



Scénarios climatiques et hydrologiques pour le canton de Fribourg

Rapport final

—
Octobre 2024

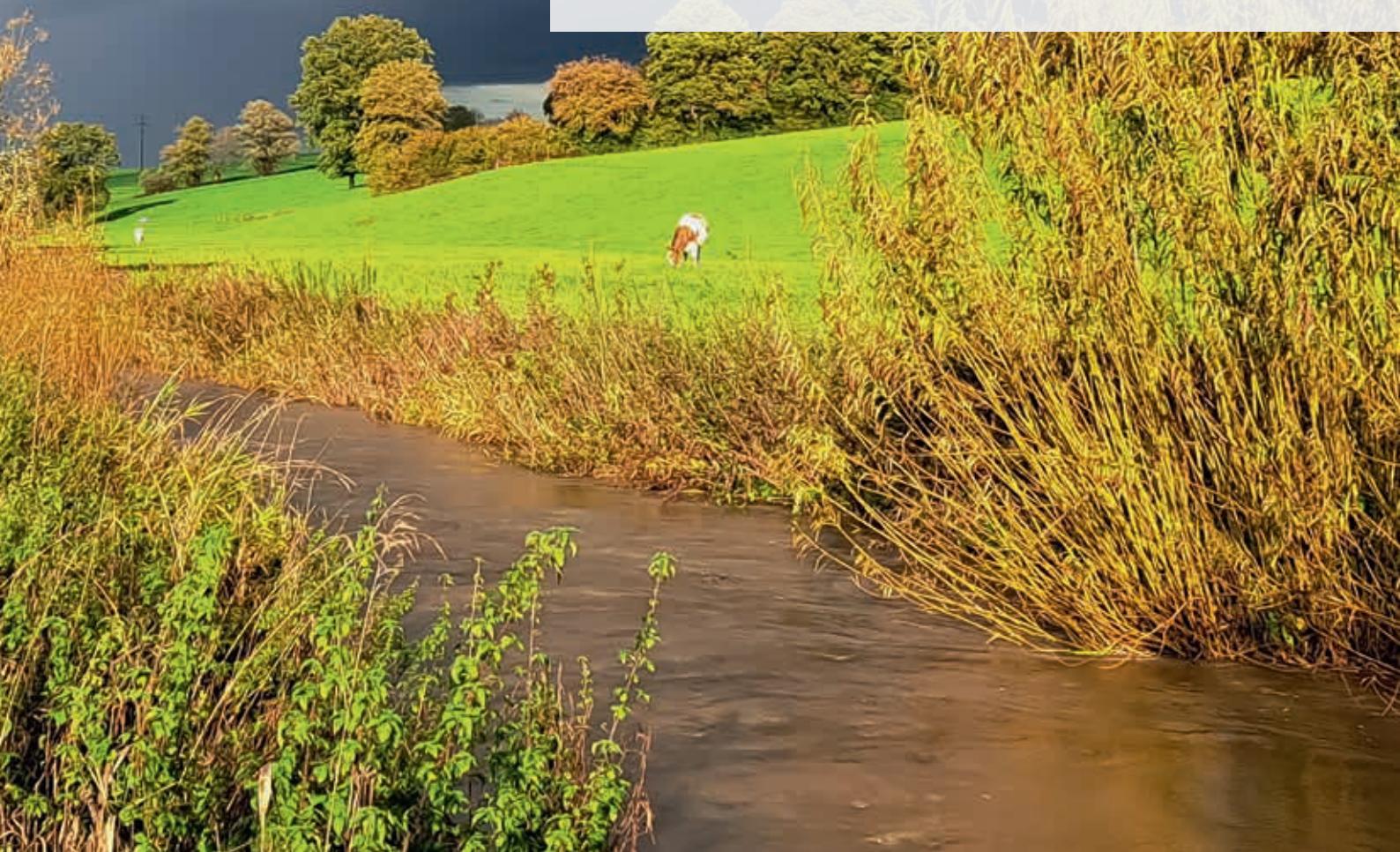
,

ETAT DE FRIBOURG
STAAT FREIBURG

Service de l'environnement SEn
Amt für Umwelt AfU



ecosfera sàrl





Scénarios climatiques et hydrologiques pour le canton de Fribourg

- Rapport final -

Jan Schwanbeck et Rolf Weingartner

mandaté par

Etat de Fribourg
Service de l'environnement SEn

Traduction en français par
Etienne Rosset

Résumé

La présente étude décrit avec une haute résolution spatiale et temporelle les effets des changements climatiques dans le canton de Fribourg ainsi que dans ses régions et dans certains de ses bassins versants. Les changements climatiques et hydrologiques sont ainsi examinés dans le contexte des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 avec atténuation limitée des changements climatiques et RCP 8.5 sans atténuation des changements climatiques. Les indicateurs de la période de référence 1981–2010 sont comparés à ceux d'un avenir à moyen terme (2040–2069) et d'un avenir à long terme (2070–2099), et ce sur une base annuelle et saisonnière.

Changements climatiques

Les changements climatiques sont analysés à l'aide de 34 indicateurs subdivisés en deux groupes : les « indicateurs de précipitation », qui regroupent onze indicateurs, et les « indicateurs de température de l'air ». L'évolution des divers indicateurs est présentée dans une fiche sous forme de chiffres et figures (« facts and figures »). Enfin, le chapitre final offre une vue d'ensemble en examinant les changements sous différents points de vue. Les cinq constats suivants sur les aspects centraux des changements ressortent de l'analyse :

1. La disponibilité moyenne annuelle des ressources en eau (précipitations) ne change guère. En revanche, les températures annuelles moyennes augmentent à nouveau au moins autant qu'au cours des 150 dernières années.
2. Les précipitations estivales diminuent. Il y a moins de jours de pluie. Les températures estivales moyennes augmentent, ce qui entraîne une augmentation de l'évaporation potentielle.
3. L'hiver devient plus chaud et plus pluvieux, et il neige moins. Avec l'augmentation des températures, l'isotherme du zéro degré remonte de 300 à 450 m dans un avenir à moyen terme et de 400 à 850 m dans un avenir à long terme.
4. Le nombre de jours caniculaires est multiplié par deux au minimum, tandis que les jours froids disparaissent peu à peu.
5. La période de végétation commence jusqu'à 40 jours plus tôt. En même temps, le risque de gel tardif augmente.

Ces constatations concernent le canton de Fribourg dans son ensemble. Le présent rapport final propose également une différenciation spatiale de ces résultats et un approfondissement de certains aspects.

Changements hydrologiques

Pour chaque région du canton de Fribourg, un bassin versant représentatif a été déterminé et modélisé à l'aide du modèle hydrologique GR4J/CemaNeige. Le modèle est alimenté par les données CH2018 et prend en compte une sélection de chaînes de modèles pour les deux scénarios d'émissions. Dans le cadre de la validation du modèle, la qualité de la modélisation des paramètres de débit choisis ainsi que la qualité de la représentation du régime hydrique dans son ensemble, et en particulier des apports et/ou débits souterrains, ont été vérifiées.

Les résultats montrent des différences significatives entre les scénarios d'émissions. Les changements les plus importants se produisent pour l'avenir lointain sous RCP 8.5. Ils se distinguent pour la plupart de manière significative des autres combinaisons entre période du futur et scénario d'émissions. Les aspects centraux des changements hydrologiques sont les suivants :

1. Les précipitations annuelles moyennes ne changent guère. Par contre, les débits annuels moyens diminuent de manière générale, le plus souvent de 0 à -10 %. L'augmentation de l'évapotranspiration moyenne actuelle est la principale responsable de cette diminution.
2. Sur une base saisonnière, les changements les plus marqués se produisent principalement en hiver et en été. La diminution des débits moyens en été - et en partie aussi en automne - est parfois très importante. Les analyses du régime hydrique montrent que les sécheresses estivales deviennent de plus en plus problématiques. La diminution des débits moyens en été est influencée de manière déterminante par la diminution des précipitations estivales moyennes et est encore aggravée par l'augmentation de l'évapotranspiration réelle.
3. Les plus petits débits quotidiens diminuent très fortement dans tous les bassins versants. Pour les débits quotidiens les plus importants, les changements sont majoritairement faibles et principalement caractérisés par des diminutions.
4. L'altitude d'un bassin versant est déterminante pour le type et l'ampleur des changements.

Il convient toutefois de noter que cette conclusion ne s'applique pas à tous les bassins versants et toutes les périodes futures.

Rôle des émissions de gaz à effet de serre

Dans l'ensemble, les résultats montrent que le canton, ses régions et ses bassins versants sont fortement touchés par les changements climatiques. Ils mettent en évidence le fait que l'ampleur des changements dépendra largement de la capacité à limiter et, si possible, à stopper le réchauffement climatique à l'échelle mondiale.

Contenu

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Introduction | 8 |
| 1.1 | Situation initiale | 8 |
| 1.2 | Objectif et démarche | 8 |
| 1.3 | Données CH2018 | 10 |
| 1.3.1 | Contexte | 10 |
| 1.3.2 | Provenance des données CH2018 | 10 |
| 1.3.3 | Séries temporelles disponibles pour CCHydro ^{FR} | 12 |
| 1.4 | Climat et conditions météorologiques | 15 |
| 1.5 | Structure du rapport | 15 |
| 2 | Changements climatiques dans le canton et ses régions | 17 |
| 2.1 | Introduction | 17 |
| 2.1.1 | Objectif | 17 |
| 2.2 | Régions prises en compte | 17 |
| 2.3 | Approche méthodologique | 20 |
| 2.3.1 | Des chaînes de modèles au indicateurs caractéristiques | 20 |
| 2.3.2 | Détermination des changements futurs par rapport à la période de référence | 21 |
| 2.3.3 | Représentation, classification et visualisation des changements futurs par rapport à la période de référence | 22 |
| 2.3.4 | Validation des valeurs de référence modélisées | 23 |
| 2.3.5 | Synthèse et vue d'ensemble | 24 |
| 2.4 | Résultats | 27 |
| 2.4.1 | Quantité moyenne de précipitations | 27 |
| 2.4.2 | Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières | 34 |
| 2.4.3 | Valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières | 41 |
| 2.4.4 | Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières | 48 |
| 2.4.5 | Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières | 55 |
| 2.4.6 | Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours | 62 |
| 2.4.7 | Valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours | 69 |
| 2.4.8 | Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours | 76 |
| 2.4.9 | Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours | 84 |
| 2.4.10 | Valeurs minimales annuelles moyennes de la somme des précipitations sur 3 semaines | 93 |
| 2.4.11 | Nombre moyen de jours sans précipitations par année | 95 |
| 2.4.12 | Température moyenne de l'air | 102 |
| 2.4.13 | Valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière | 109 |
| 2.4.14 | Valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière | 117 |
| 2.4.15 | Valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière | 125 |
| 2.4.16 | Valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière | 133 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 2.4.17 | Nombre moyen de jours chauds par année | 141 |
| 2.4.18 | Nombre moyen de jours très chauds par année | 146 |
| 2.4.19 | Nombre moyen de jours froids par année | 150 |
| 2.4.20 | Nombre moyen de jours très froids par année | 154 |
| 2.4.21 | Nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies de 200 °C | 159 |
| 2.4.22 | Nombre moyen de jours de gel tardif | 164 |
| 2.4.23 | Évapotranspiration potentielle | 169 |
| 2.5 | Synthèse des changements | 176 |
| 2.5.1 | Écarts par rapport à la période de référence 1981–2010 | 176 |
| 2.5.2 | Changements par rapport à la période de référence | 180 |
| 2.5.3 | Aspects centraux des changements | 182 |
| 3 | Changements hydrologiques dans les régions et bassins versants du canton de Fribourg | 190 |
| 3.1 | Situation initiale et objectifs | 190 |
| 3.2 | Bassins versants et régions | 190 |
| 3.3 | Méthodologie | 192 |
| 3.3.1 | Le modèle hydrologique GR4J/CemaNeige | 192 |
| 3.3.2 | Présentation des résultats | 205 |
| 3.4 | Résultats | 208 |
| 3.4.1 | Région des 3 Lacs - Grand Marais, Region Seeland-Grosses Moos | 208 |
| 3.4.2 | Région Basse Broye, Region Untere Broye | 229 |
| 3.4.3 | Région Plateau Nord, Region Nördliches Mittelland | 249 |
| 3.4.4 | Région Plateau Sud, Region Südliches Mittelland | 271 |
| 3.4.5 | Région Préalpes, Region Voralpen | 293 |
| 3.5 | Changements du régime d'écoulement | 313 |
| 3.6 | Conclusions | 316 |

1 Introduction

1.1 Situation initiale

Les derniers résultats du projet *Hydro-CH2018*¹ démontrent clairement que les conditions climatiques et hydrologiques vont changer de manière significative dans le contexte du réchauffement climatique. L'ampleur de ces changements dépendra essentiellement de la capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre et, à moyen terme, à les supprimer complètement. Face à ces changements à venir, le canton de Fribourg a élaboré un Plan climat cantonal comprenant des mesures concrètes visant à adapter les systèmes naturels au changements climatiques et à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ce plan a été adopté par le Conseil d'Etat du canton de Fribourg en juin 2021.

Dans le cadre du Plan climat, la section lacs et cours d'eau du Service de l'environnement du canton de Fribourg – ci-après SEn – a lancé plusieurs projets considérés comme urgents, dont le projet *Prise en compte des scénarios climatiques dans les projets d'aménagement et d'entretien des cours d'eau*. Le SEn a ensuite mandaté *ecosfera gmbh* pour appliquer les scénarios climatiques du projet *Hydro-CH2018* de manière spécifique au canton de Fribourg, à ses régions ainsi qu'à une sélection de bassins versants. Les résultats des calculs et de la modélisation sont documentés dans le présent rapport.

1.2 Objectif et démarche

L'objectif de la présente étude est de quantifier les changements des conditions climatiques et hydrologiques dans le canton de Fribourg, dans ses régions et dans ses bassins versants, en fonction de trois scénarios d'émissions différents – RCP 2.6 (avec mesures de protection du climat), RCP 4.5 (mesures de protection du climat limitées) et RCP 8.5 (sans mesures de protection du climat). L'accent est mis sur les changements entre la période de référence 1981–2010 d'une part et la période 2040–2069 (avenir moyen, «vers 2055») resp. 2070–2099 (avenir lointain, «vers 2085») d'autre part.

Le présent rapport s'intéresse en priorité aux deux scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5. Le scénario RCP 2.6 n'a en effet pas été pris en compte, bien que les données et informations correspondantes soient disponibles. Il nous semble donc pertinent de préciser ici les motifs de ce choix. Le scénario d'émissions RCP 2.6 suppose une très forte baisse des émissions de gaz à effet de serre. Selon ce scénario, l'augmentation de la

¹<https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/schweizer-hydroszenarien.html>

température moyenne globale par rapport au niveau préindustriel à la fin du 21ème siècle serait inférieure à 2 °C. Pour y parvenir, les États devraient non seulement atteindre, mais aller au-delà des contributions aux réductions de gaz à effet de serre (NDC -Nationally Determined Contributions) définies dans le cadre de l'accord de Paris. Le scénario RCP 2.6 revêt donc un caractère hautement politique. Or, l'évolution actuelle des émissions laisse présager un réchauffement plus important que celui envisagé dans le scénario RCP 2.6, raison pour laquelle le présent rapport se concentre sur les scénarios RCP 4.5 (mesures de protection du climat limitées) et RCP 8.5 (sans mesures de protection du climat). Ainsi, l'objectif de ce dernier est de fournir aux organes de planification une projection d'un avenir plus ou moins différent de la situation actuelle afin de leur permettre de développer des stratégies d'adaptation. Or, ceci n'est pas le cas pour le scénario RCP 2.6. Dans le domaine des dangers naturels tout particulièrement, il peut s'avérer plus judicieux de se baser sur le scénario RCP 8.5 et d'envisager une évolution défavorable. Cette approche est en outre également adoptée par l'Office fédéral de l'environnement, qui s'appuie même exclusivement sur le scénario RCP 8.5 dans le cadre de la gestion des risques naturels.

Sur la base de ce rapport, une brochure destinée au grand public sera élaborée, dans laquelle les principaux résultats et conclusions seront présentés. L'objectif est de présenter l'ensemble des évolutions possibles. Dans cette optique, le scénario d'émissions RCP 2.6 y sera également pris en compte.

Les explications ci-dessous, qui suivent le schéma présenté dans la figure 1.1, décrivent la démarche choisie dans le cadre de ce projet pour atteindre les objectifs fixés.

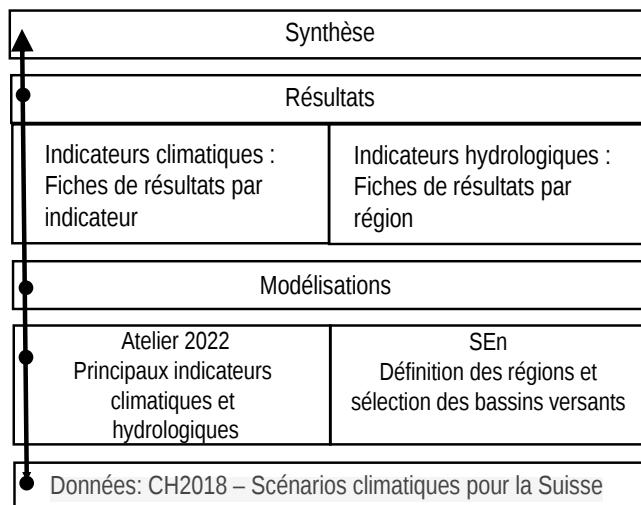


Fig. 1.1 : Vue d'ensemble du projet CCHydro^{FR}

La présente étude a pour point de départ l'ensemble de données à haute résolution spatiale et temporelle CH2018 qui contient les valeurs journalières de précipitations et de températures pour la période 1981–2099. Ces données sont décrites dans le chapitre 1.3.

En collaboration avec le SEn et par le biais d'un atelier auquel ont participé des représentantes et représentants d'autres services en décembre 2021, les indicateurs climatiques et hydrologiques pouvant être déduits des données CH2018 et présentant une grande pertinence ont été définis. Les fiches de résultats ont ensuite été élaborées sur la base de modélisations complexes, qui sont décrites plus loin (cf. fig. 1:1). Ces fiches de résultats sont au centre du présent rapport, dont l'objectif principal est de documenter les résultats, c'est-à-dire les changements des indicateurs dans le futur moyen et lointain par rapport à la période de référence. Ce faisant, les résultats sous RCP 4.5 et RCP 8.5 sont comparés. Les changements sont en outre résumés pour chaque indicateur climatique ainsi que sous forme de synthèse globale à l'aide d'un système de «feux de signalisation» spécialement développé pour cette étude.

1.3 Données CH2018

1.3.1 Contexte

Pour que la Suisse puisse s'adapter aux changements climatiques, une connaissance détaillée de ces changements est nécessaire. Le *National Centre for Climate Services* (NCCS) a donc été chargé de développer de nouveaux scénarios climatiques pour la Suisse. Sur son site web², le NCCS décrit ce mandat et sa mise en œuvre de la façon suivante :

«Le climat de la Suisse change. Pour fournir aux décisionnaires des bases de planification optimales sur mesure, des scénarios climatiques actualisés et fiables pour la Suisse sont indispensables. Basé sur les tout derniers modèles climatiques et les résultats des questionnaires utilisateurs, le thème prioritaire CH2018 élabore de nouveaux scénarios de changement climatique en étroite collaboration avec la recherche scientifique. [...] Les scénarios climatiques associent les simulations des modèles climatiques les plus modernes aux observations des tendances actuelles et permettent d'obtenir un regard plus précis sur l'avenir du climat de notre pays. Les scénarios CH2018 remplacent les scénarios climatiques suisses datant de 2011 ("CH2011").»

1.3.2 Provenance des données CH2018

Les modèles climatiques CH2018 reposent sur des scénarios d'émissions décrits par des courbes représentatives des concentrations RCP (Representative Concentration Pathways). Les RCP suivantes sont généralement utilisées pour décrire l'éventail des évolutions possibles³.

²<https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/le-nccs/themes-prioritaires/scenarios-climatiques-ch2018.html>

³de : <https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/principes-de-base-du-climat/que-sont-les-scenarios-d-emissions-.html>

- RCP 2.6 – Atténuation conséquente des changements climatiques : « Des mesures d'atténuation des changements climatiques sont prises. Une baisse immédiate des émissions entraîne un arrêt de la hausse des gaz à effet de serre dans l'atmosphère d'ici 20 ans environ. Les objectifs de l'Accord de Paris de 2016 sont atteints. »
- RCP 4.5 – Atténuation limitée des changements climatiques : « Les émissions de gaz à effet de serre sont endiguées, mais leur teneur dans l'atmosphère augmente encore pendant 50 ans. L'objectif de 2°C n'est pas atteint. »
- RCP 8.5 – Pas d'atténuation des changements climatiques : « Aucune mesure d'atténuation des changements climatiques n'est prise. Les émissions de gaz à effet de serre sont en constante augmentation. »

Chaque scénario d'émissions comprend plusieurs chaînes de modèles (simulations), dans lesquelles un modèle climatique global et un modèle climatique régional sont combinés. Le résultat du modèle régional est ensuite ramené à l'échelle de la Suisse à l'aide de méthodes statistiques (cf. fig. 1.2). Il en résulte 68 séries temporelles transitoires corrigées couvrant la période 1981–2099 avec une haute résolution temporelle (valeurs journalières) et spatiale (2 km · 2 km). 31 simulations se rapportent au scénario RCP 8.5, 25 au scénario RCP 4.5 et 12 simulations au scénario RCP 2.6.

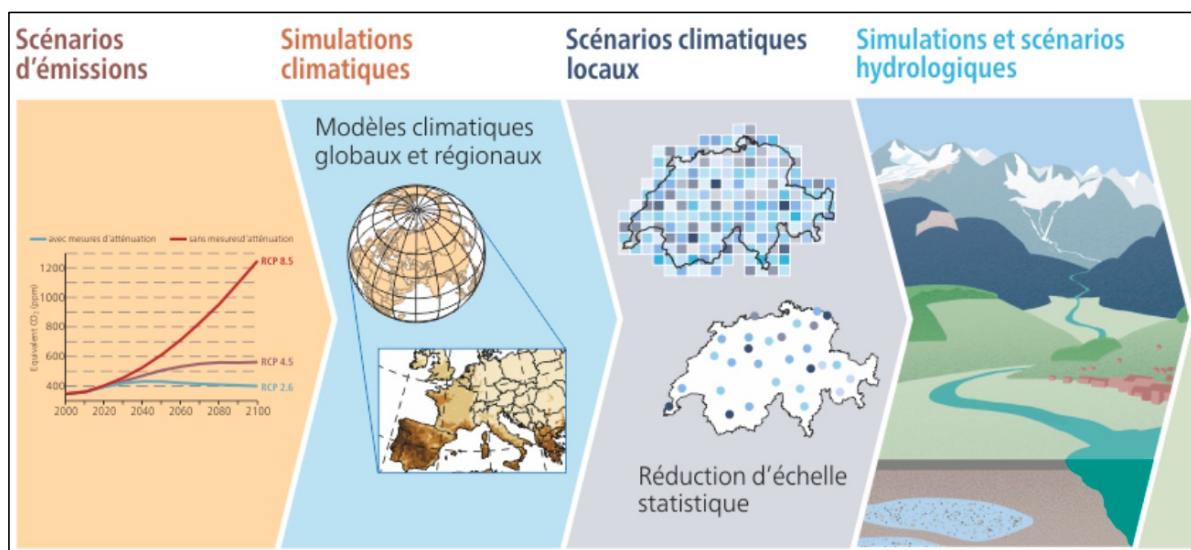


Fig. 1.2 : Représentation schématique de la chaîne de modèles complète permettant d'évaluer les effets des changements climatiques sur l'hydrologie (source : Atlas hydrologique de la Suisse 2021)

1.3.3 Séries temporelles disponibles pour CCHydro^{FR}

Afin de permettre une comparaison systématique des résultats des simulations, il est nécessaire de disposer d'un ensemble cohérent de chaînes de modèles pour tous les trois scénarios d'émissions. Les ensembles M8, M16 et M31 constitués pour le présent projet sont présentés dans le tableau 1.3.1. Ils sont définis comme suit :

1. M8 : Un total de 8 chaînes de modèles est disponible pour les trois scénarios d'émissions, permettant une comparabilité optimale entre RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5.
2. M16 : 16 chaînes de modèles sont disponibles pour RCP 4.5 et RCP 8.5. M16 convient donc à la comparaison entre ces deux scénarios d'émissions « avec émissions de gaz à effet de serre ».
3. M31 : Avec un total de 31 chaînes de modèles, on obtient une vue d'ensemble complète mais déséquilibrée.

Les chaînes de modèles en gris dans le tableau 1.3.1 ont été supprimées des ensembles M8 et M16 pour les raisons suivantes :

- Lorsque les données pour une même chaîne de modèles sont disponibles avec deux résolutions spatiales, la variante avec la résolution la plus élevée a été retenue. La variante avec la résolution inférieure a été supprimée afin que le modèle ne soit pas pris en compte deux fois et qu'il ne pèse donc pas doublement dans les évaluations.
- Lorsqu'une chaîne de modèles est disponible uniquement pour RCP 8.5, elle est rejetée.
- Lorsque des chaînes de modèles ne se différencient que par les conditions initiales, celle recommandée par MétéoSuisse est retenue. Les autres sont exclues afin d'éviter qu'une configuration de modèles ayant un poids trop important ne soit incluse dans les évaluations.

L'ensemble M16 – avec un total de 16 chaînes de modèles disponibles pour les scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 – a été utilisé pour les évaluations suivantes.

Tab. 1.3.1 : Choix des chaînes de modèles pour les analyses

| Chaînes de modèles | RCP2.6 | RCP4.5 | RCP8.5 |
|----------------------------|--------|--------|--------|
| CLMCOM-CCLM4_ECEARTH_EUR11 | | | |
| CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR11 | | | |
| CLMCOM-CCLM4_HADGEM_EUR44 | | | |
| CLMCOM-CCLM4_MPIESM_EUR11 | | | |
| CLMCOM-CCLM4_MPIESM_EUR44 | | | |
| CLMCOM-CCLM5_ECEARTH_EUR44 | | | |
| CLMCOM-CCLM5_HADGEM_EUR44 | | | |
| CLMCOM-CCLM5_MIROC_EUR44 | | | |
| CLMCOM-CCLM5_MPIESM_EUR44 | | | |
| DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR11 | | | |
| DMI-HIRHAM_ECEARTH_EUR44 | | | |
| ICTP-REGCM_HADGEM_EUR44 | | | |
| KNMI-RACMO_ECEARTH_EUR44 | | | |
| KNMI-RACMO_HADGEM_EUR44 | | | |
| MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR11 | | | |
| MPICSC-REMO1_MPIESM_EUR44 | | | |
| MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR11 | | | |
| MPICSC-REMO2_MPIESM_EUR44 | | | |
| SMHI-RCA_CCCMA_EUR44 | | | |
| SMHI-RCA_CSIRO_EUR44 | | | |
| SMHI-RCA_ECEARTH_EUR11 | | | |
| SMHI-RCA_ECEARTH_EUR44 | | | |
| SMHI-RCA_GFDL_EUR44 | | | |
| SMHI-RCA_HADGEM_EUR11 | | | |
| SMHI-RCA_HADGEM_EUR44 | | | |
| SMHI-RCA_IPSL_EUR11 | | | |
| SMHI-RCA_IPSL_EUR44 | | | |
| SMHI-RCA_MIROC_EUR44 | | | |
| SMHI-RCA_MPIESM_EUR11 | | | |
| SMHI-RCA_MPIESM_EUR44 | | | |
| SMHI-RCA_NORESM_EUR44 | | | |

Légende :

- M8 : une comparabilité optimale des scénarios
- ■ M16 : représentation robuste de l'avenir « avec émissions de gaz à effet de serre »
- ■ ■ M31 : la représentation la plus complète, mais déséquilibrée, de l'avenir

1.4 Climat et conditions météorologiques

Cette étude se concentre sur les changements climatiques. Les changements climatiques sont déduits de la comparaison des valeurs moyennes des indicateurs sur une période de 30 ans pour la période de référence 1981–2010 avec celles pour le futur moyen (2040–2069) et le futur lointain (2070–2099). Ces moyennes sur une période de 30 ans sont calculées à partir des conditions météorologiques qui varient plus ou moins fortement autour de cette moyenne et qui se caractérisent donc par leur variabilité d'une année à l'autre (cf. fig. 1.3). Cette étude ne permet pas de tirer des conclusions sur cette variabilité, ni sur la variation des valeurs maximales et minimales ou sur la succession d'années pluvieuses et sèches.

