



**ETUDE D'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR  
LE REGIME HYDROLOGIQUE EN FRANCE  
METROPOLITAINE – SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

**Eric SAUQUET, INRAE  
Guillaume THIREL, INRAE  
Jean-Pierre VERGNES, BRGM  
Florence HABETS, ENS**

**31/08/2022**

Avec le soutien financier de :



Le projet Explore2, porté par INRAE et l'Office International de l'eau (OiEau), s'inscrit dans la suite de l'étude Explore 2070 (2010-2012) grâce à laquelle les acteurs de la recherche, autour du Ministère de l'écologie, avaient établi des premiers scénarios prospectifs de disponibilités des ressources en eau à l'échelle de la France à horizon 2070. Officiellement lancé en juillet 2021, co-financé par les partenaires du projet, le Ministère de la transition écologique (MTE) et l'Office français de la biodiversité (OFB), le projet Explore2 a pour objectif, d'ici 2024, d'actualiser les connaissances sur l'impact du changement climatique sur l'hydrologie à partir des publications du GIEC (CMIP5), mais aussi d'accompagner les acteurs des territoires dans la compréhension et l'utilisation de ces résultats pour adapter leurs stratégies de gestion de la ressource en eau.

Explore2 – Etude d'impact du changement climatique sur le régime hydrologique  
en France métropolitaine - état de l'art

<b>Nom du projet</b>	<b>Explore2 : Anticiper les évolutions climatiques et hydrologiques en France</b>
Nom du rapport	Etude d'impact du changement climatique sur le régime hydrologique en France métropolitaine - état de l'art
Auteur(s)	Eric SAUQUET, INRAE Guillaume THIREL, INRAE Jean-Pierre VERGNES, BRGM Florence HABETS, ENS
Numéro de version	V0
Date contractuelle de remise du livrable	01/07/2022
Date effective de remise du livrable	31/08/2022
Statut du document	<del>version provisoire</del> /version finale
Accès en ligne	libre/ <del>restreint</del> / <del>confidentiel</del>
Mots-clés (5 maximum)	Modélisation, incertitude, débit, RCP, France

## Table des matières

1. Introduction .....	9
2. Études internationales (eaux de surface) .....	10
3. Études nationales (eaux de surface) .....	14
4. Études régionales (eaux de surface) .....	19
4.1. Le bassin Adour-Garonne .....	19
4.2. Le bassin Artois-Picardie .....	19
4.3. Le bassin Loire-Bretagne .....	20
4.4. Le bassin Rhin-Meuse .....	20
4.5. Le bassin Rhône-Méditerranée-Corse .....	25
4.6. Le bassin Seine-Normandie .....	29
5. Etudes régionales (eaux souterraines) .....	32
6. Conclusion .....	37
7. Références .....	39

## Résumé

Explore2070 (2010-2012) est la première étude prospective nationale sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Outre la fourniture de données hydro-climatiques pour l'horizon 2050-2070, Explore2070 a produit un état des connaissances et des travaux existants sur la question de l'impact du changement climatique sur les eaux de surface en France (Chazot *et al.*, 2012). Ce rapport est une mise à jour des connaissances acquises depuis la fin d'Explore2070. Les études ont été identifiées pour l'essentiel dans les journaux scientifiques. Nous avons complété le panorama des études sur les eaux de surface par un inventaire de celles dédiées aux eaux souterraines réalisées depuis la fin du projet Explore2070 en privilégiant aussi les articles de revues scientifiques. Cette synthèse sera exploitée ultérieurement pour mettre en perspective les résultats d'Explore2.

## Acronymes

ANR : Apports Naturels Reconstitués

INRAE : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement

MTE : Ministère de la transition écologique

OFB : Office français de la biodiversité

OiEau : Office international de l'eau

QA : Module (moyenne des débits annuels)

QJXAT : Débit journalier maximal annuel de période de retour T (T en année)

QMNA5 : Débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans

## Liste des figures

Figure 1 : Changement relatif du débit médian annuel moyen par rapport au niveau de référence (1981-2010) pour les trois niveaux de réchauffement global de (a) 1,5°C, (b) 2°C, et (c) 3°C (extrait de Bisselink et al. (2020))	10
Figure 2 : Changement projeté de la fréquence des sécheresses par niveau de réchauffement relatif au à la période de référence (1981-2010). Le rouge représente une augmentation de la fréquence, tandis que le bleu indique une réduction de la fréquence. Le gris signifie que les changements projetés ne sont pas robustes (moins de 2/3 des projections climatiques s'accordent sur le signe du changement de la fréquence des sécheresses). Extrait de Cammalleri et al. (2020)	11
Figure 3 : Changements relatifs de la moyenne de l'ensemble multi-modèle du débit journalier maximal annuel de période de retour 100 ans (QJXA100) et du débit annuel moyen (QA) par source des projections pour deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP8.5 et SSP585). Les régions où les changements ne sont pas significatifs à 5% sont hachurées (extrait de Di Sante et al., 2021)	12
Figure 4 : Evolutions relatives possibles (en%) du débit QMNA5 entre 1961-1990 et 2046-2065 - Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques × 7 GCMs). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations	14
Figure 5 : Evolutions relatives possibles (en%) du module QA entre 1961-1990 et 2046-2065 - Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques × 7 GCMs). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations	15
Figure 6 : Evolution en % des précipitations annuelles sur la période 2070–2100 par rapport à la période 1960–1990 en moyenne sur 14 projections climatiques de CMIP5 sous scénarios RCP8.5. Figure issue de Dayon et al. (2018)	16
Figure 7 : Moyenne d'ensemble des changements relatifs des débits saisonniers, du module QA et du QMNA5 pour la période 2070-2100 par rapport à la période 1960-1990 pour le RCP 8.5	17
Figure 8 : Proportion d'assec moyenne sur la période juin-novembre pour les périodes 1960-2018 (a), 2021-2050 (b) et 2071-2100 (c) calculées pour chaque HER (applicable aux cours d'eau de tête avec un ordre de Strahler inférieur à cinq)	18
Figure 9 : Anomalies futures et sources d'incertitude des hauts débits (Q95) sur le bassin de la Meuse de 2006 à 2085 en moyenne glissante sur 30 ans. Sources d'incertitude : RCPs : scénarios d'émission de gaz à effet de serre, GCMs : modèles climatiques de circulation générale, RCMs : modèles climatiques régionaux, HMs : structure des modèles hydrologiques, HM Params : paramètres des modèles hydrologiques, Res. Var. : variance résiduelle, Int. Var. : variabilité interne	22
Figure 10 : Distributions des évolutions des débits simulés par deux modèles hydrologiques (GRSD et LARSIM) pour les deux périodes de projection (2021-2050 à gauche ; 2071-2100 à droite) en utilisant trois projections climatiques (CNRM, IPSL et ADC, un ensemble de projections descendues en échelle par la méthode Advanced Delta Change) forcées par trois RCPs 2.6, 4.5 et 8.5, sur l'ensemble des bassins de la zone d'étude. Les évolutions en pourcentage de l'ensemble des stations sont agrégées dans les boîtes à moustaches. A noter que sont absents les scénarios radiatifs RCP 2.6 et 4.5 pour LARSIM ainsi que IPSL RCP 2.6	24
Figure 11 : Idem que la figure précédente pour le débit de crue QJXA10	24
Figure 12 : Idem que la figure précédente pour le débit d'étiage QMNA5	25

Figure 13 : Changements projetés au milieu de siècle sur les débits mensuels moyens. Pour Hydro-CH2018, la période de référence est 1981 – 2010 et les résultats sont présentés pour l'horizon « 2060 », correspondant à la période 2045 – 2074.....	27
Figure 14 : Changements relatifs moyens des débits moyens sur cinq jours à (a) Serre-Ponçon (3 580 km <sup>2</sup> ) et (b) Cadarache (11 700 km <sup>2</sup> ) pour les cinq modèles GR5J, MORDOR, CEQUEAU, CLSM et J2000 par rapport à la période 1980-2009. Les lignes épaisses représentent la période actuelle de trois mois des étiages (LF) et de hautes eaux (HF). Les points indiquent l'occurrence du minimum et du maximum de la moyenne des débits mobiles sur cinq jours dans les conditions actuelles. Les zones grisées définissent l'intervalle interquartile sur la période temps 1980-2009.....	29
Figure 15 : Débits journaliers moyens pour la Seine à Paris. A gauche, les débits naturels (tons violets, i.e. observés naturalisés ou simulés sans prise en compte des Grands Lacs) et influencés (tons verts, i.e. observés réels ou bien simulés avec prise en compte des grands Lacs) sur la période 1961-1991. Les simulations sont obtenues grâce à un forçage de climat observé. A droite, les simulations obtenues en projections : dans les tons bleus, sans prise en compte des Grands Lacs, dans les tons rouges, avec prise en compte des Grands Lacs. Les enveloppes représentent la gamme des possibles pour les sept projections utilisées.....	31
Figure 16 : Changement du niveau piézométrique minimal entre la période 1961-1991 et 2046-2065 par projection climatique.....	33
Figure 17 : Evolution moyenne sur le domaine Aqwi-FR et sur l'ensemble des modèles de climat de l'indice piézométrique standardisé de 1950 à 2100 pour les trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre.....	34
Figure 18. Occurrence des sécheresses en nappe sur le domaine Aqwi-FR : pour chaque période de 30 ans (couleurs), et tous les modèles de climat de chaque scénario RCP (forme du symbole). Chaque point présente l'extension moyenne (en abscisse), l'intensité moyenne (en ordonnée) et la durée (taille du symbole) des épisodes de sécheresse en nappe pour chaque période de 30 ans indiquée en couleur. Une sécheresse est considérée avec un niveau très bas (période de retour 10 ans). .....	35
Figure 19. Durée des sécheresses hydrogéologiques (SPLI en dessous de la décennale sèche) en fin de siècle (2070-2100) exprimée en pourcentage du temps, en moyenne sur les modèles de climat pour chacun des 3 scénarios d'émission. ....	36

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques des simulations produites dans les études d'impact du changement climatique à l'échelle nationale. * : certains GCMs sont déclinés en plusieurs runs. ....	18
Tableau 2 : Principales caractéristiques des simulations sur la Garonne produites dans les études d'impact du changement climatique .....	19
Tableau 3 : Principales caractéristiques des simulations sur la Meuse produites dans les études d'impact du changement climatique. * : Les débits observés ont été naturalisés lorsque nécessaire.....	21
Tableau 4 : Principales caractéristiques des simulations sur la Moselle, la Sarre et les affluents du Rhin, produites dans les études d'impact du changement climatique.....	23
Tableau 5 : Principales caractéristiques des simulations sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse produites dans les études d'impact du changement climatique .....	26
Tableau 6 : Principales caractéristiques des simulations sur la Seine produites dans les études d'impact du changement climatique .....	30
Tableau 7 : Evolution sur le domaine Aqwi-FR de la recharge, du nombre de jours de recharge effective (i.e. du nombre de jours où le niveau de la nappe est en hausse), et des volumes apportés par la nappe aux rivières.....	34

## 1. Introduction

Explore2070 est la première étude prospective nationale sur l'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Outre la fourniture de données hydro-climatiques pour l'horizon 2050-2070, Explore2070 a produit un état des connaissances et des travaux existants sur la question de l'impact du changement climatique sur les eaux de surface en France (Chazot *et al.*, 2012). Ce rapport constitue une mise à jour des connaissances acquises depuis la fin d'Explore2070. Les études ont été identifiées pour l'essentiel dans les journaux scientifiques. Elles sont résumées et leurs conclusions sont mises en perspective notamment par rapport aux résultats d'Explore2070.

Nous avons complété le panorama des études sur les eaux de surface par un inventaire de celles dédiées aux eaux souterraines réalisées depuis la fin du projet Explore2070 en privilégiant aussi les articles de revues scientifiques.

Cet inventaire occulte peut-être une partie de la littérature « grise », c'est-à-dire des rapports techniques d'études ayant examiné à des échelles locales l'impact du changement climatique.

Le rapport fait dans un premier temps référence aux études internationales avant d'investiguer celles réalisées à des échelles régionales.

## 2. Études internationales (eaux de surface)

La France apparaît, bien évidemment, dans des études globales et on trouvera des résultats sous forme de cartes ou de statistiques à l'échelle nationale ou des évolutions de variables hydrologiques sur une ou plusieurs stations hydrométriques françaises, données à titre d'illustration (ex. la Loire à Montjean et le Rhône à Beaucaire dans Forzieri *et al.* (2014)). L'intérêt de telles études est de mettre en perspective les changements affectant l'Hexagone par rapport à ceux des pays voisins.

Des projections hydrologiques ont été élaborées à l'échelle européenne et pour nombre d'entre elles, ont impliqué le Centre commun de recherche (JRC, Joint Research Centre, <https://joint-research-centre.ec.europa.eu>), service scientifique interne de la Commission européenne. Leur élaboration est rythmée par la publication de projections climatiques – les travaux du GIEC - et apportent ainsi un éclairage sur l'impact du changement climatique (ex. étude PESETA IV, Feyen *et al.*, 2020 ; European Commission, 2020) en soutien aux politiques de l'Union Européenne. Les simulations de débits futurs produites par le JRC sont issues du modèle hydrologique distribué LISFLOOD (van der Knijff *et al.*, 2010). Certaines d'entre elles ont alimenté le démonstrateur de service hydro-climatique dans le cadre du projet européen SWICCA (Service for Water Indicators in Climate Change Adaptation, Donnelly *et al.*, 2018), qui n'a pas été développé au-delà du stade de maquette, ou sur le site du JRC (<https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/20247f06-469c-4607-8af1-a5a670082471>). Ce modèle a déjà été utilisé dans des études d'impact à l'échelle européenne (ex. Forzieri *et al.*, 2014).

Dans les études les plus récentes (Bisselink *et al.*, 2020 ; Cammalleri *et al.*, 2020), les résultats sont présentés par niveau de réchauffement global, et non plus par horizon et par RCP, sur une fenêtre temporelle de 30 ans centrée sur l'année où le niveau de réchauffement global spécifique est atteint. Ceci permet de distinguer les impacts du moment où un niveau de réchauffement global visé est atteint. Les simulations à partir d'observations sur la période 1981-2010 servent de référence en temps présent et LISFLOOD a été forcé avec l'ensemble de 22 projections climatiques débiaisées issues de l'ensemble EURO-CORDEX (11 RCP4.5 + 11 RCP8.5) de 1981 à 2100. Le modèle a la capacité d'intégrer les usages (irrigation, industrie, énergie, élevage et demande en eau domestique).

Bisselink *et al.* (2020) (Figure 1) mettent en évidence une réponse hydrologique organisée par bande de latitude avec des pays d'Europe du Sud vraisemblablement confrontés à une diminution de la disponibilité de l'eau, notamment l'Espagne, le Portugal, la Grèce, Chypre, Malte, l'Italie et la Turquie, et à l'inverse, les pays d'Europe centrale et septentrionale bénéficiant d'une disponibilité annuelle en eau accrue.

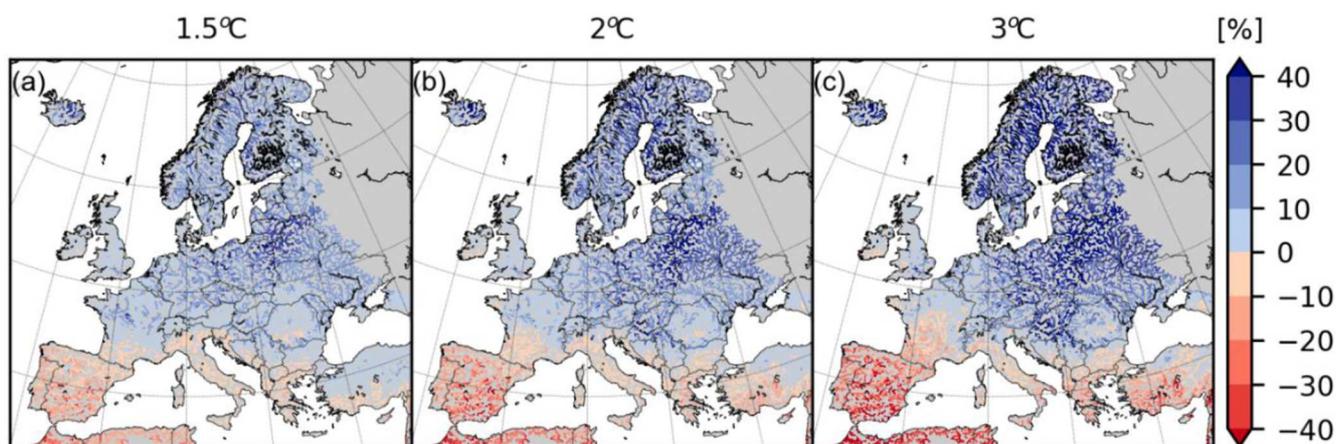


Figure 1 : Changement relatif du débit médian annuel moyen par rapport au niveau de référence (1981-2010) pour les trois niveaux de réchauffement global de (a) 1,5°C, (b) 2°C, et (c) 3°C (extrait de Bisselink *et al.* (2020))

Pour l'étude des étiages (Cammalleri *et al.*, 2020), le débit journalier minimum annuel de la rivière a été utilisé comme indicateur de sécheresse. L'analyse a porté sur les rivières drainant plus de 1.000 km<sup>2</sup>, en occultant les cours d'eau intermittents. Une distribution statistique adaptée aux valeurs extrêmes et au cadre non stationnaire a été ajustée à l'échantillon des débits minimums annuels pour faire le lien entre l'intensité de l'étiage et sa probabilité d'occurrence. L'analyse démontre un glissement en fréquence sans préciser à quel quantile d'étiage ce glissement se rapporte. On peut cependant en tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats de l'analyse des risques montrent qu'avec le réchauffement climatique, les débits extrêmement faibles des cours d'eau deviendront plus graves et persistants dans le sud de l'Europe (Figure 2). De même, la plupart de l'Europe occidentale sera confrontée à des conditions de sécheresse de plus en plus fréquentes et intenses. Cela contraste avec la Scandinavie et le nord-est de l'Europe, où les projections suggèrent une réduction du risque de sécheresse, y compris pour un réchauffement de 3°C,
- La réponse hydrologique au changement de température est quasi identique à celle constatée sur la ressource annuelle (Bisselink *et al.*, 2020),
- Pour la France, à 1.5 °C, la fréquence des sécheresses augmentera sur la moitié de son territoire, et cette augmentation concernera la quasi intégralité des cours d'eau avec un réchauffement de 3°C.

