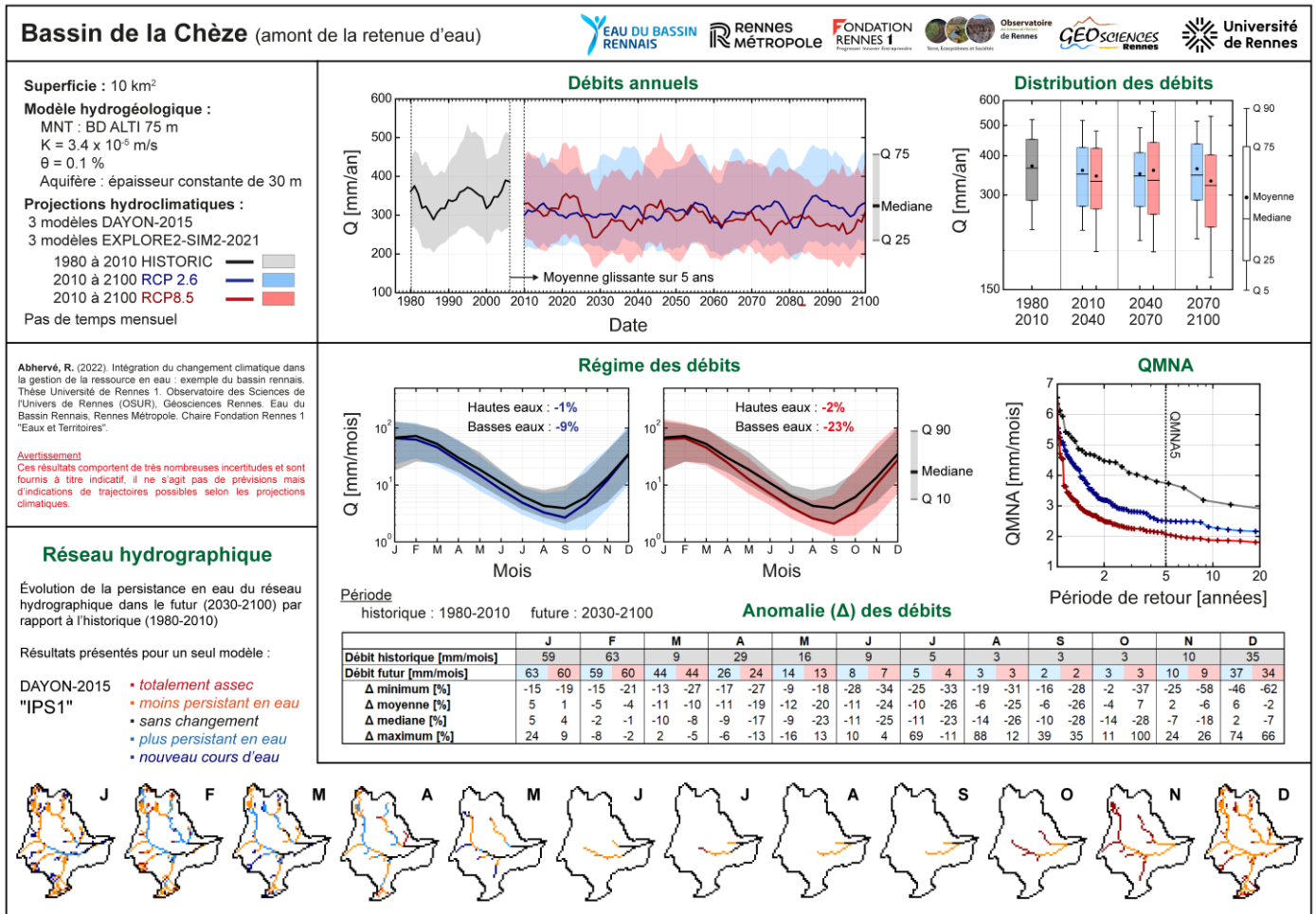


Figure 6. Projections hydro(géo)logiques des débits et du réseau hydrographique pour le bassin de la Chèze.

