

Article synthèse

Chaire Eaux et Territoires

Ronan Abhervé et Luc Aquilina

avec la participation de

Clément Roques - Jean Raynald de Dreuzy - Alexandre Coche,
Stéphane Louaisil - Benoit Têtu - Boris Gueguen - Jean-Yves Gaubert - Laurent Geneau

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



1 La Chaire Eaux et Territoires : vers un appui scientifique à la gestion de la ressource en eau du bassin rennais

En 2019, la Collectivité et la Société Publique Locale « Eau du Bassin Rennais » (EBR) se sont rapprochés des chercheurs de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes (OSUR) pour répondre à cette question à fort enjeu : quel est l'avenir des ressources en eau à l'échelle du bassin rennais dans un contexte de changement climatique ? Pour répondre à cette question, la chaire de recherche et de formation « Eaux et Territoires » est mise en place au sein de la Fondation Rennes 1, avec le financement d'Eau du Bassin Rennais et le soutien de Rennes Métropole.

L'objectif principal d'EBR est de fournir, en continu, une quantité d'eau potable suffisante et de bonne qualité à ses abonnés. Pour assurer la distribution d'eau potable aux 500 000 habitants de son territoire, soit près de la moitié du département d'Ille-et-Vilaine (35), la Collectivité dispose de 11 usines de traitement d'eau potable et de 16 ressources : 2 barrages, 2 captages en rivières, 1 étang et 11 captages souterrains. Chaque année, EBR produit en moyenne 26 Mm³ d'eau potable. Les aires d'alimentation de captage ou bassins-versants producteurs d'eau potable sont délimités sur la Figure 1.

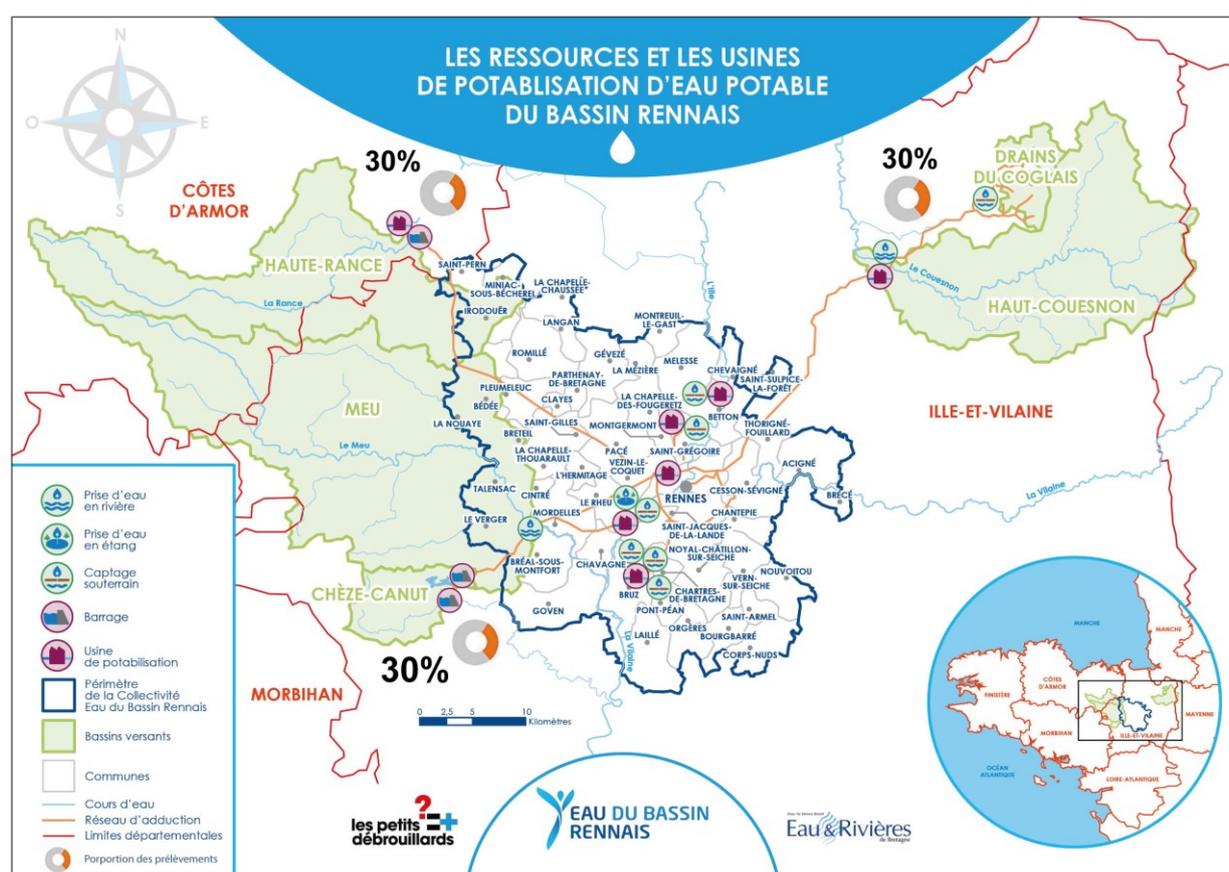


Figure 1. Système d'approvisionnement en eau potable du bassin rennais. Source : CEBR.

EBR dispose de 3 grands systèmes principaux, assurant chacun environ 30 % de la production totale : 1) le système Meu et Chèze-Canut, 2) le système Haute-Rance, et 3) le système Haut-Couesnon et Drains du Coglès. Ces points de prélèvement sont situés à quelques dizaines de kilomètres de Rennes, et leurs aires d'alimentation s'étendent sur d'autres départements comme les Côtes d'Armor (22). Selon le Président d'EBR, Michel Demolder, « approvisionner le Bassin de Rennes en eau est un défi historique et permanent ». Le contexte de changement climatique et le développement du territoire posent la question de la vulnérabilité quantitative – et qualitative – future, des ressources en eau.

La question de l'impact du changement climatique sur la disponibilité quantitative de la ressource en eau (Taylor et al., 2013) est de plus en plus prégnante en Bretagne. Dans ce contexte, la chaire « Eaux et Territoires » a offert un cadre particulièrement intéressant pour développer une recherche couplée entre les équipes de scientifiques et les gestionnaires de l'eau du territoire. Les questions scientifiques traitées dans la chaire ont émergé selon les problématiques et les risques déjà identifiés par les acteurs du territoire, en tirant partie de leur connaissance du terrain, et de leur expertise. Les travaux de recherche ont permis d'apporter de nouveaux éléments de réponses aux problématiques opérationnelles exposées en amont de ce projet, mené en co-construction, avec l'ensemble des parties prenantes.

La chaire « Eaux et Territoires » en quelques mots :

« La gestion durable de l'eau est un enjeu majeur, tant au niveau mondial – 2 milliards de personnes n'ont pas accès à l'eau potable – que local. Pour la Bretagne, première région agricole française et première région agroalimentaire en Europe, le défi est d'anticiper les risques et les dangers face à la vulnérabilité quantitative et qualitative des ressources en eau. La chaire entend répondre aux problématiques de demain, en produisant, à l'échelle locale, des outils utiles aux collectivités pour définir leurs politiques futures de l'eau, mais aussi pour les acteurs économiques en charge de la gestion de l'eau potable, ou de la protection des milieux. Les méthodes pourront ainsi être transférées à l'échelle nationale, mais aussi à autres régions du monde. »

2 Un changement climatique déjà perceptible sur le système d'alimentation en eau potable ?

Depuis plusieurs décennies, le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat) alerte sur le dérèglement climatique. Leur sixième rapport (IPCC, 2021), paru en 2021, dresse un bilan de l'état actuel du climat, projette les trajectoires de futures conditions climatiques, et liste les impacts probables à l'échelle régionale. Le rapport débute ainsi : « Il est sans équivoque que l'influence humaine a réchauffé l'atmosphère, les océans et les terres. Des changements rapides et généralisés – jamais observés depuis des siècles, voire des milliers d'années – se sont produits dans l'atmosphère, les océans, la cryosphère et la biosphère ». Le cycle mondial de l'eau continuera de s'intensifier à mesure que les températures mondiales augmenteront, avec des précipitations et un volume d'eau disponible devenant plus variables à la fois dans l'espace et le temps. Même dans les zones bénéficiant potentiellement d'un volume de précipitations plus important, un climat plus chaud intensifiera les événements climatiques estivaux très secs, à l'origine de potentielles sécheresses.

La sécheresse définit un déficit en eau anormal et temporaire sur une région donnée. Le manque d'eau est relatif aux conditions normales et aux besoins locaux d'un territoire. Trois types de sécheresses sont comptabilisés et surviennent généralement dans cet ordre chronologique : 1) la sécheresse météorologique (déficit prolongé de précipitations), 2) la sécheresse pédologique ou agricole (déficit en eau disponible pour la végétation) et 3) la sécheresse hydrologique (déficit du niveau des nappes d'eau souterraine, du débit des cours d'eau et des plans d'eau ou retenues). La sécheresse n'est pas un phénomène nouveau avec le changement climatique, même en Bretagne, où elle a déjà sévi dans le passé : 1976, 1989, 1990, 2003, 2005, 2011, 2017, 2019, 2020, et 2022.