Cette différence entre climat et conditions météorologiques doit absolument être prise en compte lors de l'interprétation des résultats.

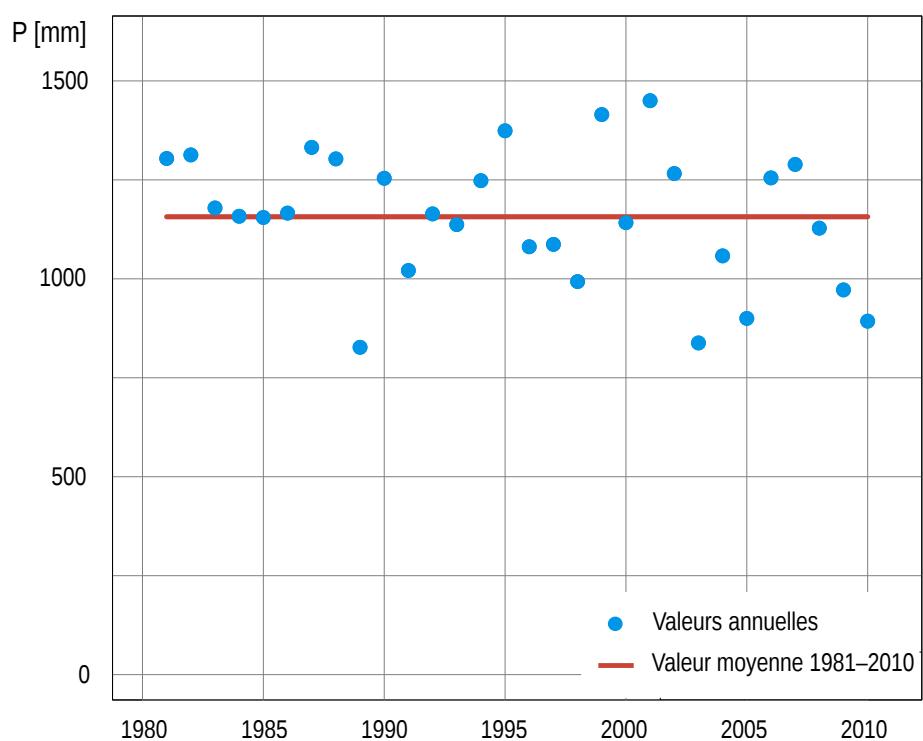


Fig. 1.3 : Valeurs individuelles et moyenne des précipitations annuelles dans le bassin versant de la Broye
(données : Atlas hydrologique de la Suisse)

1.5 Structure du rapport

Deux groupes d'indicateurs – un groupe d'indicateurs climatiques et un groupe d'indicateurs hydrologiques – sont examinés et modélisés dans l'étude CCHydro^{FR}. Chaque groupe dépend d'une méthodologie différente,

ce qui implique une présentation différente du contenu des résultats, qui sont donc exposés dans deux chapitres principaux distincts.

Le présent rapport se veut également un ouvrage de référence. Le chapitre principal sur le climat est organisé par indicateurs, celui sur l'hydrologie par régions. Des résumés complètent chacun des deux chapitres principaux.

2 Changements climatiques dans le canton et ses régions

2.1 Introduction

2.1.1 Objectif

Les données CH2018 constituent la base pour quantifier l'ampleur des changements climatiques dans le canton de Fribourg et ses régions à l'aide d'indicateurs, et ce pour le futur moyen (2040–2069) et le futur lointain (2070–2099). Pour ce faire, les changements absous et relatifs des indicateurs pour ces périodes futures par rapport à la période de référence 1981–2010 sont modélisés sur la base des scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Les résultats sont décrits, visualisés et agrégés par indicateur sur une fiche de résultats permettant une comparaison directe et simple des différents indicateurs (cf. fig. 1.1).

2.2 Régions prises en compte

Afin de permettre une différenciation spatiale des changements climatiques, le canton de Fribourg a été divisé en cinq régions selon des critères géographiques et après concertation avec le SEn :

1. BasBro : Région Basse Broye, Region Untere Broye
2. GraMar : Région des 3 Lacs – Grand Marais, Region Seeland-Grosses Moos
3. PlaNor : Région Plateau Nord, Region Nördliches Mittelland
4. PlaSud : Région Plateau Sud, Region Südliches Mittelland
5. PreAlp : Région Préalpes, Region Voralpen

Les régions sont représentées dans la figure 2.1 et leurs caractéristiques géographiques décrites dans le tableau 2.2.1. L'altitude moyenne d'une région est particulièrement importante pour l'interprétation des résultats. Il s'agit ici de l'altitude au-dessus de laquelle se trouve la moitié de la surface et au-dessous de laquelle se trouve l'autre moitié de la surface de la région.

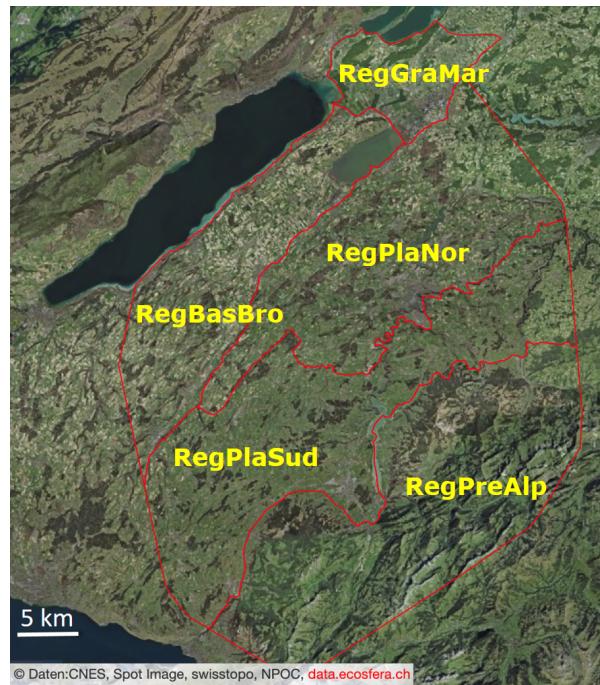


Fig. 2.1 : Subdivision du canton de Fribourg en régions

La représentation de la distribution de l'altitude dans la figure 2.2 permet de distinguer trois groupes :

1. les régions de basse altitude BasBro, GraMar et PlaNor,
2. la région PlaSud ainsi que
3. la région de haute altitude PreAlp.

Tab. 2.2.1 : Caractéristiques géographiques des régions

| Indicateur | Unité | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|---|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Superficie des régions | km ² | 2253.3 | 362.9 | 125.1 | 509.2 | 603.0 | 653.2 |
| Altitude moyenne | m s.m. | 828.0 | 539.0 | 451.0 | 597.0 | 789.0 | 1276.0 |
| Altitude minimale | m s.m. | 428.0 | 428.0 | 429.0 | 429.0 | 487.0 | 484.0 |
| Altitude maximale | m s.m. | 2383.0 | 850.0 | 602.0 | 811.0 | 1295.0 | 2383.0 |
| Classes d'utilisation du sol sélectionnées | | | | | | | |
| Terres agricoles | % | 46.6 | 65.5 | 73.8 | 59.1 | 63.9 | 5.1 |
| Prairies | % | 16.3 | 0.1 | 0.0 | 6.9 | 9.4 | 42.0 |
| Forêt de conifères | % | 9.8 | 0.9 | 0.0 | 0.3 | 7.4 | 26.4 |
| Forêt mixte | % | 12.8 | 11.3 | 13.1 | 17.0 | 10.5 | 12.4 |
| Zones urbanisées | % | 7.1 | 9.7 | 7.2 | 11.9 | 7.2 | 1.7 |
| Plans d'eau | % | 1.7 | 6.4 | 0.3 | 0.8 | 0.9 | 0.7 |

CtFR : La région CtFR est composée des cinq sous-régions BasBro,

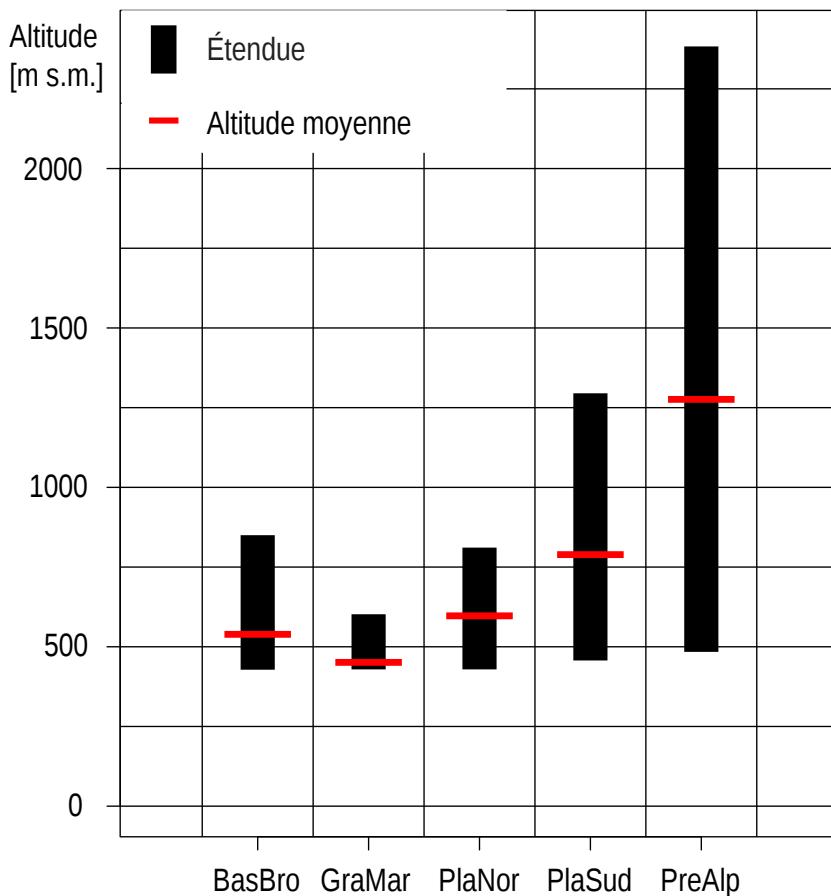


Fig. 2.2 : Distribution de l'altitude dans les régions

2.3 Approche méthodologique

2.3.1 Des chaînes de modèles au indicateurs caractéristiques

Pour calculer les indicateurs et leur évolution, les régions indiquées dans la figure 2.1 sont recoupées avec les données maillés CH2018. Le résultat de cette étape intermédiaire est une série temporelle des moyennes des précipitations et des températures de l'air moyennes par région pour la période 1981–2099 avec une résolution journalière, et ce pour les 68 chaînes de modèles. Cela représente environ 5,9 millions de valeurs individuelles par région et un total d'environ 34,4 millions de valeurs individuelles.

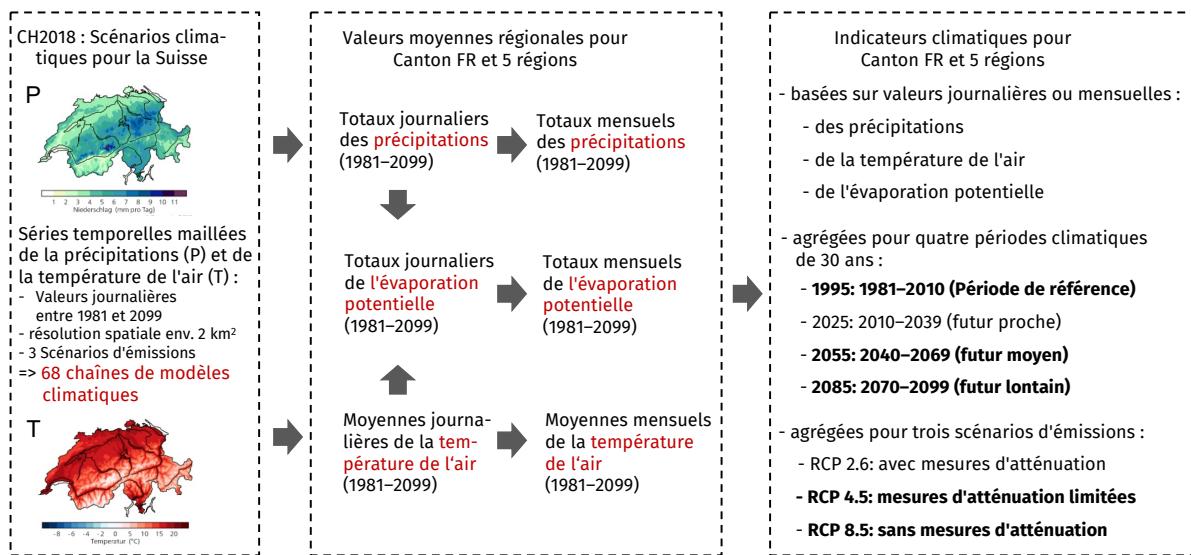


Fig. 2.3 : Approche méthodologique illustrée par l'exemple de l'indicateur Évapotranspiration potentielle

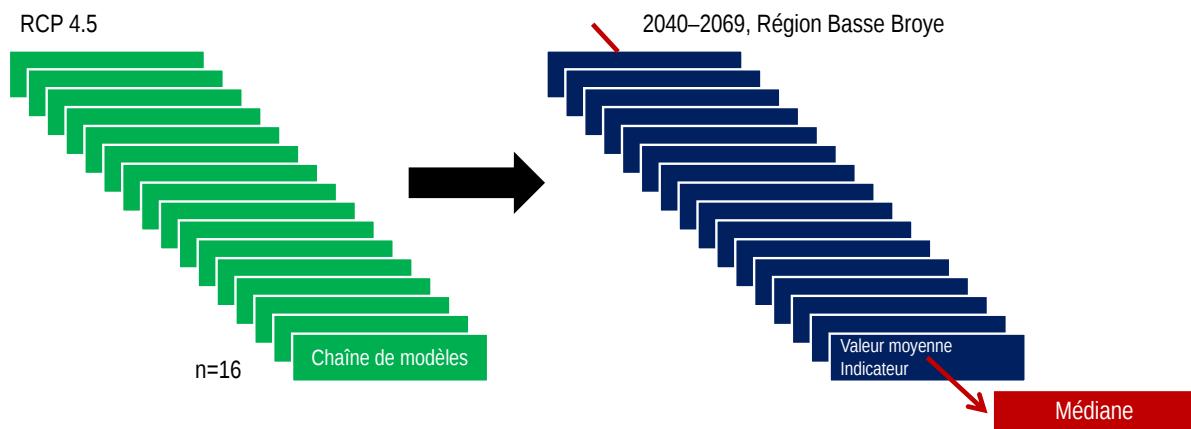


Fig. 2.4 : Déduction de la valeur finale de l'indicateur pour chaque période de 30 ans pour l'exemple du scénario RCP 4.5

Sur la base des critères énumérés au chap. 1.3.3, 16 chaînes de modèles sont utilisées pour chacun des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Pour chaque chaîne de modèles, les opérations suivantes sont effectuées (voir également la figure 2.3).

1. À partir des valeurs journalières, les valeurs caractéristiques de chaque indicateur climatique (moyenne, quantiles etc.) sont calculées pour chaque année de la période de référence de 30 ans 1981–2010 et des périodes futures 2040–2069 et 2070–2099 sous forme de valeurs mensuelles lorsque cela est pertinent, sinon sous forme de valeurs saisonnières. Les valeurs mensuelles sont ensuite agrégées en valeurs saisonnières et annuelles. Ainsi, pour chaque année d'une période de 30 ans, des valeurs caractéristiques sont obtenues avec une résolution saisonnière et annuelle.
2. Le calcul de la moyenne de ces valeurs permet ensuite d'obtenir les valeurs moyennes à long terme pour la période.

Comme mentionné précédemment, 16 chaînes de modèles sont disponibles pour chaque scénario d'émissions. À partir des moyennes à long terme par période de chaque chaîne de modèles, la médiane est finalement calculée pour servir de valeur caractéristique (cf. fig. 2.4). La dispersion des 16 moyennes à long terme des chaînes de modèles donne en outre une indication sur les incertitudes des estimations.

2.3.2 Détermination des changements futurs par rapport à la période de référence

Le calcul des changements entre les périodes futures et la période de référence est effectué de la manière suivante :

1. Calcul des écarts relatifs et/ou absolu entre les moyennes à long terme de la période de référence d'une part et les moyennes à long terme des périodes futures moyennes et lointaines d'autre part pour chaque chaîne de modèles.
2. 16 écarts sont ainsi calculés pour chaque période future. Ceux-ci sont ensuite agrégés sous forme de valeur médiane.

Les changements relevés sont donc déduits d'un système modélisé fermé. Nos recherches ont démontré que des différences entre les données observées et modélisées peuvent apparaître pour la période de référence 1981–2010 (biais de la modélisation, cf. p. ex. tab. 2.4.1). Dans la pratique, il est toutefois acceptable d'appliquer les changements relatifs (en pourcentage) directement aux données observées. Ce faisant, il convient toutefois de garder à l'esprit la qualité de la modélisation (cf. chap. 2.3.4).

2.3.3 Représentation, classification et visualisation des changements futurs par rapport à la période de référence

Le tab. 2.3.1 montre un exemple de la manière dont les changements d'un indicateur climatique sont représentés dans le rapport.

Tab. 2.3.1 : Changements en pourcentage des précipitations moyennes dans le futur lointain 2070–2099 par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 0 | 1 | 3 | 1 | -1 | -2 |
| DJF | 19 | 28 | 29 | 23 | 17 | 12 |
| MAM | 11 | 17 | 18 | 14 | 10 | 6 |
| JJA | -25 | -21 | -21 | -24 | -26 | -27 |
| SON | -4 | 1 | 4 | -1 | -5 | -10 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Les changements par rapport à la période de référence sont indiqués pour chaque région et période. Le signe indique s'il s'agit d'une augmentation ou d'une diminution. Pour les indicateurs relatifs aux précipitations et les indicateurs qui décrivent un changement du nombre de jours (p. ex. nombre moyen de jours très chauds), les changements sont indiquées en pourcentage dans les tableaux, tandis que pour les indicateurs relatifs à la température de l'air, les changements absolues sont indiquées en degrés Celsius.

Comme l'étendue des changements est souvent relativement grande – de -27 % à +28 % dans le tableau 2.3.1 –, les changements sont répartis en classes pour en faciliter l'interprétation et la comparaison :

Changements en pourcentage

Diminution très importante : Changement par rapport à la période de référence : $\leq -20\%$

Diminution importante : Changement par rapport à la période de référence : $-20\% \leq \leq -10\%$

Diminution moyenne : Changement par rapport à la période de référence : $-10\% \leq \leq -5\%$

Faible diminution : Changement par rapport à la période de référence : $-5\% \leq 0\%$

Faible augmentation : Changement par rapport à la période de référence : $0\% \leq 5\%$

Augmentation moyenne : Changement par rapport à la période de référence : $\geq 5\% \leq 10\%$

Augmentation importante : Changement par rapport à la période de référence : $\geq 10\% \leq 20\%$

Augmentation très importante : Changement par rapport à la période de référence : $\geq 20\%$

Évolution de la température en °C

Seules des valeurs positives (augmentations de la température) sont observées.

Faible augmentation : Changement par rapport à la période de référence : 0 °C à 1 °C

Augmentation moyenne : Changement par rapport à la période de référence : ≥ 1 °C à 2 °C

Augmentation importante : Changement par rapport à la période de référence : ≥ 2 °C à 3 °C

Augmentation très importante : Changement par rapport à la période de référence : ≥ 3 °C

Il est à noter que les seuils ont été fixés sur avis d'expert. Dans quelques cas isolés, il a fallu s'écartez de ces deux classifications. Dans ce contexte, il convient de se référer à l'indicateur correspondant.

Pour faciliter la lecture de ces tableaux, les classes de changement sont représentées par des couleurs. Les échelles ont été choisies en fonction de l'effet psychologique des couleurs. Pour cette raison, les échelles de couleurs changent en fonction du groupe d'indicateurs. L'évolution des précipitations va du rouge (diminutions, plus sec) au jaune (faibles changements) et au bleu (augmentations, plus humide). Pour les indicateurs relatifs à la température de l'air, les augmentations sont représentées par des tons rouges. Pour les indicateurs qui décrivent une évolution du nombre de jours, l'échelle va du vert (diminution) au violet (augmentation) en passant par le jaune (faibles changements).

2.3.4 Validation des valeurs de référence modélisées

Les valeurs issues des scénarios climatiques CH2018 sont exclusivement des valeurs modélisées. Pour valider ces valeurs avec des données d'observation du monde réel, les données ont été comparées avec le jeu de données RhiresD de MétéoSuisse, qui décrit ce jeu de données de la manière suivante¹ : « RhiresD is a spatial analysis of daily precipitation over hydrological Switzerland, encompassing all locations from where surface waters can drain to locations within the national border. Temporally, the analysis extends over a multi-decadal period (1961-present). It provides detailed spatial information and high accuracy by exploiting all available rain-gauge measurements (typically 430 within, and 220 outside Switzerland each day).».

RhiresD est donc un jeu de données basé sur des données d'observation et totalement indépendant de CH2018, de sorte que la qualité des modélisations CH2018 peut être évaluée au moins pour la période de référence 1981–2010.

Qualité de la modélisation selon l'écart en pourcentage (écart par rapport aux observations) :

¹https://www.meteoswiss.admin.ch/dam/jcr:4f51f0f1-0fe3-48b5-9de0-15666327e63c/ProdDoc_RhiresD.pdf

- $\leq |5| \%$: très bonne
- $|5| \text{ à } |10| \%$: bonne
- $|10.1| \text{ à } |20| \%$: suffisante
- $> |20| \%$: insuffisante

Qualité de la modélisation selon l'écart absolu de la température de l'air :

- $\leq |0.25| \text{ } ^\circ\text{C}$: très bonne
- $|0.25| \text{ à } |0.5| \text{ } ^\circ\text{C}$: bonne
- $|0.51| \text{ à } |1.0| \text{ } ^\circ\text{C}$: suffisante
- $> |1.0| \text{ } ^\circ\text{C}$: insuffisante

Il s'agit là aussi de valeurs seuils fixées sur la base d'avis d'expert².

2.3.5 Synthèse et vue d'ensemble

Afin de permettre une vue synthétique et récapitulative de l'évolution d'un indicateur climatique, un système de feux de signalisation a été élaboré. Ce système repose sur le tableau 2.3.1 de l'évolution des indicateurs et représente l'ampleur des écarts par rapport à la période de référence de manière simple et condensée. Le signe de l'écart n'est pas pris en compte. Le système de feux de signalisation indique dans quelle mesure les valeurs caractéristiques des périodes futures s'écartent de celles de la période de référence. Ces écarts sont également représentés par des couleurs :

- **faibles, 1** : Écarts par rapport à la période de référence $< |5| \%$
- **moyens, 2** : Écarts par rapport à la période de référence $\geq |5| \text{ bis } |10| \%$
- **importants, 3** : Écarts par rapport à la période de référence $\geq |10| \text{ % bis } |20| \%$
- **très importants, 4** : Écarts par rapport à la période de référence $\geq |20| \%$

Pour les valeurs annuelles, le code de couleur peut être directement déduit de l'ampleur des changements. Les changements des quatre saisons sont combinés en une seule valeur. Pour ce faire, les valeurs de la classe de chaque saison sont additionnées. Cette valeur cumulée est répertoriée dans le tableau et représentée de la manière suivante (cf. fig. 2.3.2) :

²Le choix des valeurs seuils peut bien sûr faire l'objet d'une discussion approfondie. Lors de la fixation des seuils, nous avons toujours eu à l'esprit l'objectif de parvenir à une évaluation globale simple et claire.

■ **faibles** : 4 et 5 points³

■ **moyens** : 6 à 9 points

■ **importants** : 10 à 13 points

■ **très importants** : 14 à 16 points

Tab. 2.3.2 : Synthèse des changements des précipitations moyennes annuelles et saisonnières sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 2085 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2085 | Saisons | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

La figure 2.5 résume le système de feux de signalisation décrit ci-dessus. Il reste à évoquer l'étape consistant à passer du «tableau de synthèse de l'indicateur» à l'«entrée dans la synthèse globale». Cette étape consiste à calculer la moyenne des valeurs des différentes régions et à les représenter selon le code de couleurs.

³4 correspond au nombre minimal possible de points. C'est le cas lorsque la classe 1 est attribuée à chaque saison. Le score le plus élevé possible est 16.

Tableau des changements

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 0 | 1 | 3 | 1 | -1 | -2 |
| DJF | 19 | 28 | 29 | 23 | 17 | 12 |
| MAM | 11 | 17 | 18 | 14 | 10 | 6 |
| JJA | -25 | -21 | -21 | -24 | -26 | -27 |
| SON | -4 | 1 | 4 | -1 | -5 | -10 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Changements classées

| Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
|---------|----|----|----|----|----|----|
| DJF | 3 | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 |
| MAM | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| JJA | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| SON | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| Total | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Saisons | | | | | | |

Tableau de synthèse de l'indicateur

| | | | | | | | |
|------|---------|----|----|----|----|----|----|
| 2085 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2085 | Saisons | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Entrée dans la synthèse globale



Année Saisons



Fig. 2.5 : Résumé du système de feux de signalisation

2.4 Résultats

2.4.1 Quantité moyenne de précipitations

Définition de l'indicateur

Quantité moyenne annuelle et saisonnière de précipitations [mm/dt] sur une période de 30 ans.