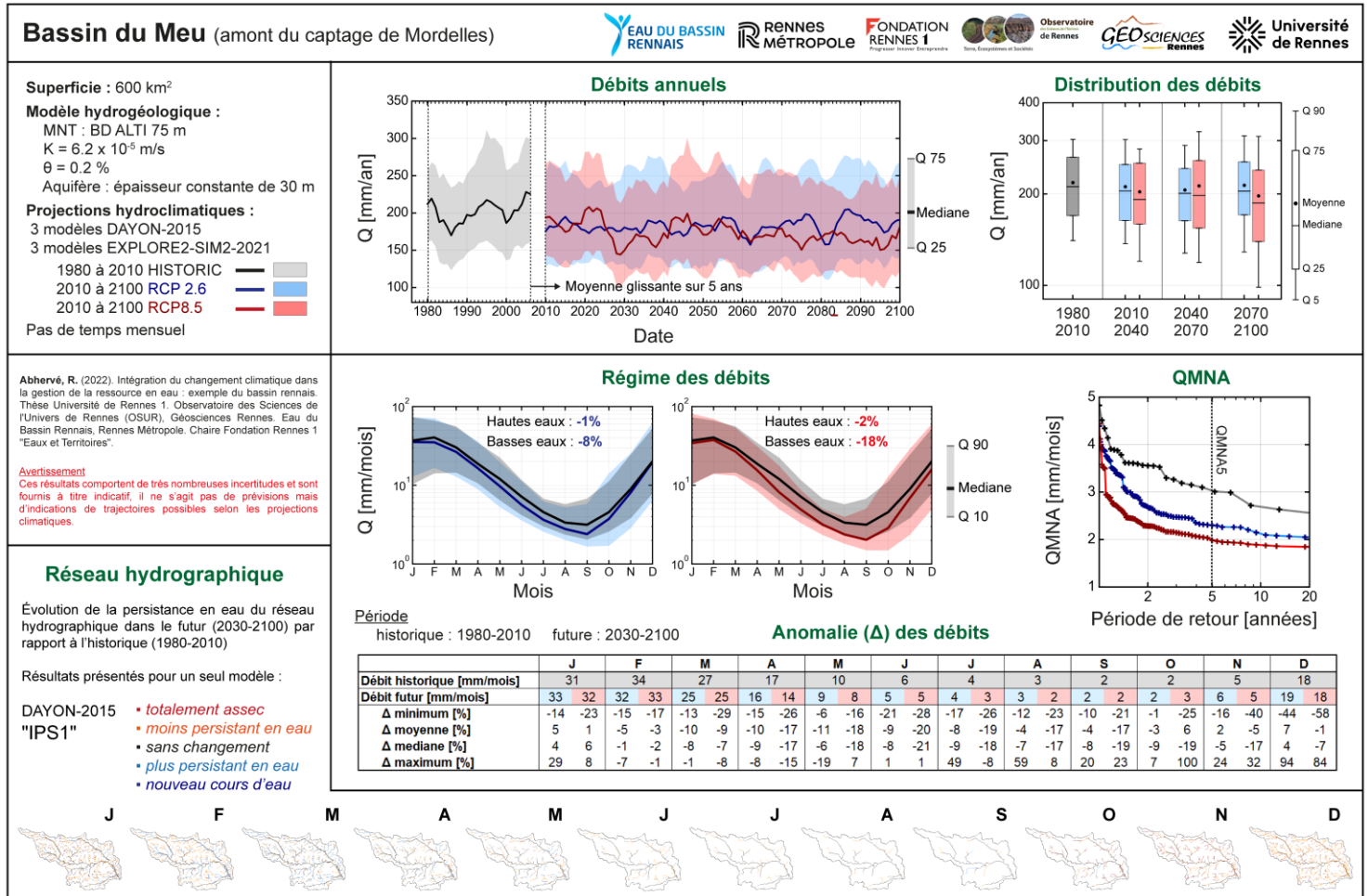


Figure 7. Projections hydro(géo)logiques des débits et du réseau hydrographique pour le bassin du Meu.

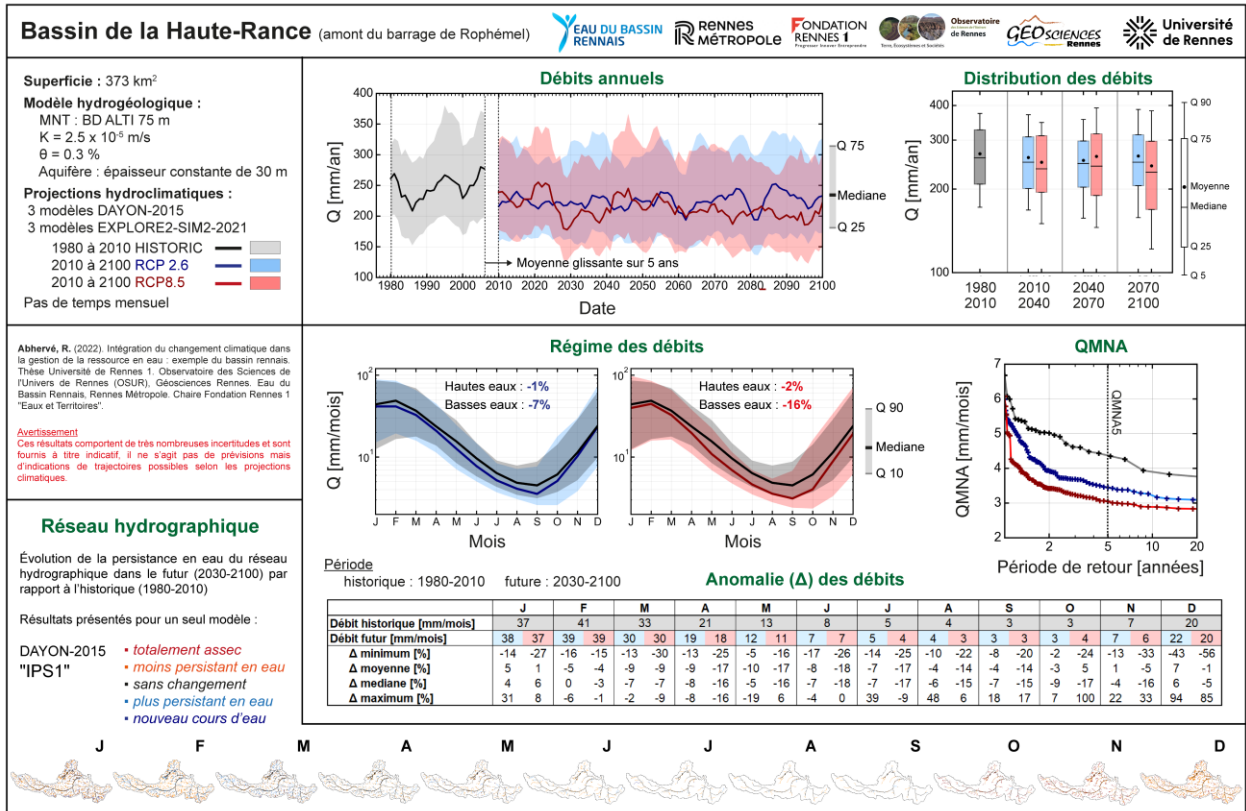


Figure 8. Projections hydro(géo)logiques des débits et du réseau hydrographique pour le bassin de la Haute-Rance.