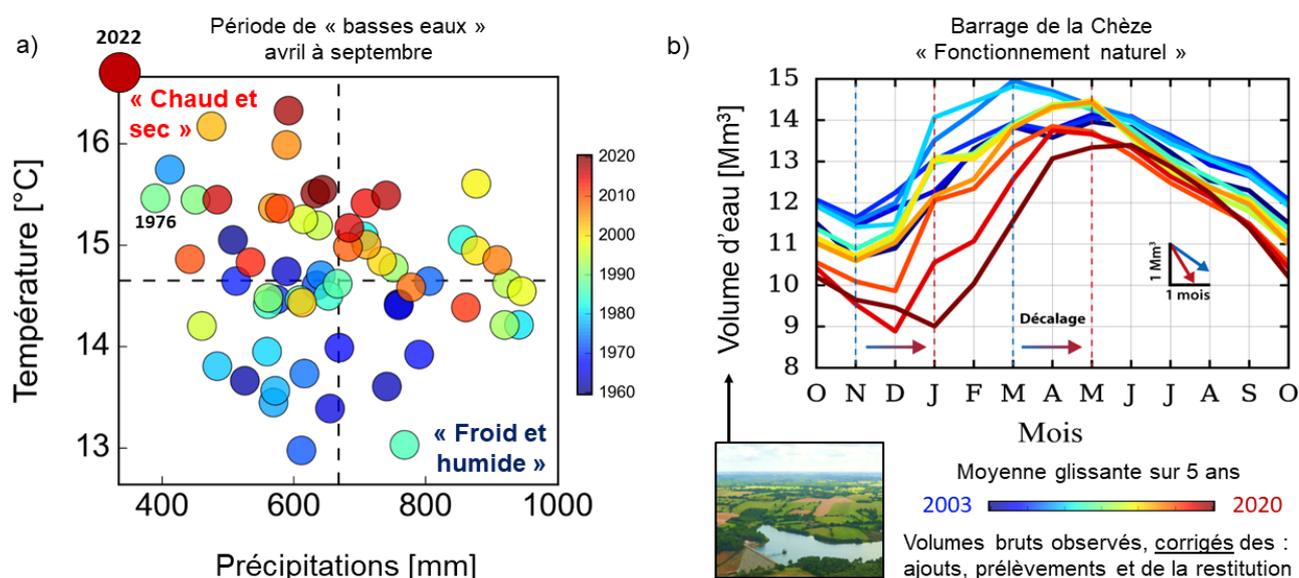


Figure 2. a) Précipitations cumulées à l'échelle du bassin rennais pour la période de basses eaux, en fonction des températures (Données : réanalyse historique, Météo-France). b) Volume d'eau moyen mensuel du barrage de la Chèze, corrigés des précipitations, de l'évaporation, des transferts d'eau, des prélèvements et du débit de restitution : « fonctionnement naturel ».

À l'échelle du bassin rennais, les tendances illustrées sur la Figure 2a vont dans le sens des travaux déjà réalisés à l'échelle de la Bretagne sur l'évolution future de la situation hydrique du bassin Rennais (Dubreuil et al., 2009; Lamy, 2014) : augmentation des phénomènes extrêmes, périodes chaudes et sèches de plus en plus fréquentes et aggravation du déficit en eau. Cette modification du climat entraîne des répercussions directes sur le système d'alimentation en eau. Prenons l'exemple du barrage de la Chèze, principale source d'eau potable de la capitale bretonne. Ces dernières années, les volumes du barrage tendent à diminuer et ce dernier

semble avoir des difficultés à se remplir « naturellement » (Figure 2b). De plus, on note une modification de la dynamique de remplissage et de vidange du barrage. Au lieu de commencer à se remplir dès le mois de novembre, comme c'était le cas auparavant, le barrage se vide jusqu'au mois de décembre-janvier-février depuis quelques années. Ce décalage dans le temps perturbe la stratégie d'approvisionnement en eau potable des gestionnaires. En 2022, année de sécheresse exceptionnelle, le barrage a atteint son niveau le plus bas jamais enregistré. Depuis l'année dernière, la perception de l'impact du changement climatique s'est accentuée. Lors de la période estivale, la quasi-totalité de la France est en situation de crise concernant les restrictions d'usages de l'eau. En février 2023, la France est touchée par une sécheresse hivernale d'une durée exceptionnelle. C'est la 5^{ème} saison de suite en déficit de précipitation.

Les structures de gestion de l'eau potable sont particulièrement sensibles à ces périodes de sécheresses prolongées. L'extension de la durée des périodes sans précipitations induit des sécheresses agricoles et hydrologiques (y compris en hiver), mettant sous pression les systèmes d'alimentation en eau. L'augmentation du nombre d'évènements de déficit en eau, déjà observée ces dernières décennies, peut d'ores et déjà être attribuée au changement climatique. Selon plusieurs études, la fréquence d'occurrence et l'intensité des années de sécheresses extrêmes des dernières années pourraient devenir la norme dans le futur (Büntgen et al., 2021).

3 La modélisation hydro(géo)logique à l'échelle du bassin-versant comme outil de projection de la disponibilité en eau

3.1 Démarche de modélisation et hypothèses selon le contexte

Les gestionnaires de l'eau potable ont besoin de projeter la quantité d'eau potentiellement disponible dans le futur, en amont des ouvrages de captage. Existe-t-il une « date de péremption » du système d'exploitation en eau actuel ? Pour y répondre, le besoin d'un outil d'anticipation a très vite été identifié pour optimiser la gestion de l'eau entre les ouvrages.

Les eaux souterraines et les eaux de surface sont connectées (Figure 3b) et c'est principalement le cas dans les zones climatiques tempérées humides, au contexte de nappes-aquifères de socle peu profondes. Sur le bassin rennais, mais plus généralement en Bretagne et sur le Massif Armoricain, les conditions climatiques et topographiques, couplées au contexte géologique de socle ancien, favorisent les transferts d'eau de la nappe d'eau souterraine vers les rivières. Les eaux de surface sont alors soutenues par un ensemble de nappes connectées et proches de la surface.

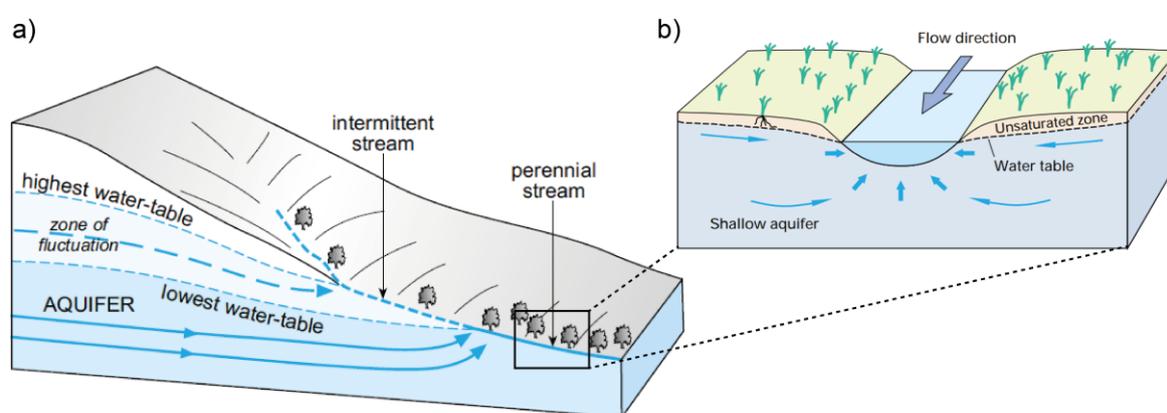


Figure 3. Schémas conceptuels illustrant la relation entre le niveau de la nappe d'eau souterraine et l'origine des cours d'eau permanents/intermittents. Source : a) modifié d'après (Foster et al., 2006) et b) modifié d'après (Winter, 1999).

Dans ce contexte, les travaux de la chaire se sont alors orientés vers la modélisation hydrogéologique, c'est à dire la simulation des écoulements souterrains et du niveau de la nappe. Les modèles numériques en 3D sont construits à l'échelle du bassin versant en prenant en compte, la topographie, une épaisseur d'aquifère et en appliquant des propriétés hydrauliques d'écoulement de l'eau, dépendantes de la nature des formations géologiques. Ces propriétés de la formation géologique qui accueille la nappe (l'aquifère) conditionnent la capacité de stockage du milieu souterrain, sa porosité, et sa capacité à laisser s'écouler l'eau, la conductivité hydraulique (ou perméabilité). Pour intégrer le climat à notre démarche, une quantité de recharge (eau infiltrée dans le sol jusqu'à la nappe) est appliquée à la surface du bassin versant modélisé. Ces données fournies par Météo-France proviennent d'un modèle hydrologique de surface à l'échelle de la France (résolution 8 x 8 km) nommé SURFEX (Le Moigne et al., 2020).