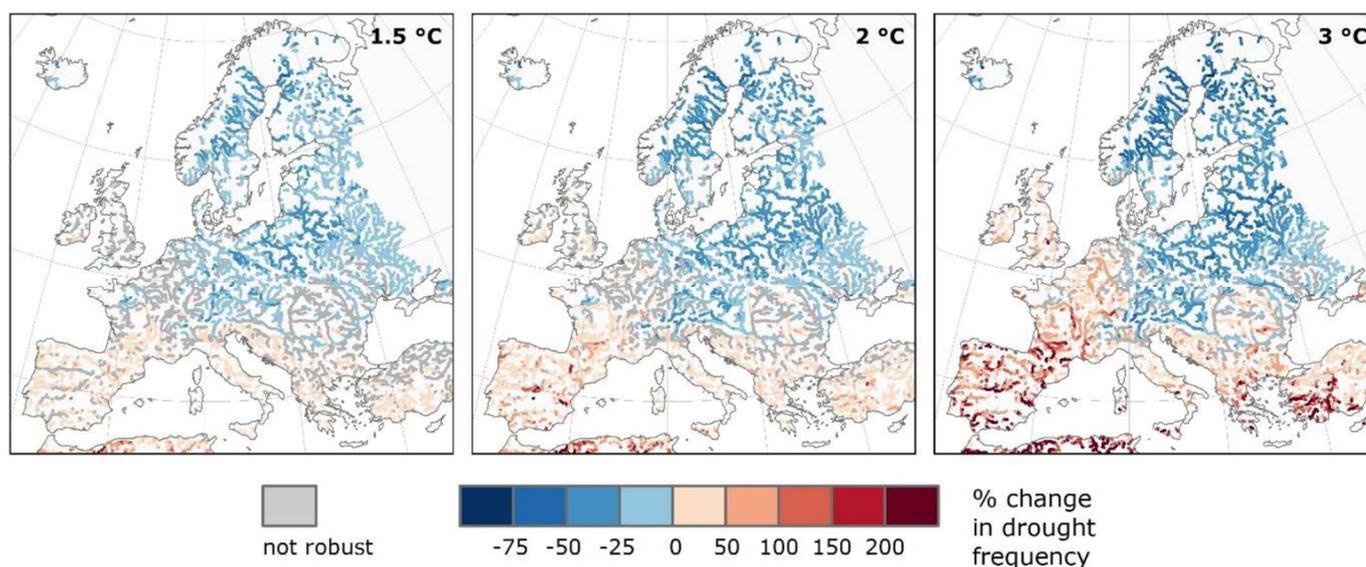


Figure 2 : Changement projeté de la fréquence des sécheresses par niveau de réchauffement relatif au à la période de référence (1981-2010). Le rouge représente une augmentation de la fréquence, tandis que le bleu indique une réduction de la fréquence. Le gris signifie que les changements projetés ne sont pas robustes (moins de 2/3 des projections climatiques s'accordent sur le signe du changement de la fréquence des sécheresses). Extrait de Cammalleri *et al.* (2020)

Concernant les crues (Roudier *et al.*, 2016), sur la base des simulations de trois modèles hydrologiques - dont LISFLOOD - alimentés par 11 projections climatiques débiaisées issues d'EURO-CORDEX, un réchauffement global de +2°C en Europe aurait pour conséquence une augmentation de la sévérité des crues au sud de la latitude 60°N (évolution jugée robuste sur une grande partie de la Roumanie, de l'Ukraine, de l'Allemagne, de la France et du nord de l'Espagne). Au nord de cette ligne, les crues seraient globalement à la baisse. L'analyse portait sur les quantiles de débits journaliers maxima annuels de période de retour 10 et 100 ans.

Une alternative a été suggérée par Di Sante *et al.* (2021) qui exploitent les sorties « Runoff », interprétables en volumes produits au niveau de chaque maille et contribuant aux écoulements en rivière, des modèles climatiques GCM ou GCM/RCM et les propagent dans le réseau hydrographique en utilisant la fonction de routage du modèle hydrologique distribué CHyM. L'étude est centrée sur l'évolution des crues mais les auteurs produisent des cartes et des statistiques de changement de débit annuel moyen QA obtenues avec trois différents ensembles EURO-CORDEX (GCM/RCM non corrigés des biais), CMIP5 (GCM sans descente

d'échelle non corrigés des biais) et CMIP6 (GCM sans descente d'échelle non corrigés des biais) sous différents scénarios d'émission contrastés (RCP2.6 et 8.5 pour EURO-CORDEX et CMIP5, et SSP126 et SSP585 pour CMIP6) et à deux horizons (milieu et fin de siècle). Les auteurs rappellent et démontrent la nécessité de s'appuyer sur des données climatiques de fine résolution pour une meilleure prise en compte des complexités et hétérogénéités hydro-climatiques locales. En fin de siècle sous scénarios les plus pessimistes (RCP8.5 et SSP585), une hausse du risque de crue est projetée dans le Benelux, le nord de la France, le bassin de la Saône, et tout ou partie du Royaume Uni (Figure 3, gauche), et ces changements sont globalement partagés entre les trois sources de projection CMIP5, CMIP6 et EURO-CORDEX sur cette partie de l'Europe. Les réponses sont différenciées selon la nature et les facteurs de contrôle dominants des crues (« crue éclair » en réponse à des pluies extrêmes en Europe centrale (dont la France) versus crues de fonte nival dans le nord-est de l'Europe). Les tendances sur le module QA sont cohérentes avec les autres études pan-européennes : mise en évidence d'un gradient de réponse nord-sud avec des débits augmentés dans le nord de l'Europe et diminué dans le sud (Figure 3, droite).

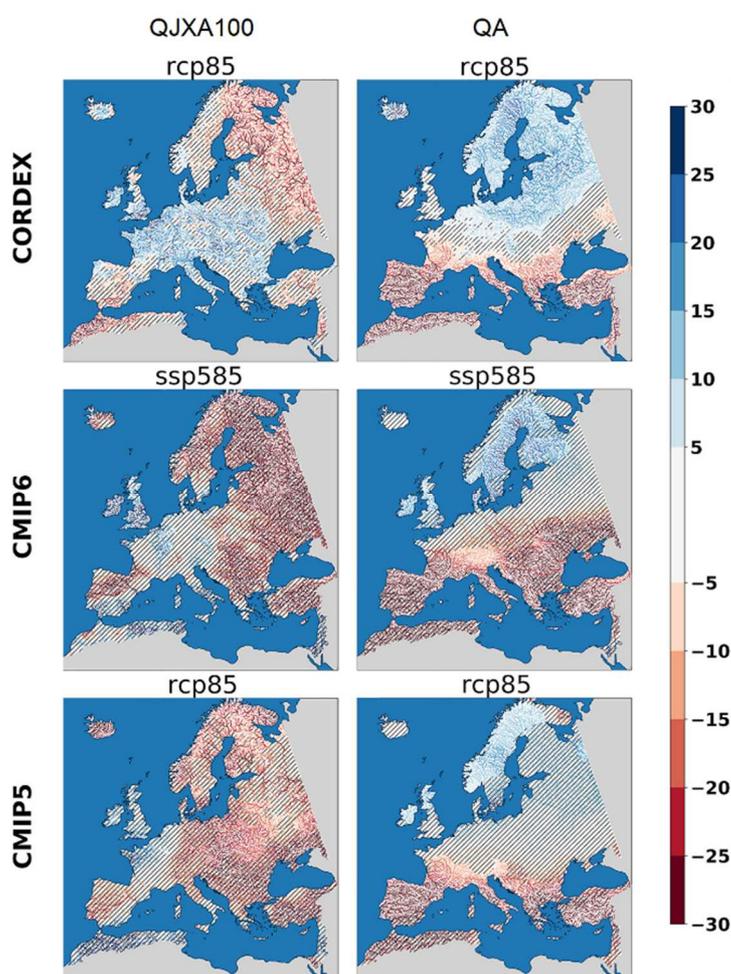


Figure 3 : Changements relatifs de la moyenne de l'ensemble multi-modèle du débit journalier maximal annuel de période de retour 100 ans (QJXA100) et du débit annuel moyen (QA) par source des projections pour deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP8.5 et SSP585). Les régions où les changements ne sont pas significatifs à 5% sont hachurées (extrait de Di Sante et al., 2021)

Les modèles appliqués le sont bien souvent avec une paramétrisation globale ajustée sur un nombre réduit de stations hydrométriques (donc de contextes hydro-climatiques contrastés) (ex. 258 dans Forzieri *et al.* (2014)), et également validé sur un faible échantillon de points de mesure de débit, comparativement à l'extension spatiale du domaine modélisé : ex. 446 stations hydrométriques dans Forzieri *et al.* (2014), 46 dans Greuell *et al.* (2015), 42 dans Di Sante *et al.* (2021), 428 dans Roudier *et al.* (2016) ou 352 pour les modèles qui ont alimenté le démonstrateur de SWICCA (SMHI, 2021)). De ce fait, il est difficile de considérer

ces modèles comme complètement validés. On peut également soupçonner que les forçages climatiques à l'échelle européenne (y compris en temps présent) ne sont pas de la même qualité que ceux que l'on peut obtenir à l'échelle nationale. Des spécificités locales échappent forcément aux modèles compte tenu de la résolution de travail et, de ce fait, de telles études ne peuvent donner qu'un aperçu des tendances à méso-échelle, comme le rappellent Krysanova *et al.* (2018) (« *Application of hydrological models for climate impact assessment at a large (global or continental) scale without checking their performance can be useful for obtaining global/continental overviews and motivating regional- and basin-scale studies, but zooming information from large-scale maps into regions should be restricted.* »). Une analyse et une modélisation plus détaillées à une échelle plus fine est indispensable pour comprendre pleinement tous les changements, notamment en montagne, et assurer une robustesse aux résultats.

### 3. Études nationales (eaux de surface)

Que nous a appris l'étude Explore2070 sur l'impact du changement climatique en France ? Sur la base des résultats obtenus aux 1522 points de simulation, sous hypothèses A1B (scénario intermédiaire en termes d'émission de gaz à effet de serre) et à l'horizon 2046-2065, l'étude conclut à :

- Une intensification des contrastes saisonniers avec des étiages estivaux plus sévères, affirmée par quasiment tous les modèles,
- Une diminution significative quasi-généralisée de la ressource en eau,
- Une modification des régimes des rivières de montagne avec une réduction de l'épaisseur du manteau neigeux, une fonte plus précoce et une composante nivale à la baisse,
- L'absence de signal partagé pour les crues.

Les Figure 4 et Figure 5, extraites de Chazot *et al.* (2012), illustrent les changements projetés sur deux variables hydrologiques : le module QA (moyenne des débits annuels) et le débit mensuel minimal annuel de période de retour 5 ans (QMNA5). La tendance à la baisse des deux variables descriptives des ressources est partagée sur un grand nombre de stations. A noter sur la Figure 4, d'une part, des hausses isolées projetées dans les Alpes du débit d'étiage, conséquence d'hivers moins froids qui favorisent les précipitations sous forme liquide et, d'autre part, des incertitudes fortes notamment sur les débits d'étiage, conséquence de la difficulté des modèles à reproduire les étiages. Ainsi, le Rhône à Beaucaire pourrait subir une baisse du QMNA5 de 20 à 50% ; la Garonne à Lamagistère pourrait voir son QMNA5 baisser de 50 à 70% à l'horizon 2050.

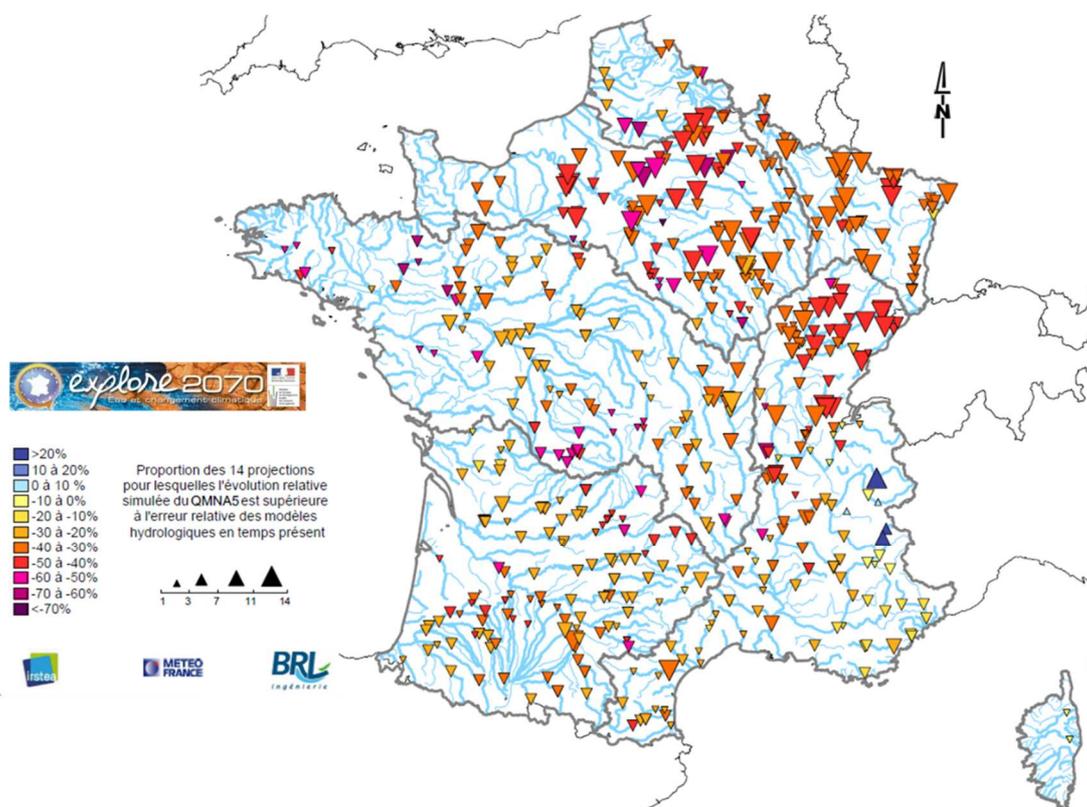


Figure 4 : Evolutions relatives possibles (en%) du débit QMNA5 entre 1961-1990 et 2046-2065 - Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques  $\times$  7 GCMs). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations

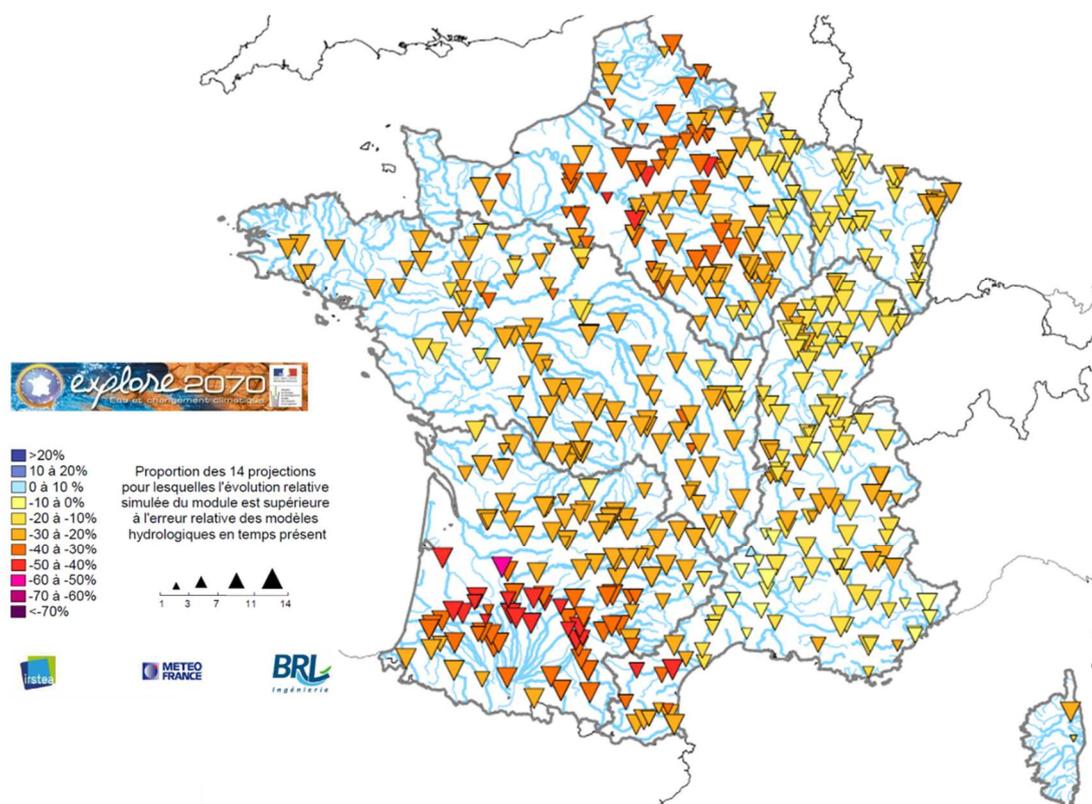


Figure 5 : Evolutions relatives possibles (en%) du module QA entre 1961-1990 et 2046-2065 - Résultats moyens établis sur les 14 simulations (2 modèles hydrologiques  $\times$  7 GCMs). La couleur des points est fonction de l'intensité du changement et la taille des points est liée à la convergence des 14 simulations

Depuis la fin du projet Explore2070, une nouvelle génération de projections a été proposée dans le cadre de CMIP5 (CMIP pour Coupled model intercomparison project en anglais) et qui ont nourri le cinquième rapport du GIEC (AR5).

Ces données ont été exploitées dans le cadre des travaux de thèse de Dayon (2015) pour estimer l'impact du changement climatique à l'échelle de la France. Les projections climatiques régionalisées s'appuient sur des sorties des modèles climatiques globaux de l'exercice CMIP5. La descente d'échelle est une méthode statistique qui repose sur le principe d'analogie. Le climat est fourni sur le maillage SAFRAN 8 x 8 km<sup>2</sup>. Le modèle hydrologique est une version améliorée de la chaîne Isba-Modcou exploitée dans le projet Explore2070. Une approche multi-modèle est mise en œuvre sur l'ensemble du XXI<sup>e</sup> siècle. Un seul modèle hydrologique est appliqué, de ce fait les incertitudes concernent l'évolution des émissions de gaz à effet de serre et la représentation du climat.