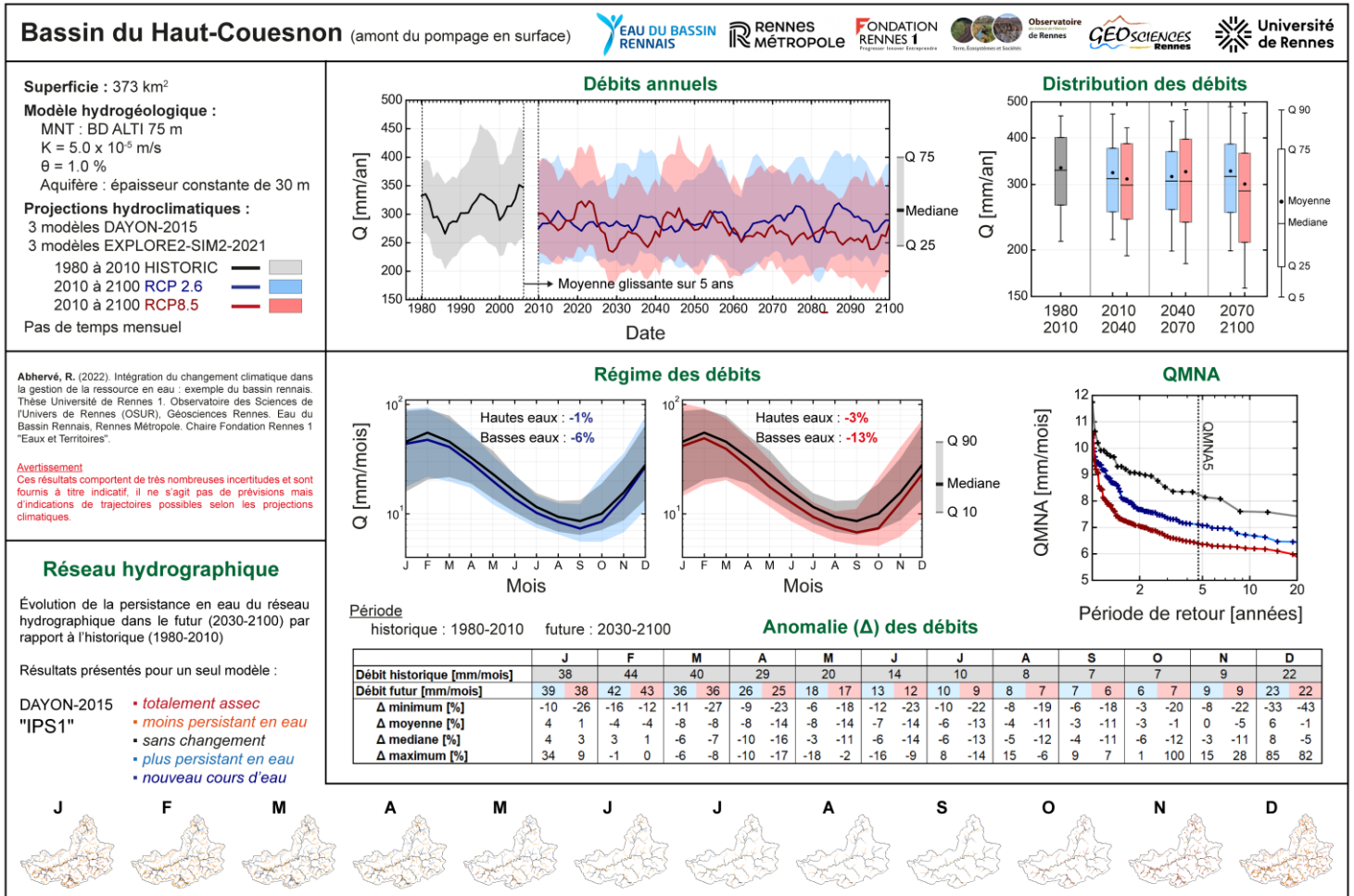


Figure 9. Projections hydro(géo)logiques des débits et du réseau hydrographique pour le bassin du Haut-Couesnon.

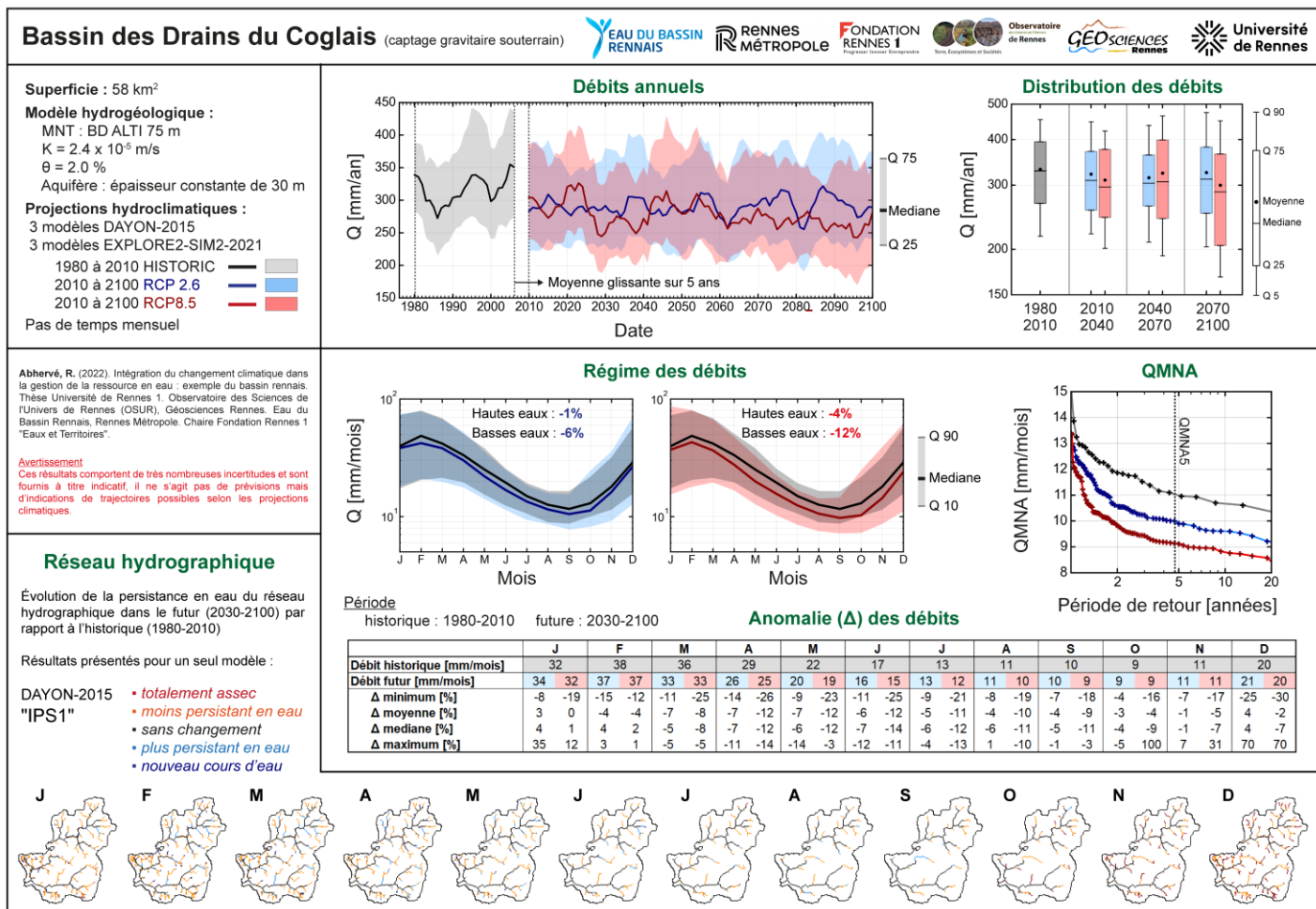


Figure 10. Projections hydro(géo)logiques des débits et du réseau hydrographique pour le bassin des Drains du Coglais.

## 4 Evolution des volumes d'eau dans le barrage de la Chèze

Le barrage de la Chèze d'une capacité de stockage de  $14 \text{ Mm}^3$  est un ouvrage stratégique majeur pour l'approvisionnement en eau potable du bassin rennais. À la fin de chaque hiver, le barrage doit être rempli afin de sécuriser et d'assurer l'alimentation en eau potable pour la période estivale. Cependant les données historiques montrent que le barrage avait de plus en plus de difficultés à se remplir « naturellement » (sans les ajouts, les prélèvements et la restitution).

À partir des données observées de 2003 à 2020 (courbe noire sur la Figure 11, 12 et 13), nous avons pu développer un modèle d'évolution des volumes d'eau dans le barrage sur la base du cumul des volumes d'eau en entrée et en sortie du barrage. Le modèle reproduit convenablement bien les volumes historiques du barrage à partir des simulations de débit en amont de la retenue (courbe rouge sur la Figure 11, ou grise sur la Figure 12 et 13) et des autres composantes du bilan : les précipitations, l'évaporation, les ajouts (Meu vers Chèze et Canut vers Chèze), les prélèvements et le débit de restitution. Les échanges entre le milieu souterrain et le barrage restent une inconnue approximée dans notre démarche de modélisation, exclusivement basée sur des données à ce stade (sans modélisation numérique du barrage et de couplage avec l'aquifère).