Dans notre démarche de modélisation, pour chaque simulation réalisée, la position et l'élévation de la nappe varient dans l'espace et le temps. À chaque endroit où la nappe intercepte la topographie, une zone de résurgence d'eau souterraine est perceptible en surface. Cette stratégie permet de simuler le débit et l'architecture des cours d'eau en tout point du site étudié. Un cours d'eau est dit permanent s'il présente un écoulement toute l'année (Figure 3a), même lors des périodes sans précipitations ; il est alimenté par le milieu souterrain. Néanmoins, la fluctuation saisonnière du niveau de la nappe est susceptible de générer des cours d'eau intermittents avec des cycles variables d'écoulement et d'assec dans l'année. Cette dynamique hydrologique étroitement liée entre la surface et la subsurface, conditionne la répartition des masses d'eau à l'échelle du bassin versant.

3.2 Calibration des modèles à partir du réseau hydrographique

Avant d'exploiter un modèle, il est nécessaire de le caler sur des observations passées pour qu'il représente au mieux la réalité. Les propriétés hydrauliques optimales de l'aquifère sont estimées en comparant les résultats de simulation à des données observées : habituellement des mesures de niveau piézométrique ou de débit de rivière. Cependant, la majorité des bassins versants ne sont pas instrumentés et les débits ne sont pas mesurés. Le manque de données rend difficile la caractérisation du milieu souterrain. La calibration des zones non instrumentées reste un défi majeur soulevé par la communauté hydrologique (Blöschl et al., 2019). Une des solutions est de se tourner vers d'autres types d'informations de surface (données satellites et de télédétection, démarches participatives d'observation, etc.), de plus en plus disponibles.

Confronté au manque de données, une nouvelle méthode innovante de calibration automatique des modèles a été développée en se basant sur le réseau hydrographique observé (Abhervé et al., 2022), une information de surface plus accessible. À partir des zones de résurgences simulées par le modèle hydrogéologique 3D, la calibration consiste à trouver les meilleures propriétés hydrauliques d'aquifère à appliquer pour représenter au mieux la carte de réseau hydrographique observé (Figure 4). Une fois que le réseau de cours d'eau simulé représente convenablement bien le réseau observé, les propriétés hydrauliques de l'aquifère sont correctement estimées et le modèle est calibré.

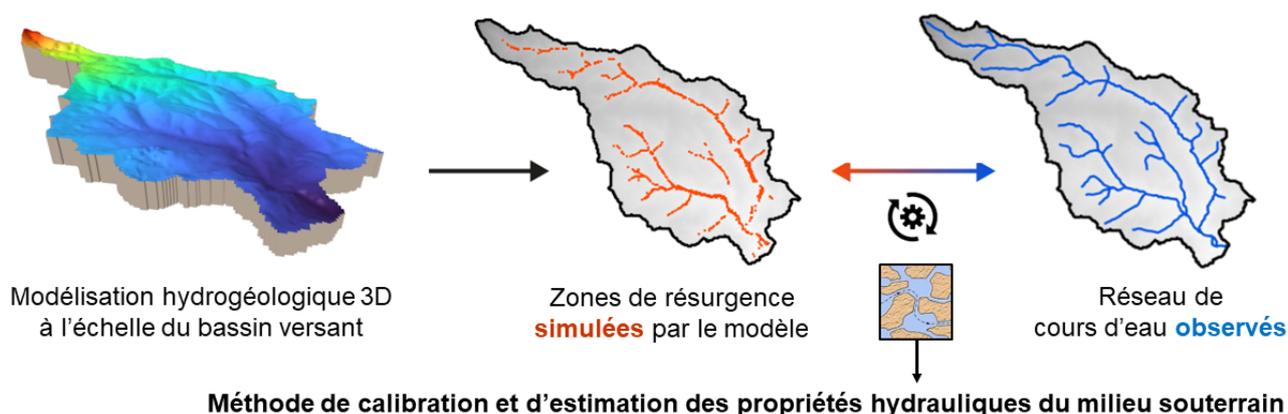


Figure 4. Illustration conceptuelle de la démarche de calibration des modèles hydrogéologiques à partir du réseau hydrographique observé.

Cette nouvelle démarche innovante présente l'avantage d'être facilement déployable sur d'autres sites d'études. Elle s'appuiera à l'avenir sur les avancées dans le domaine en plein essor de la télédétection, à l'origine de cartographies haute résolution du réseau hydrographique, bientôt capable de dissocier les zones humides des cours d'eau permanents, et intermittents.

3.3 Simulation de l'intermittence des cours d'eau en tête de bassin versant

Toujours en se focalisant sur l'intersection de la nappe avec la topographie, les modèles sont capables de simuler la dynamique d'expansion/contraction du réseau hydrographique dans l'espace et le temps. La Figure 5 illustre le rôle majeur de la capacité de stockage de l'aquifère (porosité) sur la fluctuation du niveau de nappe, et donc en parallèle, sur l'intermittence du réseau hydrographique.

En lien avec la méthodologie de calibration présentée ci-dessus, nous proposons d'utiliser l'information d'intermittence des cours d'eau pour valider et mieux contraindre les modèles. De plus en plus de données sont disponibles sur l'intermittence des cours d'eau, comme c'est le cas à l'échelle de la France avec le réseau ONDE (Observatoire National Des Etiages) (Beaufort et al., 2019) suivi par l'OFB (Office Français de la Biodiversité). Ce réseau assure la surveillance des étiages, un enjeu fort pour les pouvoirs publics, tant du point

de vue de la régulation des usages de l'eau en période de sécheresse que pour la limitation des impacts sur la faune et la flore aquatiques. Ces stations situées en amont des têtes de bassins-versants complètent le réseau de stations hydrométriques, généralement localisées en aval.

Bien que l'importance des cours d'eau permanents soit bien reconnue, la prévalence, l'importance et la valeur des cours d'eau non pérennes – qui cessent de couler périodiquement – ont tendance à être négligées, voire ignorées. Une récente étude annonce que plus de la moitié du linéaire des cours d'eau de la planète cesse de s'écouler au moins un jour par an (Messenger et al., 2021). Il est désormais bien reconnu que les rivières intermittentes et les cours d'eau éphémères (IRES) soutiennent une biodiversité et des services écosystémiques spécifiques (Datry et al., 2014). Ces IRES sont souvent qualifiés de « hotspots » de la biodiversité (Magand et al., 2020). Ainsi, même s'ils ne s'écoulent pas, les IRES fournissent de multiples services écosystémiques et complètent ceux rendus par des rivières pérennes voisines.

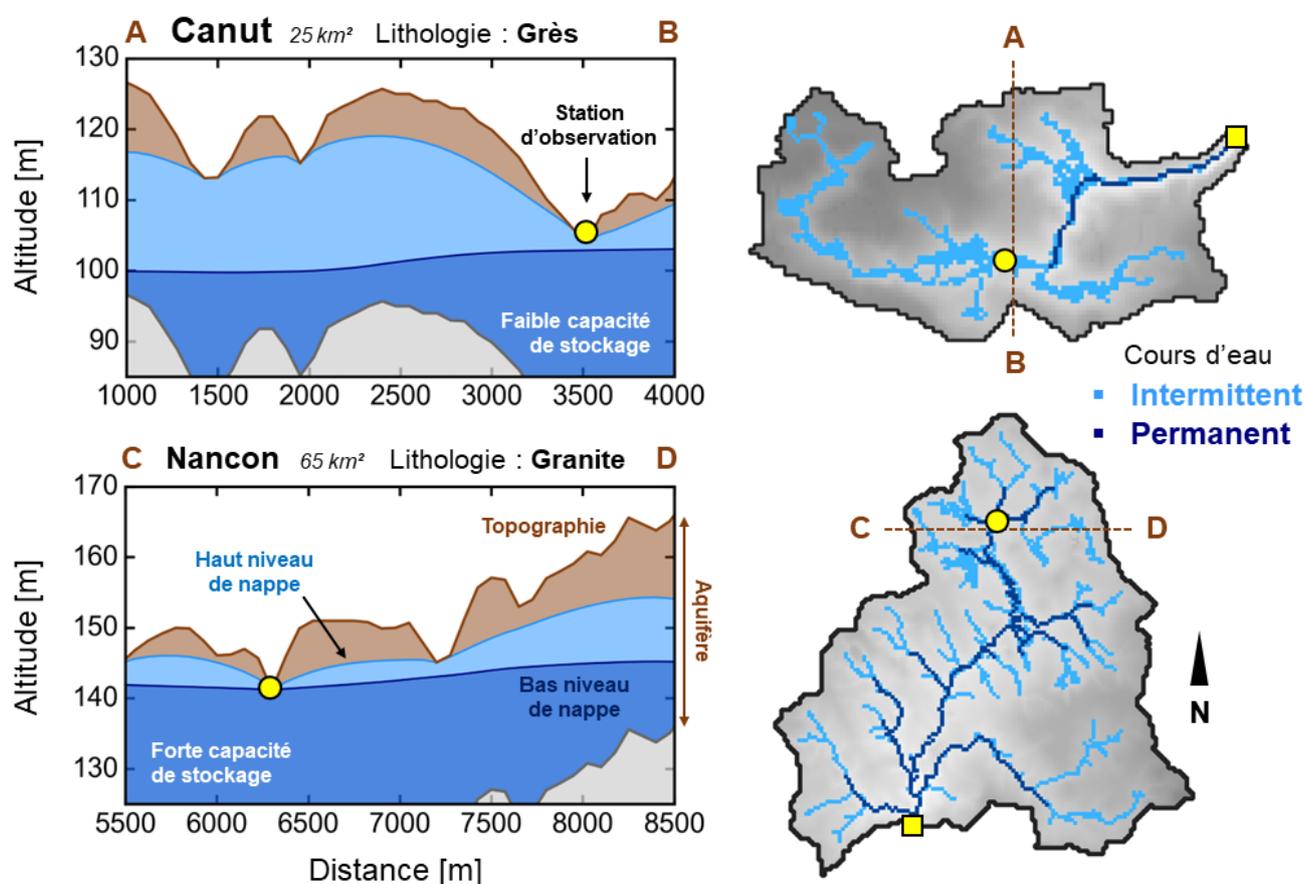


Figure 5. Résultats de simulation des modèles hydrogéologiques du bassin versant du Canut (sud-ouest de Rennes) et du Nançon (nord-est de Rennes) illustrant les liens entre niveau de nappe et intermittence des cours d'eau.