Démarche : (1) Détermination des quantités annuelles et saisonnières de précipitations par année individuelle. (2) Calcul de la moyenne de ces valeurs annuelles individuelles pour obtenir la moyenne de la période.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.1 : Quantités moyennes annuelles et saisonnières de précipitations [mm/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 4.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 1263 | 1007 | 1000 | 1061 | 1291 | 1582 |
| 2 | Année | RhiresD | 1254 | 1009 | 1016 | 1068 | 1290 | 1549 |
| 4 | Année | Δ% | 1 | 0 | -2 | -1 | 0 | 2 |
| 5 | DJF | CH2018 | 275 | 221 | 225 | 217 | 276 | 361 |
| 6 | DJF | RhiresD | 256 | 210 | 220 | 203 | 256 | 331 |
| 8 | DJF | Δ% | 7 | 5 | 2 | 7 | 8 | 9 |
| 9 | MAM | CH2018 | 314 | 245 | 238 | 266 | 326 | 394 |
| 10 | MAM | RhiresD | 311 | 245 | 240 | 272 | 327 | 377 |
| 12 | MAM | Δ% | 1 | 0 | -1 | -2 | 0 | 4 |
| 13 | JJA | CH2018 | 362 | 277 | 276 | 310 | 370 | 455 |
| 14 | JJA | RhiresD | 379 | 289 | 292 | 324 | 387 | 481 |
| 16 | JJA | Δ% | -4 | -4 | -6 | -4 | -4 | -5 |
| 17 | SON | CH2018 | 310 | 264 | 264 | 267 | 317 | 375 |
| 18 | SON | RhiresD | 308 | 265 | 265 | 269 | 320 | 360 |
| 20 | SON | Δ% | 0 | 0 | 0 | -1 | -1 | 4 |

Sous RCP 4.5, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles RhiresD. D'un point de vue régional, il n'y a pas de différences entre les modélisations et les données d'observation. Sur une base saisonnière, il s'agit également d'une très bonne qualité de modélisation. Cette dernière a tendance à être légèrement meilleure au printemps (MAM) et en automne (SON). C'est dans la région PreAlp que les écarts entre le modèle et les données de référence sont les plus importants.

Tab. 2.4.2 : Quantités moyennes annuelles et saisonnières de précipitations [mm/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 8.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 1263 | 1008 | 1000 | 1061 | 1292 | 1584 |
| 2 | Année | RhiresD | 1254 | 1009 | 1016 | 1068 | 1290 | 1549 |
| 4 | Année | Δ% | 1 | 0 | -2 | -1 | 0 | 2 |
| 5 | DJF | CH2018 | 276 | 221 | 225 | 215 | 276 | 359 |
| 6 | DJF | RhiresD | 256 | 210 | 220 | 203 | 256 | 331 |
| 8 | DJF | Δ% | 8 | 5 | 2 | 6 | 8 | 9 |
| 9 | MAM | CH2018 | 316 | 246 | 238 | 268 | 328 | 395 |
| 10 | MAM | RhiresD | 311 | 245 | 240 | 272 | 327 | 377 |
| 12 | MAM | Δ% | 2 | 1 | -1 | -1 | 0 | 5 |
| 13 | JJA | CH2018 | 361 | 278 | 275 | 310 | 370 | 454 |
| 14 | JJA | RhiresD | 379 | 289 | 292 | 324 | 387 | 481 |
| 16 | JJA | Δ% | -5 | -4 | -6 | -4 | -4 | -6 |
| 17 | SON | CH2018 | 312 | 267 | 266 | 267 | 318 | 377 |
| 18 | SON | RhiresD | 308 | 265 | 265 | 269 | 320 | 360 |
| 20 | SON | Δ% | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 | 5 |

Sous RCP 8.5, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles RhiresD. D'un point de vue régional, il n'y a pas de différences entre les modélisations et les données d'observation.. Sur une base saisonnière, il s'agit également d'une très bonne qualité de modélisation. Cette dernière a tendance à être légèrement meilleure au printemps (MAM) et en automne (SON). Dans la région PreAlp, les écarts entre le modèle et les données de référence sont nettement plus importants.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.3 : Changements en pourcentage des quantités moyennes de précipitations dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | -3 | -1 | -1 | -3 | -3 | -3 |
| DJF | 7 | 9 | 9 | 8 | 7 | 5 |
| MAM | 2 | 2 | 4 | 1 | 2 | 1 |
| JJA | -13 | -12 | -11 | -12 | -13 | -13 |
| SON | -1 | 0 | 0 | -1 | -2 | -3 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.4 : Changements en pourcentage des quantités moyennes de précipitations dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2 | 5 | 6 | 3 | 1 | -1 |
| DJF | 11 | 13 | 13 | 14 | 11 | 11 |
| MAM | 9 | 13 | 12 | 11 | 9 | 7 |
| JJA | -10 | -9 | -7 | -9 | -11 | -11 |
| SON | 1 | 6 | 4 | 2 | 0 | -3 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : Les précipitations moyennes annuelles changent peu. D'un point de vue saisonnier, d'importantes diminutions sont observées en été et des augmentations moyennes en hiver. Pour les autres saisons, il n'y a pratiquement pas de changement. Il n'y a guère de différences entre les régions.

RCP 8.5 : Les précipitations moyennes annuelles présentent des changements un peu plus importants par rapport à la période de référence que sous RCP 4.5. Alors qu'elles ont tendance à diminuer pour le scénario RCP 4.5, elles ont tendance à augmenter ici sous RCP 8.5. Ces changements sont toutefois peu importants. D'un point de vue saisonnier, les augmentations sont un peu plus importantes en hiver et les diminutions un peu moins importantes en été par rapport au scénario RCP 4.5. Au printemps (MAM), les quantités moyennes de précipitations augmentent dans une mesure moyenne à importante. Les précipitations ont tendance à augmenter plus fortement dans les régions de basse altitude BasBro et GraMar que dans les régions de haute altitude.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.5 : Changements en pourcentage des quantités moyennes de précipitations dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1 | 3 | 4 | 2 | 1 | 0 |
| DJF | 11 | 18 | 16 | 12 | 10 | 8 |
| MAM | 7 | 11 | 10 | 9 | 6 | 4 |
| JJA | -12 | -10 | -8 | -10 | -13 | -11 |
| SON | 3 | 4 | 4 | 4 | 2 | 0 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 2.4.6 : Changements en pourcentage des quantités moyennes de précipitations dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 0 | 1 | 3 | 1 | -1 | -2 |
| DJF | 19 | 28 | 29 | 23 | 17 | 12 |
| MAM | 11 | 17 | 18 | 14 | 10 | 6 |
| JJA | -25 | -21 | -21 | -24 | -26 | -27 |
| SON | -4 | 1 | 4 | -1 | -5 | -10 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

RCP 4.5 : Les précipitations moyennes annuelles ne changent que peu. D'un point de vue saisonnier, des augmentations moyennes à importantes surviennent en hiver (DJF) et au printemps (MAM), alors que des diminutions importantes sont observées en été (JJA). Il n'y a pratiquement pas de différences entre les régions.

RCP 8.5 : Les précipitations moyennes annuelles ne changent à nouveau que très peu. Au niveau des saisons, les changements constatés sous RCP 4.5 s'accentuent, surtout en hiver et en été, où les changements sont très importants. Une augmentation plus importante peut également être observée au printemps. Les hivers sont de plus en plus humides et les étés de plus en plus secs.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- : augmentation/diminution moyenne

+++/--- : augmentation/diminution importante

++++/---- : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Tab. 2.4.7 : Synthèse des changements des quantités moyennes de précipitations sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| 2085 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2085 | Saisons | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 7 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.8 : Évaluation finale des écarts des quantités moyennes de précipitations sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|---------------|---|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | faible | - | moyen | ++ | + | --- | ± |
| vers 2085 | faible | + | moyen | +++ | ++ | --- | + |

RCP 8.5

Tab. 2.4.9 : Synthèse des changements des quantités moyennes annuelles et saisonnières de précipitations sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 9 | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| 2085 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2085 | Saisons | 11 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.10 : Évaluation finale des écarts des quantités moyennes de précipitations sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|---------------|---|------------------|------|-----|------|-----|
| vers 2055 | faible | ± | moyen | +++ | ++ | -- | ± |
| vers 2085 | faible | ± | important | ++++ | +++ | ---- | ± |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

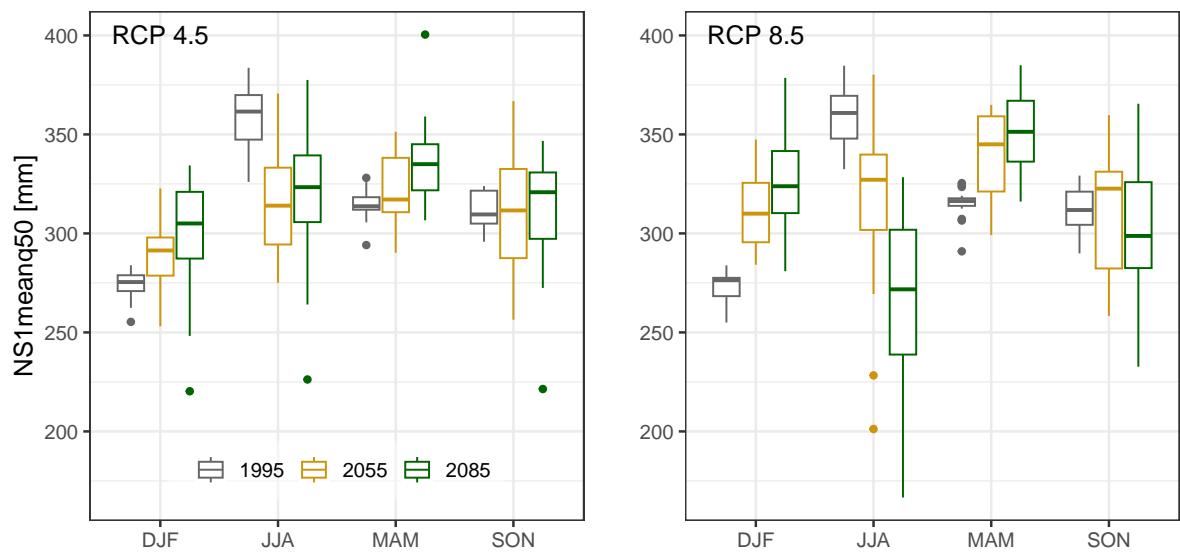


Fig. 2.6 : Précipitations moyennes saisonnières dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

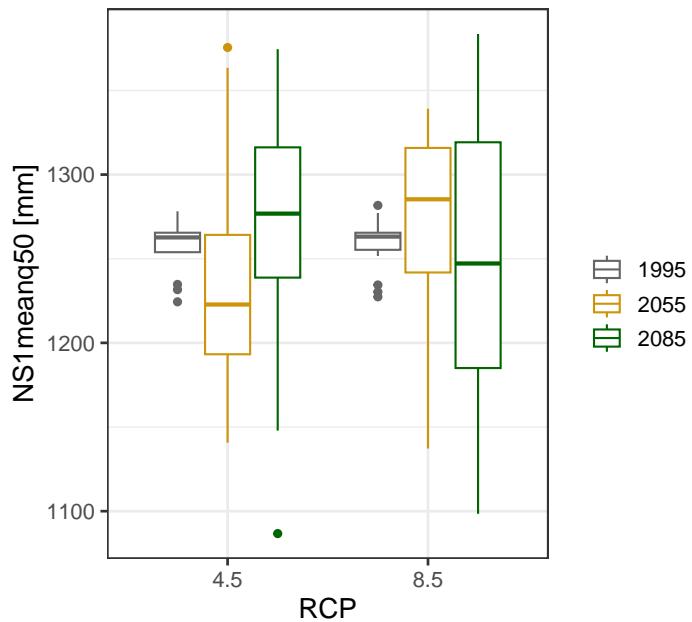


Fig. 2.7 : Précipitations moyennes annuelles dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.2 Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières [mm/d] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des plus grandes précipitations journalières annuelles et saisonnières par année individuelle. (2) Calcul de la moyenne de la distribution des trente plus fortes précipitations journalières.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.11 : Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières [mm/d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 4.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 46 | 42 | 41 | 43 | 48 | 54 |
| 2 | Année | RhiresD | 46 | 46 | 42 | 43 | 48 | 50 |
| 4 | Année | Δ% | 0 | -8 | -2 | -1 | 0 | 6 |
| 5 | DJF | CH2018 | 28 | 26 | 26 | 25 | 29 | 36 |
| 6 | DJF | RhiresD | 27 | 24 | 26 | 22 | 26 | 32 |
| 8 | DJF | Δ% | 5 | 7 | 2 | 15 | 10 | 13 |
| 9 | MAM | CH2018 | 31 | 28 | 27 | 29 | 33 | 36 |
| 10 | MAM | RhiresD | 29 | 28 | 28 | 26 | 30 | 34 |
| 12 | MAM | Δ% | 8 | -1 | -2 | 11 | 7 | 8 |
| 13 | JJA | CH2018 | 34 | 32 | 31 | 34 | 38 | 42 |
| 14 | JJA | RhiresD | 36 | 32 | 30 | 36 | 40 | 44 |
| 16 | JJA | Δ% | -6 | 1 | 2 | -7 | -6 | -3 |
| 17 | SON | CH2018 | 35 | 32 | 31 | 32 | 36 | 40 |
| 18 | SON | RhiresD | 35 | 34 | 31 | 31 | 38 | 40 |
| 20 | SON | Δ% | 0 | -4 | 0 | 3 | -3 | 1 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent dans l'ensemble très bien les valeurs annuelles RhiresD. L'écart le plus important est observé dans la région BasBro. Au niveau saisonnier, il s'agit dans l'ensemble d'une bonne qualité de modélisation. Les résultats de la période hivernale (DJF) empêchent de considérer la qualité de modélisation au niveau des saisons comme très bonne. D'un point de vue régional, la qualité des modélisations est moins bonne dans les régions PlaNor et PlaSud que dans les autres régions.

Tab. 2.4.12 : Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières [mm/d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 8.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 46 | 42 | 40 | 43 | 48 | 54 |
| 2 | Année | RhiresD | 46 | 46 | 42 | 43 | 48 | 50 |
| 4 | Année | Δ% | -1 | -9 | -5 | 0 | 0 | 7 |
| 5 | DJF | CH2018 | 28 | 25 | 25 | 25 | 29 | 35 |
| 6 | DJF | RhiresD | 27 | 24 | 26 | 22 | 26 | 32 |
| 8 | DJF | Δ% | 4 | 4 | -2 | 16 | 9 | 12 |
| 9 | MAM | CH2018 | 31 | 28 | 27 | 29 | 33 | 36 |
| 10 | MAM | RhiresD | 29 | 28 | 28 | 26 | 30 | 34 |
| 12 | MAM | Δ% | 7 | -2 | -2 | 12 | 8 | 8 |
| 13 | JJA | CH2018 | 36 | 32 | 31 | 35 | 38 | 43 |
| 14 | JJA | RhiresD | 36 | 32 | 30 | 36 | 40 | 44 |
| 16 | JJA | Δ% | -1 | 3 | 3 | -4 | -6 | -2 |
| 17 | SON | CH2018 | 35 | 34 | 31 | 32 | 37 | 40 |
| 18 | SON | RhiresD | 35 | 34 | 31 | 31 | 38 | 40 |
| 20 | SON | Δ% | -1 | -2 | 0 | 5 | -2 | 1 |

Sous **RCP 8.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles RhiresD. D'un point de vue régional, les écarts entre les valeurs modélisées et les valeurs de référence varient entre -9 et +7 %. Au niveau des saisons, il s'agit à nouveau dans l'ensemble d'une très bonne qualité de modélisation. Elle est néanmoins moins bonne en hiver (DJF) et au printemps (MAM) que pour les autres saisons. Dans les régions PlaNor, PlaSud et PreAlp, les écarts entre les valeurs modélisées et les valeurs de référence sont nettement plus importants.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.13 : Changements en pourcentage des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2 | 3 | 2 | 4 | 0 | 0 |
| DJF | 4 | 2 | 7 | 5 | 3 | 3 |
| MAM | 0 | 2 | 2 | -2 | 1 | 1 |
| JJA | 1 | 6 | 0 | -1 | -3 | -2 |
| SON | 4 | 9 | 9 | 6 | 4 | 0 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 2.4.14 : Changements en pourcentage des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 4 | 12 | 8 | 8 | 7 | 5 |
| DJF | 7 | 12 | 9 | 8 | 6 | 4 |
| MAM | 2 | 7 | 8 | 8 | 2 | 5 |
| JJA | 7 | 3 | 3 | 6 | 6 | 2 |
| SON | 7 | 9 | 6 | 4 | 5 | 6 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

RCP 4.5 : Les valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières évoluent peu sur une base annuelle par rapport à la période de référence. En termes de saisons, on observe une mosaïque spatio-temporelle de changements faibles à moyens. Aucune structure claire ne se dégage. Les différences régionales sont faibles.

RCP 8.5 : Il convient tout d'abord de souligner que les valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières augmentent sans exception par rapport à la période de référence 1981–2010. Cette augmentation est majoritairement moyenne sur une base annuelle. BasBro est la seule région à connaître une augmentation importante. La mosaïque des valeurs saisonnières constatée pour le scénario RCP 4.5 s'accentue encore avec des augmentations principalement moyennes en hiver (DJF), au printemps (MAM) et en automne (SON).

Changements vers 2085

Tab. 2.4.15 : Changements en pourcentage des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 5 | 6 | 6 | 6 | 4 | 2 |
| DJF | 4 | 6 | 8 | 7 | 5 | 3 |
| MAM | 4 | 9 | 7 | 9 | 5 | 7 |
| JJA | 7 | 8 | 6 | 7 | 4 | 9 |
| SON | 5 | 8 | 10 | 2 | 4 | 5 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.16 : Changements en pourcentage des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 7 | 16 | 13 | 8 | 7 | 6 |
| DJF | 18 | 19 | 17 | 23 | 17 | 16 |
| MAM | 12 | 17 | 21 | 16 | 12 | 9 |
| JJA | -3 | -2 | -1 | 3 | 2 | -2 |
| SON | 6 | 12 | 12 | 6 | 4 | 6 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : Sur une base annuelle, les valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières augmentent dans une mesure faible à moyenne. Au niveau des saisons également, les valeurs augmentent dans tous les cas. Ces augmentations sont pour la plupart moyennes. D'un point de vue régional, les augmentations sont globalement plus faibles dans les régions de plus haute altitude, c'est-à-dire PlaSud et PreAlp, que dans le reste du canton.

RCP 8.5 : Sur une base annuelle, les augmentations des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières varient entre des augmentations moyennes et importantes. En termes saisonniers, les valeurs augmentent partout en hiver (DJF), au printemps (MAM) et en automne (SON), de manière plus marquée en hiver et au printemps qu'en automne. En été, les différences par rapport à la période de référence sont faibles. En raison de la faible ampleur des changements en été, il n'est pas pertinent d'accorder trop d'importance au signe du changement. Il est néanmoins intéressant de constater que dans certaines régions, les valeurs diminuent désormais en été.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- - : augmentation/diminution moyenne

+++/--- : augmentation/diminution importante

++++/-/-/- : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Tab. 2.4.17 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 4 | 6 | 6 | 6 | 4 | 4 |
| 2085 | Année | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 2085 | Saisons | 6 | 8 | 9 | 7 | 6 | 7 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.18 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|---------------|----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | faible | + | faible | + | ± | ± | ++ |
| vers 2085 | moyen | ++ | moyen | ++ | ++ | ++ | ++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.19 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2055 | Saisons | 7 | 8 | 7 | 7 | 7 | 6 |
| 2085 | Année | 2 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 2085 | Saisons | 9 | 10 | 11 | 10 | 8 | 8 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.20 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|--------------|----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ++ | moyen | ++ | ++ | + | ++ |
| vers 2085 | moyen | ++ | moyen | +++ | +++ | ± | ++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

Fig. 2.8 : Valeurs maximales annuelles saisonnières moyennes des précipitations journalières dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

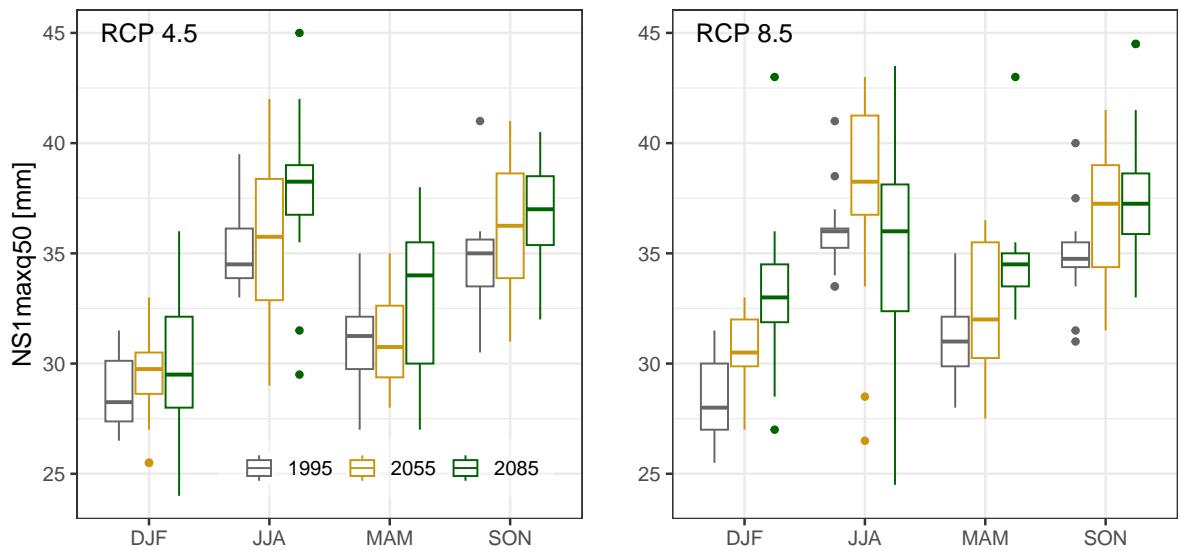
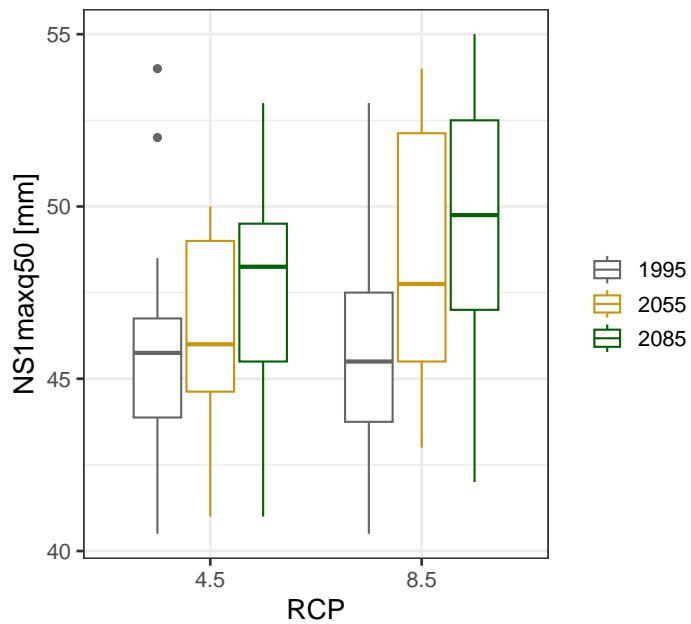


Fig. 2.9 : Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.



2.4.3 Valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières [mm/d] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des plus importantes précipitations journalières annuelles et saisonnières par année individuelle. (2) À partir de la distribution des trente plus importantes précipitations journalières, la valeur qui est dépassée dans 10 % des cas et qui n'est pas atteinte dans 90 % des cas est déterminée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.21 : Valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières [mm/d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 4.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 60 | 58 | 56 | 60 | 64 | 72 |
| 2 | Année | RhiresD | 56 | 58 | 53 | 61 | 62 | 69 |
| 4 | Année | Δ% | 8 | 2 | 7 | -1 | 3 | 4 |
| 5 | DJF | CH2018 | 42 | 37 | 36 | 37 | 45 | 53 |
| 6 | DJF | RhiresD | 39 | 32 | 32 | 33 | 33 | 49 |
| 8 | DJF | Δ% | 7 | 15 | 13 | 11 | 36 | 7 |
| 9 | MAM | CH2018 | 42 | 42 | 41 | 42 | 44 | 51 |
| 10 | MAM | RhiresD | 41 | 42 | 43 | 44 | 44 | 46 |
| 12 | MAM | Δ% | 5 | 1 | -6 | -4 | 0 | 13 |
| 13 | JJA | CH2018 | 54 | 52 | 47 | 55 | 57 | 62 |
| 14 | JJA | RhiresD | 50 | 49 | 47 | 49 | 54 | 60 |
| 16 | JJA | Δ% | 7 | 6 | 0 | 11 | 5 | 3 |
| 17 | SON | CH2018 | 54 | 50 | 47 | 49 | 56 | 57 |
| 18 | SON | RhiresD | 49 | 47 | 45 | 49 | 56 | 51 |
| 20 | SON | Δ% | 9 | 7 | 5 | 0 | -1 | 12 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles RhiresD. L'écart le plus important concerne la région de GraMar. En termes saisonniers, la qualité de la modélisation est globalement bonne. En raison d'une qualité de modélisation seulement suffisante en hiver (DJF), on ne peut pas parler d'une très bonne qualité de modélisation au niveau saisonnier. D'un point de vue régional, la qualité de la modélisation est moins bonne dans les régions PlaSud et PreAlp que dans les autres régions. La modélisation des valeurs pour la période DJF est insuffisante dans la région PlaNor.

Tab. 2.4.22 : Valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières [mm/d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 8.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 60 | 58 | 57 | 59 | 66 | 75 |
| 2 | Année | RhiresD | 56 | 58 | 53 | 61 | 62 | 69 |
| 4 | Année | Δ% | 6 | 1 | 8 | -2 | 6 | 8 |
| 5 | DJF | CH2018 | 42 | 37 | 36 | 38 | 43 | 52 |
| 6 | DJF | RhiresD | 39 | 32 | 32 | 33 | 33 | 49 |
| 8 | DJF | Δ% | 9 | 16 | 11 | 13 | 30 | 6 |
| 9 | MAM | CH2018 | 43 | 40 | 40 | 42 | 46 | 51 |
| 10 | MAM | RhiresD | 41 | 42 | 43 | 44 | 44 | 46 |
| 12 | MAM | Δ% | 5 | -3 | -8 | -4 | 5 | 11 |
| 13 | JJA | CH2018 | 53 | 50 | 47 | 53 | 56 | 62 |
| 14 | JJA | RhiresD | 50 | 49 | 47 | 49 | 54 | 60 |
| 16 | JJA | Δ% | 6 | 3 | -1 | 7 | 3 | 2 |
| 17 | SON | CH2018 | 52 | 49 | 45 | 48 | 53 | 58 |
| 18 | SON | RhiresD | 49 | 47 | 45 | 49 | 56 | 51 |
| 20 | SON | Δ% | 7 | 3 | 0 | -4 | -5 | 13 |

Sous **RCP 8.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent dans l'ensemble bien les valeurs annuelles RhiresD. Les écarts entre la valeur modélisée et la valeur de référence varient entre -2 (BasBro) et 8 % (PreAlp). Du point de vue saisonnier également, la qualité de la modélisation est dans l'ensemble bonne. Comme pour le scénario RCP 4.5, la qualité de la modélisation est la plus faible en hiver (DJF) et dans les régions PlaSud et PreAlp. La qualité de la modélisation est à nouveau insuffisante pour la combinaison hiver et PlaSud.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.23 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1 | 4 | 3 | 1 | 2 | 2 |
| DJF | 9 | 4 | 10 | 5 | 9 | 4 |
| MAM | 2 | -1 | -5 | 3 | -1 | 7 |
| JJA | 4 | 2 | 2 | 1 | 0 | -1 |
| SON | 5 | 7 | 5 | 6 | 5 | 5 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.24 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 9 | 10 | 7 | 8 | 9 | 7 |
| DJF | 10 | 13 | 13 | 10 | 10 | 5 |
| MAM | 11 | 7 | 10 | 7 | 11 | 7 |
| JJA | 7 | 7 | 9 | 6 | 7 | 14 |
| SON | 5 | 13 | 7 | 7 | 3 | 4 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : Les valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières ne changent pour ainsi dire pas sur une base annuelle. D'un point de vue saisonnier, on constate dans l'ensemble des augmentations moyennes en hiver (DJF) et en automne (SON). Au printemps (MAM) et en été (JJA), il n'y a pratiquement pas de changements par rapport à la période de référence.