Les projections régionalisées suggèrent une augmentation des précipitations, sur le nord de la France, et à l'inverse une diminution sur la partie sud. En revanche, la température augmenterait sur l'ensemble du territoire. La réponse hydrologique est organisée selon un gradient nord-sud, conformément au changement de précipitations et de température. Ces impacts étant d'autant plus intenses que les émissions de gaz à effet de serre sont importantes. La Figure 6 présente les projections de la moyenne de l'évolution des précipitations annuelles en fin de siècle pour l'ensemble des modèles de climat régionalisés utilisant le scénario RCP8.5. A cela s'ajoute une augmentation de la température allant en France de 4.5 à 2.5°C pour les scénarios tendanciels et à 2°C, respectivement.

Toutes ces projections impactent la ressource en eau souterraine. Des hypothèses supplémentaires ont été faites pour ces projections.

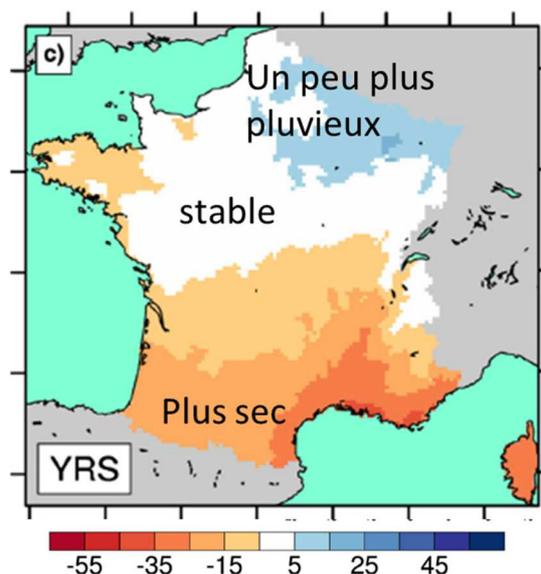


Figure 6 : Evolution en % des précipitations annuelles sur la période 2070–2100 par rapport à la période 1960–1990 en moyenne sur 14 projections climatiques de CMIP5 sous scénarios RCP8.5. Figure issue de Dayon et al. (2018).

Concernant, l'hydrologie, la moyenne d'ensemble des changements de module suggère une diminution d'environ -20% sur la Garonne, de -15% sur la Loire et le Rhône sous RCP8.5 en fin de siècle (cf. Figure 6 de Dayon et al. (2018)). La Seine se démarque des autres grands fleuves avec une incertitude sur le signe du changement (en moyenne le module diminuerait de l'ordre de -5% mais la dispersion des résultats est grande du fait de compensations entre augmentation des pluies d'hiver, diminution des pluies d'été et augmentation de l'évapotranspiration).

Le nord de la France verrait ses débits hivernaux augmenter en conséquence de la hausse des pluies. Une hausse des débits est envisagée sur les secteurs alpins et pyrénéens, du fait de changements de type de précipitations (augmentation de la fraction de précipitations liquides au détriment de la fraction neigeuse).

Les changements sur le module et sur le débit d'étiage (Figure 7) sont plus marqués dans le sud du pays pour atteindre par exemple une diminution moyenne de -50% sur le QMNA5 pour la Garonne sous scénario RCP8.5. Des simulations sont disponibles avec le RCP2.6 et indiquent des changements beaucoup plus prononcés avec le scénario RCP8.5 (sans mise en place de mesures d'atténuation) qu'avec le scénario RCP2.6 (avec mise en place de mesures d'atténuation). L'effet d'une politique de limitation des émissions de gaz à effet de serre est manifeste.

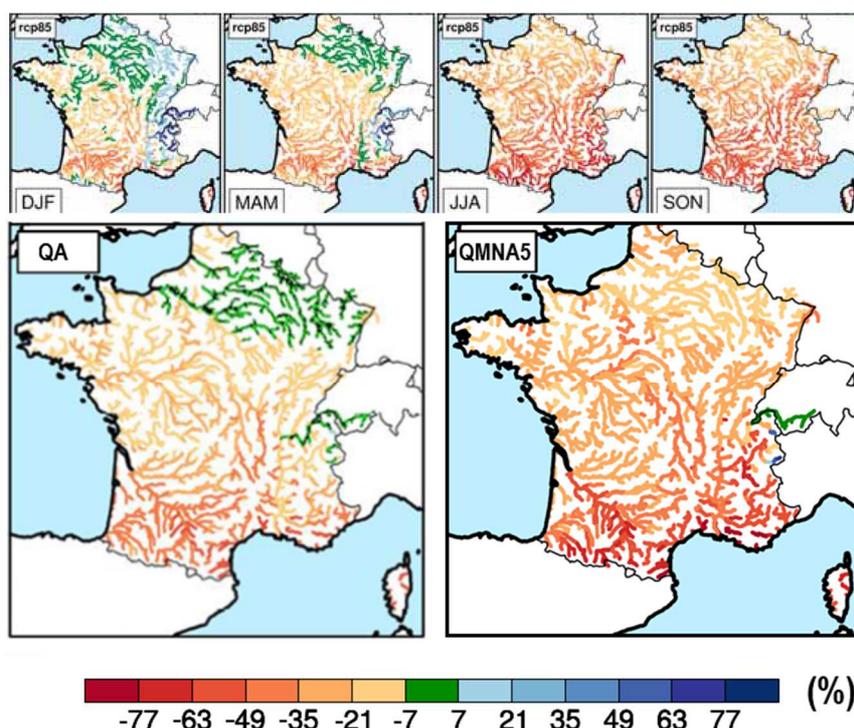


Figure 7 : Moyenne d'ensemble des changements relatifs des débits saisonniers, du module QA et du QMNA5 pour la période 2070-2100 par rapport à la période 1960-1990 pour le RCP 8.5.

Une confrontation des résultats avec le modèle hydrologique MORDOR (Garçon, 1999) alimentés par les mêmes projections climatiques montre que les changements annoncés par la chaîne Isba-Modcou sont plus importants sur le débits d'hiver que ceux suggérés par MORDOR et inversement en été, MORDOR suggère des baisses plus notables qu'Isba-Modcou.

Les travaux de Dayon (2015) sont les seuls notables à l'échelle de la France, mais les petits cours d'eau ont été écartés du diagnostic, comme ce fut le cas dans Explore2070 du fait de la résolution spatiale trop grossière de la chaîne Isba-Modcou. Sans examiner l'intégralité du régime hydrologique, Sauquet *et al.* (2021) ont cherché à caractériser l'évolution des caractéristiques d'intermittence sur les têtes de bassin en France avec d'autres projections climatiques. Les résultats sont présentés sous forme de statistique d'ensemble sur un découpage du territoire en hydro-éco-régions (HER). Les projections d'intermittence reprennent des sorties du modèle GR6J alimentés par 26 projections climatiques – 13 sorties de GCMs sous RCP 2.6 et 8.5 de l'exercice CMIP5 - désagrégés par une méthode des anomalies (Advanced Delta Change, Van Pelt *et al.* (2012)). Pour caractériser l'intermittence, des formules empiriques croisant les données d'assec observées dans chaque HER avec un ensemble de débits disponibles sur la même HER sont calées en temps présent avant d'être appliquées aux débits futurs.

La variable modélisée était la proportion d'assec, pour un jour calendaire donné, à l'échelle d'une HER sur des cours d'eau d'ordre de Strahler inférieur à cinq. Deux fenêtres temporelles ont été simulées : 2021-2050 et 2071-2100. L'étude concluait à une augmentation du risque d'intermittence, en particulier dans les régions où les assecs sont historiquement bien présents, et à des changements de saisonnalité dans les régions alpines (Figure 8). Ces résultats masquent cependant des hétérogénéités spatiales à l'intérieur des HER. En outre, les incertitudes sur le climat et l'hydrologie du XXI<sup>e</sup> siècle n'ont été prises en compte que de façon partielle dans ces premières projections d'évolution de l'intermittence. Néanmoins cette étude donne une information sur la sévérité des étiages sur les têtes de bassin, qui sont rarement examinées faute d'observations pour les renseigner.

*Explore2 – Etude d'impact du changement climatique sur le régime hydrologique  
en France métropolitaine - état de l'art*

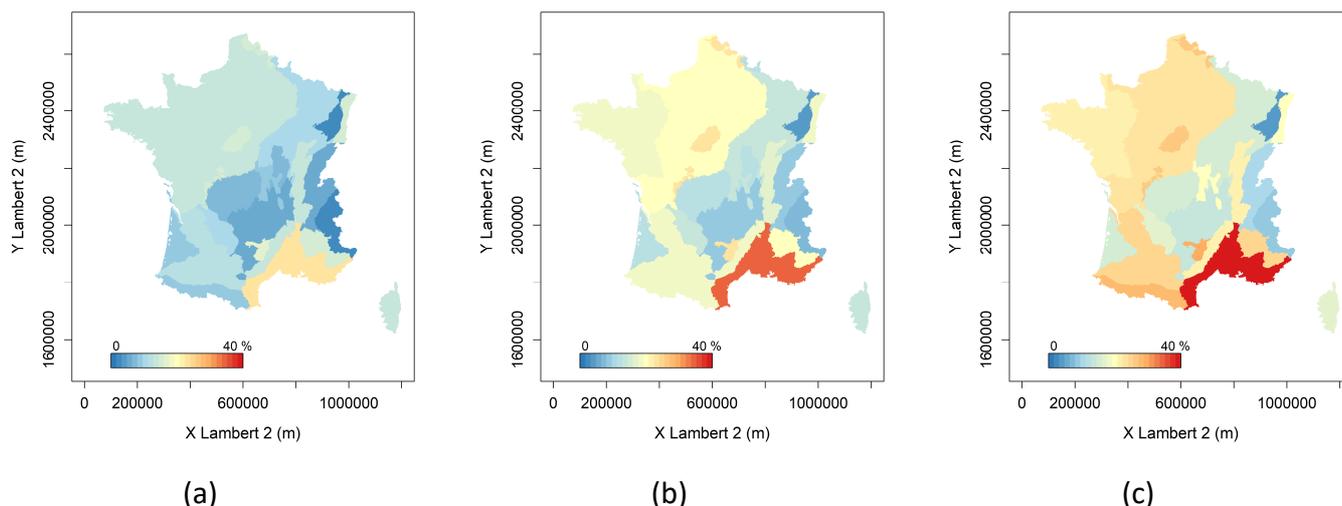


Figure 8 : Proportion d'assec moyenne sur la période juin-novembre pour les périodes 1960-2018 (a), 2021-2050 (b) et 2071-2100 (c) calculées pour chaque HER (applicable aux cours d'eau de tête avec un ordre de Strahler inférieur à cinq)

Les caractéristiques de ces études, y compris Explore2070, pour comparaison, sont rappelées dans le Tableau 1.

Nom de projet / dénomination	Scénarios d'émission de GES	Nombre de couples GCM- RCM	Nombre de méthodes de descente d'échelle	Nombre de modèles hydrologiques	Période de référence	Horizon(s) ciblé(s)	Références
Explore2070	SRES A1B	7	1	2	1961 - 1990	2046 - 2065	Chauveau <i>et al.</i> (2013)
Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties	RCPs 2.6, 4.5, 6.0 & 8.5	9*	1	1	1971 - 2000	1960 - 2100	Dayon (2015), Dayon <i>et al.</i> (2018)
Predicting flow intermittence in France under climate change	RCPs 2.6 & 8.5	13	1	1	1960–2018	2021–2050 & 2071–2100	Sauquet <i>et al.</i> (2021)

Tableau 1 : Principales caractéristiques des simulations produites dans les études d'impact du changement climatique à l'échelle nationale. \* : certains GCMs sont déclinés en plusieurs runs.

## 4. Études régionales (eaux de surface)

Ces études sont présentées par bassin de gestion des agences de l'eau.

### 4.1. Le bassin Adour-Garonne

Le projet Explore2070 concluait sur le bassin Adour-Garonne à une diminution sensible des débits annuels dans le bassin de la Garonne, conséquence d'une baisse importante des précipitations annuelles et saisonnières, simulée par la quasi-totalité des modèles climatiques. Dans les bassins du Lot et de la Dordogne, cette baisse est moins marquée, mais tout aussi significative (de l'ordre de -10 à -40%). Le QMNA5 pourrait baisser également avec des variations selon les projections et les cours d'eau et une tendance à des projections plus pessimistes pour le modèle GR4J. La quasi-totalité des projections s'accordent sur une baisse de l'intensité des crues décennales. Il faut noter que les projections hydrologiques ont alimenté les réflexions de l'Agence sur les usages à l'horizon 2050 (projet Garonne2050 ; Lhuissier *et al.*, 2016).

Les résultats de Dayon *et al.* (2018) obtenus avec les modèles de climat du 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC s'inscrivent dans la continuité des conclusions d'Explore2070 : le bassin de la Garonne est un hot-spot avec des changements de débits notables (jusqu'à -50% en étiage) et quasi généralisés à toutes les saisons sur tout le bassin, excepté sur les têtes de bassin dans les Pyrénées et le Massif Central.

Une seule étude régionale a été identifiée depuis la fin du projet Explore2070 (Tableau 2). La valorisation d'Imagine2030 mentionné dans la synthèse de Chazot *et al.* (2012) s'est poursuivie (Hendrickx et Sauquet, 2013) sur la durabilité des modes de gestion sur le bassin de l'Ariège.

Grusson (2016) a simulé le devenir du bassin de la Garonne en amont de Tonneins (51 500 km<sup>2</sup>) avec le modèle SWAT alimenté par des projections CMIP5. L'objectif était d'examiner les stocks et flux d'eau au sein et entre les différents compartiments du cycle hydrologique et leurs évolutions passées et futures. Les usages ne sont pas considérés. La modélisation est réalisée au pas de temps mensuel. La période de simulation est 2010-2050 sous deux scénarios RCPs (RCP4.5 et RCP8.5) déclinés en huit projections régionalisée. Les résultats sur les débits moyens saisonniers font apparaître une augmentation des débits une grande partie de l'année (cf. Figure IV.34, page 242), mais une baisse des débits estivaux sur la période 2040-2050 comparativement à 2000-2010. Ces résultats « atypiques » tranchent avec ceux d'Explore2070 qui suggéraient une diminution des débits sur l'ensemble de l'année notamment pour la Garonne à son exutoire. Le modèle SWAT a été actualisé et étendu à l'ensemble des Pyrénées françaises dans le cadre du projet Interreg Piragua (<https://www.opcc-ctp.org/fr/piragua>), émergeant sur sa partie orientale au bassin de gestion Rhône Méditerranée. Les résultats des simulations sont en cours de valorisation.

Nom de projet / dénomination	Scénarios d'émission de GES	Nombre de couples GCM- RCM	Nombre de méthodes de descente d'échelle	Nombre de modèles hydrologiques	Période de référence	Horizon(s) ciblé(s)	Références
Modélisation de l'évolution hydroclimatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne	RCPs 4.5 & 8.5	8	1	1	2000 – 2010	2040-2050	Grusson (2016)

Tableau 2 : Principales caractéristiques des simulations sur la Garonne produites dans les études d'impact du changement climatique

### 4.2. Le bassin Artois-Picardie

A notre connaissance, le bassin n'a pas fait l'objet de travaux de recherche identifiés depuis la fin du projet Explore2070.

### 4.3. Le bassin Loire-Bretagne

---

La dernière étude régionale est le projet ICC-HYDROQUAL (Moatar *et al.*, 2010), antérieur à Explore2070 et cité dans la synthèse bibliographique de Chazot *et al.* (2012). Un projet de recherche (HYCCARE, <https://www.alterrebourgognefranchecomte.org/actions-en-cours/projet-de-recherche-hyccare>) a concerné la région Bourgogne qui croise les trois bassins Loire-Bretagne, Seine-Normandie et Rhône-Méditerranée. Il sera présenté dans la section Rhône-Méditerranée-Corse.

### 4.4. Le bassin Rhin-Meuse

---

Le projet Explore2070 (Chauveau *et al.*, 2013), utilisant le scénario SRES A1B, a montré qu'une diminution d'environ 15 à 20% des débits annuels pour la Meuse à Chooz (son exutoire à la frontière avec la Belgique) était à attendre à horizon 2050. Des diminutions d'environ -10% des débits annuels pour la Moselle et la Sarre, et d'environ -20% pour le reste des affluents du Rhin sont envisagées. Il est attendu que les bas débits diminuent fortement mais les intensités sont différentes pour les deux modèles hydrologiques : environ -20% pour Isba-Modcou et jusqu'à -60% pour GR4J. Enfin, le signe de l'évolution des crues est très incertain, ce qui peut être directement lié au possible changement des précipitations en hiver, dont le signe est lui aussi incertain. Les crues pourraient légèrement augmenter pour la Meuse, la Moselle et la Sarre, et légèrement diminuer pour les autres affluents du Rhin, mais la dispersion des résultats est grande.

Les projections climatiques élaborées par Dayon (2015) suggèrent pour la zone d'étude une augmentation des précipitations en hiver et une diminution en été, cette dernière étant plus marquée avec les scénarios RCP les plus pessimistes (RCP 6.0 et 8.5). Cela se traduit en termes de débits moyens en futur proche par une stagnation en hiver et une diminution en été, de manière plus notable avec les scénarios RCP les plus pessimistes. Pour le futur lointain (Figure 7), une légère augmentation des débits hivernaux pourrait être observée, avec une diminution encore plus forte des débits estivaux. Les débits d'étiage QMNA5 seraient alors en diminution forte et les débits de crue décennaux QJXA10 en légère augmentation en futur lointain.

- **La Meuse**

La Meuse, de sa source à Pouilly-en-Bassigny (Haute-Marne) jusqu'à la frontière franco-belge localisée à Givet (Ardennes), a une superficie de 10 120 km<sup>2</sup> dont environ 2300 km<sup>2</sup> situées en Belgique et 140 km<sup>2</sup> au Luxembourg. Ce bassin représente 29% de la totalité du bassin de la Meuse à son exutoire dans la Mer du Nord et contribue pour plus d'un tiers (36%) au débit de la partie hollandaise de la Meuse pendant les étiages et près de la moitié (47%) pendant les crues. Différentes études réalisées ces dernières années sur ou englobant le bassin, montrent des changements importants à attendre au niveau de la dynamique hydrologique du bassin, en termes quantitatifs et qualitatifs, avec des conséquences notables sur différents secteurs (Booij, 2004 ; de Wit *et al.*, 2007 ; van Vliet et Zwolsman, 2008 ; Commeaux *et al.*, 2010 ; Drogue *et al.*, 2010 ; François *et al.*, 2011 ; Chauveau *et al.*, 2013 ; Dewals *et al.*, 2013 ; Krueger *et al.*, 2013 ; Romgens, 2013 ; Detrembleur *et al.*, 2015 ; Grelier *et al.*, 2016 ; Pyka *et al.*, 2016 ; Sjerps *et al.*, 2017).