Dans certaines zones, l'augmentation des déconnexions de la nappe avec les cours d'eau impacte directement les écosystèmes de surface dépendants des eaux souterraines, non préparés à ces conditions inédites. La prédiction de l'intermittence des cours d'eau est un verrou scientifique identifié par la communauté hydrologique (Fovet et al., 2021). La communauté alarme sur le fait que la partie intermittente des cours d'eau est susceptible d'augmenter dans le contexte des changements globaux. Une expansion est déjà perceptible dans de nombreuses régions du monde où les cours d'eau intermittents peuvent être vu comme des sentinelles du changement climatique en cours (Zipper et al., 2021). Dans ce contexte, nos outils de modélisation sont particulièrement bien adaptés pour répondre à ce défi majeur.

4 Applications des projections hydrologiques aux problématiques des gestionnaires du territoire

4.1 Origine et intégration des projections climatiques

Initialement, les projections climatiques sont réalisées à partir de modèles climatiques globaux (GCM pour Global Climate Model) et/ou des modèles climatiques régionaux (RCM pour Regional Climate Model) simulant l'évolution du climat (température, précipitations, etc.). Dans le cadre de ces travaux, ce sont les modèles issus du projet d'intercomparaison CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) qui sont utilisés (Taylor et al., 2012). Ces modèles sont forcés selon différents scénarios socio-économiques nommés RCP (Representative Concentration Pathway). Ces scénarios, construits dans le cinquième rapport AR5 du GIEC, correspondent à une évolution des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (période 2000-2100), dépendante du volume des émissions dans les années à venir. Les 2 scénarios extrêmes d'émissions sont retenus ici : le RCP 2.6 « optimiste » et le RCP8.5 « pessimiste ».

Actuellement, il existe 2 jeux de données principaux regroupant des projections climatiques à l'échelle de la France : « DAYON-2015 » (Dayon, 2015), produit à partir de modèles climatiques globaux, et « EXPLORE2-2021-SIM2 » (Météo-France, 2021), produit à partir de modèles climatiques régionaux. Bien que les scénarios d'émission de GES appliqués soient les mêmes, l'évolution du climat futur diffère sensiblement entre ces 2 produits en raison des différences méthodologiques employées. Généralement, en faisant un focus sur le déficit en eau dans le futur, les projections de « DAYON-2015 » sont plus pessimistes que celles de « EXPLORE2-2021-SIM2 ». Les simulations des 2 jeux de données s'accordent sur une forte diminution des débits dans le sud de la France, allant jusqu'à -30 % pour le scénario RCP8.5 sur la période 2070-2100 (Explore 2070, 2012), par rapport à 1975-2005. Cependant, elles sont en désaccord pour les tendances sur la moitié nord de la France : « EXPLORE2-2021-SIM2 » prévoit plutôt une forte augmentation des débits jusqu'à +30 %, tandis que « DAYON-2015 » annonce plutôt une anomalie négative.

Il est important de rappeler que ces expériences ne fournissent pas une prévision à venir, mais une « projection » du climat. Ces projections permettent de comprendre comment le climat peut être amené à évoluer sous de nouvelles contraintes d'émissions de gaz à effet de serre. Ce type d'étude ne permet pas de prévoir la trajectoire exacte, mais plutôt une enveloppe statistique de trajectoires climatiques probables. Les incertitudes s'enchaînent en cascade, allant des scénarios d'émissions de GES, aux modèles climatiques.

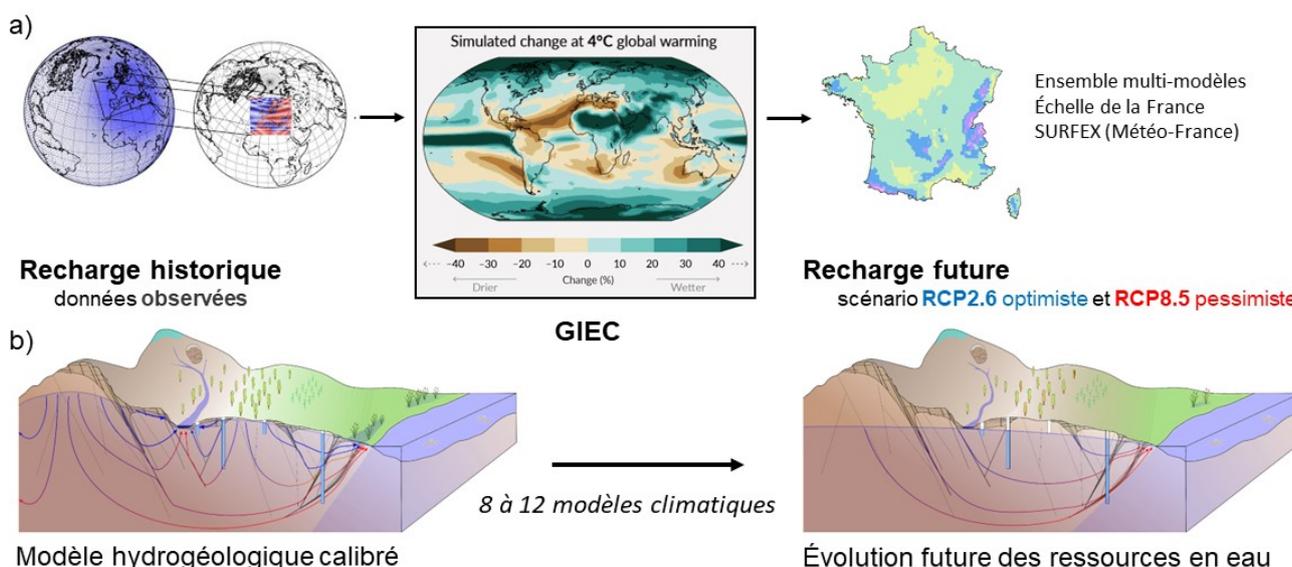


Figure 6. a) Descente d'échelle des modèles climatiques globaux à l'échelle de la France. Source : Météo-France. Au centre, changement des précipitations (%) à l'échelle mondiale dans un monde de +4°C. Source : (IPCC, 2021). b) Bloc diagramme conceptuel à l'échelle du bassin-versant, des modèles calibrés aux projections hydrologiques.

Les projections affichent une évolution des pluies très hétérogène sur la planète. À l’avenir, elles devraient augmenter à l’équateur et aux hautes latitudes, diminuer dans les régions subtropicales, avec de fortes variations selon les saisons aux moyennes latitudes. En revanche, les frontières exactes entre toutes ces zones sont extrêmement complexes à définir et il existe encore beaucoup d’incertitudes. C’est particulièrement le cas pour la Bretagne, située dans une zone de transition majeure entre le nord de l’Europe (plus de précipitations) et le bassin méditerranéen (moins de précipitations) (Figure 6a). Afin de prendre en compte ces incertitudes, il est recommandé d’utiliser plusieurs projections climatiques. Nous suivons cette stratégie en exploitant les données d’un ensemble multi-modèles. Cette approche multi-modèles permet de représenter la dispersion des signaux climatiques modélisés et donc d’accéder à une meilleure estimation du climat futur probable, compte tenu des informations disponibles.

Une fois nos modèles convenablement calibrés à partir du débit mesuré aux stations hydrométriques, du réseau hydrographique, et de l’intermittence des cours d’eau, des projections hydrologiques sont réalisées en intégrant ces projections climatiques futures (Figure 6b).

4.2 Déficit en eau et succession d’événements extrêmes

Certains travaux annoncent que le climat du bassin rennais pourrait devenir « méditerranéen » d’ici la fin du XXI^{ème} siècle (Dubreuil, 2022). Mais plus spécifiquement, c’est bien l’augmentation de la durée des périodes de déficit en eau, de leur fréquence et de leur amplitude, qui inquiète particulièrement les gestionnaires de l’eau potable.

Pour quantifier cette évolution, nous avons calculé le nombre de jours où le débit est inférieur au 10^{ème} quantile historique (1980 à 2020) : 0,01 mm/jour. En 1976, connue comme étant une année sécheresse extrême à l’image de l’année 2022, le débit n’a pas dépassé cette valeur 60 jours dans l’année. Nous proposons alors de calculer la probabilité de retrouver ce type d’épisode extrême dans le futur à partir de 12 modèles climatiques (« EXPLORE2-2021-SIM2 »), pour le scénario RCP8.5.