RCP 8.5 : Une hausse générale des valeurs maximales rares peut être observée tant sur une base annuelle que saisonnière. Au niveau annuel, l'augmentation est moyenne. Au niveau saisonnier, elle varie entre des augmentations principales moyennes en été et en automne et des augmentations moyennes à importantes en hiver et au printemps.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.25 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 6 | 3 | 3 | 6 | 4 | 2 |
| DJF | 7 | 4 | 7 | 10 | 8 | 6 |
| MAM | 7 | 3 | 5 | 9 | 11 | 7 |
| JJA | 7 | -3 | 7 | -1 | 3 | 4 |
| SON | -2 | 6 | 4 | 4 | -2 | 4 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 2.4.26 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 12 | 13 | 14 | 13 | 7 | 8 |
| DJF | 16 | 18 | 26 | 17 | 15 | 11 |
| MAM | 16 | 13 | 14 | 15 | 16 | 5 |
| JJA | 8 | 7 | 17 | 4 | 5 | 5 |
| SON | 4 | 15 | 16 | 7 | 4 | 3 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

RCP 4.5 : D'un point de vue annuel, la plupart des valeurs maximales annuelles rares ne changent que très peu par rapport à la période de référence. Au niveau des saisons, une évolution relativement claire se dégage en termes de signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions : augmentations en hiver (DJF), au printemps (MAM) et en automne (SON), augmentations ou diminutions en été. Les changements sont pour la plupart faibles à moyens.

RCP 8.5 : Dans le futur lointain, tous les changements par rapport à la période de référence 1981–2010 sont positifs sous ce scénario. Il s'agit donc d'augmentations. D'un point de vue annuel, les augmentations sont moyennes à importantes. Sur le plan saisonnier, les valeurs augmentent fortement en hiver et au printemps, et à des degrés divers selon les régions en été et en automne.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- : augmentation/diminution moyenne

+++/--- : augmentation/diminution importante

++++/---- : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Tab. 2.4.27 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 6 | 5 | 8 | 6 | 6 | 6 |
| 2085 | Année | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 2085 | Saisons | 7 | 5 | 7 | 7 | 7 | 6 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.28 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|---------------|---|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | faible | + | moyen | ++ | ± | ± | ++ |
| vers 2085 | faible | + | moyen | ++ | ++ | ± | ± |

RCP 8.5

Tab. 2.4.29 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2055 | Saisons | 10 | 10 | 10 | 9 | 9 | 8 |
| 2085 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 2085 | Saisons | 9 | 11 | 13 | 9 | 9 | 8 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.30 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ++ | moyen | +++ | ++ | + | ++ |
| vers 2085 | important | +++ | moyen | +++ | +++ | ++ | ++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

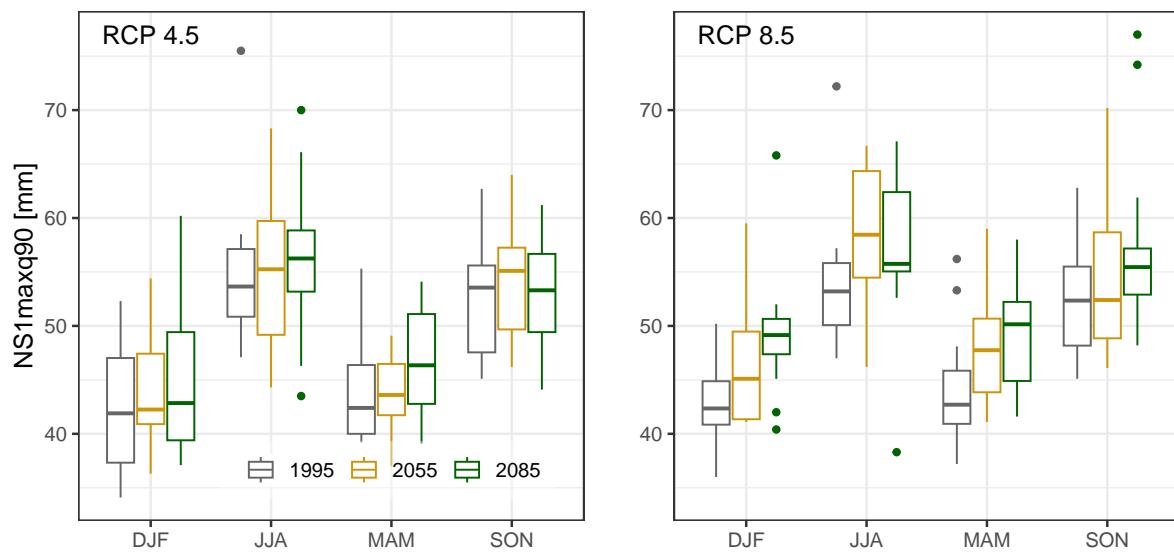


Fig. 2.10 : Valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 90 % des 16 chaînes de modèles respectives.

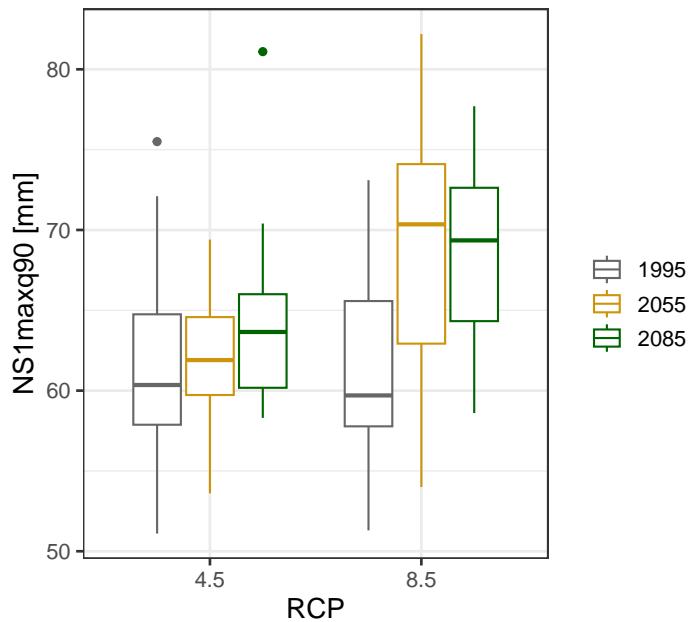


Fig. 2.11 : Valeurs maximales annuelles rares des précipitations journalières dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 90 % des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.4 Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières [mm/d] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des plus importantes précipitations journalières annuelles et saisonnières par année individuelle. (2) À partir de la distribution des trente plus importantes précipitations journalières, la valeur qui est dépassée dans 5 % des cas et qui n'est pas atteinte dans 95 % des cas est déterminée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.31 : Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 4.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 66 | 63 | 61 | 65 | 70 | 76 |
| 2 | Année | RhiresD | 67 | 65 | 67 | 69 | 72 | 76 |
| 4 | Année | Δ% | -1 | -3 | -10 | -6 | -2 | 0 |
| 5 | DJF | CH2018 | 47 | 43 | 42 | 42 | 49 | 57 |
| 6 | DJF | RhiresD | 41 | 33 | 37 | 35 | 41 | 61 |
| 8 | DJF | Δ% | 14 | 32 | 14 | 22 | 20 | -7 |
| 9 | MAM | CH2018 | 48 | 47 | 46 | 47 | 50 | 56 |
| 10 | MAM | RhiresD | 47 | 52 | 49 | 55 | 52 | 58 |
| 12 | MAM | Δ% | 2 | -11 | -7 | -16 | -4 | -4 |
| 13 | JJA | CH2018 | 58 | 55 | 55 | 57 | 61 | 67 |
| 14 | JJA | RhiresD | 54 | 56 | 49 | 52 | 64 | 72 |
| 16 | JJA | Δ% | 9 | -1 | 12 | 10 | -4 | -7 |
| 17 | SON | CH2018 | 58 | 54 | 53 | 55 | 60 | 64 |
| 18 | SON | RhiresD | 52 | 48 | 49 | 54 | 59 | 55 |
| 20 | SON | Δ% | 10 | 13 | 8 | 3 | 3 | 18 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles RhiresD. L'écart le plus important peut être observé dans la région de GraMar. Du point de vue saisonnier, la qualité de la modélisation est tout juste suffisante, ce qui s'explique également par la reproduction en partie insuffisante des valeurs de référence en hiver dans les régions BasBro, PlaNor et PlaSud.

Tab. 2.4.32 : Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 8.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 65 | 64 | 61 | 66 | 72 | 80 |
| 2 | Année | RhiresD | 67 | 65 | 67 | 69 | 72 | 76 |
| 4 | Année | Δ% | -2 | -2 | -9 | -4 | 0 | 5 |
| 5 | DJF | CH2018 | 46 | 41 | 41 | 40 | 48 | 58 |
| 6 | DJF | RhiresD | 41 | 33 | 37 | 35 | 41 | 61 |
| 8 | DJF | Δ% | 11 | 26 | 12 | 15 | 18 | -4 |
| 9 | MAM | CH2018 | 48 | 46 | 45 | 47 | 52 | 57 |
| 10 | MAM | RhiresD | 47 | 52 | 49 | 55 | 52 | 58 |
| 12 | MAM | Δ% | 3 | -12 | -8 | -15 | -1 | -2 |
| 13 | JJA | CH2018 | 57 | 55 | 53 | 58 | 62 | 68 |
| 14 | JJA | RhiresD | 54 | 56 | 49 | 52 | 64 | 72 |
| 16 | JJA | Δ% | 7 | -1 | 8 | 11 | -4 | -5 |
| 17 | SON | CH2018 | 58 | 54 | 53 | 52 | 60 | 63 |
| 18 | SON | RhiresD | 52 | 48 | 49 | 54 | 59 | 55 |
| 20 | SON | Δ% | 10 | 12 | 8 | -2 | 2 | 15 |

Sous **RCP 8.5** également, les valeurs modélisées CH2018 représentent très bien les valeurs annuelles RhiresD. L'écart le plus important est à nouveau visible dans la région de GraMar. En ce qui concerne les saisons, la qualité de la modélisation est bonne dans l'ensemble et donc meilleure que sous RCP 4.5. Cependant, la qualité de la modélisation est à nouveau moins bonne en hiver que pour les autres saisons.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.33 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1 | 5 | 2 | 6 | 2 | 2 |
| DJF | 6 | -1 | 3 | 3 | 7 | 3 |
| MAM | -2 | 1 | 0 | 1 | -2 | 7 |
| JJA | 2 | 3 | -2 | -2 | 3 | 5 |
| SON | 6 | 6 | 2 | 5 | 5 | 5 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 2.4.34 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 12 | 9 | 6 | 12 | 9 | 8 |
| DJF | 8 | 6 | 9 | 12 | 12 | 5 |
| MAM | 6 | 7 | 4 | 2 | 5 | 8 |
| JJA | 14 | 8 | 8 | 9 | 12 | 8 |
| SON | 10 | 9 | 8 | 10 | 5 | 8 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

RCP 4.5 : Les valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières ne changent que peu sur une base annuelle. Les valeurs augmentent toutes. Au niveau des valeurs saisonnières, la majorité des changements sont faibles; il s'agit aussi bien d'augmentations que de diminutions par rapport à la période de référence 1981–2010. Seul l'automne (SON) présente une majorité d'augmentations moyennes.

RCP 8.5 : Pour ce scénario, les changements par rapport à la période de référence diffèrent nettement du scénario RCP 4.5 : les changements – il s'agit exclusivement d'augmentations – sont majoritairement moyens sur une base annuelle et même importants dans la région PlaNor. La situation est similaire d'un point de vue saisonnier, avec ici aussi des augmentations principalement moyennes. Dans l'ensemble, c'est le printemps qui enregistre les plus faibles augmentations.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.35 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 4 | 5 | 3 | 3 | 1 | 13 |
| DJF | 4 | -1 | 6 | 5 | 5 | 3 |
| MAM | 5 | 5 | 5 | 7 | 5 | 3 |
| JJA | 8 | 5 | 1 | 3 | 4 | 4 |
| SON | 6 | 6 | 5 | 5 | 6 | 3 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.36 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 12 | 16 | 16 | 10 | 12 | 13 |
| DJF | 11 | 17 | 21 | 15 | 11 | 11 |
| MAM | 12 | 12 | 11 | 12 | 16 | 15 |
| JJA | 15 | 11 | 13 | 7 | 13 | 8 |
| SON | 8 | 13 | 20 | 12 | 7 | 6 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- - : augmentation/diminution moyenne

+++/--- : augmentation/diminution importante

++++/---- : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Tab. 2.4.37 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 6 | 5 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 2085 | Année | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 2085 | Saisons | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 | 4 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.38 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|---------------|----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | faible | + | moyen | ± | ± | ± | + |
| vers 2085 | moyen | ++ | moyen | ± | ++ | + | ++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.39 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 |
| 2055 | Saisons | 10 | 8 | 7 | 9 | 10 | 8 |
| 2085 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2085 | Saisons | 11 | 12 | 14 | 11 | 11 | 10 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.40 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ++ | moyen | ++ | ++ | ++ | ++ |
| vers 2085 | important | +++ | important | +++ | +++ | +++ | +++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

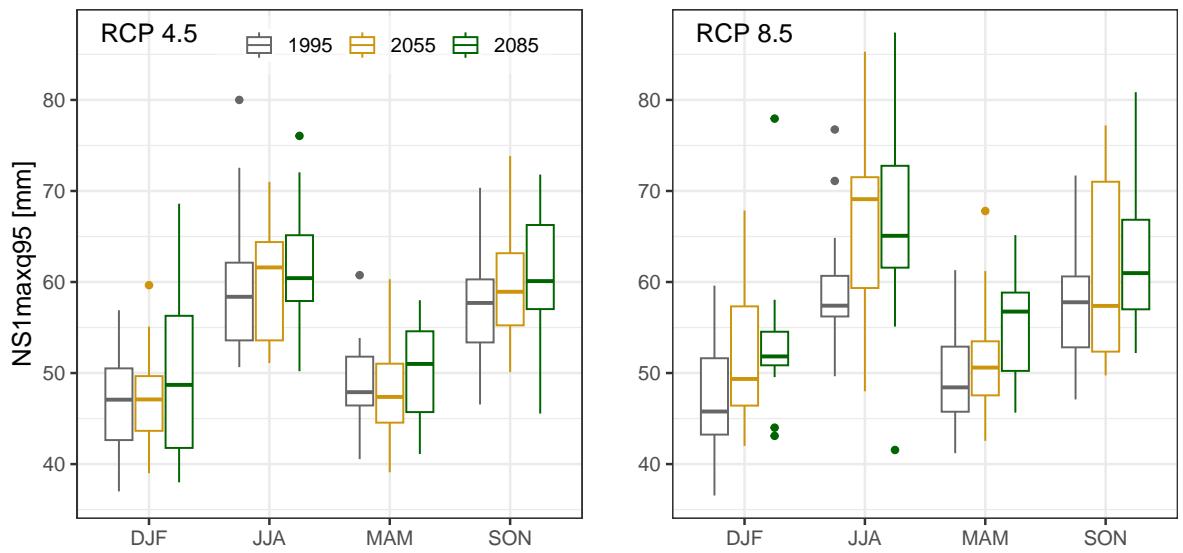


Fig. 2.12 : Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 95 % des 16 chaînes de modèles respectives.

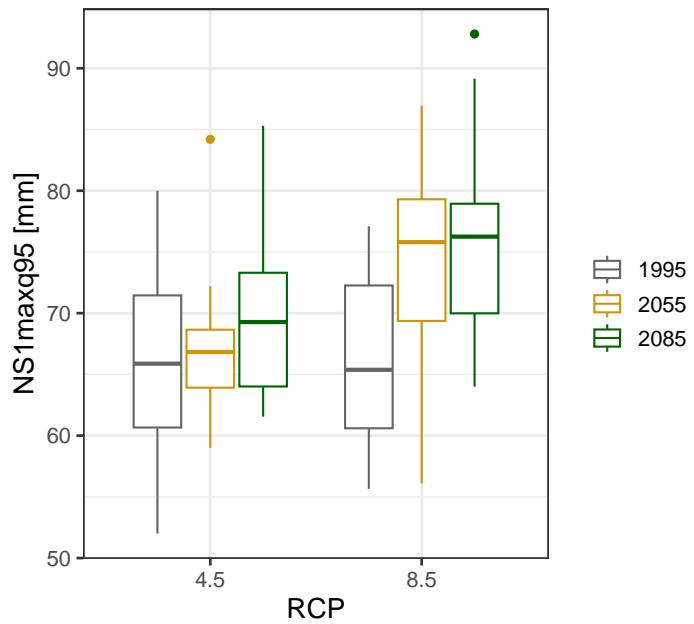


Fig. 2.13 : Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations journalières dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 95 % des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.5 Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières [mm/d] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des plus importantes précipitations journalières annuelles et saisonnières par année individuelle. (2) À partir de la distribution des trente plus importantes précipitations journalières, la valeur qui est dépassée dans 1 % des cas et qui n'est pas atteinte dans 99 % des cas est déterminée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.41 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 4.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 72 | 72 | 70 | 73 | 79 | 89 |
| 2 | Année | RhiresD | 72 | 73 | 79 | 78 | 74 | 83 |
| 4 | Année | Δ% | -1 | -1 | -11 | -6 | 7 | 8 |
| 5 | DJF | CH2018 | 55 | 49 | 49 | 48 | 57 | 69 |
| 6 | DJF | RhiresD | 47 | 42 | 41 | 41 | 56 | 63 |
| 8 | DJF | Δ% | 18 | 18 | 21 | 19 | 2 | 10 |
| 9 | MAM | CH2018 | 57 | 53 | 51 | 54 | 60 | 64 |
| 10 | MAM | RhiresD | 62 | 61 | 56 | 64 | 67 | 68 |
| 12 | MAM | Δ% | -8 | -12 | -8 | -15 | -9 | -5 |
| 13 | JJA | CH2018 | 66 | 64 | 64 | 66 | 69 | 74 |
| 14 | JJA | RhiresD | 68 | 65 | 67 | 66 | 74 | 83 |
| 16 | JJA | Δ% | -3 | -1 | -5 | -1 | -7 | -10 |
| 17 | SON | CH2018 | 65 | 65 | 62 | 65 | 71 | 77 |
| 18 | SON | RhiresD | 63 | 67 | 72 | 73 | 60 | 67 |
| 20 | SON | Δ% | 4 | -4 | -14 | -12 | 17 | 15 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 représentent dans l'ensemble bien les valeurs annuelles RhiresD. La qualité de la modélisation est également bonne dans l'ensemble au niveau saisonnier. Elle varie entre très bonne en été (JJA) et suffisante en hiver (DJF) et en automne (SON). Au niveau régional, les valeurs sont mieux reproduites dans les régions BasBro et PlaSud (bien) que dans les autres régions (suffisant).

Tab. 2.4.42 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 (RCP 8.5) et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 73 | 71 | 69 | 73 | 79 | 88 |
| 2 | Année | RhiresD | 72 | 73 | 79 | 78 | 74 | 83 |
| 4 | Année | Δ% | 2 | -3 | -12 | -7 | 7 | 6 |
| 5 | DJF | CH2018 | 55 | 47 | 48 | 47 | 57 | 73 |
| 6 | DJF | RhiresD | 47 | 42 | 41 | 41 | 56 | 63 |
| 8 | DJF | Δ% | 19 | 14 | 18 | 17 | 3 | 17 |
| 9 | MAM | CH2018 | 57 | 53 | 50 | 53 | 60 | 65 |
| 10 | MAM | RhiresD | 62 | 61 | 56 | 64 | 67 | 68 |
| 12 | MAM | Δ% | -8 | -13 | -10 | -16 | -10 | -4 |
| 13 | JJA | CH2018 | 66 | 68 | 65 | 69 | 74 | 76 |
| 14 | JJA | RhiresD | 68 | 65 | 67 | 66 | 74 | 83 |
| 16 | JJA | Δ% | -3 | 5 | -3 | 3 | 0 | -9 |
| 17 | SON | CH2018 | 65 | 63 | 61 | 64 | 70 | 77 |
| 18 | SON | RhiresD | 63 | 67 | 72 | 73 | 60 | 67 |
| 20 | SON | Δ% | 4 | -6 | -15 | -13 | 16 | 14 |

Sous **RCP 8.5** également, la qualité de la modélisation est bonne aussi bien sur une base annuelle que saisonnière. Ici aussi, les valeurs estivales sont très bien reproduites. La structure régionale de la qualité de la modélisation correspond également à celle du scénario RCP 4.5.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.43 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 7 | 9 | 2 | 3 | 6 | 8 |
| DJF | -3 | 1 | 0 | -1 | -3 | -3 |
| MAM | -4 | 0 | 0 | -4 | -3 | -2 |
| JJA | 0 | 8 | 1 | 6 | 2 | 6 |
| SON | 12 | 4 | 4 | 6 | 10 | 5 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.44 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 14 | 20 | 5 | 10 | 16 | 19 |
| DJF | 12 | 1 | 3 | 7 | 11 | 2 |
| MAM | 3 | 1 | 5 | 5 | 7 | 8 |
| JJA | 17 | 5 | 6 | 13 | 17 | 18 |
| SON | 11 | 18 | 7 | 12 | 14 | 9 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : D'un point de vue annuel, les valeurs maximales annuelles extrêmement rares augmentent dans une mesure faible à moyenne par rapport à la période de référence. D'un point de vue saisonnier, les changements sont dans l'ensemble faibles. En hiver (DJF) et au printemps (MAM), on observe aussi bien des augmentations que des diminutions des valeurs dans les régions. En été (JJA) et en automne (SON), seules des augmentations peuvent être observées.

RCP 8.5 : Pour ce scénario, les augmentations des valeurs annuelles sont significativement plus importantes que sous RCP 4.5. Il s'agit généralement d'augmentations importantes, voire très importantes dans un cas. Les valeurs augmentent dans toutes les régions et pour toutes les saisons par rapport à la période de référence 1981–2010, et ce de manière plus marquée en été et en automne. Sur le plan régional, de grandes différences apparaissent entre les régions voisines. Ceci est à mettre en relation avec la problématique liée à la modélisation de valeurs extrêmes.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.45 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 8 | 15 | 9 | 8 | 6 | 6 |
| DJF | 5 | 5 | 9 | 1 | 4 | 6 |
| MAM | 4 | 5 | 4 | 4 | 0 | -6 |
| JJA | 6 | 9 | 8 | 11 | 0 | 11 |
| SON | 6 | 3 | -2 | 9 | 10 | 5 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 2.4.46 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 23 | 25 | 20 | 15 | 19 | 15 |
| DJF | 6 | 16 | 14 | 15 | 8 | 0 |
| MAM | 18 | 17 | 8 | 19 | 21 | 15 |
| JJA | 17 | 13 | 19 | 14 | 16 | 28 |
| SON | 7 | 17 | 19 | 8 | 8 | 4 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

RCP 4.5 : L'évolution des valeurs annuelles de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 est positive et généralement moyenne. Sur une base saisonnière, on observe une mosaïque de changements faibles à moyens, qui sont dans la plupart des cas des augmentations. D'un point de vue régional, la région BasBro se distingue par des augmentations importantes sur une base annuelle.

RCP 8.5 : Les changements sur une base annuelle sont importants, voire très importants. Il s'agit donc d'augmentations par rapport à la période de référence. Les valeurs saisonnières augmentent également toutes. Les changements sont dans l'ensemble importants. Ils sont plus importants au printemps (MAM) et en été (JJA) que pendant les deux autres saisons. En ce qui concerne les régions, les augmentations des valeurs annuelles sont plus importantes dans les régions de basse altitude que dans celles de haute altitude.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- : augmentation/diminution moyenne

+++/--- : augmentation/diminution importante

++++/---- : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Tab. 2.4.47 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| 2055 | Saisons | 6 | 5 | 4 | 6 | 6 | 6 |
| 2085 | Année | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2085 | Saisons | 7 | 7 | 6 | 7 | 6 | 9 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.48 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|--------------|----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ++ | moyen | ± | ± | + | ++ |
| vers 2085 | moyen | ++ | moyen | ++ | ± | ++ | ± |

RCP 8.5

Tab. 2.4.49 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 4 | 2 | 3 | 3 | 3 |
| 2055 | Saisons | 10 | 7 | 7 | 10 | 11 | 8 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| 2085 | Saisons | 10 | 12 | 11 | 11 | 11 | 9 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.50 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|-----------------------|------|------------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | important | +++ | moyen | ++ | + | +++ | +++ |
| vers 2085 | très important | ++++ | important | ++ | +++ | +++ | +++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

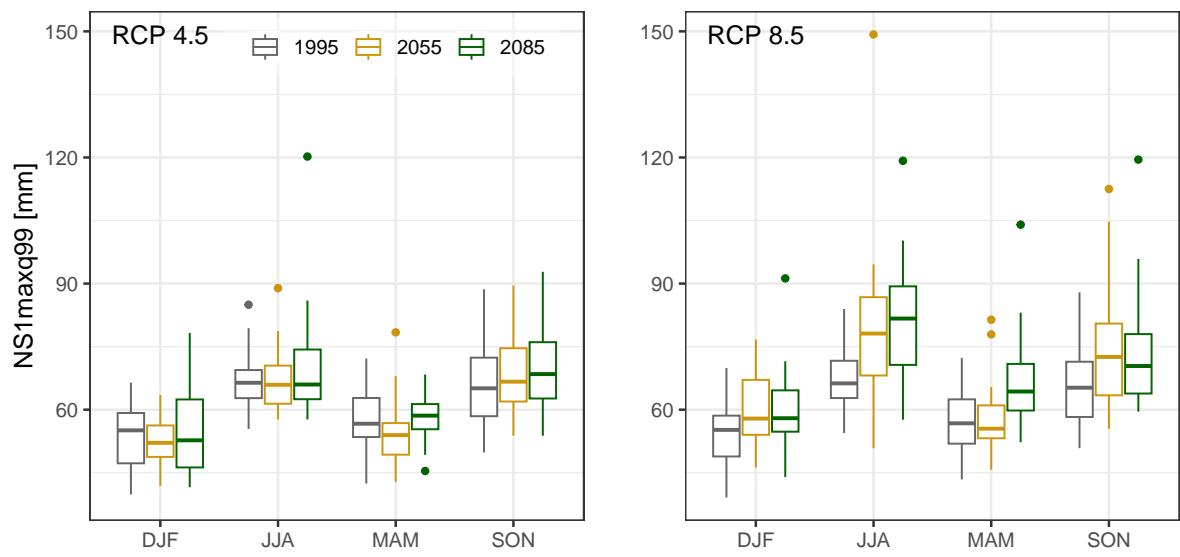


Fig. 2.14 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 99 % des 16 chaînes de modèles respectives.