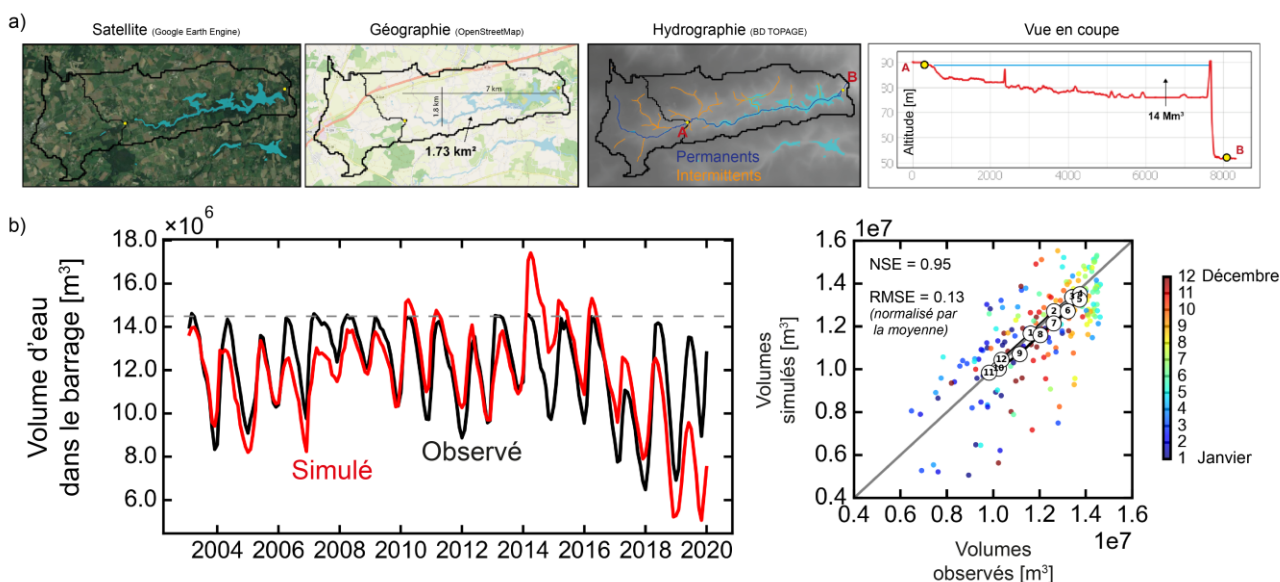


Figure 11. a) Caractéristiques générales et géographie du barrage de la Chèze.

b) Comparaison des volumes d'eau observés et simulés à partir d'un modèle simple de cumul des volumes d'eau en entrée (précipitations, débit du cours d'eau principal en amont de la retenue, débit des ruisseaux sur les flancs de la retenue, ajouts opérationnels par le Meu et le Canut) et sortie (prélèvements, évaporation, et débit de restitution) du barrage. Les échanges entre le milieu souterrain restent inconnus ne sont pas quantifiés ni modélisés numériquement.

À noter, pour atteindre le modèle optimal présenté, avec un NSE de 0.95 ou RMSE normalisé par la moyenne de 0.13, il est nécessaire d'enlever 70 % du débit simulé des ruisseaux alimentant la retenue sur les flancs. Hypothèse : cette quantité d'eau « perdue » pourrait correspondre au volume d'eau perdu vers le milieu souterrain lorsque celui remonte en charge lors de la période de remplissage.

Pour projeter l'évolution des volumes d'eau, les débits futurs en amont du barrage sont simulés à partir du modèle hydrogéologique calibré, et forcé par l'ensemble des projections climatiques « DAYON-2015 » et « EXPLORE2-2021-SIM2 », pour le scénario RCP2.6 et RCP8.5. Les précipitations et l'évaporation à l'échelle de la retenue sont aussi extraites des projections climatiques. Pour le scénario prospectif de gestion opérationnelle du barrage (ajouts, prélèvements et restitution), la moyenne intermensuelle historique illustrée sur la Figure 12b est appliquée chaque année dans le futur.



Que ce soit avec les projections « DAYON-2015 » ou « EXPLORE2-2021-SIM2 » les volumes du barrage de la Chèze tendent à la baisse jusqu'en 2040, pour le scénario le pessimiste RCP8.5, et l'optimiste RCP2.6. Le barrage ne semble plus atteindre son volume maximal dans les conditions climatiques futures. Néanmoins, la projection « DAYON-2015 » affiche une évolution plus pessimiste que celle de « EXPLORE2-2021-SIM2 ». Ce constat se confirme sur la Figure 13, où les résultats sont présentés jusqu'en 2100.

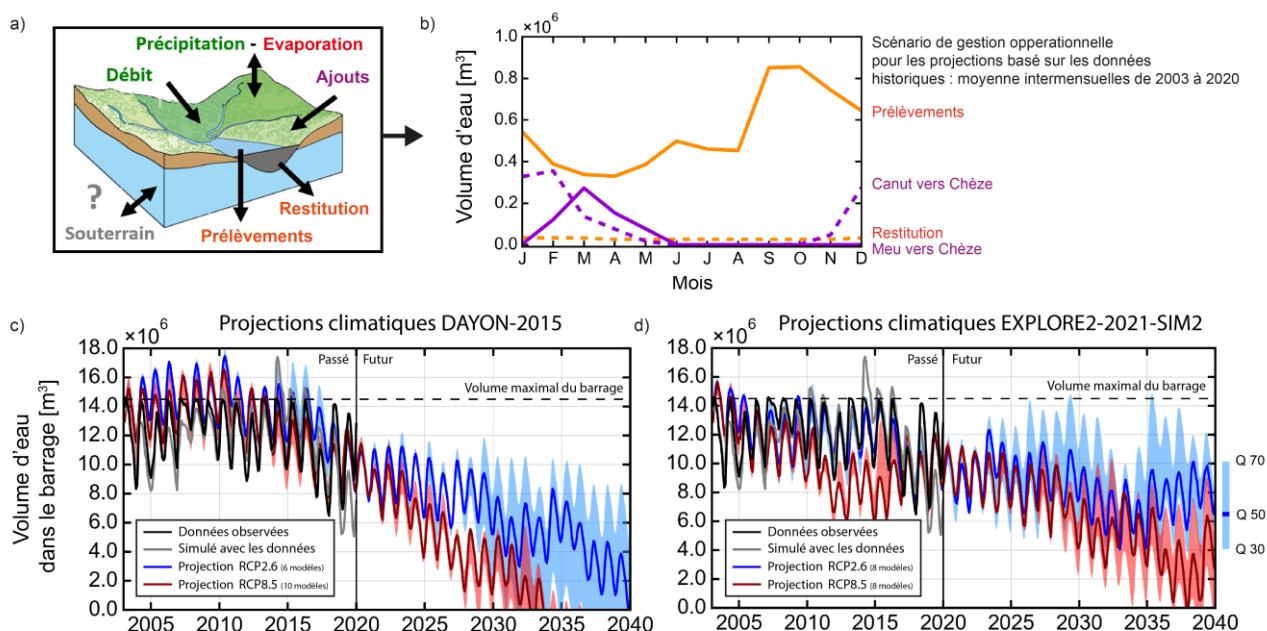


Figure 12. Projections des volumes d'eau dans le barrage de la Chèze jusqu'en 2040, à partir des projections climatiques a) « DAYON-2015 » et b) « EXPLORE2-2021-SIM2 ».