Sur la Figure 7, on voit que le nombre de jours avec ce débit historiquement très faible tend à augmenter dans le futur. Ce résultat indique un allongement de la période d’été à l’avenir, susceptible de démarrer plus tôt et se terminer plus tard dans l’année. 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 2040-2060. Ces conditions pourraient même se reproduire jusqu’à 6 années consécutives, avec de fortes conséquences sur l’alimentation en eau potable.

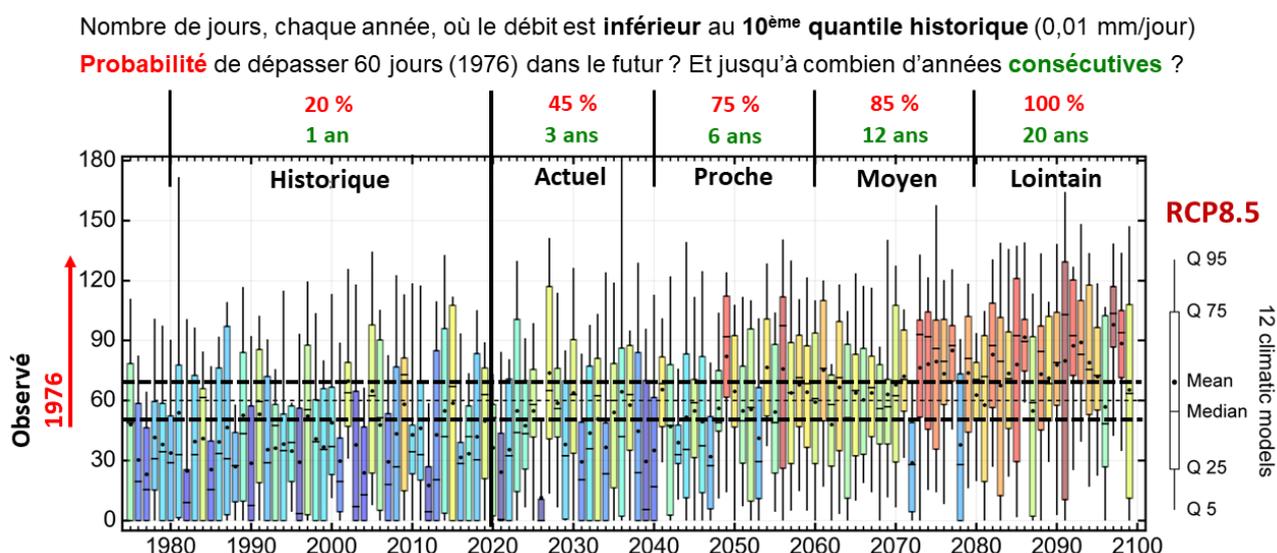


Figure 7. Nombre de jours chaque année, de 1975 à 2100, où le débit en amont du barrage de la Chèze est inférieur au 10^{ème} quantile historique (1980-2010). Statistiques de retrouver des années de type 1976 (au moins 60 jours). Données : projections multi-modèles « EXPLORE2-2021-SIM2 », scénario RCP8.5.

4.3 Évolution du volume en eau stocké dans le barrage de la Chèze

Le barrage de la Chèze d'une capacité de stockage de 14 Mm³ 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 on a vu sur la Figure 2b que le barrage avait de plus en plus de difficultés à se remplir « naturellement » (sans les ajouts, les prélèvements et la restitution).

Pour projeter l'évolution des volumes d'eau, les débits futurs en amont du barrage sont simulés à partir d'un modèle hydrogéologique calibré et forcé par un ensemble de projections climatiques « EXPLORE2-2021-SIM2 ». Pour le scénario de la gestion opérationnelle du barrage (ajouts, prélèvements et restitution), la moyenne intermensuelle historique est appliquée chaque année dans le futur. 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.

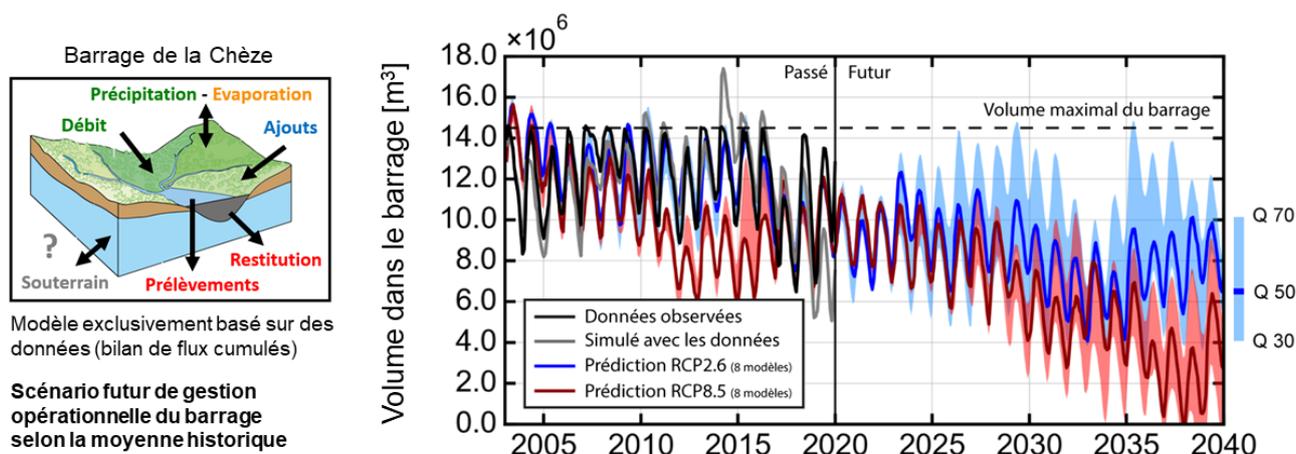


Figure 8. Projection des volumes d'eau dans le barrage de la Chèze jusqu'en 2040. Données : projections multi-modèles « EXPLORE2-2021-SIM2 », scénario RCP8.5.

Les projections affichent une tendance à la baisse des niveaux du barrage de la Chèze jusqu'en 2040, que ce soit pour le scénario le pessimiste RCP8.5 ou le scénario optimiste RCP2.6 (Figure 8). De plus, le barrage ne semble plus atteindre son volume maximal, dans les conditions de simulations et selon les hypothèses posées. Pour rappel, 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 entre les différents modèles sur l'évolution futures des précipitations reste très importante.

4.4 Sévérité des étiages et assecs en amont des stations d'épuration

La problématique des étiages pour les stations de traitement et d'épuration des eaux a aussi été traité 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.

En intégrant les projections climatiques aux modèles hydrogéologiques, nous sommes capables de simuler l'évolution spatio-temporelle de la quantité d'eau en amont des stations de rejets. Deux résultats d'intérêts principaux pour la problématique sont étudiés, la cartographie des cours d'eau permanents-intermittents-asecs et le débit mensuel minimal de chaque année civile (QMNA). Spécifiquement, le QMNA5 (débit d'étiage quinquennal) calculé représente le débit mensuel minimal ayant la probabilité 1/5 de ne pas

être dépassée une année donnée (valeur de QMNA atteinte une année sur cinq ou avec période de retour de 5 ans). Ce débit statistique informe sur la sévérité de l'étiage. Il reflète indirectement un potentiel de dilution et un débit d'étiage typique d'une année sèche.

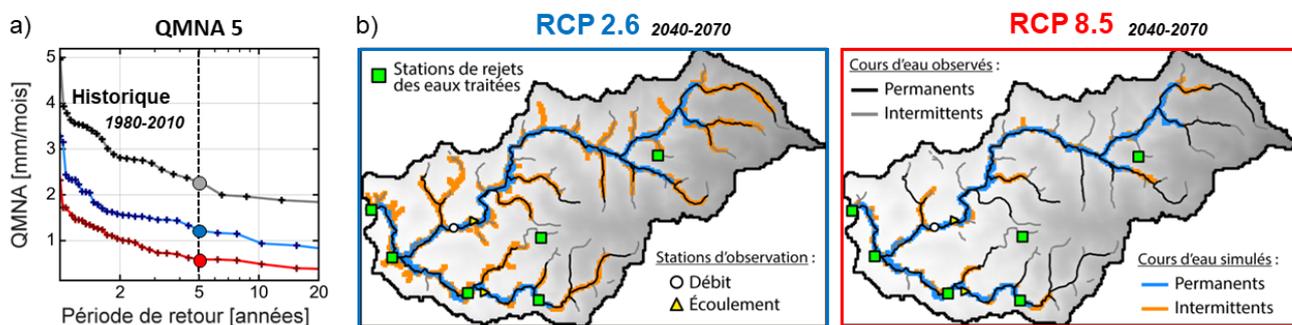


Figure 9. a) Projection des QMNA à l'exutoire du bassin-versant de la Vaunoise (nord-ouest de Rennes) et de la modification moyenne de l'intermittence des cours d'eau à l'horizon 2040-2070. Données : projections multi-modèles « DAYON-2015 », scénario RCP2.6 et RCP8.5

Le QMNA5 calculé pour la période 2040-2070 est divisé par 2 par rapport à l'historique (1980-2010) pour le scénario optimiste RCP2.6, et divisé par 4, pour le scénario pessimiste RCP8.5 (Figure 9a). En parallèle, les cartes de cours d'eau illustrent une modification de la dynamique du réseau hydrographique dans les conditions climatiques futures (Figure 9b). Les têtes de bassin versant sont particulièrement impactées, avec des assecs plus fréquents, aussi bien temporellement, que spatialement. Ainsi, certaines stations de rejets d'eaux traitées sont particulièrement vulnérables au changement climatique. Ce constat pose la question de la résilience du système de gestion actuel et de son potentiel redimensionnement.