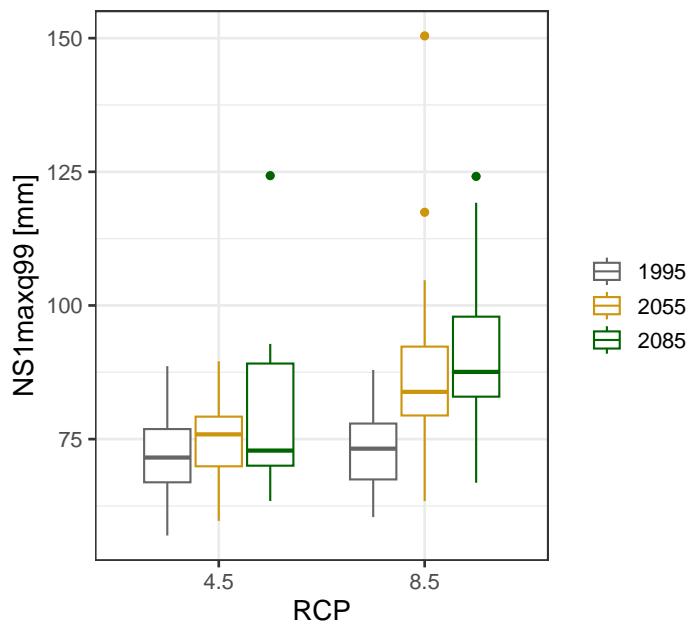


Fig. 2.15 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 99 % des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.6 Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours [mm/3d] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des plus grandes sommes annuelles et saisonnières de précipitations sur 3 jours par année individuelle. (2) Calcul de la moyenne de ces valeurs annuelles individuelles pour obtenir la moyenne par période.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.51 : Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours [mm/3d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 79 | 70 | 68 | 71 | 84 | 98 |
| 2 | Année | RhiresD | 73 | 70 | 65 | 70 | 78 | 86 |
| 4 | Année | Δ% | 8 | -1 | 4 | 2 | 8 | 14 |
| 5 | DJF | CH2018 | 53 | 43 | 43 | 43 | 54 | 70 |
| 6 | DJF | RhiresD | 47 | 42 | 40 | 39 | 46 | 57 |
| 8 | DJF | Δ% | 14 | 3 | 7 | 12 | 18 | 22 |
| 9 | MAM | CH2018 | 54 | 44 | 43 | 48 | 57 | 65 |
| 10 | MAM | RhiresD | 48 | 41 | 41 | 47 | 50 | 61 |
| 12 | MAM | Δ% | 14 | 10 | 3 | 3 | 13 | 7 |
| 13 | JJA | CH2018 | 60 | 50 | 48 | 54 | 64 | 73 |
| 14 | JJA | RhiresD | 61 | 50 | 53 | 53 | 61 | 74 |
| 16 | JJA | Δ% | -1 | 0 | -9 | 3 | 4 | -2 |
| 17 | SON | CH2018 | 55 | 51 | 49 | 50 | 58 | 68 |
| 18 | SON | RhiresD | 57 | 55 | 53 | 55 | 62 | 64 |
| 20 | SON | Δ% | -4 | -8 | -8 | -9 | -7 | 6 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 représentent globalement bien les valeurs annuelles RhiresD, et même très bien dans les régions BasBro, GraMar et PlaNor.

Sur une base saisonnière également, la qualité de la modélisation est globalement bonne. Une qualité de modélisation seulement suffisante en hiver (DJF) est contrebalancée par une très bonne qualité de modélisation en été (JJA). En ce qui concerne les régions, la qualité de modélisation varie entre une qualité très bonne dans la région BasBro et une qualité bonne à satisfaisante dans les régions PlaSud et PreAlp.

Tab. 2.4.52 : Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours [mm/3d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 77 | 70 | 66 | 70 | 80 | 98 |
| 2 | Année | RhiresD | 73 | 70 | 65 | 70 | 78 | 86 |
| 4 | Année | Δ% | 6 | -1 | 2 | 0 | 4 | 13 |
| 5 | DJF | CH2018 | 53 | 43 | 43 | 43 | 54 | 68 |
| 6 | DJF | RhiresD | 47 | 42 | 40 | 39 | 46 | 57 |
| 8 | DJF | Δ% | 14 | 2 | 7 | 12 | 17 | 20 |
| 9 | MAM | CH2018 | 54 | 44 | 43 | 49 | 56 | 66 |
| 10 | MAM | RhiresD | 48 | 41 | 41 | 47 | 50 | 61 |
| 12 | MAM | Δ% | 13 | 10 | 4 | 3 | 12 | 8 |
| 13 | JJA | CH2018 | 60 | 50 | 48 | 55 | 64 | 74 |
| 14 | JJA | RhiresD | 61 | 50 | 53 | 53 | 61 | 74 |
| 16 | JJA | Δ% | -1 | 0 | -8 | 4 | 4 | -1 |
| 17 | SON | CH2018 | 56 | 51 | 49 | 51 | 60 | 70 |
| 18 | SON | RhiresD | 57 | 55 | 53 | 55 | 62 | 64 |
| 20 | SON | Δ% | -2 | -8 | -8 | -8 | -3 | 8 |

Sous **RCP 8.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles RhiresD dans les régions BasBro, GraMar et PlaNor. Dans la région PreAlp par contre, la correspondance n'est que suffisante. Sur une base saisonnière, la qualité de la modélisation est bonne dans l'ensemble. La qualité de la modélisation en hiver (DJF) n'est que suffisante, alors qu'elle est très bonne en été (JJA). D'un point de vue régional, la qualité de la modélisation est meilleure dans les régions de basse altitude GraMar, BasBro et PlaNor que dans les régions de haute altitude PlaSud et PreAlp.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.53 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | -2 | 0 | 0 | -4 | -1 | -1 |
| DJF | 3 | 11 | 9 | 7 | 2 | 2 |
| MAM | -1 | 0 | 4 | -2 | 0 | 2 |
| JJA | -8 | 2 | -3 | -4 | -5 | -7 |
| SON | 4 | 7 | 5 | 4 | 3 | 3 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 2.4.54 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 4 | 6 | 8 | 5 | 4 | -2 |
| DJF | 4 | 8 | 7 | 8 | 5 | 3 |
| MAM | 5 | 10 | 10 | 4 | 7 | 2 |
| JJA | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | -5 |
| SON | 5 | 6 | 7 | 7 | 6 | 4 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

RCP 4.5 : Les valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours ne varient que très peu sur une base annuelle. D'un point de vue saisonnier, les valeurs augmentent à des degrés divers en hiver (DJF) et en automne (SON). En été (JJA), presque toutes les valeurs diminuent, dans une mesure faible à moyenne. Au printemps (MAM), les changements sont indifférents. Au niveau saisonnier, les valeurs augmentent partout, à une exception près. L'ampleur de l'augmentation varie toutefois entre les régions.

RCP 8.5 : Sur une base annuelle, les valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours évoluent majoritairement dans une mesure moyenne par rapport à la période de référence. Dans la région PreAlp, les valeurs diminuent même. D'un point de vue saisonnier, les valeurs augmentent toutes, à une exception près. L'ampleur de ces augmentations est majoritairement faible à moyenne et varie d'une région à l'autre. En ce qui concerne les valeurs annuelles, on constate une différence entre les régions PlaSud et PreAlp, situées à plus haute altitude, et les autres régions du canton.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.55 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1 | 2 | 3 | 2 | 2 | -1 |
| DJF | -2 | 8 | 4 | 6 | -1 | -3 |
| MAM | 3 | 3 | 9 | 3 | 4 | 3 |
| JJA | 1 | 7 | 3 | 3 | 1 | 1 |
| SON | -2 | 7 | 5 | 0 | 0 | -4 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.56 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 9 | 12 | 14 | 10 | 7 | 5 |
| DJF | 14 | 17 | 16 | 18 | 16 | 8 |
| MAM | 8 | 14 | 16 | 11 | 9 | 7 |
| JJA | -4 | -7 | 2 | -6 | -4 | -7 |
| SON | 2 | 6 | 5 | 3 | -1 | 0 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : Les valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours ne changent que très peu sur une base annuelle par rapport à la période de référence. Au niveau des saisons, seuls de faibles changements sont observés. Au printemps (MAM) et en été (JJA), toutes les valeurs augmentent.

RCP 8.5 : Ce scénario dresse un tableau nettement différent de celui du scénario RCP 4.5. Les valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours augmentent dans des proportions moyennes à importantes, en particulier dans les régions de basse altitude GraMar, BasBro et PlaNor. D'un point de vue saisonnier, un contraste se dégage entre l'hiver (DJF)/le printemps (MAM), avec une majorité d'augmentations importantes, et l'été (JJA), avec une majorité de diminutions faibles à moyennes. En automne (SON), on observe à la fois des augmentations et des diminutions.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- - : augmentation/diminution moyenne

+++/--- : augmentation/diminution importante

++++/-/-/- : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Tab. 2.4.57 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 5 | 7 | 6 | 5 | 5 | 5 |
| 2085 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2085 | Saisons | 4 | 7 | 6 | 5 | 4 | 4 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.58 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|---------------|---|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | faible | ± | moyen | ++ | ± | ± | + |
| vers 2085 | faible | ± | moyen | ± | + | + | ± |

RCP 8.5

Tab. 2.4.59 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 6 | 8 | 8 | 6 | 7 | 5 |
| 2085 | Année | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 2085 | Saisons | 7 | 10 | 9 | 9 | 7 | 7 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.60 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|--------------|----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ± | moyen | ++ | ++ | ± | ++ |
| vers 2085 | moyen | ++ | moyen | +++ | +++ | ± | ± |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

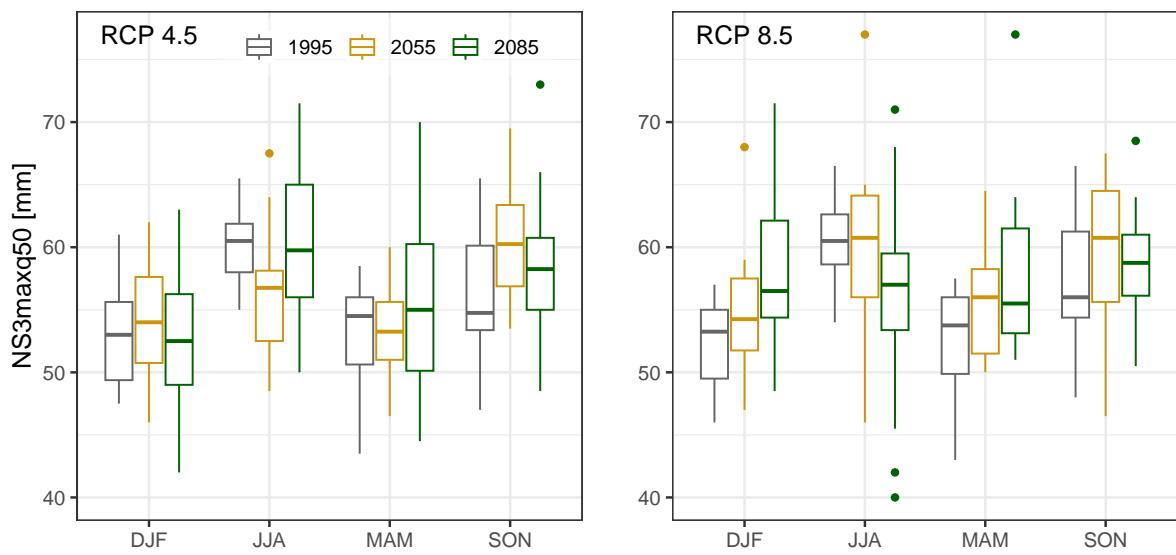


Fig. 2.16 : Moyennes saisonnières des valeurs maximales annuelles des précipitations sur 3 jours dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

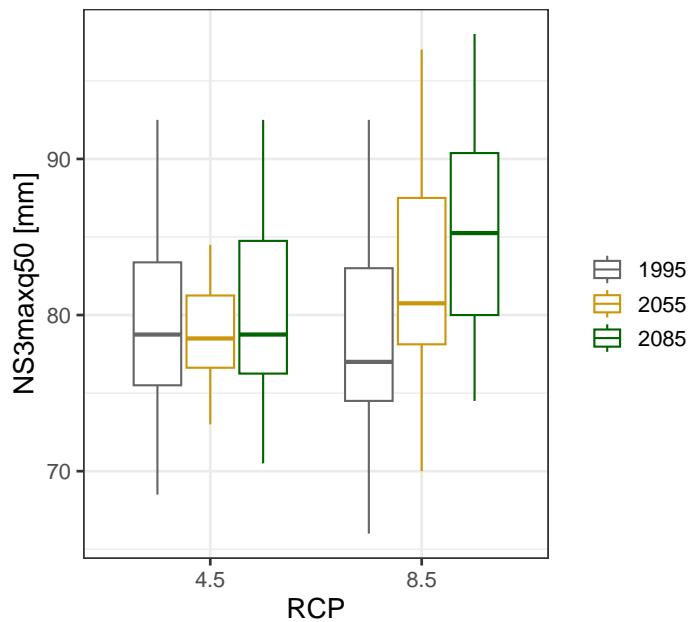


Fig. 2.17 : Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.7 Valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours [mm/3d] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des plus grandes sommes annuelles et saisonnières de précipitations sur 3 jours par année individuelle. (2) À partir de la distribution des trente plus importantes précipitations sur 3 jours, la valeur qui est dépassée dans 10 % des cas et qui n'est pas atteinte dans 90 % des cas est déterminée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.61 : Valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours [mm/3d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 105 | 95 | 90 | 99 | 111 | 130 |
| 2 | Année | RhiresD | 93 | 88 | 83 | 95 | 99 | 118 |
| 4 | Année | Δ% | 13 | 8 | 9 | 5 | 12 | 10 |
| 5 | DJF | CH2018 | 77 | 66 | 64 | 67 | 79 | 103 |
| 6 | DJF | RhiresD | 64 | 55 | 59 | 54 | 63 | 84 |
| 8 | DJF | Δ% | 20 | 19 | 8 | 22 | 25 | 23 |
| 9 | MAM | CH2018 | 77 | 67 | 67 | 69 | 83 | 94 |
| 10 | MAM | RhiresD | 79 | 83 | 77 | 79 | 82 | 82 |
| 12 | MAM | Δ% | -2 | -19 | -13 | -12 | 1 | 15 |
| 13 | JJA | CH2018 | 92 | 79 | 75 | 87 | 96 | 110 |
| 14 | JJA | RhiresD | 85 | 67 | 74 | 76 | 90 | 101 |
| 16 | JJA | Δ% | 9 | 18 | 2 | 14 | 7 | 8 |
| 17 | SON | CH2018 | 84 | 84 | 78 | 78 | 88 | 101 |
| 18 | SON | RhiresD | 80 | 80 | 68 | 80 | 85 | 84 |
| 20 | SON | Δ% | 4 | 5 | 15 | -2 | 4 | 20 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent dans l'ensemble bien les valeurs annuelles RhiresD. Sur une base saisonnière, la qualité de la modélisation n'est que suffisante. Les observations en hiver (DJF) sont les moins bien reproduites. D'un point de vue régional, la qualité de la modélisation est suffisante dans toutes les régions sauf dans la région PlaSud (bonne).

Tab. 2.4.62 : Valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours [mm/3d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 106 | 98 | 89 | 101 | 112 | 128 |
| 2 | Année | RhiresD | 93 | 88 | 83 | 95 | 99 | 118 |
| 4 | Année | Δ% | 14 | 11 | 8 | 6 | 13 | 8 |
| 5 | DJF | CH2018 | 75 | 65 | 62 | 61 | 77 | 105 |
| 6 | DJF | RhiresD | 64 | 55 | 59 | 54 | 63 | 84 |
| 8 | DJF | Δ% | 17 | 18 | 5 | 13 | 22 | 26 |
| 9 | MAM | CH2018 | 77 | 67 | 64 | 68 | 81 | 95 |
| 10 | MAM | RhiresD | 79 | 83 | 77 | 79 | 82 | 82 |
| 12 | MAM | Δ% | -3 | -18 | -17 | -13 | -1 | 16 |
| 13 | JJA | CH2018 | 92 | 80 | 75 | 88 | 97 | 110 |
| 14 | JJA | RhiresD | 85 | 67 | 74 | 76 | 90 | 101 |
| 16 | JJA | Δ% | 8 | 19 | 2 | 16 | 7 | 9 |
| 17 | SON | CH2018 | 83 | 83 | 81 | 78 | 92 | 102 |
| 18 | SON | RhiresD | 80 | 80 | 68 | 80 | 85 | 84 |
| 20 | SON | Δ% | 4 | 4 | 18 | -2 | 8 | 21 |

Sous **RCP 8.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent dans l'ensemble bien les valeurs annuelles RhiresD. Dans les régions BasBro et PlaSud, la qualité n'est que suffisante. Sur une base saisonnière, la qualité de la modélisation est également seulement suffisante. Elle n'est bonne qu'en automne (SON). De plus, les valeurs des régions ne peuvent toutes être modélisées qu'avec une qualité suffisante.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.63 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 8 | 5 | 7 | 5 | 7 | 3 |
| DJF | 2 | 9 | 6 | 1 | 1 | 2 |
| MAM | 3 | 1 | -6 | 1 | 4 | 10 |
| JJA | -2 | -1 | -1 | -3 | 0 | -3 |
| SON | 3 | 4 | 4 | 3 | 0 | 3 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.64 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 12 | 13 | 11 | 9 | 7 | 7 |
| DJF | 11 | 17 | 16 | 15 | 12 | 6 |
| MAM | 4 | 10 | 5 | 13 | 9 | -2 |
| JJA | 3 | 8 | 8 | 6 | 4 | 3 |
| SON | 4 | 14 | 6 | 6 | 2 | 1 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : Sur une base annuelle, les valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours augmentent modérément par rapport à la période de référence 1981–2010, à l'exception de la région PreAlp (faible augmentation). D'un point de vue saisonnier, les changements sont majoritairement faibles.

RCP 8.5 : Les valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours enregistrent une augmentation moyenne à importante. Une différence est à noter entre les régions de basse altitude et celles de plus haute altitude. Comme les valeurs annuelles, les valeurs saisonnières augmentent toutes par rapport à la période de référence, les augmentations étant plus importantes en hiver (DJF) et au printemps (MAM) qu'en été (JJA) et en automne (SON). Pour les valeurs saisonnières, les changements sont également plus faibles dans les régions situées en altitude que dans celles situées en plaine.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.65 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 11 | 12 | 11 | 14 | 7 | 4 |
| DJF | 7 | 1 | 1 | -1 | 4 | 1 |
| MAM | 6 | 3 | 8 | 15 | 5 | 2 |
| JJA | -3 | -2 | 4 | 1 | -4 | 8 |
| SON | 3 | 4 | 0 | 2 | 1 | 0 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 2.4.66 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 10 | 18 | 17 | 10 | 12 | 6 |
| DJF | 12 | 24 | 25 | 18 | 13 | 1 |
| MAM | 15 | 19 | 14 | 24 | 16 | 4 |
| JJA | 3 | 4 | 15 | 0 | 2 | -5 |
| SON | 11 | 5 | 13 | 8 | 10 | 5 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

RCP 4.5 : Les changements – c'est-à-dire les augmentations des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours – sont importants sur une base annuelle dans les régions de basse altitude et moyens à faibles dans les régions de plus haute altitude (PlaSud, PreAlp). Sur le plan des saisons, une mosaïque spatio-temporelle composée essentiellement de faibles augmentations, de quelques augmentations moyennes et d'une augmentation importante peut être observée.

RCP 8.5 : L'augmentation des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours est majoritairement importante. La région PreAlp est la seule à présenter une augmentation « que » moyenne. Sur le plan saisonnier, on observe maintenant – contrairement au scénario RCP 4.5 – des structures spatio-temporelles plus claires : des augmentations faibles à très importantes en hiver (DJF) et au printemps (MAM), des augmentations faibles à importantes en automne (SON) et une situation hétérogène en été. D'un point de vue régional, la région PreAlp se distingue par ses faibles changements.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- : augmentation/diminution moyenne

+++/--- : augmentation/diminution importante

++++/---- : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Tab. 2.4.67 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 2055 | Saisons | 4 | 5 | 6 | 4 | 4 | 6 |
| 2085 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 |
| 2085 | Saisons | 6 | 4 | 5 | 6 | 5 | 5 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.68 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|--------------|----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ++ | faible | + | ± | - | + |
| vers 2085 | moyen | ++ | faible | ± | ++ | ± | + |

RCP 8.5

Tab. 2.4.69 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 2055 | Saisons | 6 | 11 | 9 | 10 | 7 | 5 |
| 2085 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 2085 | Saisons | 10 | 10 | 13 | 10 | 10 | 6 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.70 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ++ | moyen | +++ | ± | ++ | ++ |
| vers 2085 | important | +++ | important | +++ | +++ | ± | ++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

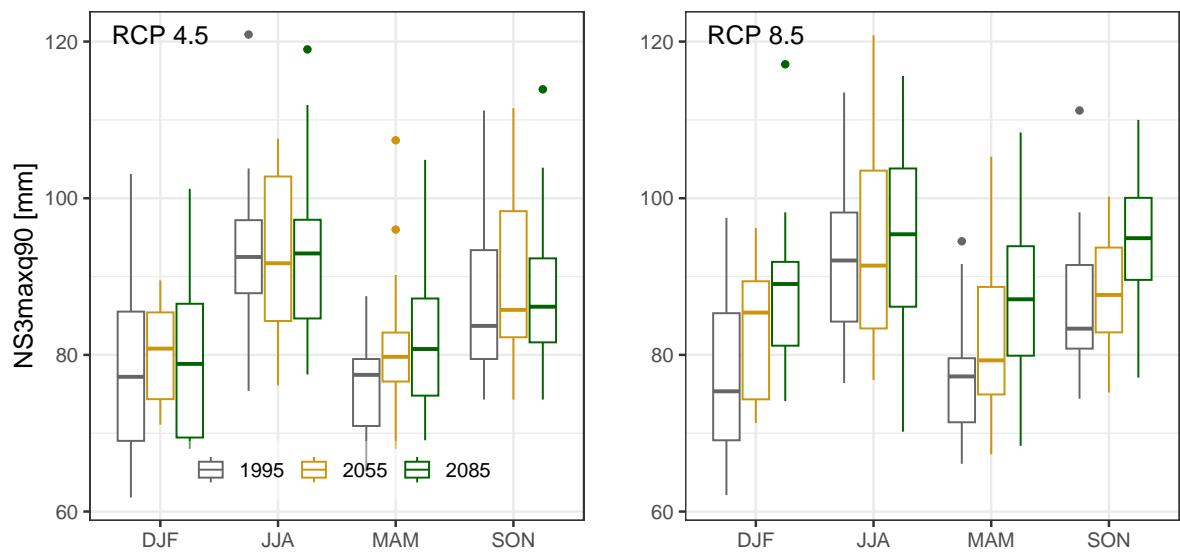


Fig. 2.18 : Valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 90 % des 16 chaînes de modèles respectives.

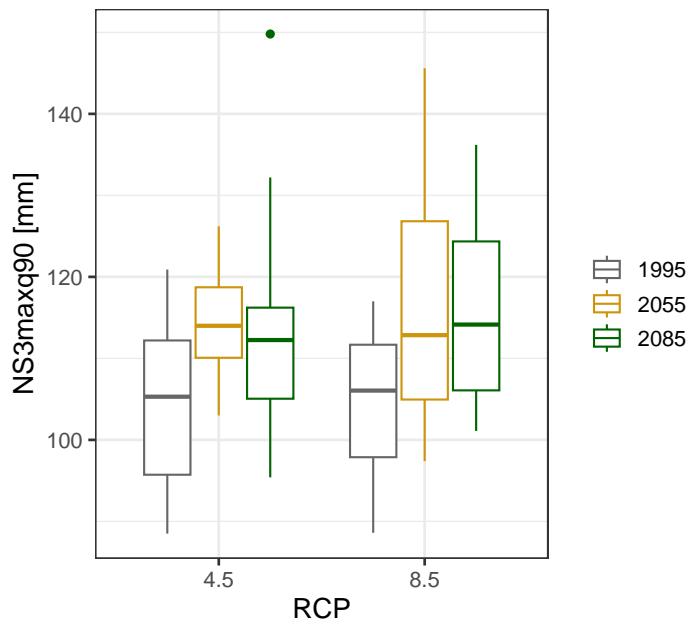


Fig. 2.19 : Valeurs maximales annuelles rares des précipitations sur 3 jours dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 90 % des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.8 Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours [mm/3d] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des plus grandes sommes annuelles et saisonnières de précipitations sur 3 jours par année individuelle. (2) À partir de la distribution des trente plus importantes précipitations sur 3 jours, la valeur qui est dépassée dans 5 % des cas et qui n'est pas atteinte dans 95 % des cas est déterminée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.71 : Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours [mm/3d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 113 | 101 | 99 | 105 | 119 | 140 |
| 2 | Année | RhiresD | 97 | 96 | 100 | 106 | 104 | 124 |
| 4 | Année | Δ% | 17 | 4 | -2 | 0 | 14 | 13 |
| 5 | DJF | CH2018 | 88 | 71 | 70 | 72 | 91 | 114 |
| 6 | DJF | RhiresD | 75 | 62 | 63 | 59 | 76 | 97 |
| 8 | DJF | Δ% | 18 | 14 | 11 | 22 | 20 | 18 |
| 9 | MAM | CH2018 | 86 | 76 | 72 | 82 | 91 | 104 |
| 10 | MAM | RhiresD | 85 | 85 | 80 | 90 | 85 | 99 |
| 12 | MAM | Δ% | 1 | -11 | -10 | -8 | 6 | 5 |
| 13 | JJA | CH2018 | 102 | 88 | 84 | 99 | 105 | 117 |
| 14 | JJA | RhiresD | 90 | 79 | 76 | 87 | 100 | 116 |
| 16 | JJA | Δ% | 13 | 11 | 10 | 14 | 5 | 1 |
| 17 | SON | CH2018 | 94 | 91 | 84 | 88 | 100 | 117 |
| 18 | SON | RhiresD | 87 | 85 | 81 | 88 | 87 | 91 |
| 20 | SON | Δ% | 9 | 8 | 3 | 0 | 15 | 29 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent dans l'ensemble bien les valeurs annuelles Rhi-resD. La qualité de la modélisation indique une configuration régionale avec de très bonnes modélisations dans les régions de basse altitude BasBros à PlaNor et des modélisations seulement suffisantes dans les régions les plus élevées du canton de Fribourg. D'un point de vue saisonnier, la qualité de la modélisation est seulement suffisante. Ce sont surtout les valeurs hivernales (DJF) qui sont reproduites de manière tout juste suffisante. D'un point de vue régional, les régions PlaSud et PreAlp sont moins bien modélisées que les autres régions.