Il faut rappeler que ces résultats, particulièrement inquiétants, sont fournis à titre indicatif, il ne s'agit en aucun cas de prévisions, mais d'indications d'évolutions possibles selon les projections climatiques disponibles, où la variabilité intra et inter-modèles sur l'évolution futures des précipitations reste très importante. De plus, l'exercice de modélisation exclusivement basé sur des données est à ce stade très simplifié, avec d'importantes hypothèses simplificatrices : échanges entre le milieu souterrain et la masse d'eau de la retenue non représentés, extrapolation du débit simulé en amont du barrage à d'autres sous-bassins d'alimentation de la retenue, et l'application dans le futur d'un scénario de gestion opérationnel moyenné sur l'historique.

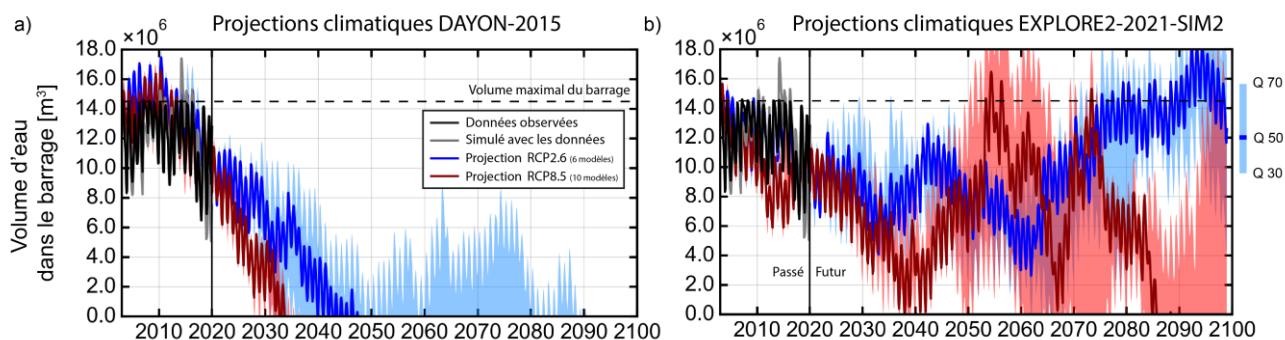
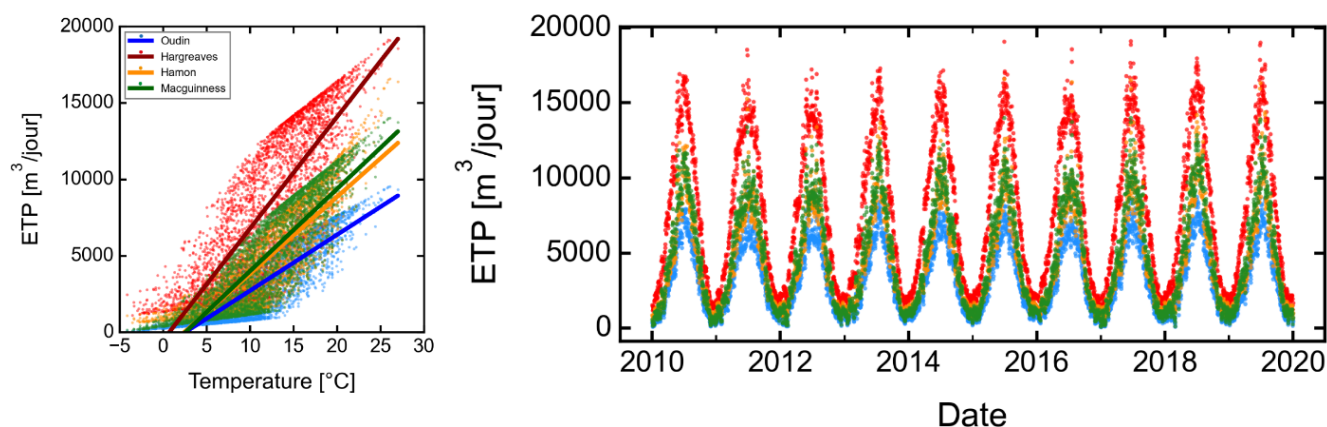


Figure 13. Projections des volumes d'eau dans le barrage de la Chèze jusqu'en 2100, à partir des projections climatiques a) « DAYON-2015 » et b) « EXPLORE2-2021-SIM2 ».

### Note sur l'estimation de l'évaporation d'une retenue d'eau

Selon la littérature, quantifier l'évaporation d'une retenue d'eau reste un défi majeur pour la communauté scientifique (Habets et al., 2018). Les estimations sont complexes (Aldomany, 2017), notamment puisque le stockage de la chaleur de la masse d'eau influe sur le flux énergétique de la surface. Ce stockage dépend en partie de la température des colonnes d'eau, influencée par la profondeur. D'autres processus entrent en jeu comme la circulation de l'eau dans le réservoir, la vitesse du vent et l'humidité de l'air. Outre la mesure directe par des instruments, plusieurs méthodes mathématiques (empiriques et analytiques) permettent d'estimer l'évaporation d'une surface d'eau libre, mais requiert des variables mesurées relativement complexes (Tanny et al., 2008). Il existe plusieurs types de méthodes : du bilan énergétique, du bilan hydrologique, de transfert de masse, de combinaison (bilan énergétique et aérodynamisme) (Rosenberry et al., 2007). Certaines d'entre elles ont été simplifiées pour n'avoir besoin que 4 paramètres climatiques principaux : la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Les formules utilisées sont initialement conçues pour estimer l'évapotranspiration potentielle (ETP), mais sont adaptées pour estimer l'évaporation d'une surface en eau libre. C'est pourquoi, dans un premier temps, nous calculons l'évaporation de la retenue en calculant l'ETP (Figure 14). Les 4 formules utilisées requièrent seulement des données sur la température, les autres variables étant définies à partir de constantes. Une attention particulière sera accordée à l'évaporation supplémentaire sous l'effet du réchauffement climatique, déjà démontré dans la littérature (Helfer et al., 2012).