Antérieur à Explore2070, le projet AMICE (<http://www.amice-project.eu> ; Drogue *et al.*, 2010) avait examiné le devenir du bassin jusqu'à la Mer du Nord sur la base de scénarios sec et humide. Ce projet a montré à la station de Chooz (exutoire de la Meuse française) une diminution des débits d'étiage d'environ -10 à -25% selon le scénario envisagé en futur proche (milieu du XXI<sup>e</sup> siècle) et de -35 à -50% en futur lointain (fin du XXI<sup>e</sup> siècle). L'évolution des débits de crues est, quant à elle, très incertaine, le scénario humide donnant une augmentation de +10 et +25% en futurs proche et lointain, et le scénario sec une diminution de -5 et -10% respectivement. Le projet n'a pas pu conclure sur les précipitations extrêmes et les crues rapides qui en résultent.

Nom de projet / dénomination	Scénarios d’émission de GES	Nombre de couples GCM- RCM	Nombre de méthodes de descente d’échelle	Nombre de modèles hydrologiques	Période de référence	Horizon(s) ciblé(s)	Références
CHIMERE21*	RCPs 4.5 & 8.5	5	1	4	1976 - 2005	2006-2100 (zoom sur 2021-2050 & 2071-2100)	Thirel <i>et al.</i> (2021, in prep.)

*Tableau 3 : Principales caractéristiques des simulations sur la Meuse produites dans les études d’impact du changement climatique. \* : Les débits observés ont été naturalisés lorsque nécessaire.*

Une étude majeure a concerné le bassin de la Meuse (Tableau 3) : le projet CHIMERE21 mené à l’échelle de la partie française du bassin de la Meuse. Le projet CHIMERE21 (Thirel *et al.*, 2021) a utilisé des projections climatiques produites par Météo-France et débiaisées avec la méthode ADAMONT (Verfaillie *et al.*, 2017), dont certaines ont été reprises dans le projet Explore2. L’analyse des projections climatiques indique sans surprise un futur plus chaud, et ce d’autant plus qu’on se situe dans un futur lointain et dans un futur comportant plus d’émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5). En ce qui concerne les précipitations, le signal est moins homogène. On se dirige vers un futur plus humide à l’échelle annuelle. La déclinaison à l’échelle saisonnière est différente : on peut constater une tendance à des hivers plus humides mais la tendance sur les étés est plus incertaine, certaines projections indiquant des étés plus secs et d’autres indiquant des étés plus humides. L’analyse des débits futurs indique une probable augmentation des débits lors de la période hivernale, une légère augmentation des débits moyens (mais avec une forte incertitude) ainsi qu’une évolution peu marquée des débits d’étiage en été, même si certaines projections indiquent une baisse possible des débits durant cette période. On observe cependant des différences spatiales sur le bassin de la Meuse, l’augmentation des débits de crue étant notable notamment en aval du bassin et la diminution des débits d’étiage étant plus marquée notamment en amont.

Un exercice de décomposition de la variance a permis de hiérarchiser les sources d’incertitude. Ainsi pour les hautes eaux (Figure 9), au début du siècle, l’incertitude est portée par la variabilité interne (« Int. Var. » de la Figure 9). Les modèles climatiques globaux et régionaux (« GCMs » et « RCMs » de la Figure 9) expliquent la plus grande partie de l’incertitude totale. Cependant, les scénarios d’émission de gaz à effet de serre (« RCPs » de la Figure 9) présentent une part de l’incertitude modérée pour les crues pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle en raison de l’évolution différente des précipitations hivernales selon le RCP considéré. Enfin, la variance résiduelle (« Res. Var. » de la Figure 9) porte aussi une part non négligeable de l’incertitude totale à partir de l’horizon 2050 pour les débits de crue.

Le projet CHIMERE21 a permis une comparaison au premier ordre des projections climatiques utilisées par rapport à celles d’Explore2070 et de DRIAS-2020 (sous-sélection de cinq projections) et des projections hydrologiques utilisées par rapport à celles d’Explore 2070. Comparé à Explore2070, les projections utilisées dans CHIMERE21, tout comme celles de DRIAS-2020, indiquent un futur plus chaud, mais aussi plus humide. La principale différence entre CHIMERE 21 et DRIAS-2020 concerne une augmentation des précipitations moindre dans le jeu de données DRIAS-2020. En termes de débits, Explore2070 avait montré sur la Meuse une forte pression sur les débits d’étiage et sur les débits moyens, qui étaient en baisse, ainsi qu’une évolution incertaine des débits de crue. Dans CHIMERE21, l’évolution des débits d’étiage est moins pessimiste, mais pourrait être expliquée par une représentativité imparfaite des projections utilisées dans CHIMERE21.

Dans l’ensemble, les études concernant la Meuse française ont en commun une hausse de la température de l’air mais avec des intensités différentes. Ainsi, la Meuse, bien que se situant dans une zone plutôt arrosée de la France, ne semble pas devoir être épargné par les conséquences du changement global. Les résultats convergent moins clairement concernant les étiages et les crues. Les étiages pourraient diminuer ou être stables et les crues pourraient augmenter ou être stables. Il est important de souligner que le projet CHIMERE21 dispose des projections climatiques les plus récentes (qui seront mises à jour dans Explore2) et

des modèles hydrologiques les plus récents (dont la plupart seront utilisés dans Explore2). En plus d'une augmentation probable des crues (hivernales) et d'une diminution possible des débits d'étiage (estivaux), les conclusions fortes de CHIMERE21 étaient une augmentation des débits de crue plus forte en aval du bassin (zone déjà considérée comme Territoire à Risque d'Inondations) et la diminution des débits d'étiage plus marquée notamment en amont.

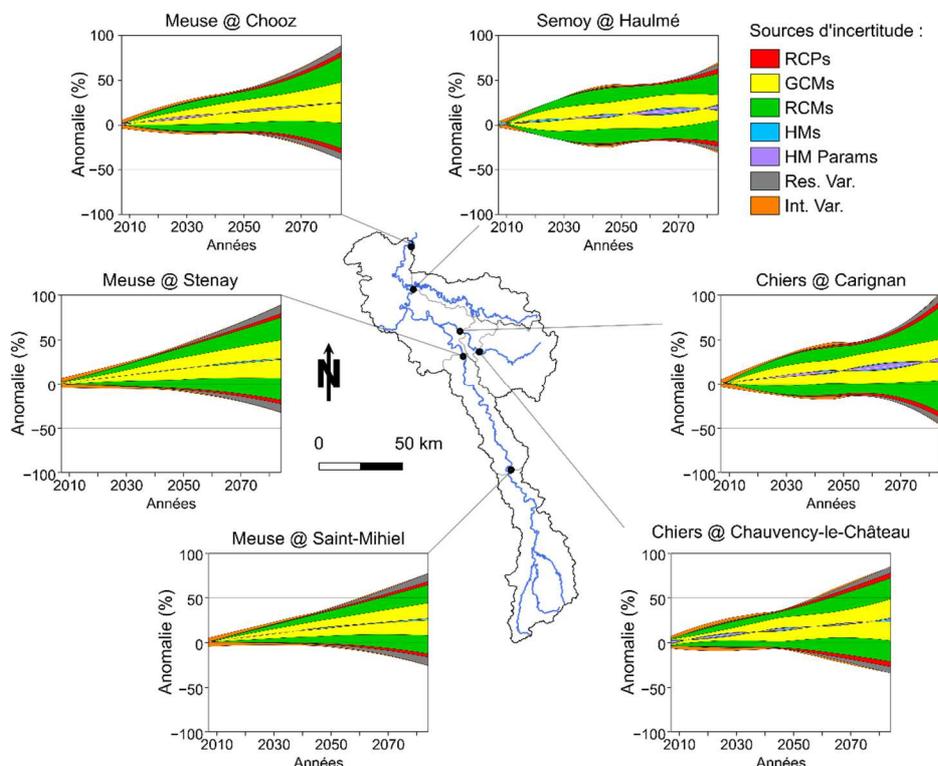


Figure 9 : Anomalies futures et sources d'incertitude des hauts débits (Q95) sur le bassin de la Meuse de 2006 à 2085 en moyenne glissante sur 30 ans. Sources d'incertitude : RCPs : scénarios d'émission de gaz à effet de serre, GCMs : modèles climatiques de circulation générale, RCMs : modèles climatiques régionaux, HMs : structure des modèles hydrologiques, HM Params : paramètres des modèles hydrologiques, Res. Var. : variance résiduelle, Int. Var. : variabilité interne.

### • La Moselle, la Sarre et les affluents français du Rhin

Le bassin versant du Rhin s'étend sur un peu moins de 200 000 km<sup>2</sup>. Ce bassin a un rôle primordial à l'échelle européenne en termes de ressources en eau et de navigation, car il traverse de nombreux pays. La Moselle, la Sarre et d'autres affluents vosgiens du Rhin coulent en France et alimentent des zones stratégiques. Ici nous ne parlerons que de ces rivières, et non de l'ensemble du bassin du Rhin, en raison de la disponibilité des données hydro-climatiques observées et des projections sur les zones hors de France.

Le climat de la zone d'étude est océanique dégradé, à influence continentale, et montagnard sur le massif des Vosges. Globalement, cette zone géographique est humide, en particulier dans les Vosges, et l'enneigement peut être important localement, mais ayant un rôle hydrologique mineur à l'échelle d'intérêt.

Plusieurs études ont concerné spécifiquement la zone d'étude (Tableau 4) : VULNAR mené sur la nappe du Rhin supérieur, FLOW MS (Floods and low flows management of the Moselle and Sarre basins) mené sur la Moselle entière, et enfin le projet MOSARH21, le plus récent, sur la partie française du bassin de la Moselle, de la Sarre et du Rhin.

Le projet VULNAR avait pour but d'étudier les effets du changement climatique sur la nappe du Rhin supérieur (Thierion *et al.*, 2012). Une augmentation de la température de 3°C ainsi qu'une diminution des précipitations d'environ -15% sont attendues en comparaison à une période de référence définie entre 1961 et 1990. De plus, une diminution des précipitations neigeuses de l'ordre de -70% est anticipée. L'impact du

changement climatique sur les niveaux de la nappe du Rhin supérieur est faible, avec une faible augmentation de l’infiltration en provenance des rivières et une diminution de la recharge en eau moyenne.

Nom de projet / dénomination	Scénarios d’émission de GES	Nombre de couples GCM- RCM	Nombre de méthodes de descente d’échelle	Nombre de modèles hydrologiques	Période de référence	Horizon(s) ciblé(s)	Référence
VULNAR	SRAS A1B, A2 & B1	7	1	2	1961-2000	2046-2065 & 2081-2099	Thierion <i>et al.</i> (2012)
FLOW MS	SRES A1B	1	1	1	1971 - 2000	2021-2050	CIPMS (2013)
MOSARH21	SRES A1B & RCPs 4.5, 8.5		2 pour chaque scénario d’émission de GES	4	1976 - 2005	2006-2100 (zoom sur 2021-2050 & 2071-2100)	Thirel <i>et al.</i> (2018, 2019)

*Tableau 4 : Principales caractéristiques des simulations sur la Moselle, la Sarre et les affluents du Rhin, produites dans les études d’impact du changement climatique*

Le projet FLOW MS s’est intéressé au bassin de la Moselle, incluant sa partie luxembourgeoise et allemande, jusqu’à sa confluence avec le Rhin à Coblenz. Les projections climatiques ont indiqué une augmentation de la température de +1°C d’ici 2050 sur le bassin, avec des étés plus secs et des hivers plus humides. D’un point de vue hydrologique, le projet a conclu à des étés aux bas débits probablement plus faibles et à une augmentation significative des crues pendant l’hiver. Les indicateurs utilisés pour ce projet sont principalement basés sur des valeurs de débits moyens, minimum et maximums mensuels. Une augmentation des températures de l’ordre de 1°C et une diminution des précipitations en été ainsi qu’une augmentation en hiver ont été mises en évidence. Les étiages hivernaux sont évalués à la hausse et les étiages estivaux à la baisse. Les crues hivernales sont estimées à la hausse tandis que les crues estivales sont stables.

Le projet MOSARH21 a montré une augmentation des températures de +1.5 à +5°C selon le scénario et l’échéance considérés, mais aussi une évolution très incertaine des précipitations. Les évolutions des débits moyens indiquent généralement une légère augmentation des débits moyens annuels (Figure 10), qui pourrait même devenir importante pour l’une des projections dans une hypothèse d’augmentation forte des émissions de gaz à effet de serre (RCP 8.5). En ce qui concerne l’aléa de crue, il pourrait être accru dans un futur proche (2021-2050). En revanche, dans un futur plus lointain, l’évolution des crues est très incertaine, les projections divergeant fortement (Figure 11). Les débits d’étiage seraient à la baisse dans le futur proche. Leur évolution dans le futur lointain (2071-2100) serait également plus incertaine, allant de la baisse drastique à une augmentation sensible selon la projection climatique utilisée (Figure 12).

*Explore2 – Etude d'impact du changement climatique sur le régime hydrologique  
en France métropolitaine - état de l'art*

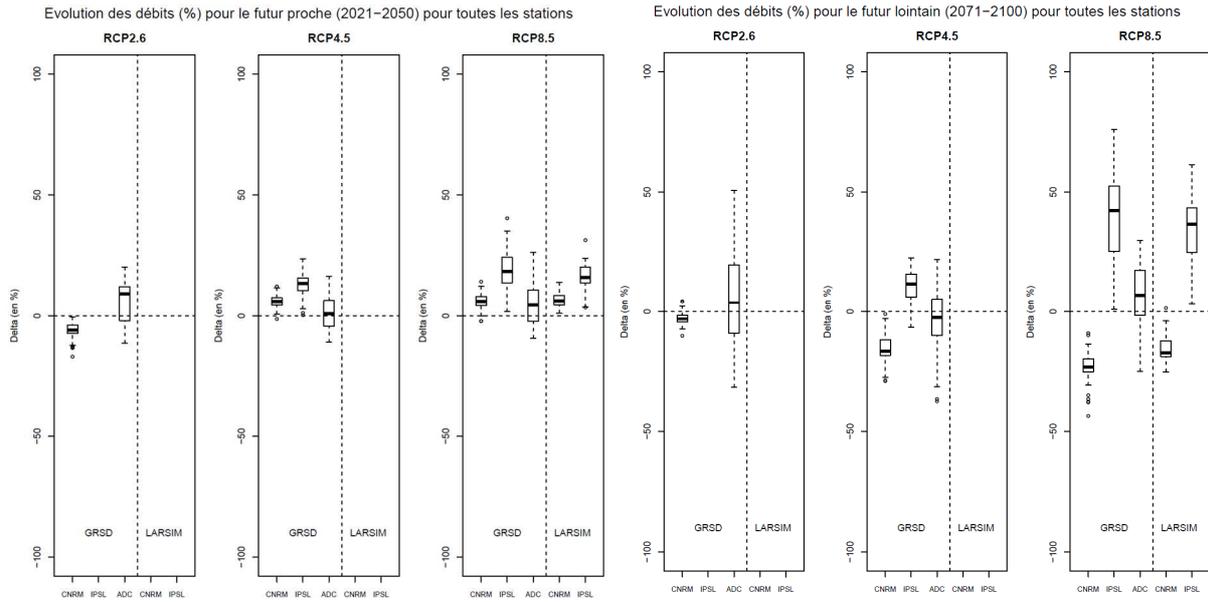


Figure 10 : Distributions des évolutions des débits simulés par deux modèles hydrologiques (GRSD et LARSIM) pour les deux périodes de projection (2021-2050 à gauche ; 2071-2100 à droite) en utilisant trois projections climatiques (CNRM, IPSL et ADC, un ensemble de projections descendues en échelle par la méthode Advanced Delta Change) forcées par trois RCPs 2.6, 4.5 et 8.5, sur l'ensemble des bassins de la zone d'étude. Les évolutions en pourcentage de l'ensemble des stations sont agrégées dans les boîtes à moustaches. A noter que sont absents les scénarios radiatifs RCP 2.6 et 4.5 pour LARSIM ainsi que IPSL RCP 2.6