5 Travaux complémentaires et perspectives de la chaire

5.1 Déploiement des méthodes développées et instrumentation des sites d'étude

L'ensemble des méthodes d'analyse et des outils de modélisation numérique sont disponibles en « open-access » à l'issue de ces travaux. Les codes informatiques sont rassemblés au sein d'une plateforme nommée HydroModPy, qui sera bientôt disponible en ligne. Les outils développés sont transférés aux partenaires d'Eau du Bassin Rennais et de Rennes Métropole. La démarche générale de modélisation et les innovations apportées en termes de calibration des modèles, à partir du réseau hydrographique, favorisent un déploiement rapide et efficace des outils sur d'autres sites d'études pour les problématiques locales à l'échelle de la Bretagne ou plus généralement dans d'autres régions à travers le monde.

Le besoin de données reste important pour répondre aux enjeux de caractérisation et de gestion des ressources en eau (quantité et qualité). Depuis janvier 2023, le bassin-versant du Canut est instrumenté et le niveau des cours d'eau est suivi en continu (mesures haute fréquence) pour mieux caractériser leur intermittence et les interactions subsurface-surface (Figure 10). Ce dispositif complète d'autres suivis de la qualité de l'eau (pesticides) mis en place sur ce site pilote. L'instrumentation a été réalisée dans le cadre de la chaire d'excellence « Ressources en eau du futur » financée par Rennes Métropole, chaire dont les travaux ont été couplés avec les travaux de la chaire de la Fondation Rennes 1.

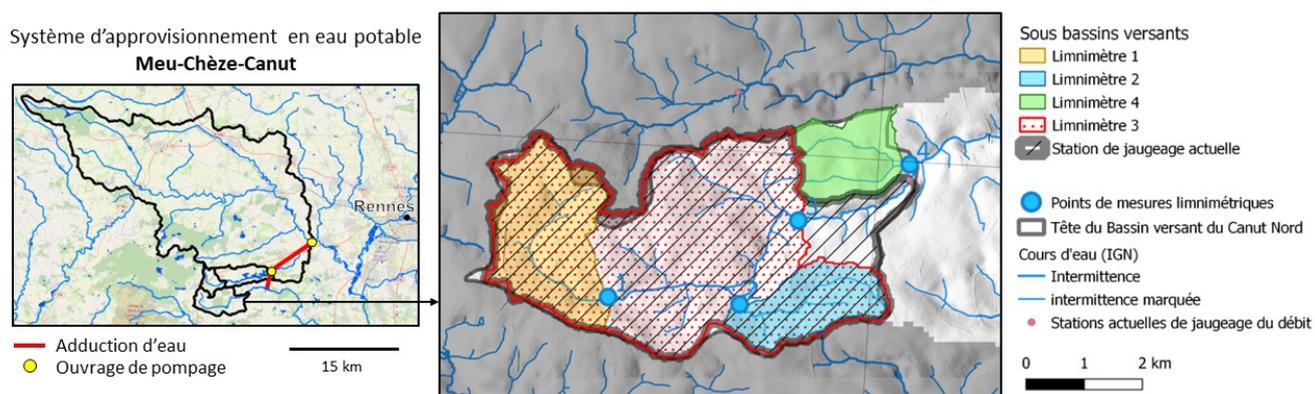


Figure 10. Carte de l'instrumentation de site : bassin versant du Canut.

5.2 Coupler les processus hydrologiques aux scénarios socio-économiques locaux

Dans le cadre de cette chaire d'excellence, une stratégie de modélisation plus complexe a été mise en place avec des modèles hydro(géo)logiques, couplés et entièrement intégrés, capables de simuler l'ensemble des processus de surface et de la subsurface (Figure 11). Les travaux se sont principalement intéressés à l'effet de l'occupation du sol sur la répartition spatio-temporelle des ressources en eau, à l'échelle du bassin versant du Meu (ouest de Rennes). Le modèle couplé surface-subsurface a permis d'explorer l'effet du bocage, du drainage agricole, du type de sol, et de son artificialisation, sur la dynamique hydrologique des bassins-versants. Les différents cas testés dans ces travaux se basent sur des scénarios prospectifs d'aménagement du territoire, conceptuellement développés en concertation avec les acteurs locaux et partenaires du projet.

5.3 Développement d'outils opérationnels sur la base de prévisions saisonnières

Dans le cadre des travaux de la chaire nous nous sommes focalisés sur des projections climatiques futures jusqu'à l'horizon 2100, et non pas sur des prévisions climatiques ou météorologiques. Les acteurs locaux du territoire ont identifié le besoin de prévisions hydrologiques à court/moyen terme (mensuel, hebdomadaire, à journalier). Une stratégie serait d'intégrer des prévisions climatiques saisonnières aux

modèles hydro(géo)logiques dans le but de produire des tendances probabilistes pour les semaines ou mois à venir. Quantifier ces tendances serait particulièrement pertinent pour construire des outils d'aide à la décision et d'anticipation de gestion des volumes d'eau des barrages.

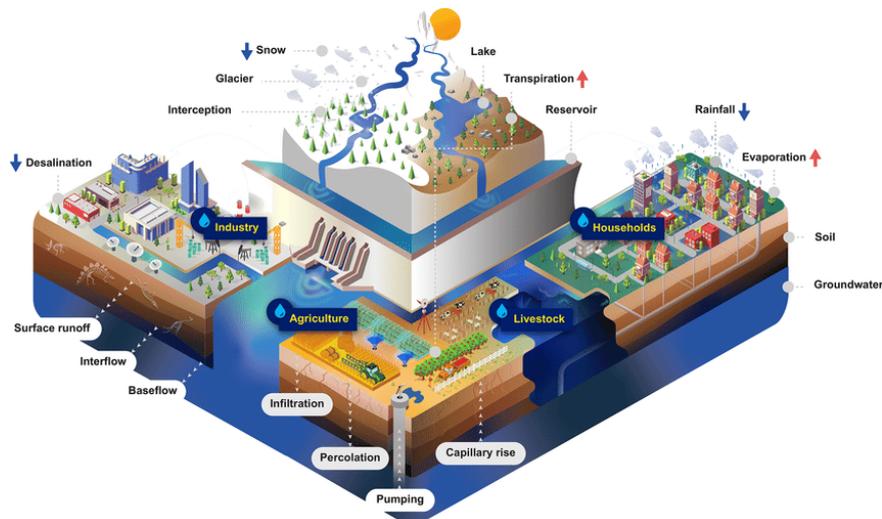


Figure 11. Bloc diagramme illustrant le modèle CWatM, capable de coupler et simuler les processus hydrologiques généraux des eaux de surface et souterraines, en tenant compte des activités anthropiques. Source : (Burek et al., 2020).

Certains projets exploitent déjà les prévisions climatiques dans l'étude d'impact du changement climatique sur les ressources en eau. C'est le cas du projet AQUI-FR (Vergnes et al., 2020) qui a pour principal objectif la mise en place d'un suivi et d'une prévision de la ressource en eau souterraine, à l'échelle de la France. Le principe est de capitaliser les efforts de modélisations hydrogéologiques régionales dans une plateforme commune. Plusieurs modèles sont déjà développés et opérationnels sur des bassins sédimentaires et aquifères karstiques. Les modèles hydrogéologiques développés dans le cadre de la chaire, à l'échelle du bassin rennais, ont pour but d'être intégrés à cette plateforme AQUI-FR. En collaboration directe avec Météo-France, cette plateforme de modélisation nationale prévoit le niveau des aquifères et du débit des cours d'eau, allant de l'échelle saisonnière à journalières, jusqu'au suivi en « quasi-temps réel ». Cette application fournit, par exemple, des prévisions de l'état des nappes et les débits d'étiage à 3 mois d'échéance.