**Figure 14.** Evapotranspiration potentielle (ETP) journalière calculée selon 4 formules empiriques. Les données de température nécessaires pour le calcul de l'ETP proviennent de la réanalyse SAFRAN, moyennées à l'échelle du bassin rennais.

Pour les équations de calcul, voir ce lien : <https://pyet.readthedocs.io/en/latest/methods/index.html>.

## 5 Problématique des étiages (assecs) de cours d'eau pour les stations d'épuration

La problématique des étiages pour les stations de traitement et d'épuration des eaux a aussi été étudiée pour donner suite à une demande de Rennes Métropole. En effet, le rejet des eaux traitées dans le milieu naturel dépend fortement du débit des rivières. Les difficultés principales apparaissent lors de la période d'étiage où le débit des cours d'eau est au plus bas. La présence ou non d'écoulement conditionne la stratégie de gestion des eaux du système d'assainissement. Au total, 5 bassins-versants ont été modélisés pour cette problématique (Figure 15). Une fiche similaire à la Figure 16 a été produite pour chaque site.

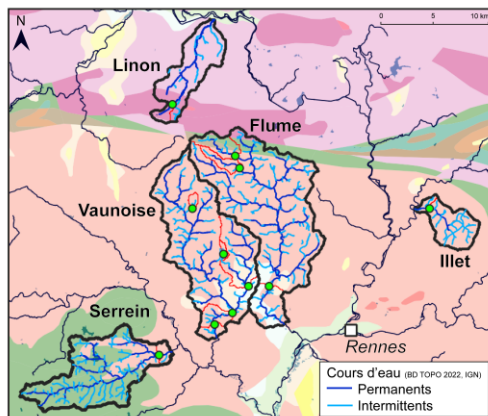


Figure 15. Zoom sur les bassins-versants modélisés et leur réseau de cours d'eau observé (permanent et intermittent) pour la problématique des étiages et assecs en amont des stations de rejet des eaux traitées (Rennes Métropole).

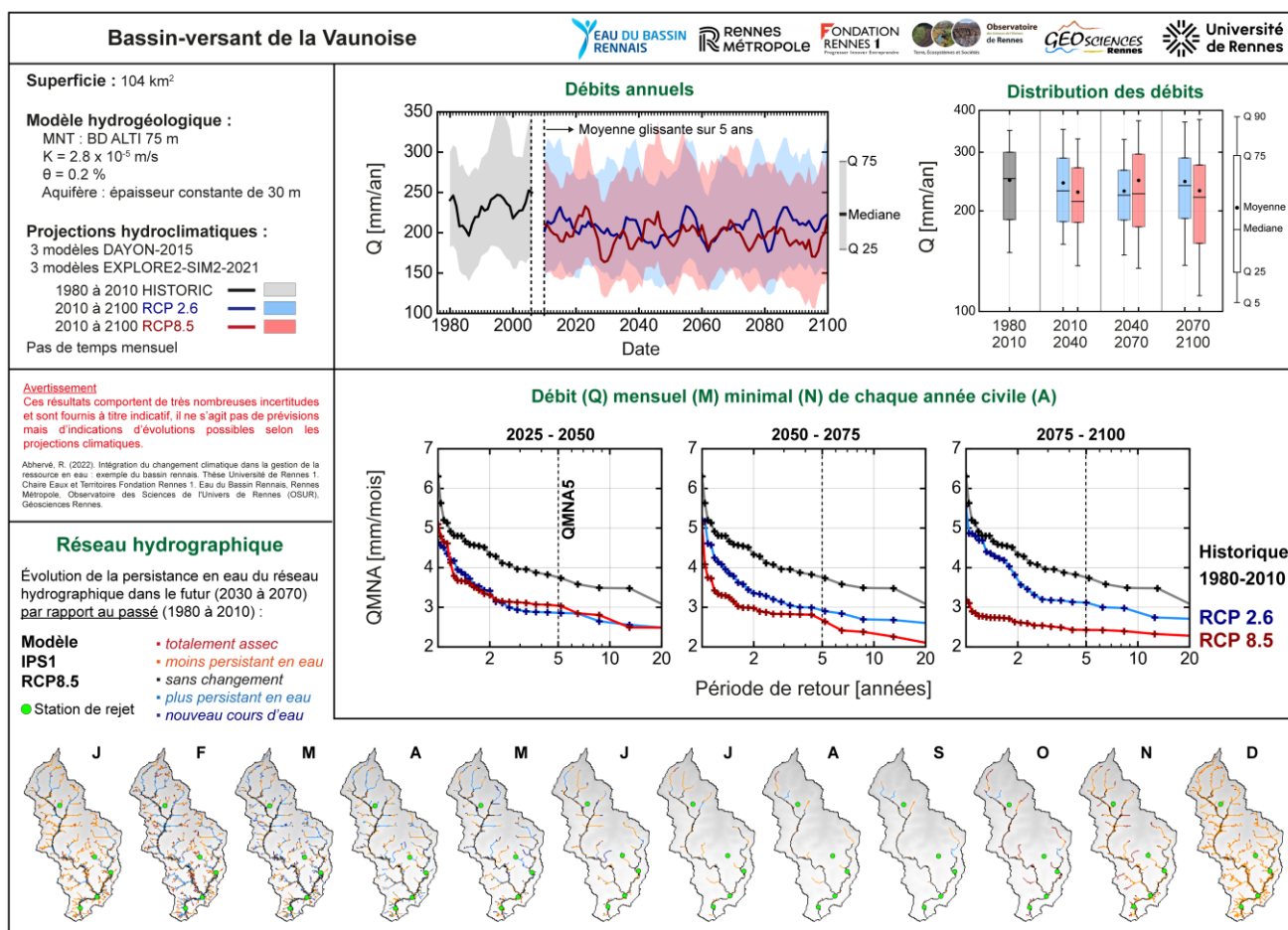
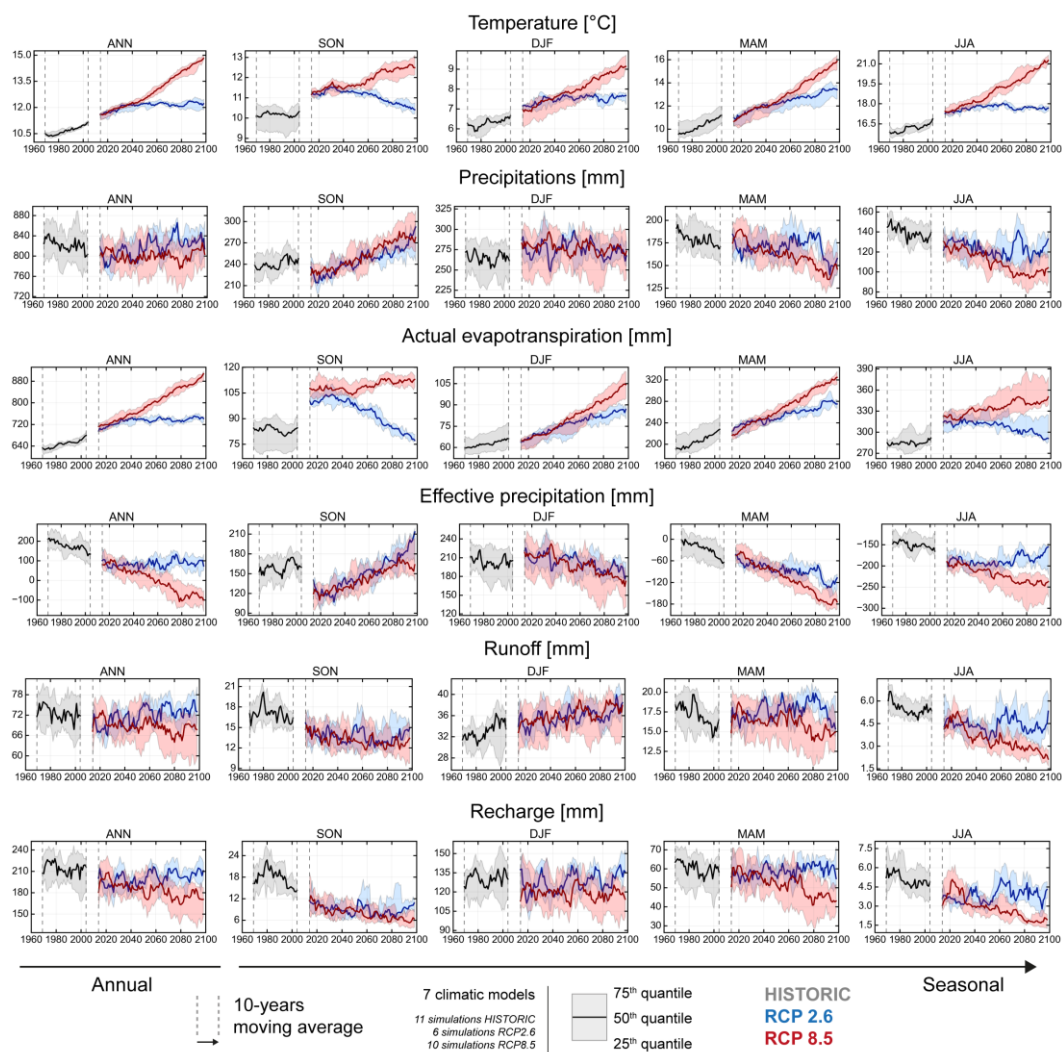
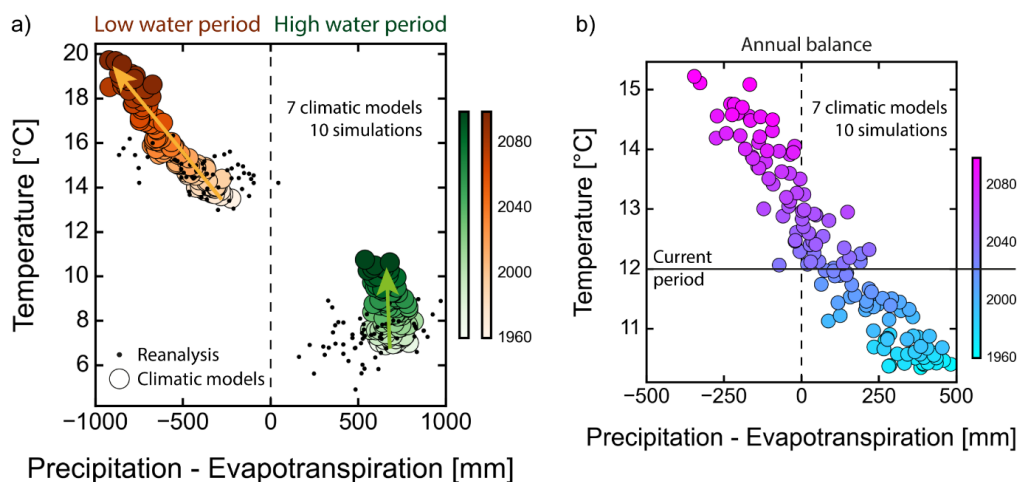