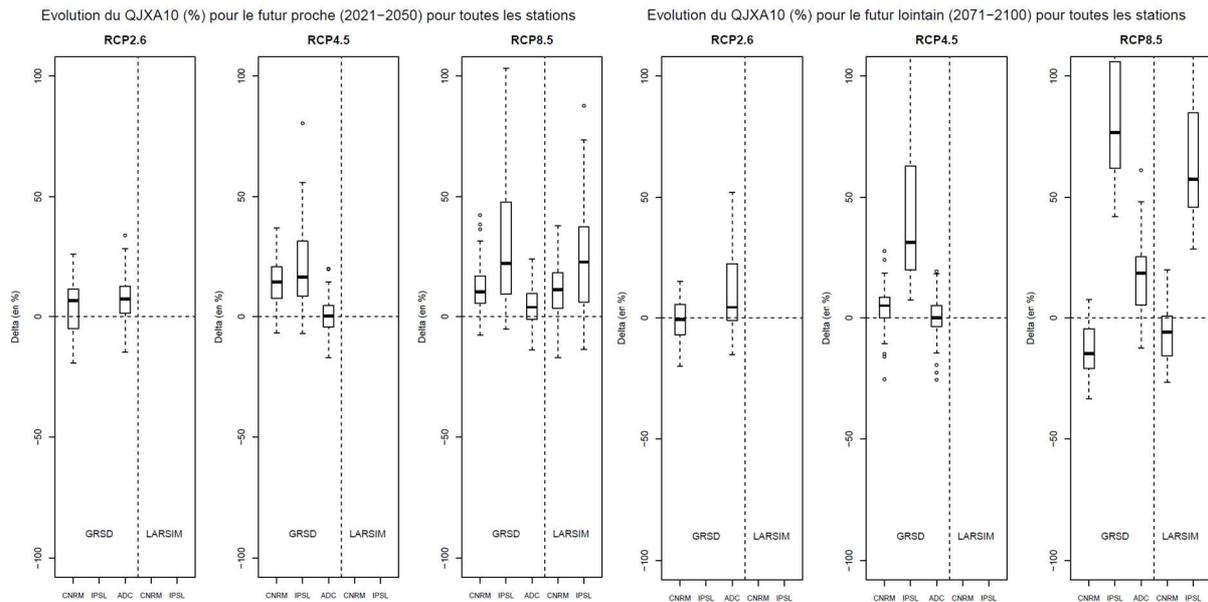


Figure 11 : Idem que la figure précédente pour le débit de crue QJXA10

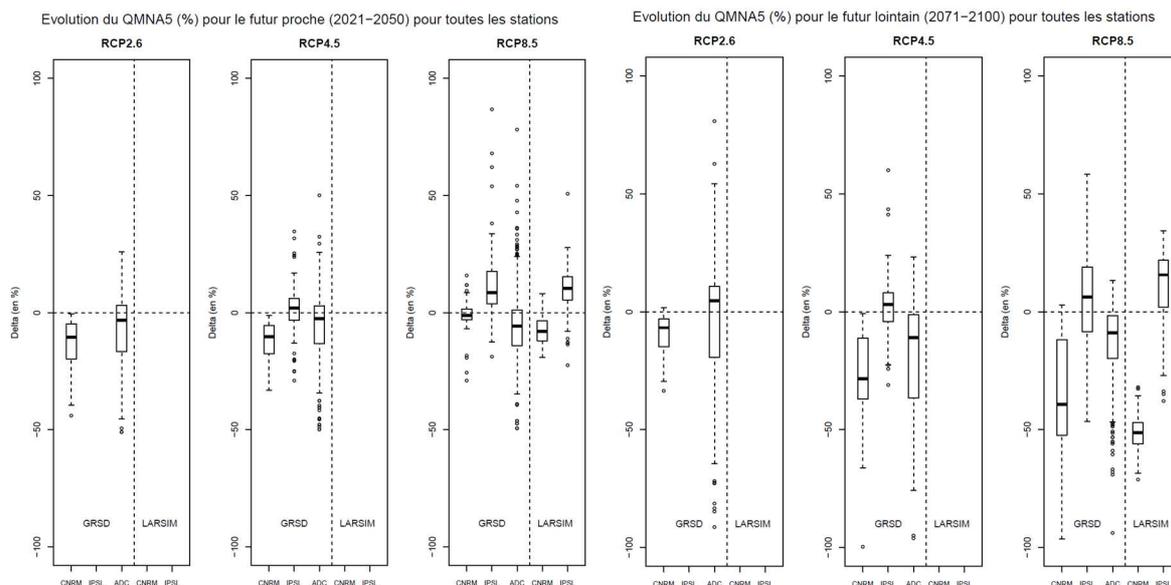


Figure 12 : Idem que la figure précédente pour le débit d'étiage QMNA5

Ce projet, le plus récent sur cette zone, a montré que les incertitudes sont présentes à plusieurs niveaux dans les projections hydrologiques produites. Les modèles climatiques (GCMs) et les scénarios RCP semblent être le principal facteur d'incertitude. Il apparaît que l'incertitude liée aux modèles hydrologiques est faible. Cette hiérarchisation des sources d'incertitude rejoint les conclusions de bon nombre d'études antérieures s'étant intéressées au poids relatifs des différents maillons de la chaîne de modélisation dans l'incertitude totale.

Les résultats ont été comparés à ceux obtenus dans le cadre d'études d'impact antérieures réalisées sur le bassin (FLOW MS et Explore2070) en réutilisant les projections climatiques de ces anciens projets et en les utilisant pour forcer les modèles hydrologiques du projet MOSARH21. Finalement, les études précédentes sont cohérentes avec les résultats obtenus dans le projet MOSARH21. Cependant, certaines différences existent, l'horizon d'Explore2070 se situant entre la période du futur proche et celle du futur lointain : les évolutions de débits d'Explore2070 pourraient correspondre à une situation intermédiaire entre les deux périodes d'étude.

#### 4.5. Le bassin Rhône-Méditerranée-Corse

Le projet Explore2070 concluait à une diminution quasi généralisée du débit annuel, avec des changements particulièrement sensibles sur les cours d'eau des secteurs pyrénéens et de la partie médiane du bassin du Rhône, sous des climats globalement plus secs (baisse des précipitations annuelles de l'ordre de 0 à 15% selon les projections). Les étiages estivaux s'annoncent à la baisse avec une dispersion forte entre -10 et -70%, y compris en montagne. Le signal sur les étiages hivernaux en montagne est plus incertain (baisse ou augmentation). Le quantile de crue décennal est majoritairement à la baisse (de -5 à -30%), seul le secteur des Cévennes verrait une tendance à la hausse. A noter des évolutions assez hétérogènes sur les fleuves côtiers méditerranéen.

Les résultats de Dayon (2015) indiquent une réponse très hétérogène entre secteurs de montagne et secteurs de plaine. La hausse de température favorise les précipitations liquides qui gagnent rapidement le réseau hydrographique. Cet effet est sensible en haute altitude dans les Alpes, qui voient les débits d'hiver et de printemps augmenter. Les basses eaux dans les bassins de montagne sont observés en hiver et par conséquent les débits d'étiage dont le QMNA5, devraient augmenter. Ce changement se propage le long du réseau hydrographique d'amont en aval vers des altitudes plus faibles. Les bassins sans alimentation par la neige voient leur débit diminuer hors bassin de la Saône, toute l'année. Les débits du bassin versant de la Saône seront à la baisse sauf en hiver.

Trois études ont été identifiées sur le bassin (Tableau 5), dont le projet HYCCARE dont le territoire d’intérêt se situe à cheval sur trois bassins de trois agences de l’eau.

Nom de projet / dénomination	Scénarios d’émission de GES	Nombre de couples GCM- RCM	Nombre de méthodes de descente d’échelle	Nombre de modèles hydrologiques	Période de référence	Horizon(s) ciblé(s)	Références
HYCCARE	RCP 8.5	18	1	2	1980-2010	1980-2100	Brulebois (2016)
MDR	RCPs 2.6, 4.5 & 8.5	3	1	1	1971-2000	1960-2100	Branger <i>et al.</i> ( <i>in prep</i> )
R <sup>2</sup> D <sup>2</sup> -2050	SRES A1B	4	3	5	1980-2009	2036-2065	Sauquet <i>et al.</i> (2016)

*Tableau 5 : Principales caractéristiques des simulations sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse produites dans les études d’impact du changement climatique*

### • Le Rhône

Le bassin du Rhône a été le premier grand bassin versant français à fédérer des équipes de recherche françaises en climat et hydrologie autour de la question de l’impact du changement climatique sur la ressource en eau (Leblois, 2002). Ce bassin permettait d’aborder l’avenir du manteau neigeux, avec des enjeux sur l’hydroélectricité, et d’examiner les changements sur une grande diversité de contextes climatiques représentatifs de la France métropolitaine (continental, océanique et méditerranéen). Seule la partie française (85 000 km<sup>2</sup>, entre la frontière suisse et Beaucaire) était examinée et les projections climatiques étaient fondées sur un doublement du CO<sub>2</sub> positionné au milieu du XXI<sup>e</sup> siècle (2054-2064). Etchevers *et al.* (2002, Table 2, Figure 13) concluaient à une augmentation des débits annuels (+16%) et hivernaux (+50% de janvier à mars inclus) du Rhône à son exutoire sous climat modifié (+2°C et +15% de précipitations en moyenne annuelle). Cette augmentation masque des réponses contrastées au changement climatique. Ainsi, l’augmentation des apports des affluents du nord du bassin (Saône, Doubs et Ain) et le maintien des contributions issus des Alpes (Isère) compensent la chute des débits projetée sur les tributaires méditerranéens (Ardèche, Durance). Peu d’études traitent le Rhône dans son intégralité : il s’agit d’études à méso-échelle comme celle des Alpes de Wagner *et al.* (2017) avec des résolutions spatiales et temporelles grossières, ou à l’échelle du globe (van Vliet *et al.*, 2013), dans laquelle le Rhône est présent parmi les 1612 points de contrôle du modèle hydrologique et les points de simulation sous projections climatiques. Les résultats ne sont pas toujours très détaillés pour le Rhône (un bassin versant parmi d’autres). Mentionnons l’étude Hydro-CH2018 (OFEV, 2021), récemment achevé sur la partie suisse qui fournit un aperçu de l’évolution du Rhône et ses affluents en amont de Genève. Hydro-CH2018 a produit des projections hydrologiques sous RCPs 2.6, 4.5, et 8.5, à partir de 44 projections climatiques régionalisées, sur la période 1971-2100.

La Figure 13 présente les changements probables en milieu du XXI<sup>e</sup> siècle exprimés par rapport à des périodes de référence. Les études centrées sur le fleuve Rhône français partagent les hypothèses suivantes :

- Une hausse de la température de l’air mais avec des intensités différentes (ex. +2.1°C dans Etchevers *et al.* (2002), entre +1.7°C et +2.8°C dans Chauveau *et al.* (2013)),
- Des évolutions déconnectées de la partie suisse, une limite déjà évoquée par Etchevers *et al.* (2002) mais non levée,
- La dimension « gestion » peu ou non abordée (pas de représentation explicite des usages, des aménagements, et des dérivations).

Explore2 – Etude d'impact du changement climatique sur le régime hydrologique en France métropolitaine - état de l'art

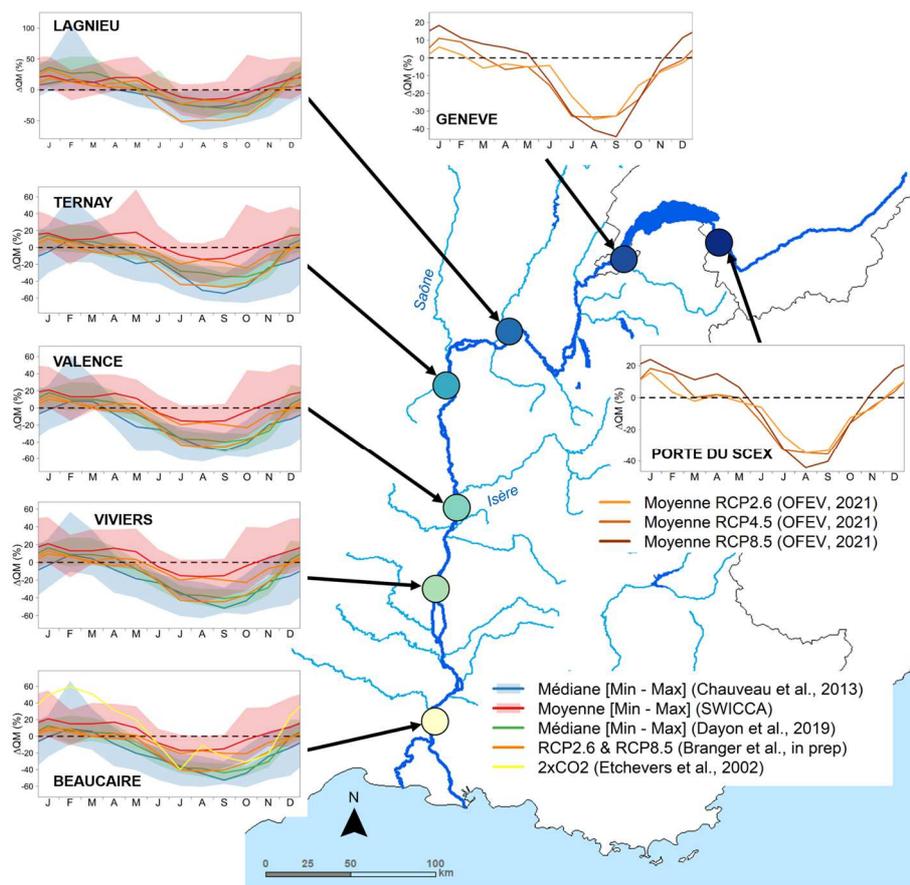


Figure 13 : Changements projetés au milieu de siècle sur les débits mensuels moyens. Pour Hydro-CH2018, la période de référence est 1981 – 2010 et les résultats sont présentés pour l'horizon « 2060 », correspondant à la période 2045 – 2074

Les résultats obtenus avec J2000 Rhône dans le cadre du projet MDR sur les débits du Rhône avec un jeu réduit de projections climatiques convergent avec les précédentes études : des étiages plus sévères sont projetés en milieu de siècle, avec des intensités de réduction qui diffèrent d'une étude à une autre. L'évolution en hiver est plus incertaine. Cette évolution est en grande partie conditionnée par les apports de la Saône, une contribution dominante au Rhône dans le contexte actuel.

Les études mobilisant des modèles sans représentation de la neige – considérées comme hors sujet – ont été volontairement exclues de cette revue de littérature, tout comme l'étude récente de Ruiz-Villanueva *et al.* (2015) : les simulations hydrologiques obtenues en fin de siècle vraisemblablement non expertisées, conduisent en effet à des étiages hivernaux et des hautes eaux en été sur le bassin versant de la Saône ; ce qui est incohérent avec les projections climatiques choisies.

Une part du devenir du Rhône est conditionnée par celui des glaciers. C'est principalement en Suisse que l'on trouve un grand nombre d'études sur les affluents du Rhône couverts par des glaciers, compte tenu de la contribution des glaciers de ~ 40 % aux débits estivaux du Rhône en amont du Lac Léman (Boscarello *et al.*, 2014). Le changement climatique va modifier l'équilibre entre l'accumulation hivernale et la fonte estivale (l'accumulation en hiver ne compensera plus la fonte) des glaciers. Plusieurs phases sont identifiées. Durant la première, le glacier va perdre en volume et les processus de fonte du glacier sont intensifiés par des températures plus élevées, et le retrait progressif du glacier (bilan de masse négatif) bénéficie au cours d'eau (débit en hausse). Cette première phase est en œuvre depuis près de 40 ans dans les Alpes françaises (Bolibar *et al.*, 2020). Lui succède une seconde phase (basculement autour de 2030, pour le glacier de Findelen étudié par Uhlmann *et al.* (2013) et pour ceux alimentant l'Arve (Laurent *et al.*, 2020) pendant laquelle le glacier pourrait perdre son rôle dominant dans l'hydrologie du cours d'eau. Les évolutions des précipitations vont progressivement gouverner celles des débits.

- **La Durance**

En parallèle du projet Explore2070, le projet R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>-2050 (Sauquet *et al.*, 2016) a examiné les débits naturels du bassin de la Durance en amont de Mallemort avant d'étudier l'équilibre offre-demande en eau sous scénarios socio-économiques à l'horizon 2050. Les projections climatiques sont les sorties de quatre GCMs du projet européen ENSEMBLES (van der Linden et Mitchell, 2009), régionalisées par des méthodes de descente d'échelle qui intègrent une composante stochastique. Un échantillonnage a conduit à une sélection de 330 projections préservant la diversité des sources d'incertitudes et les caractéristiques statistiques, en termes de changements entre le présent et le futur, présentes dans l'ensemble initial. Le changement climatique envisagé sur la période 2036-2065 et ses effets sur la ressource naturelle, mesuré sur la base des 330 projections, se traduit par les évolutions suivantes par rapport à la période 1980-2009 :

- pour le climat, de manière assez homogène, une augmentation des températures d'au moins 1°C, et pouvant aller jusqu'à 3°C, plus importante l'été et une évolution très incertaine des précipitations ;
- pour l'hydrologie naturelle, les cinq modèles hydrologiques semblent converger vers une diminution de la ressource disponible avec une réduction des débits d'étiage estivaux, autour de -20 m<sup>3</sup>/s sur le débit moyen d'août à Cadarache (Figure 14-a), une réduction significative du manteau neigeux. Les modifications portant sur la dynamique du stock de neige projetées en amont de Serre-Ponçon (Figure 14-b) se propagent vers l'aval, une baisse de la ressource annuelle proche de -20 m<sup>3</sup>/s à Cadarache et des évolutions incertaines des débits hivernaux, du fait notamment de la forte variabilité dans les projections sur les pluies.

Les signes des changements sont partagés par R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>-2050 et Explore2070. Cependant les évolutions suggérées par R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>-2050 sont moindres que celles d'Explore2070 (de l'ordre de -15 m<sup>3</sup>/s en moyenne annuelle pour Explore2070 contre -8 m<sup>3</sup>/s pour R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>-2050 à Serre-Ponçon). Une raison pourrait être le changement de température plus important (+2.2°C à Serre-Ponçon) dans Explore2070 que dans R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>-2050 (+1.7°C à Serre-Ponçon), du fait d'une fenêtre plus précoce pour R<sup>2</sup>D<sup>2</sup>-2050.

L'examen des demandes globales en eau montre une diminution à l'échelle du territoire, qui dépend fortement des scénarios territoriaux élaborés ici ; une diminution de la production d'énergie due notamment à la réduction des apports en amont des ouvrages hydroélectriques ; la satisfaction des demandes en eau en aval des ouvrages considérées comme prioritaires mais avec pour contrepartie moins de flexibilité pour la production d'énergie en hiver. Des tendances fortes sur les étiages estivaux incitent la poursuite de mesures sans regret. Même si les réserves physiques en eau semblent suffisantes à l'horizon 2050 (les réserves pourront se remplir chaque année), les changements climatiques et socio-économiques (eux les premiers d'ailleurs dans un contexte de « bassin déversant ») vont modifier sensiblement la capacité à satisfaire les différents usages, sur la Durance comme sur le Verdon. Il faudra donc aux acteurs trouver les voies qui leur permettront de parvenir à un nouvel équilibre qui sera un compromis. L'incertitude sur l'évolution de la demande est plus portée par la trajectoire socio-économique que par l'évolution du climat.

Les partenaires du projet RIWER2030 poursuivent la valorisation des résultats (François *et al.*, 2014).