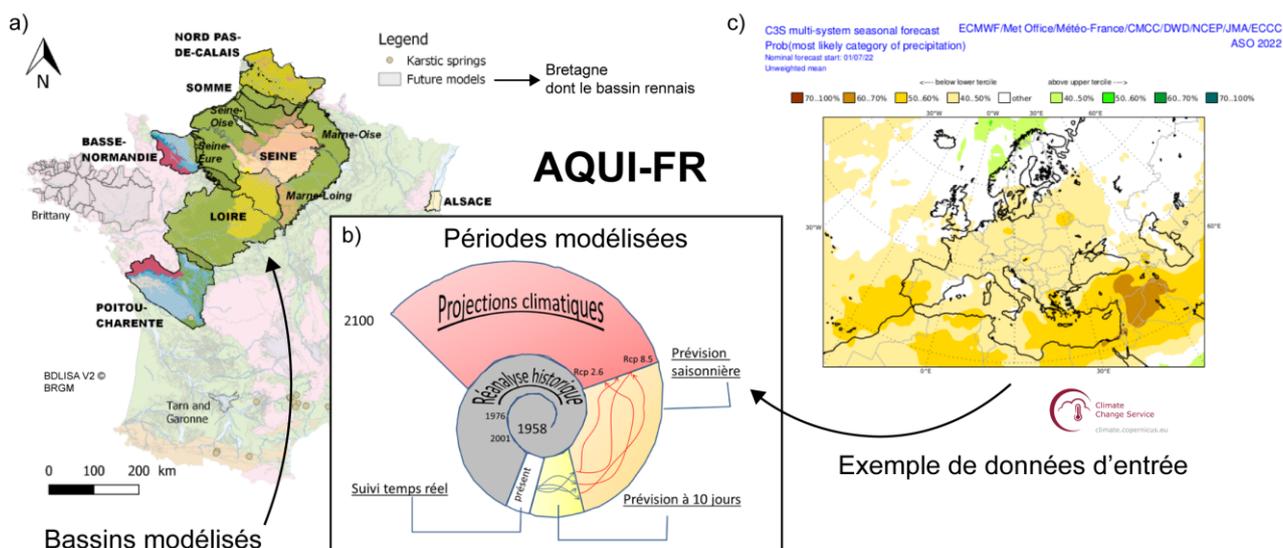


Figure 12. a) Modèles hydrogéologiques opérationnels et en cours de développement à l'échelle de la France dans le cadre du projet AQUI-FR. Source : (Vergnes et al., 2020). b) Illustration des périodes possibles à modéliser au sein de la plateforme. Source : site internet AQUI-FR. c) Exemple de projection saisonnière des changements de précipitations sur 3 mois (août à octobre 2022), simulé par l'ensemble multi-modèles C3S. Source : (Copernicus, 2022).

5.4 Vers de nouvelles stratégies adaptatives et de transformation

Les territoires du bassin rennais deviennent de plus en plus vulnérables au manque d'eau, aux risques, et autres bouleversements chroniques liés à l'eau (baisse des ressources disponibles, assèchement des cours d'eau, perte de biodiversité, conflits d'usages, etc.). Autour de cette problématique, les élus et acteurs locaux se rassemblent pour mettre en œuvre des actions à l'échelle locale et régionale, toujours avec cet objectif d'assurer un approvisionnement en eau de qualité, en continu, tout en préservant les écosystèmes et en pérennisant l'attractivité du territoire. Pour répondre à ce défi dans un contexte de changement, certaines stratégies sont déjà mises en place à l'échelle du bassin rennais.

Les résultats de la chaire Eaux et Territoires appuient l'ensemble de ces actions en lien avec les ressources en eau que l'on peut regrouper ci-dessous en 3 axes majeurs :

- **Sécuriser l'approvisionnement et anticipation**
 - Travaux de recherche et développement pour projeter/prévoir l'avenir des ressources en eau
 - Mieux gérer les transferts entre ressources sur la base de nouvelles expertises et des connaissances
 - Favoriser la diversité des captages et des usines de traitement d'eau potable
- **Économiser la ressource et rétention des eaux**
 - Sensibilisation de la population et mise en place de programmes d'économie d'eau (Figure 13a)
 - Leviers sur le prix de l'eau avec la mise en place de mesures fortes (fin de la dégressivité)
 - Renouvellement des infrastructures et du réseau pour limiter les pertes
 - Rétention des eaux à l'échelle du bassin versants, e.g. solutions fondées sur la nature (SfN) (Figure 13b)
 - Limiter l'imperméabilisation et l'artificialisation des sols
- **Accompagner le développement et la transition des territoires**
 - Mener des programmes de protection des ressources en eau : quantité et qualité (Figure 13a)
 - Réflexion autour du développement socio-économique : agriculture, aménagement du territoire, etc.

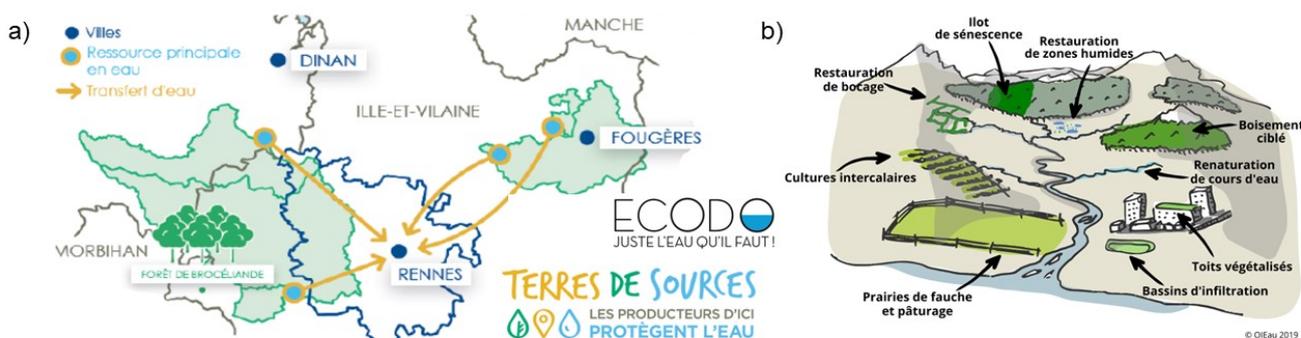


Figure 13. a) Exemple d'actions locales à l'échelle du bassin rennais : la marque de territoire « Terres de Sources » promeut les produits agricoles issus d'exploitations s'engageant à faire progresser leur mode de production pour protéger les ressources en eau, et le programme « ECODO » a pour objectif de favoriser et d'encourager les économies de l'eau auprès des usagers. Source : CEBR. b) Les mesures naturelles de rétention des eaux (MNRE) sont des actions qui contribuent à ralentir l'écoulement de l'eau par la restauration d'écosystèmes ou par la modification de pratiques notamment par des solutions fondées sur la nature (SfN). Source : modifié d'après (Fouillet & Le Grumelec, 2020).

6 Conclusion

Le changement climatique perturbe le cycle de l'eau et ses effets sont déjà perceptibles sur les ressources en eau du bassin rennais. L'ensemble du système d'alimentation en eau potable est fragilisé par les nouvelles conditions climatiques associée à la croissance de la demande en eau. Exposés à cette nouvelle vulnérabilité, les gestionnaires de l'eau potable d'Eau du Bassin Rennais font appel à l'appui scientifique pour projeter l'évolution de la disponibilité en eau en amont des ouvrages de captage. Cette requête nécessite de développer des questions de recherche spécifiques pour mieux comprendre le fonctionnement des hydrosystèmes et in fine, les modéliser.

Les travaux de la chaire ont suivi le triptyque de la démarche scientifique basée sur l'observation, l'expérimentation et la modélisation. En plus d'émettre de nouvelles hypothèses sur le fonctionnement hydrologique des sites d'études, les analyses de données rétrospectives recueillies sur les sites d'études ont permis d'orienter le choix des stratégies de modélisation. L'approche de modélisation hydrogéologique développée se focalise sur les relations entre la subsurface et la surface, et plus spécifiquement, sur les résurgences d'eau souterraine générées par l'interception de la nappe avec la topographie. Pour caler les modèles, une méthode de calibration basée sur le réseau hydrographique de surface est proposée, dans le but d'estimer les propriétés hydrauliques de l'aquifère. De cette innovation, découle la suite des travaux autour des cours d'eau intermittents, d'une importance majeure pour les écosystèmes, et de plus en plus prévalents sous l'effet du changement climatique. Autre originalité de la thèse, les modèles hydrogéologiques développés sont capables de simuler la dynamique spatio-temporelle d'expansion/contraction du réseau hydrographique, à l'échelle du bassin-versant. Ce type de modélisation permet de travailler sur les facteurs de contrôles hydrogéologiques, comme les temps de réponse de l'aquifère, déterminants dans la génération de l'intermittence des cours d'eau. En contrepartie, ces informations de surface, de plus en plus précises, et disponibles, peuvent être exploitées pour améliorer la capacité de prédiction des modèles hydro(géo)logiques.

La stratégie de modélisation parcimonieuse adoptée est reproductible sur de multiples sites d'étude. Les capacités de déploiement et de transférabilité ont permis de calibrer un premier modèle hydrogéologique pour la majeure partie des bassins-versants, destinés à l'alimentation en eau potable du bassin rennais. Une fois calibrés, les modèles sont opérationnels pour projeter l'évolution des ressources en eau, en y intégrant des projections climatiques futures. Ces projections climatiques édifiées à partir d'ensembles de multi-modèles, et selon des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (RCP2.6 et RCP8.5) jusqu'à l'horizon 2100, fournissent une enveloppe des trajectoires probables du climat, plus ou moins pessimistes. Les travaux de thèse ont mis en avant l'influence des caractéristiques physiques de l'aquifère (lithologie - propriétés hydrauliques - capacité de stockage - temps de réponse) sur la résilience des bassins-versants, face aux conditions climatiques futures, caractérisées par des épisodes de déficit en eau plus longs, et plus fréquents. Bien que les incertitudes s'accumulent sur l'ensemble de la chaîne de modélisation, on peut affirmer que les projections hydrologiques dressent un bilan plutôt pessimiste de la disponibilité en eau dans le futur à l'échelle du bassin rennais. D'après les analyses effectuées, selon le scénario RCP 8.5, la situation serait d'ores et déjà alarmante à un horizon futur relativement proche – dès les prochaines décennies – en continuant de se dégrader d'ici la fin du XXI^{ème} siècle.