Tab. 2.4.72 : Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours [mm/3d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées Rhi-resD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 114 | 103 | 99 | 108 | 119 | 144 |
| 2 | Année | RhiresD | 97 | 96 | 100 | 106 | 104 | 124 |
| 4 | Année | Δ% | 18 | 7 | -1 | 2 | 15 | 16 |
| 5 | DJF | CH2018 | 88 | 72 | 75 | 71 | 90 | 113 |
| 6 | DJF | RhiresD | 75 | 62 | 63 | 59 | 76 | 97 |
| 8 | DJF | Δ% | 18 | 15 | 18 | 20 | 19 | 17 |
| 9 | MAM | CH2018 | 87 | 79 | 75 | 83 | 91 | 107 |
| 10 | MAM | RhiresD | 85 | 85 | 80 | 90 | 85 | 99 |
| 12 | MAM | Δ% | 3 | -8 | -7 | -8 | 7 | 9 |
| 13 | JJA | CH2018 | 103 | 90 | 84 | 100 | 109 | 120 |
| 14 | JJA | RhiresD | 90 | 79 | 76 | 87 | 100 | 116 |
| 16 | JJA | Δ% | 14 | 14 | 12 | 15 | 9 | 3 |
| 17 | SON | CH2018 | 97 | 93 | 84 | 87 | 102 | 115 |
| 18 | SON | RhiresD | 87 | 85 | 81 | 88 | 87 | 91 |
| 20 | SON | Δ% | 12 | 9 | 4 | -2 | 18 | 27 |

Tout comme sous RCP 4.5, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent bien les valeurs annuelles RhiresD sous **RCP 8.5**. Les écarts les plus importants se situent à nouveau dans les régions PlaNor et PreAlp. Sur une base saisonnière, la qualité de la modélisation est dans l'ensemble suffisante. Seules les valeurs du printemps (MAM) présentent une bonne qualité. En ce qui concerne les régions, les différences sont moins importantes pour cet indicateur que pour les autres.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.73 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 12 | 10 | 12 | 15 | 13 | 6 |
| DJF | 10 | 13 | 13 | 4 | 9 | 7 |
| MAM | 3 | 2 | 1 | 0 | 2 | 9 |
| JJA | 4 | 4 | -1 | 0 | 2 | 4 |
| SON | 4 | 7 | 8 | 5 | 4 | 0 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 2.4.74 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 11 | 11 | 11 | 9 | 9 | 5 |
| DJF | 13 | 8 | 10 | 14 | 11 | 8 |
| MAM | 4 | 6 | 3 | 1 | 2 | 4 |
| JJA | 4 | 2 | 11 | 2 | 3 | 2 |
| SON | 8 | 11 | 5 | 7 | 10 | 6 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

RCP 4.5 : Les changements – tous des augmentations – des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours par rapport à la période de référence 1981–2010 sont globalement importants au niveau annuel. La région PreAlp constitue une exception avec des augmentations moyennes. D'un point de vue saisonnier, les valeurs augmentent toutes, à une seule exception près. En hiver (DJF), les augmentations sont importantes dans les régions de basse altitude BasBro et GraMar, alors qu'elles sont faibles à moyennes dans les autres régions situées à plus haute altitude. Au printemps (MAM) et en automne (SON), les augmentations sont faibles à moyennes. En été (JJA), on constate les plus petits écarts par rapport aux valeurs de la période de référence.

RCP 8.5 : D'un point de vue annuel, l'augmentation des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours est moyenne à importante. Une fois de plus, on constate une subdivision du canton en régions présentant d'importantes augmentations par rapport à la période de référence (BasBro, Gra-

Mar) et celles présentant des augmentations moyennes. Les valeurs saisonnières augmentent toutes. Les augmentations sont plus importantes en hiver et en automne.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.75 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 8 | 12 | 11 | 5 | 4 | 6 |
| DJF | 9 | 0 | 1 | 3 | 6 | 1 |
| MAM | 6 | 5 | 7 | 2 | 6 | -2 |
| JJA | 2 | 4 | 11 | -3 | 5 | 14 |
| SON | 9 | 9 | 10 | 7 | 8 | 8 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.76 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 15 | 21 | 16 | 14 | 13 | 7 |
| DJF | 10 | 19 | 12 | 10 | 12 | 6 |
| MAM | 17 | 19 | 19 | 22 | 15 | 9 |
| JJA | 1 | 1 | 11 | 0 | 3 | -1 |
| SON | 12 | 15 | 19 | 12 | 10 | 9 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : Les valeurs annuelles de cet indicateur augmentent toutes. L'augmentation est plus importante dans les régions de basse altitude que dans les régions de haute altitude du canton. D'un point de vue saisonnier, toutes les valeurs augmentent en hiver (DJF) et en automne (SON). Au printemps (MAM) et en été (JJA), le signal n'est pas uniforme, avec toutefois ici aussi une prédominance des augmentations.

RCP 8.5 : L'augmentation des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours est importante à très importante au niveau annuel (exception PreAlp : moyenne). Les augmentations dominent pour toutes les saisons et sont même importantes en hiver, au printemps et en automne. L'été se distingue nettement avec des changements généralement faibles par rapport à la période de référence. D'un point de

vue régional, la région PreAlp, c'est-à-dire la région la plus élevée du canton de Fribourg, se distingue par des changements « que » moyens et un changement faible.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

| | |
|---|--|
| +/- : faible augmentation/diminution | ++/- - : augmentation/diminution moyenne |
| +++/ - - - : augmentation/diminution importante | ++++/- - - - : augmentation/diminution très importante |

RCP 4.5

Tab. 2.4.77 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 2055 | Saisons | 6 | 7 | 7 | 5 | 5 | 6 |
| 2085 | Année | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 2085 | Saisons | 7 | 6 | 9 | 5 | 8 | 7 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.78 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | important | +++ | moyen | +++ | + | ± | ++ |
| vers 2085 | moyen | ++ | moyen | + | ± | ± | ++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.79 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 2055 | Saisons | 7 | 8 | 9 | 7 | 8 | 6 |
| 2085 | Année | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 2085 | Saisons | 10 | 10 | 12 | 11 | 10 | 7 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.80 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ++ | moyen | +++ | + | + | ++ |
| vers 2085 | important | +++ | important | +++ | +++ | ± | +++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

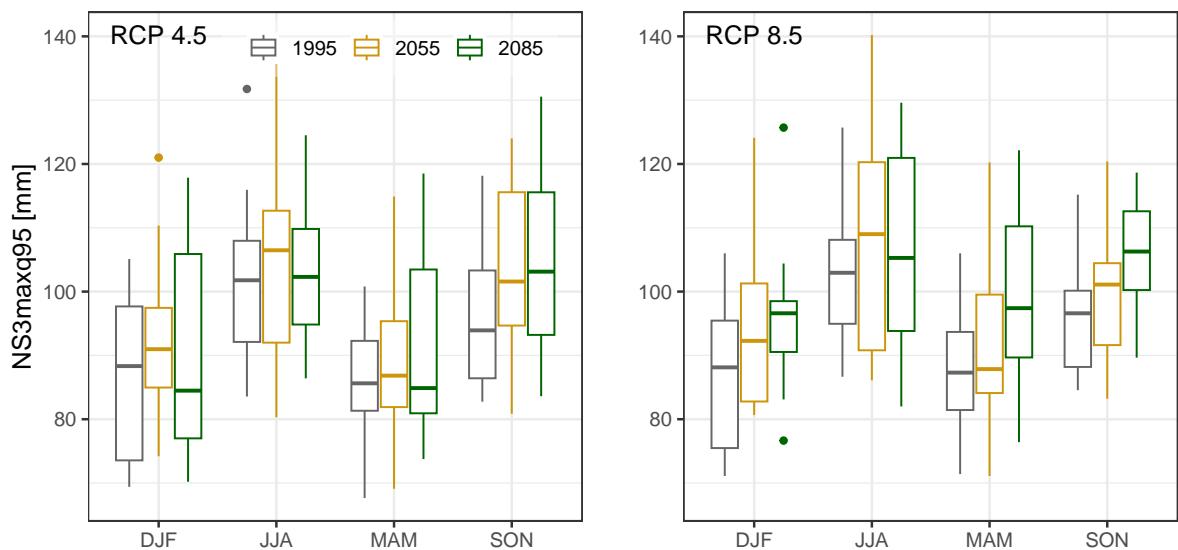


Fig. 2.20 : Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 95 % des 16 chaînes de modèles respectives.

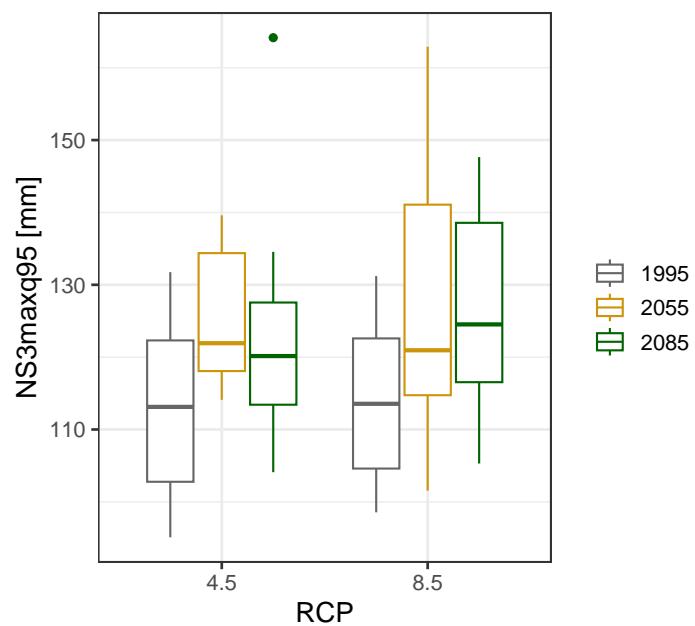


Fig. 2.21 : Valeurs maximales annuelles très rares des précipitations sur 3 jours dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 95 % des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.9 Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours [mm/3d] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des plus grandes sommes annuelles et saisonnières de précipitations sur 3 jours par année individuelle. (2) À partir de la distribution des trente plus importantes précipitations sur 3 jours, la valeur qui est dépassée dans 1 % des cas et qui n'est pas atteinte dans 99 % des cas est déterminée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.81 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours [mm/3d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 132 | 111 | 106 | 119 | 140 | 161 |
| Année | RhiresD | 109 | 111 | 145 | 119 | 114 | 140 |
| Année | Δ | 23 | -1 | -39 | 0 | 26 | 22 |
| Année | Δ% | 21 | -1 | -27 | 0 | 22 | 16 |
| DJF | CH2018 | 96 | 77 | 77 | 77 | 98 | 131 |
| DJF | RhiresD | 81 | 69 | 71 | 67 | 86 | 116 |
| DJF | Δ | 15 | 8 | 6 | 10 | 12 | 16 |
| DJF | Δ% | 19 | 12 | 9 | 15 | 14 | 14 |
| MAM | CH2018 | 94 | 87 | 85 | 97 | 99 | 123 |
| MAM | RhiresD | 95 | 88 | 82 | 95 | 101 | 109 |
| MAM | Δ | -2 | -1 | 4 | 2 | -2 | 15 |
| MAM | Δ% | -2 | -1 | 4 | 2 | -2 | 14 |
| JJA | CH2018 | 117 | 105 | 99 | 114 | 127 | 140 |
| JJA | RhiresD | 108 | 99 | 100 | 107 | 112 | 140 |
| JJA | Δ | 9 | 6 | -1 | 7 | 14 | 0 |
| JJA | Δ% | 9 | 6 | -1 | 6 | 13 | 0 |
| SON | CH2018 | 107 | 98 | 93 | 97 | 114 | 137 |
| SON | RhiresD | 92 | 106 | 140 | 113 | 89 | 110 |
| SON | Δ | 15 | -8 | -47 | -16 | 25 | 27 |
| SON | Δ% | 16 | -8 | -34 | -14 | 29 | 24 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 ne reproduisent dans l'ensemble que de manière suffisante les valeurs annuelles RhiresD. Dans les régions GraMar et PlaSud, la qualité de la modélisation est même insuffisante. Sur une base saisonnière également, la qualité de la modélisation n'est dans l'ensemble que suffisante. Cependant, de très grandes différences apparaissent avec une très bonne modélisation au printemps (MAM), une bonne modélisation en hiver (DJF) et en été (JJA) et une modélisation insuffisante en automne (SON). Au niveau régional, la qualité de la modélisation est bonne (PlaNor et BasBro) à suffisante.

Tab. 2.4.82 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours [mm/3d] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 134 | 112 | 111 | 125 | 140 | 164 |
| Année | RhiresD | 109 | 111 | 145 | 119 | 114 | 140 |
| Année | Δ | 24 | 1 | -34 | 6 | 26 | 25 |
| Année | Δ% | 22 | 1 | -24 | 5 | 23 | 18 |
| DJF | CH2018 | 103 | 80 | 82 | 79 | 111 | 135 |
| DJF | RhiresD | 81 | 69 | 71 | 67 | 86 | 116 |
| DJF | Δ | 22 | 11 | 11 | 12 | 26 | 20 |
| DJF | Δ% | 27 | 16 | 16 | 18 | 30 | 17 |
| MAM | CH2018 | 103 | 90 | 87 | 98 | 108 | 124 |
| MAM | RhiresD | 95 | 88 | 82 | 95 | 101 | 109 |
| MAM | Δ | 8 | 2 | 5 | 2 | 7 | 16 |
| MAM | Δ% | 8 | 3 | 6 | 2 | 7 | 14 |
| JJA | CH2018 | 116 | 105 | 100 | 112 | 128 | 138 |
| JJA | RhiresD | 108 | 99 | 100 | 107 | 112 | 140 |
| JJA | Δ | 8 | 6 | 0 | 5 | 15 | -2 |
| JJA | Δ% | 8 | 6 | 0 | 4 | 14 | -2 |
| SON | CH2018 | 109 | 98 | 91 | 98 | 113 | 136 |
| SON | RhiresD | 92 | 106 | 140 | 113 | 89 | 110 |
| SON | Δ | 17 | -8 | -48 | -15 | 24 | 26 |
| SON | Δ% | 18 | -7 | -35 | -13 | 27 | 24 |

Sous **RCP 8.5**, les valeurs modélisées CH2018 ne reproduisent à nouveau que de manière suffisante les valeurs annuelles RhiresD. Dans les régions GarMar et PlaSud, la qualité de la modélisation est à nouveau insuffisante. Même sur une base saisonnière, la qualité de la modélisation n'est que suffisante. De bons résultats de modélisation au printemps (MAM) et en été (JJA) contrastent avec des résultats insuffisants en hiver (DJF) et en automne (SON). D'un point de vue régional, la qualité de la modélisation est globalement insuffisante dans la région PlaSud, suffisante dans la région GraMar et bonne dans les autres régions.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.83 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|--------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 5 | 20 | 13 | 11 | 3 | 9 |
| DJF | 7 | 22 | 23 | 12 | 10 | 5 |
| MAM | 16 | 10 | 15 | 11 | 15 | 11 |
| JJA | 5 | 6 | 1 | 4 | 7 | 6 |
| SON | 8 | 22 | 20 | 14 | 8 | -5 |
| ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

Tab. 2.4.84 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|--------------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 11 | 18 | 11 | 9 | 6 | 5 |
| DJF | 1 | 5 | 3 | 13 | 4 | -2 |
| MAM | 4 | 6 | 4 | 7 | 2 | 0 |
| JJA | 5 | 11 | 5 | 6 | 3 | 2 |
| SON | 10 | 14 | 11 | 14 | 2 | 5 |
| ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

RCP 4.5 : Sur une base annuelle, toutes les valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours augmentent par rapport à la période de référence 1981–2010. L'augmentation est très importante dans la région BasBro, mais seulement faible dans la région PlaSud. D'un point de vue saisonnier, les augmentations sont majoritairement importantes à très importantes en hiver (DJF) et au printemps (MAM), alors qu'elles sont faibles à moyennes en été (JJA). Les résultats sont très différents en automne, avec de très importantes augmentations dans les régions de basse altitude et même une faible diminution dans la région PreAlp.

RCP 8.5 : Les changements des valeurs annuelles sont tous positifs. Il y a un contraste entre les régions de basse altitude qui connaissent d'importantes augmentations et les régions de haute altitude qui connaissent des augmentations moyennes. À l'exception de l'hiver dans la région PreAlp, les valeurs saisonnières augmentent toutes. Les changements sont plus importants en été et en automne qu'au printemps.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.85 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 11 | 21 | 25 | 9 | 8 | 12 |
| DJF | 6 | 13 | 7 | 7 | 5 | 2 |
| MAM | 9 | 10 | 9 | 7 | 6 | 1 |
| JJA | 13 | 12 | 23 | 9 | 13 | 7 |
| SON | 25 | 25 | 12 | 30 | 27 | 14 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 25 [%]

Tab. 2.4.86 : Changements relatifs des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 10 | 20 | 22 | 12 | 7 | 6 |
| DJF | 8 | 10 | 4 | 2 | 3 | 0 |
| MAM | 16 | 24 | 24 | 19 | 16 | 15 |
| JJA | 4 | 8 | 12 | 3 | 7 | 4 |
| SON | 11 | 25 | 25 | 15 | 9 | 4 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 25 [%]

RCP 4.5 : Sur une base annuelle, les valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours présentent des changements importants, voire très importants par rapport à la période de référence. Il s'agit dans tous les cas d'augmentations. L'augmentation la plus marquée (+25 %) est observée dans la région GraMar. Une fois de plus, les deux régions de basse altitude BasBro et GraMar se distinguent nettement des régions situées à plus haute altitude. Au niveau des saisons, les augmentations sont également toutes positives, surtout en été (JJA) et en automne (SON). Les augmentations des valeurs par rapport à la période de référence sont généralement les plus faibles dans la région PreAlp.

RCP 8.5 : Pour les valeurs annuelles, les augmentations présentent un schéma similaire à celui observé sous RCP 4.5. Par rapport à la période de référence, les valeurs changent de manière très importante dans les

régions de basse altitude et dans une mesure moyenne à importante dans les régions de haute altitude. Toutes les valeurs augmentent également au niveau des saisons. Les augmentations sont plus faibles en hiver (DJF) et en été (JJA) qu'au printemps (MAM) et en automne (SON). Les augmentations les plus importantes se produisent dans les régions de basse altitude BasBro et GraMar.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- - : augmentation/diminution moyenne

+++/ - - - : augmentation/diminution importante

++++/- - - - : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Il convient ici de rappeler que la qualité de la modélisation de cet indicateur peut également être insuffisante en fonction des saisons et des régions.

Tab. 2.4.87 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 2 | 4 | 3 | 3 | 1 | 2 |
| 2055 | Saisons | 9 | 13 | 12 | 10 | 10 | 9 |
| 2085 | Année | 3 | 4 | 4 | 2 | 2 | 3 |
| 2085 | Saisons | 11 | 13 | 11 | 10 | 11 | 7 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.88 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|------|
| vers 2055 | moyen | ++ | important | +++ | +++ | + | ± |
| vers 2085 | important | +++ | important | ++ | ++ | +++ | ++++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.89 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 | 2 |
| 2055 | Saisons | 7 | 10 | 7 | 10 | 4 | 5 |
| 2085 | Année | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| 2085 | Saisons | 9 | 13 | 12 | 8 | 8 | 6 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.90 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ++ | moyen | ± | + | ++ | ++ |
| vers 2085 | important | +++ | moyen | + | +++ | ++ | +++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

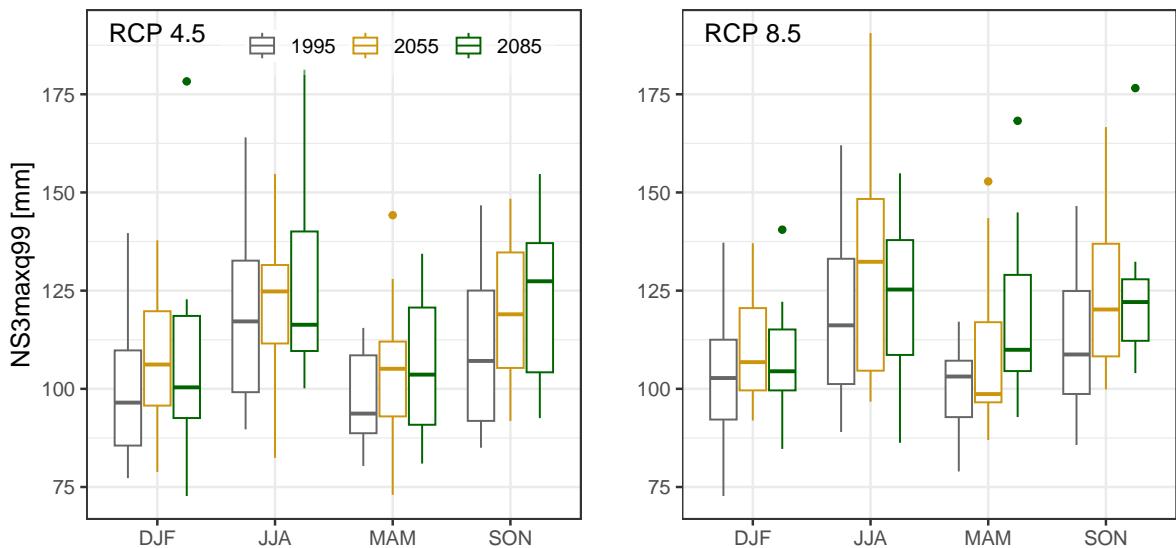


Fig. 2.22 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 99 % des 16 chaînes de modèles respectives.

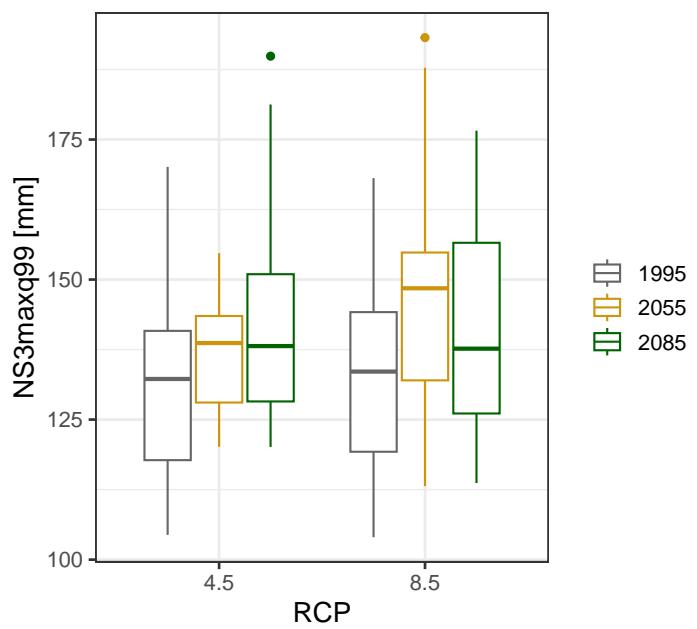


Fig. 2.23 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 99 % des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.10 Valeurs minimales annuelles moyennes de la somme des précipitations sur 3 semaines

Définition de l'indicateur

Valeurs minimales annuelles moyennes de la somme des précipitations sur 3 semaines [mm/3 semaines] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche par chaîne de modèles : (1) Pour chaque année individuelle : addition des précipitations journalières sur 21 jours consécutifs [mm/3 semaines] dans une fenêtre de temps glissante décalée d'un jour à chaque fois. (2) Détermination des plus petites sommes annuelles ainsi que des plus petites sommes saisonnières sur 3 semaines. (3) Calcul de la moyenne des trente valeurs des années individuelles pour obtenir la valeur de l'indicateur.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.91 : Valeurs minimales annuelles moyennes de la somme des précipitations sur 3 semaines [mm/3 semaines] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 2 | Année | RhiresD | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| 4 | Année | Δ% | 2 | 66 | 96 | 77 | 6 | -9 |
| 5 | DJF | CH2018 | 8 | 6 | 7 | 6 | 7 | 10 |
| 6 | DJF | RhiresD | 9 | 6 | 6 | 7 | 9 | 10 |
| 8 | DJF | Δ% | -13 | 0 | 9 | -11 | -17 | 3 |
| 9 | MAM | CH2018 | 13 | 8 | 9 | 10 | 13 | 18 |
| 10 | MAM | RhiresD | 13 | 7 | 7 | 10 | 13 | 18 |
| 12 | MAM | Δ% | -5 | 15 | 28 | -3 | -1 | -1 |
| 13 | JJA | CH2018 | 19 | 13 | 14 | 16 | 18 | 25 |
| 14 | JJA | RhiresD | 24 | 17 | 16 | 19 | 22 | 31 |
| 16 | JJA | Δ% | -20 | -22 | -15 | -14 | -17 | -19 |
| 17 | SON | CH2018 | 12 | 9 | 10 | 10 | 11 | 15 |
| 18 | SON | RhiresD | 13 | 8 | 7 | 10 | 14 | 17 |
| 20 | SON | Δ% | -12 | 8 | 38 | 0 | -17 | -12 |

Sous RCP 4.5, les données d'observation RhiresD ne sont dans l'ensemble pas suffisamment bien reproduites par le modèle. Certes, certaines combinaisons entre région et saison présentent des qualités de modélisation tout à fait bonnes, voire très bonnes dans certains cas, mais les variations de la qualité de la modélisation sont telles qu'une comparaison des données n'est pas pertinente.

Tab. 2.4.92 : Valeurs minimales annuelles moyennes de la somme des précipitations sur 3 semaines [mm/3 semaines] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 4 |
| 2 | Année | RhiresD | 3 | 1 | 1 | 1 | 2 | 4 |
| 4 | Année | Δ% | 34 | 68 | 110 | 73 | 11 | 2 |
| 5 | DJF | CH2018 | 8 | 6 | 7 | 7 | 8 | 11 |
| 6 | DJF | RhiresD | 9 | 6 | 6 | 7 | 9 | 10 |
| 8 | DJF | Δ% | -11 | 8 | 15 | -6 | -14 | 4 |
| 9 | MAM | CH2018 | 12 | 8 | 9 | 10 | 13 | 17 |
| 10 | MAM | RhiresD | 13 | 7 | 7 | 10 | 13 | 18 |
| 12 | MAM | Δ% | -8 | 19 | 35 | -1 | -6 | -7 |
| 13 | JJA | CH2018 | 19 | 13 | 15 | 16 | 18 | 25 |
| 14 | JJA | RhiresD | 24 | 17 | 16 | 19 | 22 | 31 |
| 16 | JJA | Δ% | -19 | -23 | -11 | -16 | -17 | -19 |
| 17 | SON | CH2018 | 12 | 9 | 10 | 10 | 11 | 14 |
| 18 | SON | RhiresD | 13 | 8 | 7 | 10 | 14 | 17 |
| 20 | SON | Δ% | -9 | 5 | 33 | -2 | -19 | -16 |

Avec ce scénario également, la qualité de la modélisation est dans l'ensemble insuffisante.

Conclusion de l'évaluation des modèles

Au vu de la modélisation insuffisante des valeurs de référence de la période d'observation, nous renonçons ici à présenter les résultats.

2.4.11 Nombre moyen de jours sans précipitations par année

Définition de l'indicateur

Nombre moyen de jours sans précipitations par année [d/dt] sur une période de 30 ans, un «jour sans précipitations» étant défini comme jour avec moins de 1 mm de précipitations.