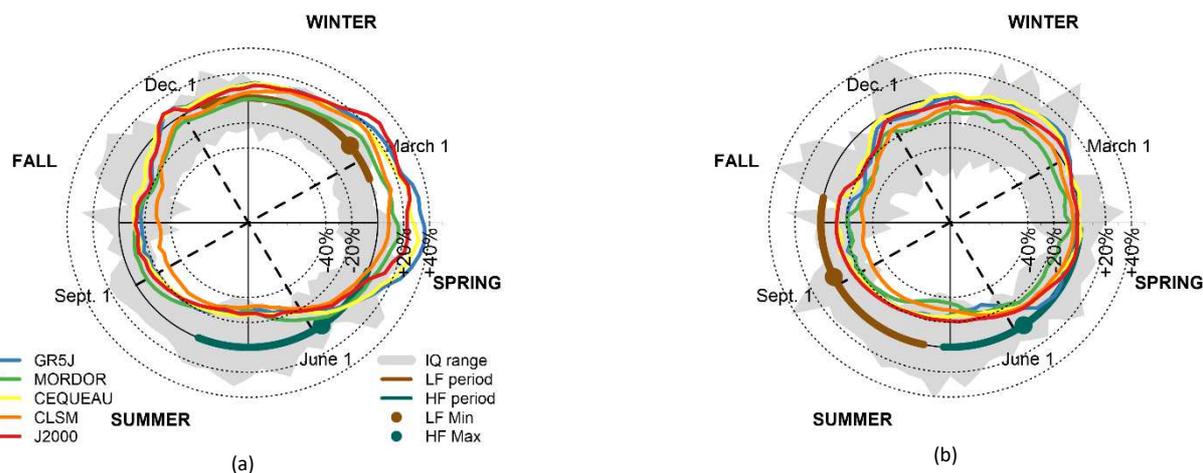


Figure 14 : Changements relatifs moyens des débits moyens sur cinq jours à (a) Serre-Ponçon (3 580 km<sup>2</sup>) et (b) Cadarache (11 700 km<sup>2</sup>) pour les cinq modèles GR5J, MORDOR, CEQUEAU, CLSM et J2000 par rapport à la période 1980-2009. Les lignes épaisses représentent la période actuelle de trois mois des étiages (LF) et de hautes eaux (HF). Les points indiquent l'occurrence du minimum et du maximum de la moyenne des débits mobiles sur cinq jours dans les conditions actuelles. Les zones grisées définissent l'intervalle interquartile sur la période temps 1980-2009

### - Les cours d'eau de Bourgogne

HYCCARE Bourgogne (HYdrologie, Changement Climatique, Adaptation, Ressource en Eau) a pour objectif de mettre à disposition des acteurs et décideurs locaux des outils leur permettant d'intégrer le changement climatique dans la gestion de l'eau. A cette fin des projections hydrologiques ont été élaborées sur un échantillon de 13 bassins versants contribuant à la Seine, la Loire et le Rhône à partir de projections climatiques régionalisées issues de l'exercice CMIP5 sur l'ensemble du XXI<sup>e</sup> siècle (Brulebois, 2016). Les débits annuels montrent peu d'évolution à l'exception de quelques bassins en fin de siècle. En revanche, les étiages sont accentués. Ainsi en moyenne sur tous les bassins :

- La durée est allongée (40 jours sur la période 1980-2010 contre 82 jours sur la période 2070-2100), et ceci principalement est dû à des débits faibles plus précoces dans l'année,
- Le débit moyen sur 3 jours minimum annuel (VCN3) diminuera de l'ordre de 36% entre la période 1980-2010 et la période 2070-2100).

L'ordre de grandeur des changements sur les étiages n'est pas incompatible avec les résultats de Dayon (2015), les variables hydrologiques n'étant pas les mêmes. Cependant, les résultats d'HYCCARE se démarquent de ceux des projets Explore2070 ou RexHyss. Une raison est l'utilisation des sorties de modèles régionaux de CMIP5 qui prévoient une augmentation des précipitations hivernales plus forte que celle considérée dans Explore2070.

### 4.6. Le bassin Seine-Normandie

Les projections climatiques d'Explore2070 suggèrent une baisse des précipitations annuelles autour de -5%. Concomitant avec une hausse des températures et de l'évapotranspiration, les débits annuels seraient amenés à diminuer sensiblement sur l'ensemble du bassin Seine-Normandie. La partie intermédiaire de la Seine serait *a priori* plus touchée par cette baisse. Les étiages seraient plus sévères (de -10 à -70% selon les projections). L'étude fait ressortir la Seine comme l'un des bassins avec les baisses les plus sévères au niveau du territoire. Les crues seraient d'intensité moindre.

Les simulations de Dayon *et al.* (2018) suggèrent une vision différente du devenir hydrologique de la Seine : en fin de siècle, en moyenne les débits annuels diminueraient mais cette baisse est incertaine du fait d'effets antagonistes (hausse des pluies d'hiver sur le Nord du bassin, mais diminution des pluies d'été et augmentation de l'évapotranspiration). Le débit d'étiage QMNA5 serait à la baisse, mais cette baisse est

moins marquée que dans Explore2070. Ce secteur apparaît moins comme « hot-spot » du changement climatique en France, mais les changements restent sensibles.

La valorisation du projet RexHySS (Ducharne *et al.*, 2009), mentionnée dans la synthèse bibliographique adossée au projet Explore2070 s'est poursuivie (Habets *et al.*, 2013). Le projet CLIMAWARE s'est déroulé en parallèle du projet Explore2070 et a sa place dans ce travail de recensement des études (Tableau 6). Comme évoqué plus haut, le projet de recherche HYCCARE a concerné les trois bassins Loire-Bretagne, Seine-Normandie et Rhône-Méditerranée et il sera décrit dans la section Rhône-Méditerranée-Corse.

La contribution française au projet européen Climaware, financé par le programme de recherche IWRM-NET (Integrated Water Resources Management Network), a eu pour but de proposer des stratégies d'adaptation dans la gestion de barrage en réponse aux impacts du changement climatique sur les eaux de surface pour le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle (Dorchies *et al.*, 2016). Le bassin de la Seine et ses Grands Lacs était le secteur d'intérêt. Deux modélisations ont été engagées : une sans considérer les barrages (hydrologie naturelle, avec des débits naturalisés pour permettre un contrôle) et la seconde avec la représentation des modes de gestion de ces ouvrages (hydrologie influencée), en 25 stations hydrométriques réparties en amont de Paris (43 800 km<sup>2</sup>). Les hypothèses de travail (GCMs, méthode de régionalisation, horizons visés, application du modèle hydrologique GR4J en mode semi-distribué) sont quasi identiques à celles d'Explore2070. A noter cependant une correction quantile-quantile appliquées aux données climatiques régionalisées. La Figure 15 (gauche, courbes violettes) montre la capacité du modèle à représenter le régime hydrologique, à la fois en périodes humides et en périodes sèches. La Figure 15 (droite, courbes bleues) montre les régimes hydrologiques sur la période historique (1961-1991, enveloppe bleue foncée) et future (2046-2065, enveloppe bleue transparente). Ainsi, on peut remarquer une augmentation de la largeur de l'enveloppe dans le futur, signe d'une incertitude accrue. De plus, on voit qu'une augmentation des débits les plus forts est possible mais hautement incertaine, alors qu'une diminution des débits d'étiage est probable. Dans ces conditions, il n'est guère surprenant de retrouver des résultats similaires avec Explore2070 lorsque l'on regarde des indicateurs classiques (non montrés ici) : une diminution notable des débits d'étiage (QMNA5, quantile 95% de la courbe des débits classés (Q95) et débits mensuels d'été et d'automne) et une incertitude sur le signe des changements des débits de hautes eaux (débit journalier maximal annuel de période de retour 10 ans (QJXA10), quantile 10% de la courbe des débits classés (Q10) et débits mensuels d'hiver et de printemps). Ces évolutions sur les étiages ont des répercussions sur les modes opératoires actuels. Aussi, deux options d'adaptation des règles de gestion des réservoirs ont été testées individuellement, puis en les combinant : (i) conception de nouvelles courbes objectif de remplissage des lacs-réservoirs, et (ii) mise en place d'un contrôleur centralisé en temps réel piloté par des prévisions météorologiques à moyen terme (9 jours). Les stratégies envisagées permettent une légère amélioration des performances par rapport à des modes de gestion inchangés (Figure 15 droite, courbes rouges), mais sans atteindre l'efficacité actuelle, notamment en ce qui concerne la limitation des bas débits.

Nom de projet / dénomination	Scénarios d'émission de GES	Nombre de couples GCM- RCM	Nombre de méthodes de descente d'échelle	Nombre de modèles hydrologiques	Période de référence	Horizon(s) ciblé(s)	Références
CLIMAWARE	SRES A1B	7	1	2	1961 – 1991	2046-2065	Dorchies et al. (2016)

Tableau 6 : Principales caractéristiques des simulations sur la Seine produites dans les études d'impact du changement climatique

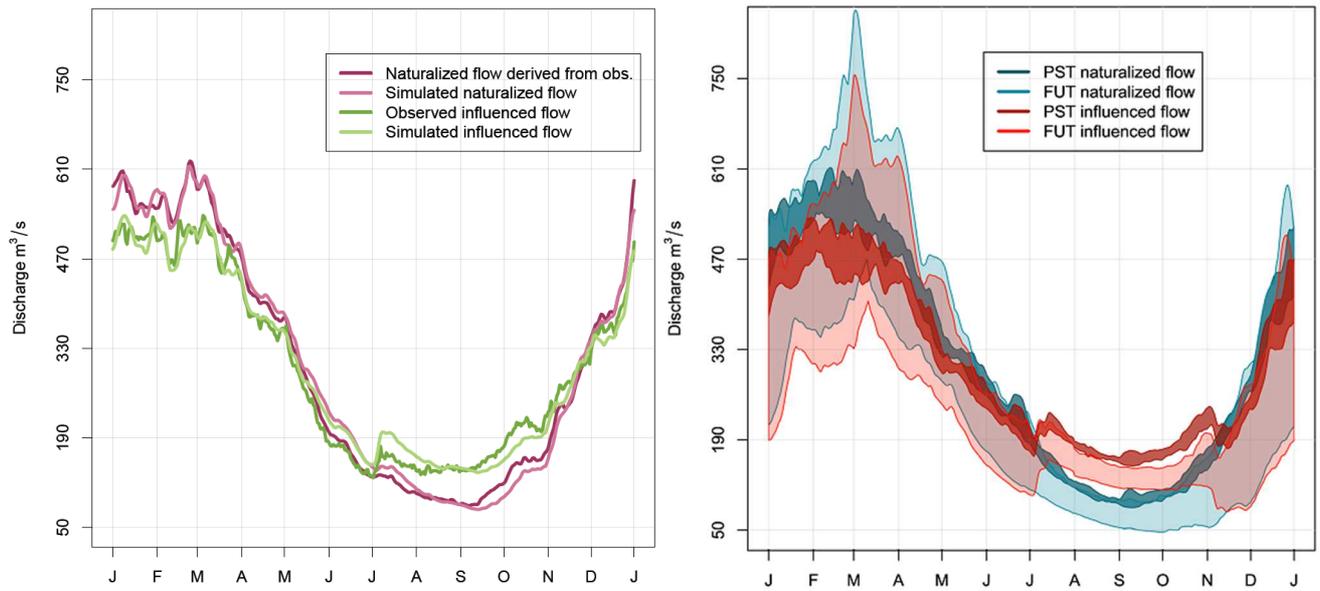


Figure 15 : Débits journaliers moyens pour la Seine à Paris. A gauche, les débits naturels (tons violets, i.e. observés naturalisés ou simulés sans prise en compte des Grands Lacs) et influencés (tons verts, i.e. observés réels ou bien simulés avec prise en compte des grands Lacs) sur la période 1961-1991. Les simulations sont obtenues grâce à un forçage de climat observé. A droite, les simulations obtenues en projections : dans les tons bleus, sans prise en compte des Grands Lacs, dans les tons rouges, avec prise en compte des Grands Lacs. Les enveloppes représentent la gamme des possibles pour les sept projections utilisées.

## 5. Etudes régionales (eaux souterraines)

Des études régionales ont pu être identifiées mobilisant les résultats d'AquiFR et du modèle RECHARGE, modèles exploités dans le cadre du projet Explore2.

Ainsi Allier *et al.* (2021) ont exploité les résultats d'AquiFR et d'une petite partie du modèle Loire pour évaluer le devenir des ressources souterraines du département du Maine-et-Loire. Maréchal *et al.* (2012) ont examiné le devenir du système karstique du Lez pour engager des stratégies de gestion de l'eau sur les territoires alimentés par cette ressource. Caballero *et al.* (2015) et Le Cointe *et al.* (2019) ont pu initier les développements du modèle RECHARGE sur les bassins de gestion des agences de l'eau Adour-Garonne, en premier lieu, puis Rhône-Méditerranée-Corse.

Haidu et Nistor (2020) ont étudié, sur la région Grand-Est, l'évolution de la pluie efficace et un indicateur d'aridité, pour mesurer l'impact du changement climatique sur la recharge des aquifères à deux horizons « 2020 » (2011–2040) et « 2050 » (2041–2070). La période de référence est comme Explore2070 : 1961–1990. L'étude s'appuie sur les sorties de 15 GCM, issues de l'exercice CMIP5 et la méthode des anomalies est appliquée à ces projections globales pour en déduire des forçages locaux. Les évolutions simulées sont gouvernées principalement par la hausse des températures et de l'évapotranspiration annuelles. Les précipitations sont peu modifiées (en termes quantitatifs et vis-à-vis de la structure spatiale). La recharge est globalement à la baisse et les effets - les baisses plus sensibles - sont projetés dans la plaine du Rhin et dans le département de la Marne.

Amraoui *et al.* (2019) rappellent les principales conclusions du projet Explore2070 pour le bassin de la Somme. A l'échelle du bassin de la Somme, la baisse de la recharge calculée à partir des résultats des sept projections climatiques d'Explore2070 est de l'ordre de 19% (entre -30.4% et -5.6%). Le modèle hydrodynamique suggère une baisse des débits mensuels de la Somme (-23% à son exutoire) et de ses principaux affluents à l'horizon 2046-2065. Les cartes des changements des niveaux piézométriques minimaux par projection climatique (Figure 16) mettent en évidence des contrastes entre les plateaux (changements importants) et les fonds de vallée (changements modérés) pour cinq des sept projections.

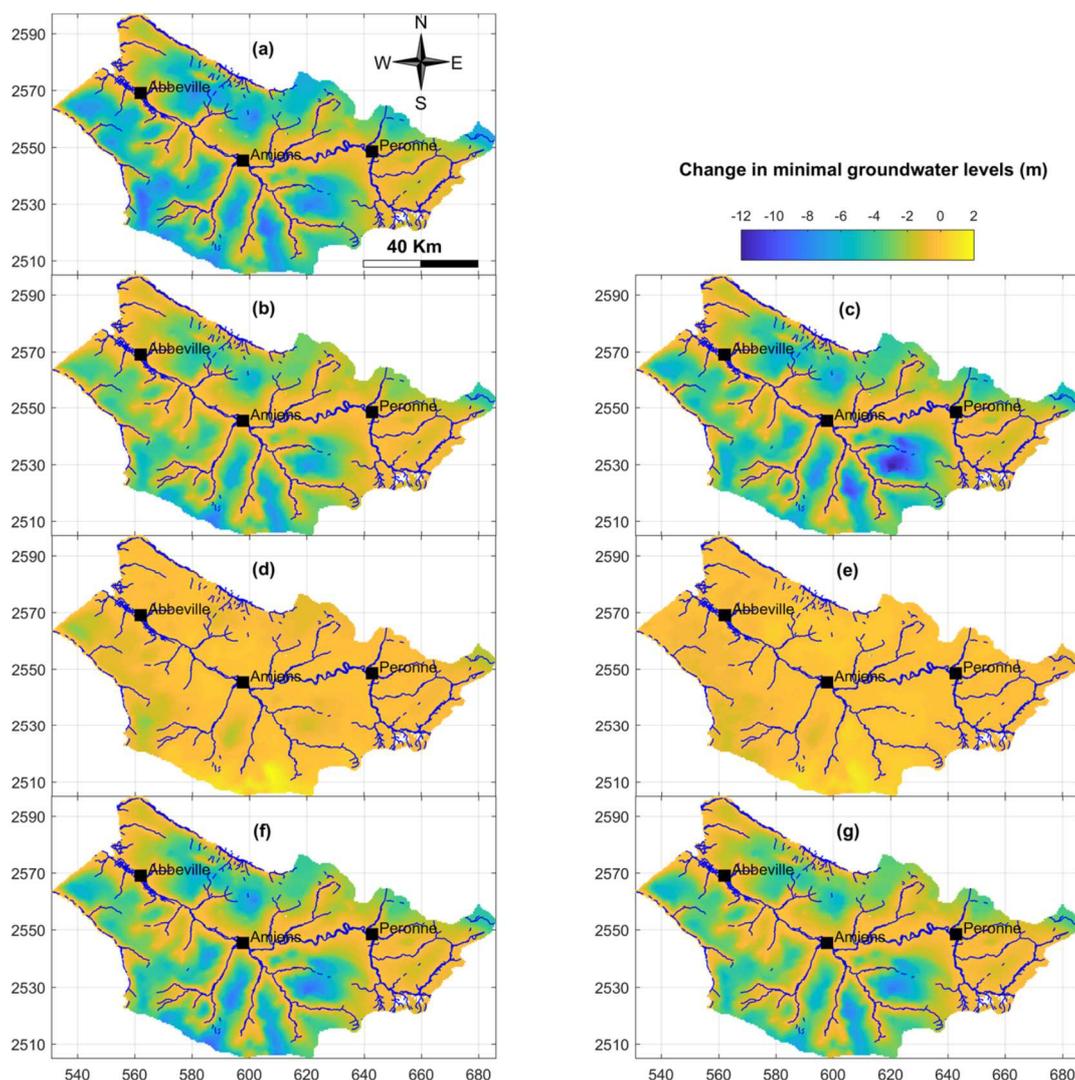


Figure 16 : Changement du niveau piézométrique minimal entre la période 1961-1991 et 2046-2065 par projection climatique

La plateforme de modélisation hydrogéologique nationale Aquif-FR (Vergnes *et al.*, 2020) a traité les projections climatiques CMIP5 régionalisées par Dayon *et al.* (2018) (décrit en section 3, page 14) dans le cadre combiné du projet Aquif-FR OFB et de la convention service climatique (<https://convention-services-climatiques.lsce.ipsl.fr/>). Les trois scénarios d'émission ont été traités (RCP2.6, RCP4.5 et RCP8.5). Ce travail a supposé une occupation des sols et des prélèvements stables.