Figure 16. Exemple de planche de résultats des simulations du modèle hydrogéologique projetant l'évolution des débits et du réseau hydrographique sous l'effet de conditions climatiques futures, pour le bassin-versant de la Vaunoise.

## 6 Annexes

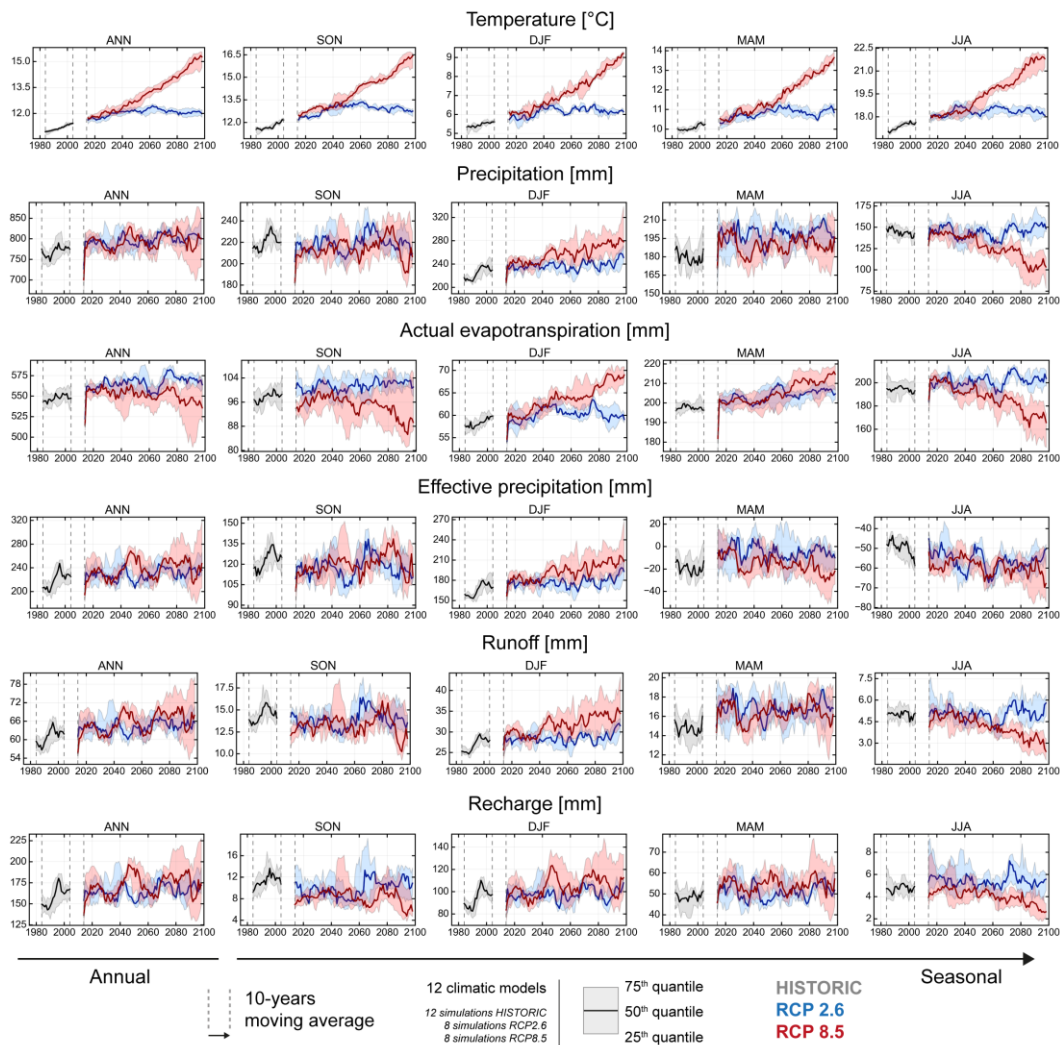


**Annexe 1.** Moyenne glissante sur 10 ans de l'évolution annuelle et saisonnière, à l'échelle du bassin rennais, des variables hydroclimatique issues de l'ensemble des projections multi-modèles « DAYON-2015 », affichée ici de 1960 à 2005 pour la partie historique, et de 2005 à 2100 pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5

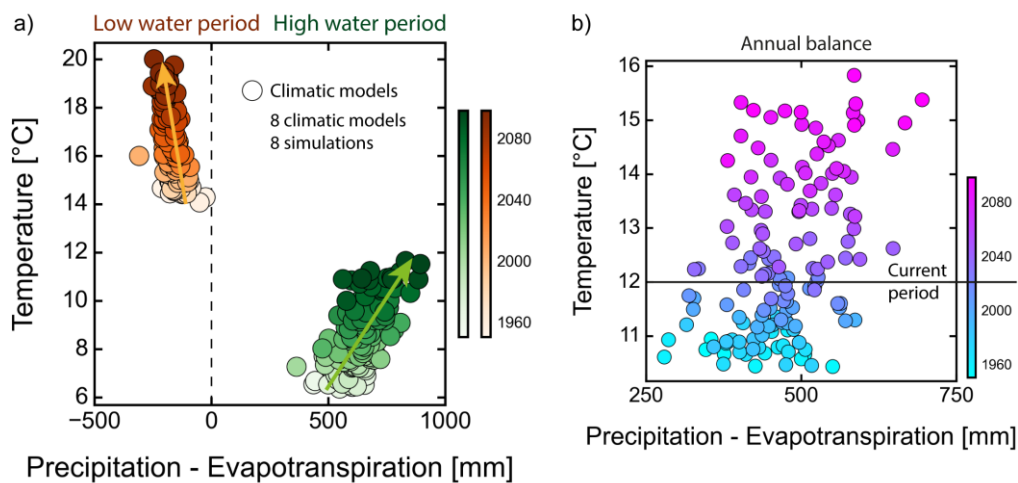


**Annexe 2.** Bilans des pluies efficaces en fonction des températures, à l'échelle du bassin rennais, pour l'ensemble des projections multi-modèles « DAYON-2015 », scénario RCP8.5, a) pour la période de hautes eaux et basses eaux et b) à l'échelle de l'année hydrologique.





**Annexe 3.** Moyenne glissante sur 10 ans de l'évolution annuelle et saisonnière des variables hydroclimatiques issues de l'ensemble des projections multi-modèles « EXPLORE2-SIM2-2021 », affichée ici de 1975 à 2005 pour la partie historique, et de 2005 à 2100 pour les scénarios RCP2.6 et RCP8.5. Echelle du bassin rennais.



**Annexe 4.** Bilan du cumul des pluies efficaces en fonction des températures annuelles moyennes, issues de la moyenne de l'ensemble des projections multi-modèles « EXPLORE2-2021-SIM2 », a) pour la période de hautes eaux et basses eaux et b) à l'échelle de l'année hydrologique. Echelle du bassin rennais.

## 7 Références

---

Abhervé, R., (2022). Intégration du changement climatique dans la gestion de la ressource en eau : exemple du bassin rennais. Thèse Université de Rennes 1. Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR), Géosciences Rennes. Eau du Bassin Rennais, Rennes Métropole. Chaire Fondation Rennes 1 "Eaux et Territoires".

Lien vers le manuscrit de thèse :

<https://www.theses.fr/2022REN1B067>

Lien vers d'autres document en lien avec la thèse et la Chaire Eaux et Territoires :

<https://www.creseb.fr/integration-du-changement-climatique-dans-la-gestion-de-la-ressource-en-eau-bassin-rennais/>

Aldomany, M. (2017). *L'évaporation dans le bilan hydrologique des étangs du Centre-Ouest de la France (Brenne et Limousin)* [Université d'Orléans. Thèse.]. 2017ORLE1155 . tel-01661489

Dayon, G. (2015). *Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies*. Université de Toulouse. Thèse.

Habets, F., Molénat, J., Carluier, N., Douez, O., & Leenhardt, D. (2018). The cumulative impacts of small reservoirs on hydrology: A review. *Science of the Total Environment*, 643, 850–867. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.188>

Helfer, F., Lemckert, C., & Zhang, H. (2012). Impacts of climate change on temperature and evaporation from a large reservoir in Australia. *Journal of Hydrology*, 475, 365–378. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.10.008>

IPCC. (2021). Climate Change 2021 The Physical Science Basis Summary for Policymakers Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*.

McSweeney, C. F., Jones, R. G., Lee, R. W., & Rowell, D. P. (2015). Selecting CMIP5 GCMs for downscaling over multiple regions. *Climate Dynamics*, 44(11–12), 3237–3260. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2418-8>

Météo-France. (2021). *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole*. <http://www.drias-climat.fr/>

Rosenberry, D. O., Winter, T. C., Buso, D. C., & Likens, G. E. (2007). Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. *Journal of Hydrology*, 340(3–4), 149–166. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.018>

Tanny, J., Cohen, S., Assouline, S., Lange, F., Grava, A., Berger, D., Teltch, B., & Parlange, M. B. (2008). Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates. *Journal of Hydrology*, 351(1–2), 218–229. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.12.012>