Démarche : (1) Détermination du nombre de jours sans précipitations par année et par saison. (2) Calcul de la moyenne à partir de la répartition du nombre de jours sans précipitations.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence RhiresD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.93 : Nombre moyen de jours sans précipitations par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 219 | 238 | 235 | 232 | 224 | 213 |
| 2 | Année | RhiresD | 220 | 235 | 235 | 232 | 224 | 213 |
| 4 | Année | Δ% | -1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | DJF | CH2018 | 55 | 58 | 58 | 58 | 55 | 52 |
| 6 | DJF | RhiresD | 56 | 60 | 59 | 60 | 57 | 54 |
| 8 | DJF | Δ% | -3 | -2 | -2 | -2 | -4 | -2 |
| 9 | MAM | CH2018 | 53 | 58 | 58 | 56 | 53 | 50 |
| 10 | MAM | RhiresD | 54 | 60 | 60 | 57 | 54 | 51 |
| 12 | MAM | Δ% | -1 | -2 | -3 | -1 | -2 | -2 |
| 13 | JJA | CH2018 | 54 | 60 | 60 | 58 | 55 | 52 |
| 14 | JJA | RhiresD | 54 | 58 | 58 | 56 | 54 | 50 |
| 16 | JJA | Δ% | 2 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 |
| 17 | SON | CH2018 | 57 | 60 | 60 | 60 | 58 | 56 |
| 18 | SON | RhiresD | 58 | 61 | 60 | 62 | 58 | 57 |
| 20 | SON | Δ% | -1 | -1 | -1 | -3 | 0 | -2 |

La qualité de la modélisation est très bonne sous RCP 4.5. Il est à noter que toutes les valeurs sont très bien reproduites.

Tab. 2.4.94 : Nombre moyen de jours sans précipitations par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées RhiresD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 220 | 238 | 234 | 233 | 223 | 212 |
| 2 | Année | RhiresD | 220 | 235 | 235 | 232 | 224 | 213 |
| 4 | Année | Δ% | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | DJF | CH2018 | 55 | 58 | 58 | 58 | 56 | 54 |
| 6 | DJF | RhiresD | 56 | 60 | 59 | 60 | 57 | 54 |
| 8 | DJF | Δ% | -3 | -2 | -1 | -2 | -2 | 0 |
| 9 | MAM | CH2018 | 52 | 58 | 58 | 56 | 52 | 50 |
| 10 | MAM | RhiresD | 54 | 60 | 60 | 57 | 54 | 51 |
| 12 | MAM | Δ% | -2 | -3 | -2 | -2 | -3 | -3 |
| 13 | JJA | CH2018 | 54 | 60 | 60 | 58 | 56 | 52 |
| 14 | JJA | RhiresD | 54 | 58 | 58 | 56 | 54 | 50 |
| 16 | JJA | Δ% | 2 | 2 | 3 | 4 | 2 | 2 |
| 17 | SON | CH2018 | 58 | 60 | 60 | 60 | 58 | 57 |
| 18 | SON | RhiresD | 58 | 61 | 60 | 62 | 58 | 57 |
| 20 | SON | Δ% | 0 | -2 | -1 | -3 | 1 | 0 |

Sous **RCP 8.5** également, toutes les combinaisons spatio-temporelles sont très bien reproduites.

Changements vers 2055

Dans ce chapitre, le code de couleurs utilisé pour représenter les changements est modifié. Les tons rouges signifient une augmentation du nombre de jours sans précipitations. Il fait donc plus sec. Les tons bleus signifient une diminution des jours sans précipitations. Le climat devient plus humide.

Tab. 2.4.95 : Changements relatifs du nombre moyen de jours sans précipitations par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| DJF | 0 | -2 | -3 | -1 | -1 | 0 |
| MAM | -1 | 0 | -2 | -1 | -1 | -2 |
| JJA | 8 | 8 | 7 | 9 | 7 | 7 |
| SON | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.96 : Changements relatifs du nombre moyen de jours sans précipitations par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 |
| DJF | -4 | -4 | -4 | -4 | -4 | -3 |
| MAM | 0 | -1 | -2 | -2 | 1 | 0 |
| JJA | 8 | 7 | 8 | 8 | 8 | 9 |
| SON | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 5 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : Le nombre de jours sans précipitations ne change pratiquement pas par rapport à la période de référence 1981–2010. Uniquement en été (JJA), le nombre de jours sans précipitations augmente dans une mesure moyenne.

RCP 8.5 : Sous ce scénario également, le nombre de jours sans précipitations ne change que très peu par rapport à la période de référence. Il en résulte un modèle spatio-temporel très similaire à celui du scénario RCP 4.5.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.97 : Changements relatifs du nombre moyen de jours sans précipitations par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| DJF | -2 | -3 | -4 | -2 | -2 | -1 |
| MAM | -2 | -3 | -3 | -3 | -2 | -3 |
| JJA | 7 | 7 | 6 | 8 | 9 | 7 |
| SON | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.98 : Changements relatifs du nombre moyen de jours sans précipitations par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| DJF | -5 | -5 | -6 | -5 | -4 | -5 |
| MAM | 0 | -2 | -1 | -1 | 0 | -2 |
| JJA | 20 | 14 | 15 | 17 | 20 | 20 |
| SON | 7 | 3 | 5 | 3 | 7 | 7 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : Tant les valeurs annuelles que les changements saisonniers sont faibles. En été, les valeurs présentent toutes une augmentation moyenne du nombre de jours sans précipitations.

RCP 8.5 : L'évolution des valeurs annuelles par rapport à la période de référence 1981–2010 est toujours faible, mais dans l'ensemble un peu plus importante que sous RCP 4.5. Sur une base saisonnière, des contours clairs apparaissent maintenant pour la première fois avec des diminutions moyennes du nombre de jours sans précipitations en hiver (DJF) et des augmentations importantes à très importantes du nombre de jours sans précipitations en été (JJA).

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- : augmentation/diminution moyenne

+++/--- : augmentation/diminution importante

++++/---- : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Tab. 2.4.99 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours sans précipitations par année sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 2085 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2085 | Saisons | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.100 : Évaluation finale des écarts du nombre moyen de jours sans précipitations sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne. + signifie ici que le nombre de jours sans précipitations augmente, c'est-à-dire que le climat devient plus sec.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|---------------|---|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | faible | + | faible | - | - | ++ | + |
| vers 2085 | faible | + | faible | - | - | ++ | + |

RCP 8.5

Tab. 2.4.101 : Synthèse des changements du nombre de jours sans précipitations sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2055 | Saisons | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 6 |
| 2085 | Année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 2085 | Saisons | 9 | 7 | 8 | 7 | 8 | 9 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.102 : Évaluation finale des écarts du nombre moyen de jours sans précipitations sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|---------------|---|---------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | faible | + | moyen | - | ± | ++ | + |
| vers 2085 | faible | + | moyen | -- | - | +++ | ++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

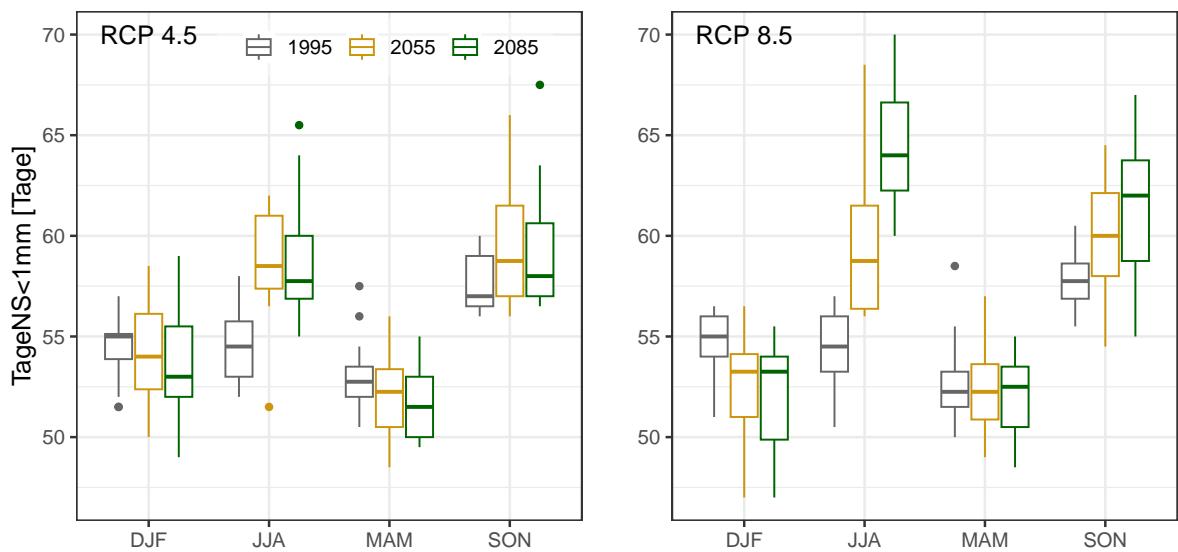


Fig. 2.24 : Nombre moyen de jours sans précipitations par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

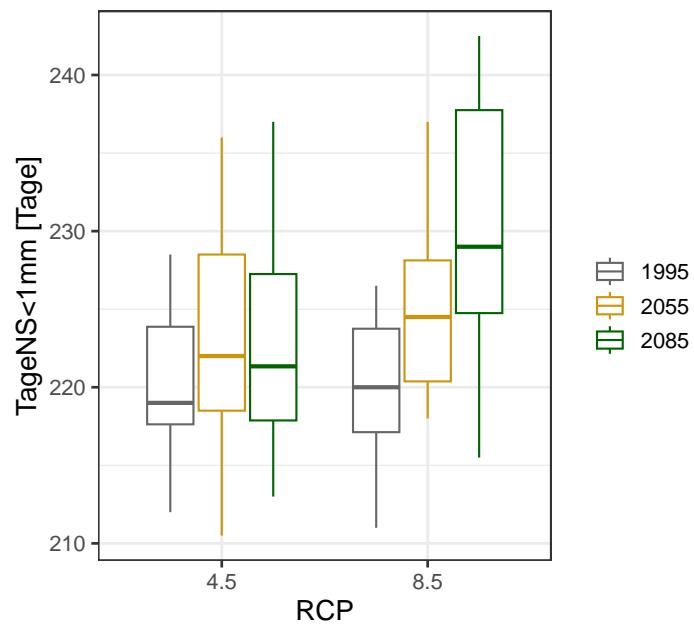


Fig. 2.25 : Nombre moyen de jours sans précipitations par année dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.12 Température moyenne de l'air

Définition de l'indicateur

Température moyenne de l'air par saison et par année [°C] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des températures moyennes annuelles et saisonnières par année individuelle.
(2) Calcul de la moyenne de ces valeurs annuelles individuelles pour obtenir la moyenne par période.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement. Les valeurs seuils pour l'évaluation de la qualité de la modélisation se basent sur les valeurs absolues qui ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

Tab. 2.4.103 : Température moyenne de l'air [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 7.9 | 9.3 | 9.9 | 8.9 | 8.1 | 5.8 |
| 2 | Année | TabsD | 8.0 | 9.4 | 10.0 | 9.0 | 8.2 | 5.8 |
| 3 | Année | Δ | -0.1 | -0.1 | -0.2 | -0.1 | -0.1 | 0.1 |
| 5 | DJF | CH2018 | 0.2 | 1.3 | 1.8 | 0.9 | 0.4 | -1.3 |
| 6 | DJF | TabsD | 0.2 | 1.3 | 1.8 | 0.9 | 0.4 | -1.2 |
| 7 | DJF | Δ | 0.0 | 0.0 | 0.0 | -0.1 | -0.1 | -0.1 |
| 9 | MAM | CH2018 | 7.0 | 8.7 | 9.3 | 8.3 | 7.3 | 4.4 |
| 10 | MAM | TabsD | 7.6 | 9.2 | 9.9 | 8.8 | 7.9 | 4.9 |
| 11 | MAM | Δ | -0.5 | -0.5 | -0.6 | -0.5 | -0.6 | -0.5 |
| 13 | JJA | CH2018 | 16.2 | 17.8 | 18.5 | 17.4 | 16.4 | 13.6 |
| 14 | JJA | TabsD | 16.0 | 17.6 | 18.4 | 17.2 | 16.2 | 13.3 |
| 15 | JJA | Δ | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| 17 | SON | CH2018 | 8.4 | 9.7 | 10.2 | 9.3 | 8.6 | 6.7 |
| 18 | SON | TabsD | 8.3 | 9.5 | 10.0 | 9.1 | 8.5 | 6.4 |
| 19 | SON | Δ | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.3 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 de la température moyenne annuelle sont très bien reproduites dans toutes les régions. Les différences ne dépassent pas 0,1 °C. Au niveau des saisons également, la qualité de la modélisation est très bonne dans l'ensemble. Cependant, le modèle ne reproduit que de manière suffisante les observations du mois de mai. D'un point de vue régional, la qualité de la modélisation est très bonne, sauf dans la région PreAlp (bonne).

Tab. 2.4.104 : Température moyenne de l'air [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 7.9 | 9.4 | 9.9 | 8.9 | 8.2 | 5.8 |
| 2 | Année | TabsD | 8.0 | 9.4 | 10.0 | 9.0 | 8.2 | 5.8 |
| 3 | Année | Δ | 0.0 | 0.0 | -0.1 | -0.1 | -0.1 | 0.1 |
| 5 | DJF | CH2018 | 0.1 | 1.2 | 1.7 | 0.8 | 0.2 | -1.4 |
| 6 | DJF | TabsD | 0.2 | 1.3 | 1.8 | 0.9 | 0.4 | -1.2 |
| 7 | DJF | Δ | -0.1 | -0.1 | -0.1 | -0.2 | -0.2 | -0.2 |
| 9 | MAM | CH2018 | 7.0 | 8.7 | 9.3 | 8.3 | 7.3 | 4.5 |
| 10 | MAM | TabsD | 7.6 | 9.2 | 9.9 | 8.8 | 7.9 | 4.9 |
| 11 | MAM | Δ | -0.5 | -0.5 | -0.6 | -0.5 | -0.6 | -0.5 |
| 13 | JJA | CH2018 | 16.2 | 17.9 | 18.5 | 17.5 | 16.5 | 13.6 |
| 14 | JJA | TabsD | 16.0 | 17.6 | 18.4 | 17.2 | 16.2 | 13.3 |
| 15 | JJA | Δ | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |
| 17 | SON | CH2018 | 8.5 | 9.7 | 10.1 | 9.3 | 8.7 | 6.7 |
| 18 | SON | TabsD | 8.3 | 9.5 | 10.0 | 9.1 | 8.5 | 6.4 |
| 19 | SON | Δ | 0.2 | 0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.3 |

Sous **RCP 8.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent à nouveau très bien les valeurs annuelles TabsD. Sur une base saisonnière, la qualité de la modélisation est dans l'ensemble un peu moins bonne que sur une base annuelle, mais elle reste bonne. Au printemps (MAM), la qualité de la modélisation n'est que suffisante – comme sous RCP 4.5. D'un point de vue régional, les régions PlaSud et PreAlp, situées en altitude, sont bien modélisées, les autres régions le sont très bien.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.105 : Changements absolus de la température moyenne de l'air dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1.6 | 1.5 | 1.6 | 1.5 | 1.6 | 1.7 |
| DJF | 1.9 | 1.8 | 1.6 | 2.0 | 1.9 | 1.9 |
| MAM | 1.5 | 1.3 | 1.4 | 1.4 | 1.5 | 1.7 |
| JJA | 1.8 | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 1.8 | 1.9 |
| SON | 1.6 | 1.7 | 1.7 | 1.7 | 1.6 | 1.5 |

[-3 -2 -1 1 2 3 °C]

Tab. 2.4.106 : Changements absolus de la température moyenne de l'air dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2.4 | 2.3 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 |
| DJF | 2.1 | 2.1 | 2.0 | 2.2 | 2.2 | 2.2 |
| MAM | 1.9 | 1.7 | 1.7 | 1.8 | 1.9 | 2.1 |
| JJA | 2.3 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.3 | 2.6 |
| SON | 2.5 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.5 | 2.5 |

[-3 -2 -1 1 2 3 °C]

RCP 4.5 : Le réchauffement par rapport à la période de référence 1981–2010 dans le canton de Fribourg est très similaire, tant au niveau saisonnier que régional. Sur une base annuelle et en moyenne cantonale, cette augmentation est de 1,6 °C et varie entre 1,5 et 1,9 °C selon les saisons. L'augmentation de la température est la plus faible au printemps (MAM) et la plus importante en hiver (DJF). Au niveau des régions, la fourchette des valeurs est légèrement plus grande et se situe entre 1,3 et 2,0 °C.

RCP 8.5 : L'augmentation de la température moyenne annuelle est plus élevée de 0,8 °C en moyenne cantonale par rapport au scénario RCP 4.5. L'augmentation de la température est à nouveau la plus faible au printemps (MAM). Contrairement au scénario RCP 4.5, elle est la plus importante en automne (SON). Les résultats démontrent que l'augmentation de la température est corrélée à l'altitude des régions.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.107 : Changements absolus de la température moyenne de l'air dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 2.0 | 2.2 | 2.3 |
| DJF | 2.2 | 2.3 | 2.1 | 2.3 | 2.2 | 2.1 |
| MAM | 1.9 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 2.0 | 2.0 |
| JJA | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.1 | 2.3 |
| SON | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 2.1 | 2.1 | 2.1 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

Tab. 2.4.108 : Changements absolus de la température moyenne de l'air dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 4.2 | 4.0 | 3.9 | 4.0 | 4.2 | 4.4 |
| DJF | 4.1 | 4.0 | 3.8 | 4.1 | 4.3 | 4.2 |
| MAM | 3.6 | 3.3 | 3.3 | 3.3 | 3.6 | 4.1 |
| JJA | 4.3 | 4.2 | 4.1 | 4.1 | 4.2 | 4.7 |
| SON | 4.0 | 3.9 | 3.9 | 3.9 | 4.0 | 4.1 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

RCP 4.5 : Sur l'ensemble du canton, l'augmentation moyenne de la température annuelle est de 2,1 °C. Le réchauffement par rapport à la période de référence 1981–2010 est plus important dans les régions de haute altitude que dans les régions de basse altitude. D'un point de vue saisonnier, l'augmentation de la température est la plus faible au printemps (MAM) et la plus importante en hiver (DJF).

RCP 8.5 : On remarque la très forte augmentation des températures dans tout le canton par rapport à la période de référence 1981–2010. Sur l'ensemble du canton, la moyenne annuelle de la température de l'air augmente de 4,2 °C par rapport à la période de référence 1981–2010. Cette augmentation varie entre 3,6 et 4,3 °C selon les saisons. Le réchauffement est à nouveau le plus important dans les régions PlaSud et PreAlp.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

| | |
|--|--|
| +/- : faible augmentation/diminution | ++/- - : augmentation/diminution moyenne |
| +++/- - - : augmentation/diminution importante | ++++/- - - - : augmentation/diminution très importante |

L'évaluation des écarts de la température de l'air par rapport à la période de référence 1981–2010 se base sur des différences absolues de température. Il est à noter que les valeurs seuils nécessaires à cet effet ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

RCP 4.5

Tab. 2.4.109 : Synthèse des changements de la température moyenne de l'air sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 2055 | Saisons | 8 | 8 | 8 | 9 | 8 | 8 |
| 2085 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2085 | Saisons | 11 | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.110 : Évaluation finale des écarts de la température moyenne de l'air sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | moyen | ++ | moyen | ++ | ++ | ++ | ++ |
| vers 2085 | important | +++ | important | +++ | ++ | +++ | +++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.111 : Synthèse des changements de la température moyenne de l'air sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2055 | Saisons | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 12 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Saisons | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.112 : Évaluation finale des écarts de la température moyenne de l'air sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|-----------------------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| vers 2055 | important | +++ | important | +++ | ++ | +++ | +++ |
| vers 2085 | très important | ++++ | très important | ++++ | ++++ | ++++ | ++++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

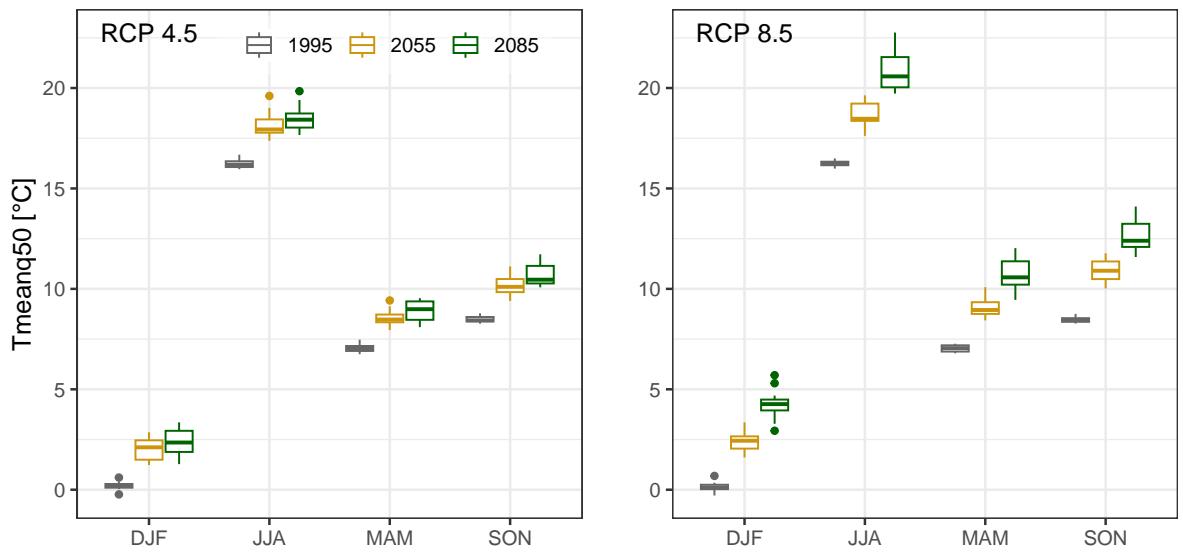


Fig. 2.26 : Températures moyennes de l'air par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

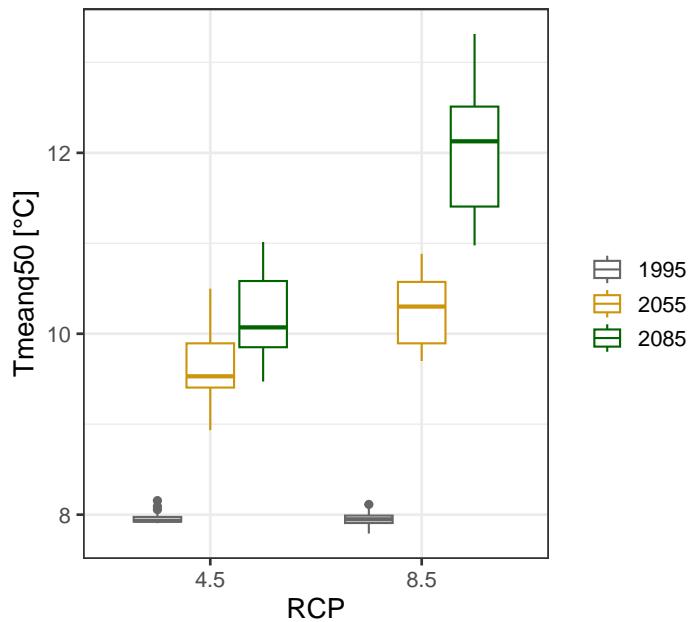


Fig. 2.27 : Températures moyennes annuelles de l'air dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.13 Valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière [°C] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des températures maximales annuelles et saisonnières pour chaque année individuelle. (2) Calcul de la moyenne de ces valeurs maximales des années individuelles pour obtenir la moyenne par période.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement. Les valeurs seuils pour l'évaluation de la qualité de la modélisation se basent sur les valeurs absolues qui ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

Tab. 2.4.113 : Valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 22.5 | 24.0 | 24.5 | 23.6 | 22.9 | 20.3 |
| 2 | Année | TabsD | 22.3 | 24.1 | 24.7 | 23.5 | 23.0 | 20.0 |
| 3 | Année | Δ | 0.2 | -0.1 | -0.2 | 0.1 | -0.1 | 0.3 |
| 5 | DJF | CH2018 | 8.3 | 9.4 | 9.5 | 9.2 | 8.7 | 6.8 |
| 6 | DJF | TabsD | 8.1 | 9.5 | 9.4 | 9.5 | 8.8 | 6.6 |
| 7 | DJF | Δ | 0.2 | -0.1 | 0.1 | -0.3 | -0.1 | 0.2 |
| 9 | MAM | CH2018 | 16.3 | 18.0 | 18.9 | 17.7 | 16.6 | 13.5 |
| 10 | MAM | TabsD | 17.4 | 19.0 | 19.3 | 18.6 | 17.9 | 15.1 |
| 11 | MAM | Δ | -1.1 | -0.9 | -0.4 | -0.8 | -1.4 | -1.7 |
| 13 | JJA | CH2018 | 22.5 | 24.0 | 24.5 | 23.6 | 22.9 | 20.3 |
| 14 | JJA | TabsD | 22.2 | 24.1 | 24.7 | 23.5 | 22.8 | 20.0 |
| 15 | JJA | Δ | 0.3 | -0.1 | -0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.3 |
| 17 | SON | CH2018 | 18.1 | 19.5 | 20.2 | 19.2 | 18.4 | 15.9 |
| 18 | SON | TabsD | 17.3 | 18.9 | 19.3 | 18.5 | 17.8 | 15.5 |
| 19 | SON | Δ | 0.8 | 0.7 | 0.8 | 0.7 | 0.6 | 0.4 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles TabsD. L'écart le plus important est de 0,3 °C dans la région PreAlp. Sur une base saisonnière, la qualité de la modélisation est globalement bonne. Alors que l'hiver (DJF) et l'été (JJA) sont très bien modélisés, la qualité de la modélisation est seulement suffisante en automne (SON) et même insuffisante au printemps (MAM). D'un point de vue régional, la qualité de la modélisation est suffisante dans la région PreAlp et bonne partout ailleurs.