On dispose pour chacun de ces scénarios d'un ensemble de projections comprenant de 8 à 14 membres. Le Tableau 7 présente en moyenne sur le domaine Aquif-FR la moyenne et l'écart-type des évolutions de recharge, du nombre de jour de recharge effective (c'est-à-dire, du nombre de jours où le niveau de la nappe est en hausse), et des volumes apportés par la nappe aux rivières entre la période 2070-2100 et 1960-1990 pour les trois scénarios d'émissions. Du fait du gradient nord-sud du changement des précipitations qui est encore plus marqué pour le scénario RCP8.5 que pour les autres, certains modèles conduisent à une augmentation de la recharge sur le domaine Aquif-FR (jusqu'à +8%), mais, un plus grand nombre projette une réduction plus marquée (jusqu'à -37%). Ainsi, en moyenne sur l'ensemble des modèles, la recharge diminue de -8% pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, et reste stable pour le RCP2.6. Même si la recharge est plus importante en volume, elle peut être plus concentrée en durée. Ainsi, si on s'intéresse à la recharge effective de la nappe, on constate qu'elle se produit sur un nombre de jours fortement réduit pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 (-10% et -15%), avec un accord vers une réduction du nombre de jours pour l'ensemble des projections. Seul le RCP2.6 pour lequel l'évolution des précipitations est plus réduite montre une

fluctuation à la baisse ou à la hausse du nombre de jours de recharge effective, avec une moyenne à la réduction de -4%.

	RCP 2.6 8 projections	RCP 4.5 14 projections	RCP 8.5 14 projections
Evolution de la recharge (%)	~ -1 [-7 ; 0]	~ -8 [-30 ; +8]	~ -8 [-37 ; +7]
Evolution du nombre de jours de recharge effective (%)	~ -4 [-7 ; +9]	~ -10 [-18 ; -4]	~ -15 [-21 ; -9]
Evolution du volume d'échange nappe rivière (%)	~ 0 [-7 ; +9]	~ -7 [-33 ; +1]	~ -6 [-58 ; +12]

Tableau 7 : Evolution sur le domaine Aqwi-FR de la recharge, du nombre de jours de recharge effective (i.e. du nombre de jours où le niveau de la nappe est en hausse), et des volumes apportés par la nappe aux rivières.

Dans ce travail, l'indice piézométrique standardisé IPS (Seguin, 2014 ; Vergnes *et al.*, 2020) est utilisé. Cet indice permet d'interpréter un niveau de nappe en comparaison de sa fréquence dans la période de référence : un niveau très bas ou très haut est caractérisé par une période de retour d'environ 10 ans. Cet indice facilite l'interprétation cartographique des impacts et permet également de représenter un impact sur l'ensemble d'une couche aquifère ou d'un bassin

La Figure 17 présente l'évolution de 1950 à 2100 de cet indice en moyenne sur le domaine et pour l'ensemble des modèles de climat pour les trois scénarios d'émission, au pas de temps mensuels. Elle met en évidence des importantes fluctuations interannuelles. En fin de siècle, les efforts d'atténuation sont payants pour le scénario à 2°C, et le niveau moyen des nappes revient autour de la normale, alors que pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, le niveau des nappes reste autour du niveau de l'actuelle décennale sèche.

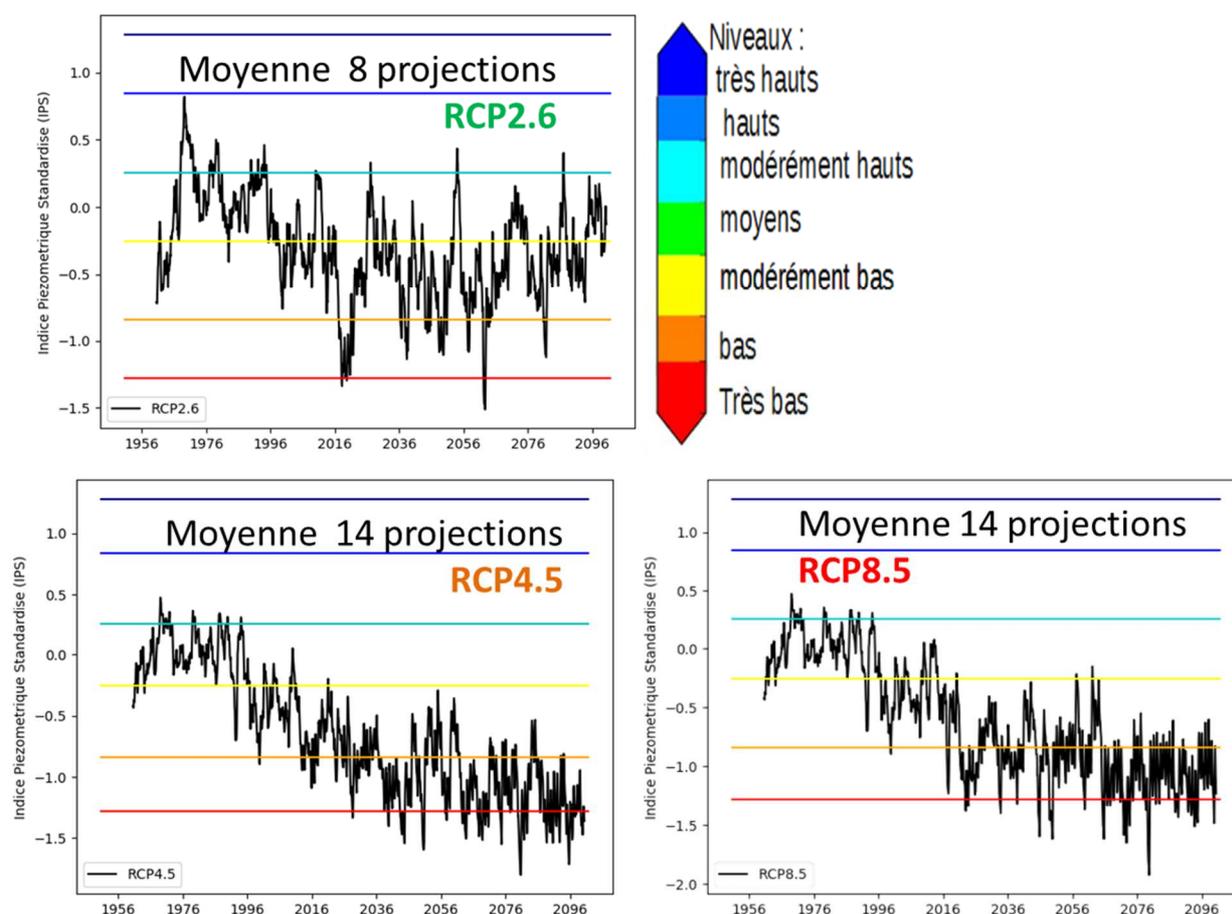


Figure 17 : Evolution moyenne sur le domaine Aqwi-FR et sur l'ensemble des modèles de climat de l'indice piézométrique standardisé de 1950 à 2100 pour les trois scénarios d'émission de gaz à effet de serre.

Les résultats de la Figure 17 sont des moyennes sur l'ensemble du domaine et sur l'ensemble des projections. Ils masquent des disparités entre les différentes projections climatiques.

Pour mieux se rendre compte de la dispersion entre projections climatiques, la Figure 18 présente l'extension des zones en sécheresse (c'est-à-dire où le niveau des nappes est inférieur à un niveau très bas) en fonction de l'intensité des sécheresses, par scénario d'émission et par période de 30 ans. La durée des sécheresses y est représentée par la taille du symbole (plus large lorsque la durée est plus longue). On peut constater que l'intensité des sécheresses augmente pour toutes les projections, ainsi que leur extension spatiale et leur durée, et ce pour la plupart des projections quel que soit le RCP.

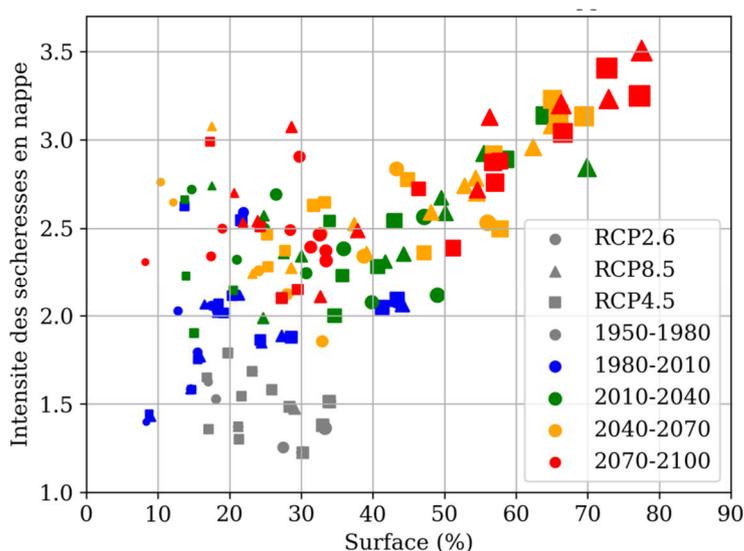


Figure 18. Occurrence des sécheresses en nappe sur le domaine Aqwi-FR : pour chaque période de 30 ans (couleurs), et tous les modèles de climat de chaque scénario RCP (forme du symbole). Chaque point présente l'extension moyenne (en abscisse), l'intensité moyenne (en ordonnée) et la durée (taille du symbole) des épisodes de sécheresse en nappe pour chaque période de 30 ans indiquée en couleur. Une sécheresse est considérée avec un niveau très bas (période de retour 10 ans).

Enfin, la Figure 19 aborde la dimension spatiale, et présente sous forme de cartes la durée en sécheresse hydrogéologique en moyenne sur l'ensemble des modèles de climat et pour les trois scénarios d'émission en fin de siècle. Ainsi, certaines zones seront quasi en continu en sécheresse (zone en rouge foncée sur la figure). Cela correspond à des zones avec des prélèvements importants en nappe, notamment pour l'eau potable. Le choix de conserver des prélèvements constants dans les simulations d'Aqwi-FR n'est pas compatible avec l'évolution de la ressource en eau souterraine.

Aqwi-FR simulant les débits et les échanges nappes-rivières, il a été également possible de s'intéresser à l'évolution croisée des débits en rivière et des niveaux de nappe. Il apparaît clairement un assèchement des têtes de bassins en particulier dans les zones les nappes sont le plus affectés par une baisse. On retrouve une connexion forte entre zones de prélèvements importantes, abaissement des nappes, disparition des rivières en têtes de bassin. Il s'avère qu'il n'y a pas de fortes évolutions des caractéristiques des hauts débits dans le futur. Pour les hauts niveaux de nappe, des épisodes plus intenses sont projetées dans le futur, sur des extensions similaires à l'actuelle, et sur des durées légèrement plus courtes, et cela, surtout pour les scénarios d'émission les plus émetteurs (RCP8.5 et RCP4.5). Ces résultats sont détaillés dans le rapport (Habets *et al.*, 2021).

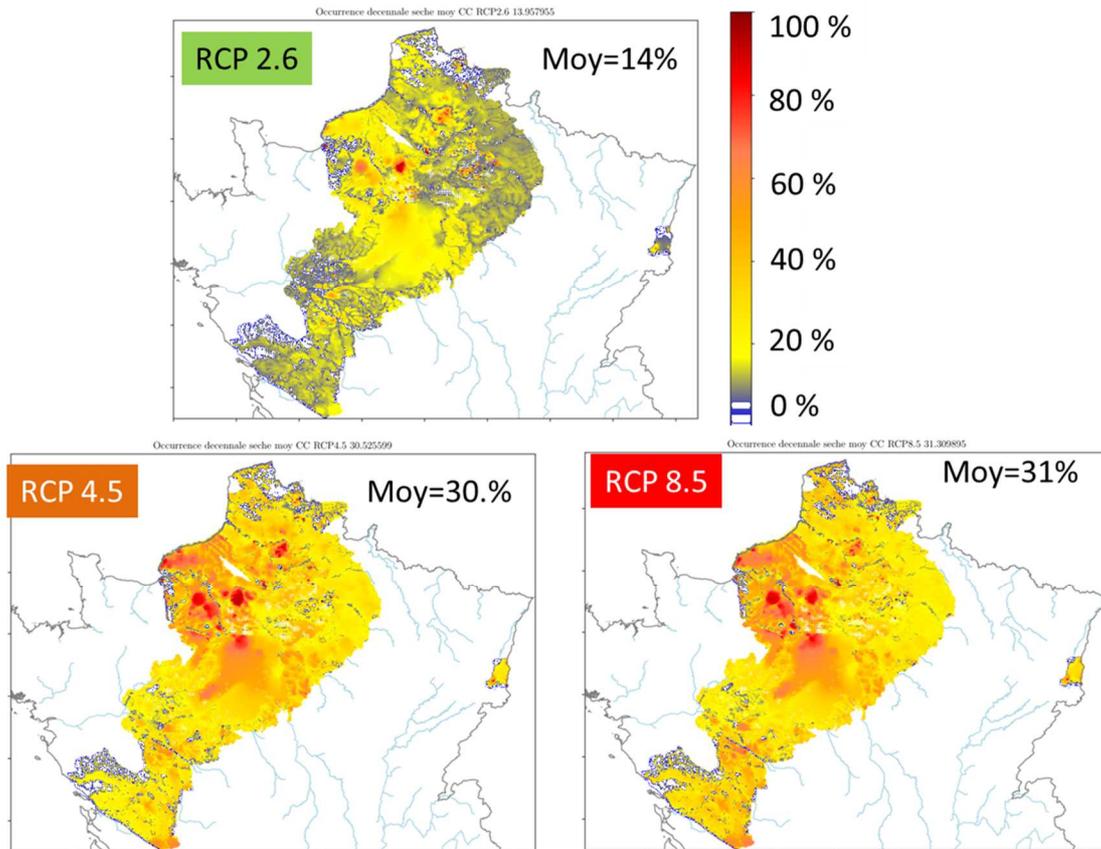


Figure 19. Durée des sécheresses hydrogéologiques (SPL en dessous de la décennale sèche) en fin de siècle (2070-2100) exprimée en pourcentage du temps, en moyenne sur les modèles de climat pour chacun des 3 scénarios d'émission.

Ainsi, il apparaît très probable que sans un effort important pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, les problèmes de gestion de l'eau associés aux sécheresses seront récurrents même dans la partie nord de la France dans le futur, sans pour autant qu'il y ait une réduction marquée des risques de hautes eaux en nappe. Des simulations ont été engagées en exploitant des projections issues de projections régionalisées avec une version antérieure d'ADAMONT (Verfaillie *et al.*, 2017), mais qui se sont avérées erronées par la suite.

## 6. Conclusion

L'analyse bibliographique a identifié des études aux différentes échelles (européennes, française ou régionales) traitant de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie et réalisées depuis la fin du projet Explore2070. Elles ont été, pour certaines, motivées par la publication récente des simulations de l'exercice CMIP5.

Les résultats issus de ces différents projets sont difficilement comparables, du fait des différentes hypothèses prises : les scénarios d'émission, la période de référence (pour le calage des modèles, le calcul des changements, etc.), les modèles (qu'ils concernent le climat ou l'hydrologie), les méthodes de descente d'échelle, les méthodes de correction de biais, le nombre des simulations réalisées, les résolutions spatiale et temporelle des simulations, etc. Les conclusions sont conditionnées par ces choix techniques.

L'analyse des études post-Explore2070 montre que, lorsque plusieurs scénarios d'émission de GES et horizons sont considérés, les intensités de changement sont plus importantes en l'absence de politique d'atténuation et en fin de siècle. Elle montre également qu'une grande majorité de ces études, menées aux échelles nationale ou Européenne, convergent vers des étiages estivaux plus sévères sur les différents bassins en France métropolitaine.

En revanche, aucun signal clair ne se dégage sur le devenir des crues, et cela conformément aux conclusions du dernier rapport du GIEC. L'Europe en est une illustration, avec des résultats contradictoires selon différentes études (ex. Roudier *et al.*, 2016 ; Di Sante *et al.*, 2021). L'incertitude hérite des choix de modélisation ou d'ordre méthodologique pris à tous les niveaux. C'est notamment le cas des choix relatifs aux modèles de régionalisation du climat retenus pour la production des projections climatiques locales avec des conséquences sur l'évolution des pluies extrêmes. Par exemple, les méthodes qui s'appuient sur le principe d'analogie (ré-échantillonnage de valeurs passées) ne peuvent pas prendre en compte les modifications de certains extrêmes pluviométriques (impossibilité de proposer des valeurs de cumuls journaliers en dehors de la gamme des observations). Par ailleurs, les modèles climatiques régionaux sont classiquement interrogés sur leur capacité à produire des événements pluviométriques locaux. Quand elles sont appliquées pour corriger les sorties des modèles climatiques régionaux, les méthodes de correction de biais doivent, quant à elles, faire aussi différentes hypothèses importantes sur les corrections à apporter aux valeurs extrêmes simulées. Enfin, les incertitudes héritées des choix de modélisation concernent aussi les modèles hydrologiques, notamment leur façon de représenter tout ou partie des différents processus générateurs des crues.

Le projet Explore2 va produire des séries de débits et des quantiles de pluies extrêmes ou de crue (dans une configuration sans aménagement, ni évolution de l'occupation des sols) seront fournis. Au vu des différentes limitations connues et évoquées ci-dessus sur les projections des extrêmes hydro-climatiques, elles ne seront pas fournies cependant pour des périodes de retour supérieures à 10 ans (noter qu'au-delà de ces limitations, s'ajoutent aux incertitudes de la chaîne de modélisation celles liées à la méthode statistique de calcul des valeurs extrêmes).

Les questions liées à la possibilité de projeter les évolutions des extrêmes hydro-climatiques seront abordées en parallèle du projet Explore2. Par exemple, la thèse de Nils Poncet au CNRM (projet MOPGA KM-IMPACTS, codirigé par Philippe Lucas-Picher, Guillaume Thirel et Yves Tramblay) permettra d'évaluer le potentiel des simulations produites avec les nouveaux modèles de climat à haute résolution (résolution ~ 2 km et pas de temps horaire) qui permettent de représenter la convection. Elle permettra aussi de les confronter aux projections issues des modèles de la génération précédente (résolution ~ 12 km), de mesurer l'impact de la correction des biais sur les projections et, *in fine*, de comparer les réponses hydrologiques de deux modèles hydrologiques distincts.

Les résultats de cette thèse, croisés avec la bibliographie et l'analyse des incertitudes, devraient permettre une première mise en perspective des résultats d'Explore2 qui seront produits sur les crues et d'apprécier les progrès réalisés depuis Explore2070. Le consortium s'attachera à identifier les points de convergence et de divergence en termes notamment d'hypothèses de travail pour mieux comprendre les cohérences et incohérences entre études qui ont pu se succéder sur un même terrain d'application. A l'issue du projet Explore2, le consortium pourra recenser les verrous scientifiques persistants et donc à lever pour une meilleure connaissance des extrêmes sous changement climatique.