Au vu des projections, le besoin de connaissances et d'outils pour adapter les stratégies de gestion devient critique pour Eau du Bassin Rennais et Rennes Métropole. Ce constat se vérifie déjà aujourd'hui, au vu des expériences passées et des situations de crise actuelles, telle que l'année de sécheresse exceptionnelle de 2022. Ces demandes nécessiteront le déploiement des modèles à d'autres échelles, d'instrumentation sur les sites d'études, mais aussi la création d'outils plus spécifiques (e.g. modélisation du barrage de la Chèze). En misant sur l'anticipation, les gestionnaires de l'eau potable évoquent la nécessité d'avoir recourt à des prévisions hydrologiques, en quasi-temps réel, ou à l'échéance hebdomadaire/mensuelle. Néanmoins, cette stratégie est complexe à entreprendre et constitue un réel challenge technique, et scientifique (WATERLINE project, 2022). Au stade actuel des travaux, les outils développés en accès libre, les innovations proposées, et les résultats produits dans cette thèse, constituent une première base pour répondre à ce défi majeur, et complexe, qu'est l'intégration du changement climatique à la gestion de la ressource en eau.

7 Références

- Abhervé, R., Gauvain, A., Roques, C., Longuevergne, L., Louaisil, S., Aquilina, L., & Dreuzy, J. De. (2022). Calibration of groundwater seepage on the spatial distribution of the stream network to assess catchment-scale hydraulic conductivity. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, Preprint*, 1–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/hess-2022-175>
- Beaufort, A. B., Sauquet, E., Michon, J., Magand, C., Nowak, C., Beaufort, A. B., Sauquet, E., Michon, J., Magand, C., & Mieux, C. N. (2019). Mieux connaître l'intermittence des cours d'eau grâce aux données de l'observatoire national des étiages "ONDE." *Colloque International UNESCO-SHF "Sécheresses, Étiages et Déficit En Eau"*, Paris, France.
- Blöschl, G., Bierkens, M. F. P., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., Kirchner, J. W., McDonnell, J. J., Savenije, H. H. G., Sivapalan, M., Stump, C., Toth, E., Volpi, E., Carr, G., Lupton, C., Salinas, J., Széles, B., Viglione, A., Aksoy, H., ... Zhang, Y. (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH) – a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, *64*(10), 1141–1158. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1620507>
- Büntgen, U., Urban, O., Krusic, P. J., Rybníček, M., Kolář, T., Kyncl, T., Ač, A., Koňasová, E., Čáslavský, J., Esper, J., Wagner, S., Saurer, M., Tegel, W., Dobrovolný, P., Cherubini, P., Reinig, F., & Trnka, M. (2021). Recent European drought extremes beyond Common Era background variability. *Nature Geoscience*, *14*(4), 190–196. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00698-0>
- Burek, P., Satoh, Y., Kahil, T., Tang, T., Greve, P., Smilovic, M., Guillaumot, L., Zhao, F., & Wada, Y. (2020). Development of the Community Water Model (CWatM v1.04) - A high-resolution hydrological model for global and regional assessment of integrated water resources management. *Geoscientific Model Development*, *13*(7), 3267–3298. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3267-2020>
- Copernicus. (2022). *Seasonal forecasts: The C3S regularly publishes seasonal forecast products. These products are based on data from several state-of-the-art seasonal prediction systems.* <https://climate.copernicus.eu/seasonal-forecasts>
- Datry, T., Larned, S. T., & Tockner, K. (2014). Intermittent rivers: A challenge for freshwater ecology. *BioScience*, *64*(3), 229–235. <https://doi.org/10.1093/biosci/bit027>
- Dayon, G. (2015). *Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies.* Université de Toulouse. Thèse.
- Dubreuil, V., Planchon, O., Letg, C., Cnrs, U. M. R., Ifr, F. R., Université, C., Le, R. H., & Rennes, M. (2009). Bilan d'un Siècle d'Observation Des Secheresses Et Des Types De Circulations Atmospheriques Associees a Rennes. *Geographia Technica. Numéro Spécial, May 2014*, 139–144.
- Dubreuil, Vincent. (2022). Le changement climatique en France illustré par la classification de Köppen. *La Météorologie*, *116*, 37–47.
- Explore 2070. (2012). Explore 2070 : Hydrologie de surface, Rapport de synthèse. *Ministère de l'écologie Du Développement Durable, Des Transports et Du Logement.*
- Foster, S., Koundouri, P., Tuinhof, A., Kemper, K., Nanni, M., & Garduño, H. (2006). Sustainable Groundwater Groundwater Management : Management Groundwater Dependent Ecosystems. *Main, Figure 1*, 1–4.
- Fouillet, M., & Le Grumelec, S. (2020). *Les mesures naturelles de rétention d'eau : 10 retours d'expérience en France métropolitaine.* Office International de l'Eau (OIEau).
- Fovet, O., Belemtougri, A., Boithias, L., Marylise, J. C., Kevin, C., & Braud, I. (2021). Intermittent rivers and ephemeral streams : Perspectives for critical zone science and research on socio-ecosystems. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Water, March*, 1–33. <https://doi.org/10.1002/wat2.1523>
- 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.*
- Lamy, C. (2014). *Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne* [Université Rennes 2. Thèse.]. 2013REN20025 . tel-01059818
- Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., & Rousset-Regimbeau, F. (2020). The Latest Improvements in SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou Hydrometeorological Model over France. *Geoscientific Model Development Discussions*, 1–32. <https://doi.org/10.5194/gmd-2020-31>
- Magand, C., Alves, M. H., Calleja, E., Datry, T., Dörflinger, G., England, J., Gallart, F., Gómez, R., Jorda-Capdevila, D., Marti, E., Munne, A., Pastor, V. A., Stubbington, R., Tziortzis, I., & Von Schiller, D. (2020). Intermittent Rivers and Ephemeral streams : What water managers need to know Edited by : Contributing authors. *Technical Report – Cost ACTION CA 15113.* <https://doi.org/10.5281/zenodo.3888474>
- Messenger, M. L., Lehner, B., Cockburn, C., Lamouroux, N., Pella, H., Snelder, T., Tockner, K., Trautmann, T., Watt, C., & Datry, T. (2021). Global prevalence of non-perennial rivers and streams. *Nature*, *594*(7863), 391–397. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03565-5>
- Météo-France. (2021). *Les nouvelles projections climatiques de référence DRIAS 2020 pour la métropole.* <http://www.drias-climat.fr/>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *93*(4), 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- Taylor, R. G., Scanlon, B., Doll, P., Rodell, M., van Beek, R., Wada, Y., Longuevergne, L., Leblanc, M., Famiglietti, J. S., Edmunds, M., Konikow, L., Green, T. R., Chen, J. Y., Taniguchi, M., Bierkens, M. F. P., MacDonald, A., Fan, Y., Maxwell, R. M., Yechieli, Y., ... Treidel, H. (2013). Ground water and climate change. *Nature Climate Change*, *3*(4), 322–329. <https://doi.org/10.1038/nclimate1744>
- Vergnes, J.-P., Roux, N., Habets, F., Ackerer, P., Amraoui, N., Besson, F., Caballero, Y., Courtois, Q., de Dreuzy, J.-R., Etchevers, P., Gallois, N., Leroux, D. J., Longuevergne, L., Le Moigne, P., Morel, T., Munier, S., Regimbeau, F., Thiéry, D., & Viennot, P. (2020). The AquifR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France: evaluation over a 60-year period. *Hydrology and Earth System Sciences*, *24*(2), 633–654. <https://doi.org/10.5194/hess-24-633-2020>
- WATERLINE project. (2022). *NEW SOLUTIONS FOR DATA ASSIMILATION AND COMMUNICATION TO IMPROVE HYDROLOGICAL MODELLING AND FORECASTING.* CHIST-ERA 2019. <http://waterlineproject.eu/>
- Winter, T. C. (1999). Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, *7*(1), 28–45. <https://doi.org/10.1007/s100400050178>
- Zipper, S. C., Hammond, J. C., Shanafield, M., Zimmer, M., Datry, T., Jones, C. N., Kaiser, K. E., Godsey, S. E., Burrows, R. M., Blaszcak, J. R., Busch, M. H., Price, A. N., Boersma, K. S., Ward, A. S., Costigan, K., Allen, G. H., Krabbenhoft, C. A., Dodds, W. K., Mims, M. C., ... Allen, D. C. (2021). Pervasive changes in stream intermittency across the United States. *Environmental Research Letters*, *16*(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac14ec>