## 7. Références

- Allier, D., Vergnes, J.-P., Vernoux, J.-F., Thiéry, D., Rouxel, E., Chrétien, P. (2021) Etat quantitatif actuel et évolution future des ressources en eau souterraine du département du Maine-et-Loire. Rapport final. BRGM/RP-70635-FR, Orléans.
- Amraoui, N., Sbai, M.-A., Stollsteiner, P. (2019). Assessment of Climate Change Impacts on Water Resources in the Somme River Basin (France). *Water Resour Manage* 33, 2073–2092. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02230-x>.
- Bisselink, B., Bernhard, J., Gelati, E., Adamovic, M., Guenther, S., Mentaschi, L., Feyen, L., de Roo, A. (2012). Climate change and Europe's water resources, EUR 29951 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020, ISBN 978-92-76-10398-1, doi:10.2760/15553, JRC118586.
- Bolibar, J., Rabatel, A., Gouttevin, I., Galiez, C. (2020). A deep learning reconstruction of mass balance series for all glaciers in the French Alps: 1967–2015. *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1973–1983, doi: 10.5194/essd-12-1973-2020.
- Booij, M. J. (2004). Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *J. Hydrol.*, 303(6), 176-198.
- Boscarello, L., Ravazzani, G., Rabuffetti, D., Mancini, M. (2014). Integrating glaciers raster-based modelling in large catchments hydrological balance: the Rhone case study. *Hydrol. Process.*, 28, 496–508, doi: 10.1002/hyp.958.
- Brulebois, E. (2016). Impacts du changement climatique sur la disponibilité de la ressource en eau en Bourgogne : aspects quantitatifs et qualitatifs. Thèse, Université de Bourgogne Franche-Comté.
- Caballero, Y., Lanini, S., Seguin, J., Charlier, J.-B., Ollivier, C. (2015). Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique. Application au bassin Rhône Méditerranée Corse. Rapport de 1<sup>ère</sup> année. BRGM/RP-64779-FR, Orléans.
- Cammalleri, C., Naumann, G., Mentaschi, L., Formetta, G., Forzieri G., Gosling, S., Bisselink, B., De Roo, A., Feyen, L. (2020). Global warming and drought impacts in the EU, EUR 29956 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-12947-9, doi:10.2760/597045, JRC118585.
- Chazot, S., Perrin, C., Vidal, J.P., Sauquet E., Chauveau, M., Rouchy, N. (2012). EXPLORE 2070 – Lot Hydrologie de surface B5 – Synthèse bibliographique, 43 pages + annexes.
- CIPMS, 2013. Identification des impacts possibles du changement climatique dans le bassin versant de la Moselle et de la Sarre, Commissions internationales pour la protection de la Moselle et de la Sarre, 13 pages.
- Commeaux, F., Drogue, G., François, D. (2010). Analyse prospective des débits mensuels d'étiage de la Meuse française à l'aide d'un modèle hydrologique : sensibilité aux méthodes de descente d'échelle spatiale et aux scénarios d'émission, BAGF - Géographies, 2, 178-193.
- Dayon, G. (2015). Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies. Thèse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- Dayon, G., Boé, J., Martin, E., Gailhard, J. (2018). Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience*, 350 (4), 141–153, doi:10.1016/j.crte.2018.03.001.
- de Wit, M. J. M., van den Hurk, B., Warmerdam, P. M. M., Torfs, P. J. J. F., Roulin, E., van Deursen, W. P. A. (2007). Impact of climate change on low-flows in the river Meuse. *Climatic Change*, 82, 351-372, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9195-2>.

- Detrembleur, S., Stilmant, F., Dewals, B., Erpicum, S., Archambeau, P., Piroton, M. (2015). Impacts of climate change on future flood damage on the river Meuse, with a distributed uncertainty analysis. *Natural Hazards*, 77, 1533-1549, doi.org/10.1007/s11069-015-1661-6.
- Dewals, B., Drogue, G., Erpicum, S., Piroton, M., Archambeau, P. (2013). Impact of climate change on inundation hazard along the river Meuse. *Transboundary Water Management in a Changing Climate*, edited by: Dewals, B., and Fournier, M., 19-27.
- Di Sante, F., Coppola, E., Giorgi, F. (2021). Projections of river floods in Europe using EURO-CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations. *Int J Climatol.*, 41, 3203– 3221, <https://doi.org/10.1002/joc.7014>.
- Donnelly, C., Ernst, K., Arheimer, B. (2018). A comparison of hydrological climate services at different scales by users and scientists. *Climate Services*, 11, 24-35, <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2018.06.002>.
- Dorchies, D., Thirel, G., Perrin, C., Bader, J.-C., Thepot, R., Rizzoli, J.-L., Jost, C., Demerliac, S. (2016). Climate change impacts on water resources and reservoir management in the Seine river basin (France). *La Houille Blanche*, (5), 32-37, DOI: 10.1051/lhb/2016047.
- Drogue, G., Fournier, M., Bauwens, A., Buiteveld, H., Commeaux, F., Degré, A., De Keizer, O., Detrembleur, S., Dewals, B., François, D., Guilmin, E., Hausmann, B., Hissel, F., Huber, N., Lebaut, S., Losson, B., Kufeld, M., Nacken, H., Piroton, M., Pontégny, D., Sohler, C., Vanneuville, W. (2010). AMICE report, Analysis of climate change, high-flows and low-flows scenarios on the Meuse basin, WP1 report summary – Actions 1 & 3.
- Ducharne, A., Habets, F., Déqué, M., Evaux, L., Hachour, A., Lepaillier, A., Lepelletier, T., Martin, E., Oudin, L., Pagé, C., Ribstein, P., Sauquet, E., Thiéry, D., Terray, L., Viennot, P., Boé, J., Bourqui, M., Crespi, O., Gascoin, S., Rieu, J. (2009). *Projet REXHySS - Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. Rapport final, MEEDDM.*
- Etchevers, P., Golaz, C., Habets, F., Noilhan, J. (2002). Impact of a climate change on the Rhone river catchment hydrology. *J. Geophys. Res.*, 107(D16), 4293, doi:10.1029/2001JD000490.
- European Commission, Joint Research Centre, Dottori, F., Mentaschi, L., Bianchi, A., et al. (2020). Adapting to rising river flood risk in the EU under climate change : JRC PESETA IV project : Task 5, Publications Office, 2020, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/14505>
- Feyen, L., Ciscar, J.C., Gosling, S., Ibarreta, D., Soria, A. (editors) (2020). *Climate change impacts and adaptation in Europe. JRC PESETA IV final report. EUR 30180EN*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, ISBN 978-92-76-18123-1, doi:10.2760/171121, JRC119178.
- Forzieri, G., Feyen, L., Rojas, R., Flörke, M., Wimmer, F., Bianchi, A. (2014). Ensemble projections of future streamflow droughts in Europe. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 85–108, <https://doi.org/10.5194/hess-18-85-2014>.
- François, B., Hingray, B., Hendrickx, F., Creutin, J. D. (2014). Seasonal patterns of water storage as signatures of the climatological equilibrium between resource and demand. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 3787–3800, <https://doi.org/10.5194/hess-18-3787-2014>.
- François, D., Drogue, G., Commeaux, F. (2011). Évolution possible des débits d'étiage de la Meuse en France au cours du XXIème siècle. *Revue Géographique de l'Est*, 51.
- Grelier, B., Drogue, G., Piroton, M., Archambeau, P., Dewals, B. (2016). An alternate approach for assessing impacts of climate change on water resources: Combining hazard likelihood and catchment sensitivity, 4th IAHR Europe Congress, Liège.
- Greuell, W., Andersson, J. C. M., Donnelly, C., Feyen, L., Gerten, D., Ludwig, F., Pisacane, G., Roudier, P., Schaphoff, S. (2015). Evaluation of five hydrological models across Europe and their suitability for making

projections under climate change. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 12, 10289–10330, <https://doi.org/10.5194/hessd-12-10289-2015>.

Grusson, Y. (2016). Modélisation de l'évolution hydroclimatique des flux et stocks d'eau verte et d'eau bleue du bassin versant de la Garonne. Laval University, Quebec City, QC, Canada, 355 pages.

Habets, F., Boé, J., Déqué, M., Ducharne, A., Gascoin, S., Hachour, A., Martin, E., Pagé, C., Sauquet, E., Terray, L., Thiéry, D., Oudin, L., Viennot, P. (2013). Impact of climate change on the hydrogeology of two basins in Northern France. *Climatic Change*, doi: 10.1007/s10584-013-0934-x.

Habets, F., Amraoui, Nadia, Thiery, D., Vergnes, J.-P., Morel, T., Le Moigne, P., Munier, S., Leroux, D., de Dreuzy, J.-R., Longuevergne, L., Ackerer, P., Besson, F., Etchevers, P., Rousset, F., Willemet, J.-M., Viennot, P., Gallois, N. (2021). Plateforme de modélisation hydrogéologique nationale AQUI-FR. Rapport final, 62 pages, [hal-03485621](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03485621).

Haidu, I., Nistor, M.-M. (2020). Long-term effect of climate change on groundwater recharge in the Grand Est region of France. *Meteorological Applications*, 27:e1796. <https://doi.org/10.1002/met.1796>

Hendrickx, F., Sauquet, E. (2013). Impact of warming climate on water management for the Ariège river basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2013.788790.

Krueger, I., Ottow, B. T., de Keizer, O., Buiteveld, H. (2013). Towards a roadmap to climate change adaptation in the Meuse river basin, with the focus on water quantity. *Transboundary Water Management in a Changing Climate*, edited by: Dewals, B., and Fournier, M., 69-74.

Krysanova, V., Donnelly, C., Gelfan, A., Gerten, D., Arheimer, B., Hattermann, F., Kundzewicz Z. W. (2018) How the performance of hydrological models relates to credibility of projections under climate change, *Hydrological Sciences Journal*, 63:5, 696-720, DOI: 10.1080/02626667.2018.1446214.

Laurent, L., Buoncristiani, J.-F., Pohl, B., Zekollari, H., Farinotti, D., Huss, M., Mugnier, J.L., Pergaud, J. (2020). The impact of climate change and glacier mass loss on the hydrology in the Mont-Blanc massif. *Scientific Reports* 10, 10420, doi: 10.1038/s41598-020-67379-7.

Le Cointe, P., Arnaud, L., Beranger, S., Caballero, Y., Lanini, S. (2019). Réponse des Eaux souterraines au Changement climatique dans le bassin Adour-Garonne (RECHARGE). Rapport final. BRGM/RP-67149-FR, Orléans.

Leblois, E. (2002). Évaluation des possibles impacts du changement climatique par modélisation distribuée (projets Gewex-Rhône et GICC-Rhône). *La Houille Blanche*, 88(8), 78-83, doi: 10.1051/lhb/2002112.

Lhuissier, L., Lamblin, V., Sauquet, E., Arama, Y., Goulard, F., Strosser, P. (2016). Retour sur l'étude prospective Garonne 2050. *La Houille Blanche*, 6, 30-35, doi: <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2016057>.

Maréchal, J.-C., Borrel-Estupina, V., Caballero, Y., Cernesson, F., Fleury, P., Allemand, J., Ladouche, B., Malaterre, P.-O. (2012). Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du Lez - Simulations numériques de différents scénarios de changement globaux. Rapport final L.4.2 BRGM/RP-61050-FR, Orléans

Moatar, F., Ducharne, A., Thiéry, D., Bustillo, V., Sauquet, E., Vidal J.-P. (2010). La Loire à l'épreuve du changement climatique. *Géosciences*, 12, 78-87.

OFEV (éd.) (2021). Effets des changements climatiques sur les eaux suisses. Hydrologie, écologie et gestion des eaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. *Connaissance de l'environnement*, 2101, 134 pages.

Pyka, C., Jacobs, C., Breuer, R., Elbers, J., Nacken, H., Sewilam, H., Timmerman, J. (2016). Effects of water diversion and climate change on the Rur and Meuse in low-flow situations. *Environmental Earth Sciences*, 75, 10.1007/s12665-016-5989-3.

- Romgens, H. (2013). Climate change and the impact on drinking water supply in the Meuse river basin. *Transboundary Water Management in a Changing Climate*, edited by: Dewals, B., and Fournier, M., 37-43.
- Roudier, P., Jafet, A. C. M., Donnelly, C., Feyen, L., Greuell, W., Ludwig, Fulco, L. (2016). Projections of future floods and hydrological droughts in Europe under a +2°C global warming. *Climatic Change*, 135, 341-355, <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1570-4>.
- Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M., Bussi, G., Francès, F., Bréthaut, C. (2015). Climate change impacts on discharges of the Rhone River in Lyon by the end of the twenty-first century: model results and implications. *Reg Environ Change*, 15, 505–515, doi: 10.1007/s10113-014-0707-8.
- Sauquet E., Arama Y., Blanc-Coutagne E., Bouscasse H., Branger F., Braud I., Brun J.-F., Chérel Y., Cipriani T., Datry T., Ducharne A., Hendrickx F., Hingray B., Krowicki F., Le Goff I., Le Lay M., Magand C., Malerbe F., Mathevet T., Mezghani A., Monteil C., Perrin C., Poulhe P., Rossi A., Samie R., Strosser P., Thirel G., Tilmant F., Vidal J.-P. (2016). Le partage de la ressource en eau sur la Durance en 2050 : vers une évolution du mode de gestion des grands ouvrages duranciens ? *La Houille Blanche*, 5, 1-6, <http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2016046>.
- Sauquet, E., Beaufort, A., Sarremejane, R., Thirel, G. (2021). Predicting flow intermittence in France under climate change. *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2021.1963444.
- Seguin, J. (2015). Proposition d'un indicateur piézométrique standardisé pour le Bulletin de Situation Hydrologique 'Nappes'. Rapport final. BRGM/RP-64147-FR, Orléans.
- Sjerps, R. M. A., ter Laak, T. L., Zwolsman, G. (2017). Projected impact of climate change and chemical emissions on the water quality of the European rivers Rhine and Meuse: A drinking water perspective. *Science of the Total Environment*, 601, 1682-1694, 10.1016/j.scitotenv.2017.05.250.
- SMHI (2021). Hydrological model specification: A multimodel ensemble of hydrological models at the European scale with E-HYPE (5 km grid and catchment) and VIC-WUR (5 km) Dataset: Hydrology related climate impact indicators from 1970 to 2100 derived from bias adjusted European climate projections. C3S\_424\_SMHI Operational Water Service, <https://confluence.ecmwf.int/pages/viewpage.action?pageId=283570322>, 25 pages.
- Thierion, C., Longuevergne, L., Habets, F., Ledoux, E., Ackerer, P., Majdalani, S., Leblois, E., Lecluse, S., Martin, E., Queguiner, S., and Viennot, P., 2012. Assessing the water balance of the Upper Rhine Graben hydrosystem. *J. Hydrol.*, 424–425, 68-83, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.028>.
- Thirel, G., Collet, L., Rousset, F., Delaigue, O. François, D., Gailhard, J., Le Lay, M., Perrin, C., Reverdy, M., Samacoits, R., Terrier, M., Vidal, J.-P., Wagner, J.-P. (2021). Projet CHIMERE 21. CHlers - Meuse : Evolution du RégimE hydrologique au 21<sup>e</sup> siècle. Rapport final. Agence de l'Eau Rhin-Meuse, convention n°17C08004. 23/04/2021. 152 pp. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.
- Thirel, G., Collet, L., Rousset, F., Delaigue, O. François, D., Gailhard, J., Le Lay, M., Perrin, C., Reverdy, M., Samacoits, R., Terrier, M., Vidal, J.-P., Wagner, J.-P. (*in prep.*). Evolution of the French Meuse River discharge in the 21<sup>st</sup> century.
- Thirel, G., Gerlinger, K., Perrin, C., Drogue, G., Renard, B., and Wagner, J.-P., 2018. Evolutions des débits futurs sur le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques du 5e rapport du GIEC. Rapport final du projet MOSARH21, [https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2018/04/Rapport\\_final\\_MOSARH21\\_v2\\_1.pdf](https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2018/04/Rapport_final_MOSARH21_v2_1.pdf).
- Thirel, G., Gerlinger, K., Perrin, C., Drogue, G., Renard, B., Wagner, J.-P., 2019. Quels futurs possibles pour les débits des affluents français du Rhin (Moselle, Sarre, Ill) ? *La Houille Blanche*, 5-6, 140-149, <https://doi.org/10.1051/lhb/2019039>.

- Uhlmann, B., Jordan, F., Beniston, M. (2013). Modelling runoff in a Swiss glacierized catchment – Part II: daily discharge and glacier evolution in the Findelen basin in a progressively warmer climate. *Int. J. Climatol.* 33: 1301–1307, doi: 10.1002/joc.3516.
- van der Knijff, J., Younis, J., de Roo, A. (2010). LISFLOOD: A GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 24, 189–212, doi:10.1080/13658810802549154.
- van Pelt, S. C., Beersma, J. J., Buishand, T. A., van den Hurk, B. J. J. M., Kabat, P. (2012). Future changes in extreme precipitation in the Rhine basin based on global and regional climate model simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4517–4530.
- van Vliet, M. T.H., Franssen, W.H.P., Yearsley, J.R., Ludwig, F., Haddelan, I., Lettenmaier, D. P., Kabat, P. (2013). Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change*, 23(2), 450-464, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002.
- van Vliet, M. T. H., Zwolsman, J. J. G. (2008). Impact of summer droughts on the water quality of the Meuse river. *J. Hydrol.*, 353, 1-17.
- Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., Lafaysse, M. (2017). The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geoscientific Model Development*, 10, 4257-4283, doi : 10.5194/gmd-10-4257-2017.
- 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., and Viennot, P. (2020). The AquiFR hydrometeorological modelling platform as a tool for improving groundwater resource monitoring over France: evaluation over a 60-year period. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 633–654, <https://doi.org/10.5194/hess-24-633-2020>.
- Wagner, T., Themeßl, M., Schüppel, A., Gobiet, A., Stigler, H., Birk, S. (2017). Impacts of climate change on stream flow and hydro power generation in the Alpine region. *Environ. Earth Sci.*, 76, 4, doi: 10.1007/s12665-016-6318-6.