Tab. 2.4.114 : Valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 22.5 | 23.9 | 24.5 | 23.7 | 23.0 | 20.3 |
| 2 | Année | TabsD | 22.3 | 24.1 | 24.7 | 23.5 | 23.0 | 20.0 |
| 3 | Année | Δ | 0.1 | -0.1 | -0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.3 |
| 5 | DJF | CH2018 | 8.4 | 9.3 | 9.7 | 9.2 | 8.8 | 6.8 |
| 6 | DJF | TabsD | 8.1 | 9.5 | 9.4 | 9.5 | 8.8 | 6.6 |
| 7 | DJF | Δ | 0.3 | -0.2 | 0.3 | -0.3 | 0.0 | 0.2 |
| 9 | MAM | CH2018 | 16.2 | 17.8 | 18.6 | 17.5 | 16.5 | 13.3 |
| 10 | MAM | TabsD | 17.4 | 19.0 | 19.3 | 18.6 | 17.9 | 15.1 |
| 11 | MAM | Δ | -1.2 | -1.1 | -0.7 | -1.0 | -1.4 | -1.8 |
| 13 | JJA | CH2018 | 22.5 | 23.9 | 24.5 | 23.7 | 23.0 | 20.3 |
| 14 | JJA | TabsD | 22.2 | 24.1 | 24.7 | 23.5 | 22.8 | 20.0 |
| 15 | JJA | Δ | 0.3 | -0.1 | -0.2 | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| 17 | SON | CH2018 | 18.2 | 19.5 | 20.1 | 19.2 | 18.4 | 16.0 |
| 18 | SON | TabsD | 17.3 | 18.9 | 19.3 | 18.5 | 17.8 | 15.5 |
| 19 | SON | Δ | 0.9 | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 0.6 |

Sous **RCP 8.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles TabsD. L'écart le plus important est de 0,3 °C dans la région PreAlp. En ce qui concerne les saisons, la qualité de la modélisation présente la même structure que pour le scénario RCP 4.5. Dans l'ensemble, les erreurs de modélisation sont un peu plus importantes, de sorte que la qualité de la modélisation saisonnière n'est que suffisante.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.115 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2.8 | 2.5 | 2.4 | 2.7 | 2.8 | 2.7 |
| DJF | 1.7 | 1.9 | 1.6 | 1.7 | 1.8 | 1.7 |
| MAM | 2.2 | 1.7 | 1.7 | 1.8 | 2.3 | 2.5 |
| JJA | 2.8 | 2.5 | 2.4 | 2.7 | 2.8 | 2.7 |
| SON | 2.1 | 2.0 | 2.0 | 1.9 | 2.1 | 2.2 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

Tab. 2.4.116 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2.9 | 3.0 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 3.0 |
| DJF | 2.1 | 1.9 | 1.8 | 1.9 | 2.0 | 2.2 |
| MAM | 2.7 | 2.5 | 2.3 | 2.4 | 2.8 | 3.3 |
| JJA | 3.0 | 3.0 | 2.9 | 2.9 | 2.9 | 3.0 |
| SON | 2.8 | 2.6 | 2.5 | 2.4 | 2.8 | 3.0 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

RCP 4.5 : Sur une base annuelle, les valeurs maximales annuelles moyennes augmentent de 2,4 à 2,8 °C par rapport à la période de référence 1981–2010 dans les différentes régions, et de 2,8 °C en moyenne dans le canton. Dans les régions du canton situées en altitude (PlaSud et PreAlp), les valeurs augmentent davantage que dans les parties du canton situées à plus basse altitude. D'un point de vue saisonnier, les augmentations varient entre 1,6 et 2,8 °C. Elles sont les plus faibles en hiver (DJF), suivies de l'automne (SON) et du printemps (MAM). Les augmentations les plus importantes allant jusqu'à 2,8 °C se produisent en été (JJA).

RCP 8.5 : L'augmentation des valeurs maximales annuelles moyennes de la température journalière moyenne atteint 3,0 °C sur une base annuelle. Les différences entre les régions ne dépassent pas 0,1 °C. La moyenne cantonale s'élève à 2,9 °C. En ce qui concerne les changements saisonniers, on remarque que l'augmentation des températures est similaire au printemps (MAM), en été (JJA) et en automne (SON). En revanche, l'augmentation est nettement plus faible en hiver (DJF). Les changements les plus importants par rapport à la période de référence sont toujours observés en été.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.117 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 3.2 | 3.1 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.2 |
| DJF | 2.1 | 1.9 | 1.9 | 1.9 | 2.2 | 2.5 |
| MAM | 2.4 | 1.9 | 1.9 | 2.0 | 2.6 | 2.7 |
| JJA | 3.2 | 3.1 | 3.0 | 3.1 | 3.2 | 3.1 |
| SON | 2.6 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.7 | 2.8 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

Tab. 2.4.118 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 6.0 | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.9 | 5.8 |
| DJF | 3.8 | 3.7 | 3.7 | 3.8 | 4.1 | 4.2 |
| MAM | 4.7 | 3.8 | 3.9 | 4.0 | 4.7 | 5.4 |
| JJA | 5.8 | 5.7 | 5.7 | 5.5 | 5.8 | 5.6 |
| SON | 4.9 | 4.8 | 4.8 | 4.7 | 5.1 | 5.2 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

RCP 4.5 : D'un point de vue annuel, les valeurs maximales moyennes augmentent de 3,2 °C en moyenne dans le canton par rapport à la période de référence 1981–2010. Les différences régionales sont faibles. D'un point de vue saisonnier, l'augmentation est beaucoup plus importante en été (JJA) que pour les autres saisons. L'augmentation en hiver (DJF) est inférieure de 1 °C et plus à celle de l'été.

RCP 8.5 : Pour l'ensemble du canton, l'augmentation des valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière par rapport à la période de référence 1981–2010 est de 6.0 °C sur une base annuelle. Dans les régions, les valeurs annuelles connaissent des augmentations comprises entre 5,7 et 5,9 °C. En termes de saisonnalité, une division en trois segments peut être observée : Les plus petites augmentations de température se produisent en hiver (DJF) et les plus importantes en été (JJA). Celles-ci sont supérieures d'environ 2 °C à celles de l'hiver. Le printemps (MAM) et l'automne (SON) se situent entre les deux.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- - : augmentation/diminution moyenne

+++/ - - - : augmentation/diminution importante

++++/- - - - : augmentation/diminution très importante

L'évaluation des écarts de la température de l'air par rapport à la période de référence 1981–2010 se base sur des différences absolues de température. Il est à noter que les valeurs seuils nécessaires à cet effet ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

RCP 4.5

Tab. 2.4.119 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2055 | Saisons | 11 | 10 | 10 | 9 | 11 | 11 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Saisons | 13 | 11 | 11 | 12 | 13 | 13 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.120 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|-----------------------|------|------------------|-----|-----|------|-----|
| vers 2055 | important | +++ | important | ++ | +++ | +++ | +++ |
| vers 2085 | très important | ++++ | important | +++ | +++ | ++++ | +++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.121 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| 2055 | Saisons | 13 | 12 | 11 | 11 | 12 | 15 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Saisons | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.122 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière unter RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|-----------------------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| vers 2055 | important | +++ | important | ++ | +++ | +++ | +++ |
| vers 2085 | très important | ++++ | très important | ++++ | ++++ | ++++ | ++++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

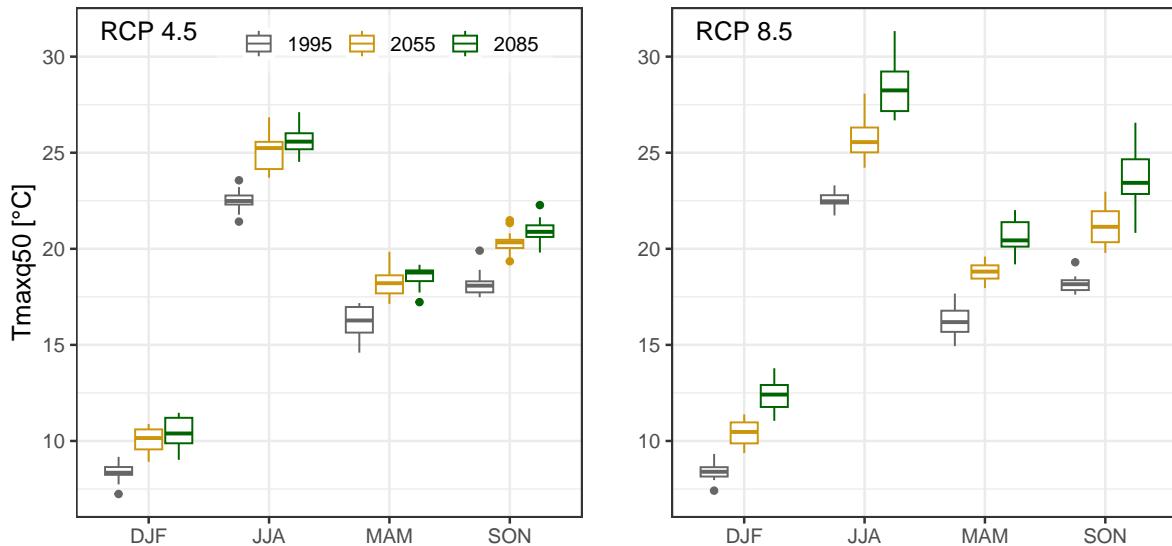


Fig. 2.28 : Valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

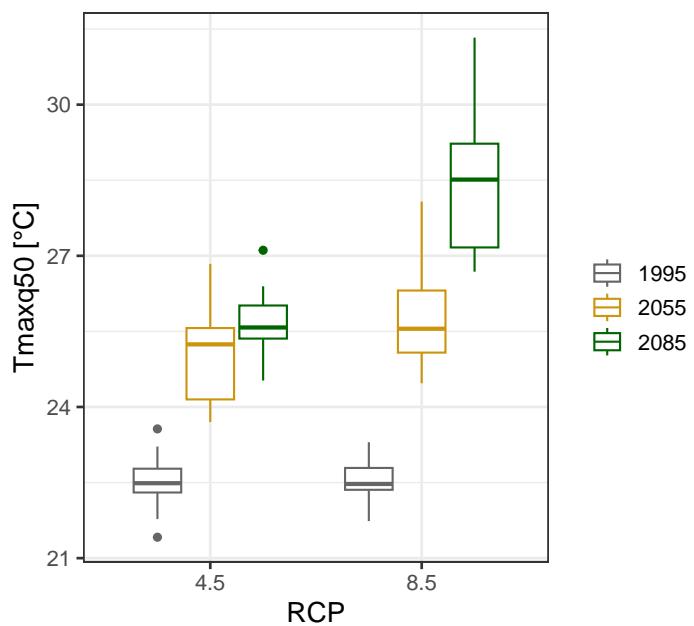


Fig. 2.29 : Valeurs maximales annuelles moyennes de la température de l'air journalière dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.14 Valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière [°C] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des températures maximales annuelles et saisonnières pour chaque année individuelle. (2) À partir de la distribution des trente plus hautes températures de l'air, la valeur qui est dépassée dans 10 % des cas et qui n'est pas atteinte dans 90 % des cas est déterminée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement. Les valeurs seuils pour l'évaluation de la qualité de la modélisation se basent sur les valeurs absolues qui ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

Tab. 2.4.123 : Valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 24.5 | 26.2 | 26.5 | 25.6 | 24.9 | 22.3 |
| 2 | Année | TabsD | 24.3 | 25.9 | 26.6 | 25.4 | 24.6 | 21.8 |
| 3 | Année | Δ | 0.2 | 0.3 | -0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.5 |
| 5 | DJF | CH2018 | 10.3 | 11.4 | 11.7 | 11.2 | 10.8 | 8.8 |
| 6 | DJF | TabsD | 10.2 | 11.6 | 11.2 | 11.6 | 11.1 | 7.9 |
| 7 | DJF | Δ | 0.1 | -0.2 | 0.5 | -0.4 | -0.3 | 0.9 |
| 9 | MAM | CH2018 | 19.0 | 20.4 | 21.1 | 20.2 | 19.4 | 16.4 |
| 10 | MAM | TabsD | 19.4 | 20.9 | 21.4 | 20.6 | 19.9 | 17.0 |
| 11 | MAM | Δ | -0.4 | -0.5 | -0.3 | -0.4 | -0.5 | -0.6 |
| 13 | JJA | CH2018 | 24.5 | 26.2 | 26.5 | 25.6 | 24.9 | 22.3 |
| 14 | JJA | TabsD | 24.3 | 25.9 | 26.6 | 25.4 | 24.6 | 21.8 |
| 15 | JJA | Δ | 0.2 | 0.3 | -0.1 | 0.2 | 0.2 | 0.5 |
| 17 | SON | CH2018 | 20.3 | 21.6 | 22.2 | 21.2 | 20.6 | 18.2 |
| 18 | SON | TabsD | 19.1 | 21.0 | 21.3 | 20.4 | 19.8 | 17.4 |
| 19 | SON | Δ | 1.2 | 0.6 | 0.9 | 0.7 | 0.8 | 0.8 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles TabsD. L'écart le plus important est observé dans la région PreAlp avec un écart de 0,5 °C. Au niveau saisonnier, la qualité de la modélisation est dans l'ensemble bonne. Uniquement en automne (SON), la modélisation est suffisante. La qualité de la modélisation est également bonne dans l'ensemble des régions, sauf dans la région PreAlp (suffisante).

Tab. 2.4.124 : Valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 24.6 | 26.1 | 26.5 | 25.8 | 25.0 | 22.3 |
| 2 | Année | TabsD | 24.3 | 25.9 | 26.6 | 25.4 | 24.6 | 21.8 |
| 3 | Année | Δ | 0.4 | 0.2 | -0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.5 |
| 5 | DJF | CH2018 | 10.2 | 11.2 | 11.4 | 11.0 | 10.5 | 8.7 |
| 6 | DJF | TabsD | 10.2 | 11.6 | 11.2 | 11.6 | 11.1 | 7.9 |
| 7 | DJF | Δ | 0.0 | -0.4 | 0.2 | -0.6 | -0.6 | 0.9 |
| 9 | MAM | CH2018 | 18.8 | 20.7 | 21.4 | 20.3 | 19.3 | 16.2 |
| 10 | MAM | TabsD | 19.4 | 20.9 | 21.4 | 20.6 | 19.9 | 17.0 |
| 11 | MAM | Δ | -0.6 | -0.3 | -0.1 | -0.3 | -0.6 | -0.8 |
| 13 | JJA | CH2018 | 24.6 | 26.1 | 26.5 | 25.8 | 25.0 | 22.3 |
| 14 | JJA | TabsD | 24.3 | 25.9 | 26.6 | 25.4 | 24.6 | 21.8 |
| 15 | JJA | Δ | 0.4 | 0.2 | -0.1 | 0.3 | 0.3 | 0.5 |
| 17 | SON | CH2018 | 20.1 | 21.5 | 22.1 | 21.2 | 20.4 | 18.0 |
| 18 | SON | TabsD | 19.1 | 21.0 | 21.3 | 20.4 | 19.8 | 17.4 |
| 19 | SON | Δ | 1.0 | 0.6 | 0.8 | 0.8 | 0.6 | 0.6 |

Sous **RCP 8.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent dans l'ensemble bien les valeurs annuelles TabsD. Cependant, dans la région PreAlp, la qualité de la modélisation est seulement suffisante. Au niveau saisonnier, la qualité de la modélisation est également bonne dans l'ensemble. Elle n'est moins bonne qu'en automne (SON), mais reste suffisante. Dans quatre régions sur cinq, le modèle peut être considéré comme bon. La région PreAlp se distingue par une qualité suffisante.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.125 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2.8 | 2.8 | 2.6 | 2.8 | 2.9 | 2.4 |
| DJF | 1.6 | 1.4 | 1.3 | 1.5 | 1.6 | 1.7 |
| MAM | 2.2 | 1.8 | 1.9 | 2.1 | 2.3 | 2.0 |
| JJA | 2.8 | 2.8 | 2.6 | 2.8 | 2.9 | 2.4 |
| SON | 2.3 | 2.2 | 2.0 | 2.2 | 2.4 | 2.4 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

Tab. 2.4.126 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 3.5 | 3.5 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 |
| DJF | 2.3 | 2.0 | 1.9 | 2.0 | 2.4 | 2.7 |
| MAM | 2.7 | 2.3 | 2.4 | 2.4 | 2.6 | 2.9 |
| JJA | 3.5 | 3.5 | 3.4 | 3.5 | 3.6 | 3.7 |
| SON | 3.3 | 3.4 | 3.3 | 3.2 | 3.5 | 3.2 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

RCP 4.5 : Au niveau de la moyenne cantonale, les valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière moyenne augmentent de 2,8 °C par rapport à la période de référence 1981–2010. D'un point de vue régional, l'augmentation est la plus faible dans la région PreAlp. En termes saisonniers, les augmentations sont les plus faibles en hiver (DJF), suivies du printemps (MAM) et de l'automne (SON). En été (JJA), les augmentations sont supérieures d'au moins un degré Celsius à celles de l'hiver, sauf dans la région PreAlp.

RCP 8.5 : Sur l'ensemble du canton, les valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière moyenne augmentent de 3,5 °C sur l'ensemble de l'année. Avec une augmentation de 3,7 °C, le réchauffement est le plus important dans la région PreAlp. En ce qui concerne les saisons, une différence nette peut être observée entre l'hiver et le printemps d'une part, et l'été et l'automne d'autre part. Les augmentations en été/automne sont beaucoup plus importantes.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.127 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-----------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 3.1 | 2.9 | 2.9 | 3.1 | 3.1 | 2.9 |
| DJF | 1.9 | 1.5 | 1.7 | 1.6 | 2.0 | 2.4 |
| MAM | 2.1 | 1.8 | 2.0 | 1.8 | 2.1 | 2.3 |
| JJA | 3.1 | 2.9 | 2.9 | 3.1 | 3.1 | 2.9 |
| SON | 3.5 | 3.4 | 3.4 | 3.4 | 3.6 | 3.4 |
| ■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C] | | | | | | |

Tab. 2.4.128 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-----------------------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.4 | 6.2 | 5.9 |
| DJF | 3.7 | 3.5 | 3.2 | 3.6 | 3.8 | 4.0 |
| MAM | 4.3 | 3.8 | 3.8 | 3.9 | 4.3 | 4.8 |
| JJA | 6.2 | 6.3 | 6.4 | 6.4 | 6.2 | 5.9 |
| SON | 7.0 | 7.1 | 7.3 | 7.0 | 7.2 | 7.0 |
| ■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C] | | | | | | |

RCP 4.5 : Au niveau cantonal, les valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière moyenne augmentent de 3,1 °C sur l'ensemble de l'année. Les valeurs régionales ne diffèrent que peu de la moyenne cantonale. Au niveau des saisons, on constate à nouveau une différence très nette entre l'hiver (DJF) et le printemps (MAM) d'une part et l'été (JJA) et l'automne (SON) d'autre part. En été et en automne, l'augmentation de la température est beaucoup plus importante, avec des augmentations supérieures d'environ 1 °C par rapport à celles de l'hiver et du printemps. Par ailleurs, l'augmentation est plus importante en automne qu'en été.

RCP 8.5 : En moyenne cantonale, les valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière moyenne augmentent de 6,2 °C sur l'ensemble de l'année. Dans les régions GraMar et PlaNor, l'augmentation atteint même 6,4 °C. D'un point de vue saisonnier, l'augmentation constatée en été est supérieure d'environ 3 °C à celle constatée en hiver (à l'exception de la région PreAlp), et celle constatée en automne peut dépasser de 4 °C celle observée en hiver.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- - : augmentation/diminution moyenne

+++/ - - - : augmentation/diminution importante

++++/- - - - : augmentation/diminution très importante

L'évaluation des écarts de la température de l'air par rapport à la période de référence 1981–2010 se base sur des différences absolues de température. Il est à noter que les valeurs seuils nécessaires à cet effet ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

RCP 4.5

Tab. 2.4.129 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2055 | Saisons | 11 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 |
| 2085 | Année | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| 2085 | Saisons | 13 | 11 | 12 | 12 | 14 | 13 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.130 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|-----------------------|------|------------------|-----|-----|------|------|
| vers 2055 | important | +++ | important | ++ | +++ | +++ | +++ |
| vers 2085 | très important | ++++ | important | ++ | +++ | ++++ | ++++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.131 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2055 | Saisons | 14 | 14 | 13 | 14 | 14 | 14 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Saisons | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.132 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|-----------------------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| vers 2055 | très important | ++++ | important | +++ | +++ | ++++ | ++++ |
| vers 2085 | très important | ++++ | très important | ++++ | ++++ | ++++ | ++++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

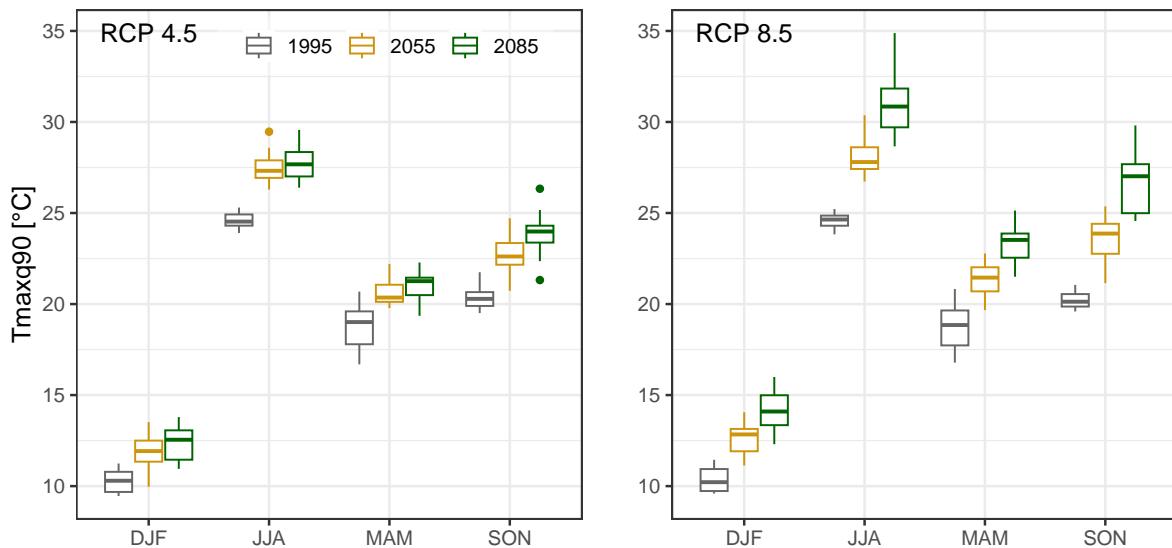


Fig. 2.30 : Valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 90 % des 16 chaînes de modèles respectives.

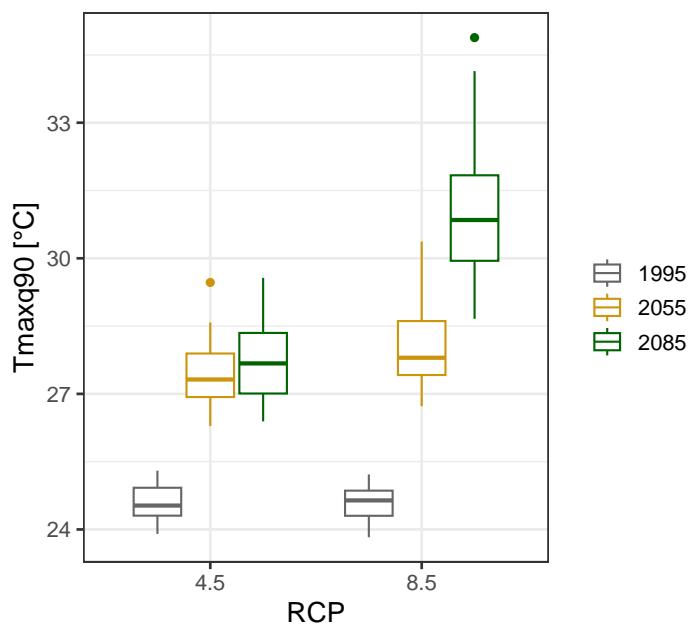


Fig. 2.31 : Valeurs maximales annuelles rares de la température de l'air journalière dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 90 % des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.15 Valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière [°C] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des températures maximales annuelles et saisonnières pour chaque année individuelle. (2) À partir de la distribution des trente plus hautes températures de l'air, la valeur qui est dépassée dans 5 % des cas et qui n'est pas atteinte dans 95 % des cas est déterminée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement. Les valeurs seuils pour l'évaluation de la qualité de la modélisation se basent sur les valeurs absolues qui ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

Tab. 2.4.133 : Valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 25.2 | 26.8 | 27.3 | 26.4 | 25.6 | 22.7 |
| 2 | Année | TabsD | 24.6 | 26.1 | 26.9 | 25.5 | 25.0 | 22.3 |
| 3 | Année | Δ | 0.6 | 0.7 | 0.4 | 0.9 | 0.7 | 0.3 |
| 5 | DJF | CH2018 | 11.0 | 12.0 | 12.1 | 11.6 | 11.3 | 9.4 |
| 6 | DJF | TabsD | 10.8 | 12.1 | 11.6 | 12.3 | 11.8 | 8.4 |
| 7 | DJF | Δ | 0.2 | -0.1 | 0.5 | -0.6 | -0.5 | 1.0 |
| 9 | MAM | CH2018 | 19.4 | 20.9 | 21.8 | 20.7 | 19.9 | 16.9 |
| 10 | MAM | TabsD | 20.4 | 22.0 | 22.5 | 21.6 | 21.0 | 17.7 |
| 11 | MAM | Δ | -1.0 | -1.1 | -0.8 | -1.0 | -1.1 | -0.7 |
| 13 | JJA | CH2018 | 25.2 | 26.8 | 27.3 | 26.4 | 25.6 | 22.7 |
| 14 | JJA | TabsD | 24.6 | 26.1 | 26.9 | 25.5 | 25.0 | 22.3 |
| 15 | JJA | Δ | 0.6 | 0.7 | 0.4 | 0.9 | 0.7 | 0.3 |
| 17 | SON | CH2018 | 20.7 | 22.1 | 22.7 | 21.7 | 21.0 | 18.7 |
| 18 | SON | TabsD | 19.9 | 21.4 | 22.2 | 21.0 | 20.3 | 17.5 |
| 19 | SON | Δ | 0.9 | 0.7 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 1.1 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 ne reproduisent que de manière suffisante les valeurs annuelles TabsD. Seule la région PreAlp présente une bonne qualité de modélisation. D'un point de vue saisonnier, les valeurs du printemps (MAM) sont dans l'ensemble reproduites de manière insuffisante. Pour les autres saisons, la qualité de la modélisation est partout suffisante. Les valeurs de la région GraMar sont mieux prises en compte par le modèle (bonne qualité) que celles des autres régions (qualité suffisante).

Tab. 2.4.134 : Valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 25.3 | 26.8 | 27.4 | 26.4 | 25.7 | 22.7 |
| 2 | Année | TabsD | 24.6 | 26.1 | 26.9 | 25.5 | 25.0 | 22.3 |
| 3 | Année | Δ | 0.7 | 0.7 | 0.4 | 0.9 | 0.7 | 0.4 |
| 5 | DJF | CH2018 | 10.4 | 11.5 | 11.8 | 11.4 | 11.1 | 9.2 |
| 6 | DJF | TabsD | 10.8 | 12.1 | 11.6 | 12.3 | 11.8 | 8.4 |
| 7 | DJF | Δ | -0.3 | -0.6 | 0.2 | -0.9 | -0.7 | 0.7 |
| 9 | MAM | CH2018 | 19.3 | 20.9 | 21.7 | 20.6 | 19.7 | 16.9 |
| 10 | MAM | TabsD | 20.4 | 22.0 | 22.5 | 21.6 | 21.0 | 17.7 |
| 11 | MAM | Δ | -1.1 | -1.1 | -0.8 | -1.0 | -1.4 | -0.8 |
| 13 | JJA | CH2018 | 25.3 | 26.8 | 27.4 | 26.4 | 25.7 | 22.7 |
| 14 | JJA | TabsD | 24.6 | 26.1 | 26.9 | 25.5 | 25.0 | 22.3 |
| 15 | JJA | Δ | 0.7 | 0.7 | 0.4 | 0.9 | 0.7 | 0.4 |
| 17 | SON | CH2018 | 20.7 | 22.0 | 22.5 | 21.7 | 20.9 | 18.5 |
| 18 | SON | TabsD | 19.9 | 21.4 | 22.2 | 21.0 | 20.3 | 17.5 |
| 19 | SON | Δ | 0.8 | 0.6 | 0.4 | 0.6 | 0.6 | 1.0 |

Sous **RCP 8.5**, la qualité de la modélisation des valeurs annuelles et saisonnières est seulement suffisante dans son ensemble. De même, la plupart des observations des régions ne sont modélisées que de manière suffisante. La région BasBro est la seule exception affichant une bonne qualité de modélisation.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.135 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2.9 | 2.7 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 2.9 |
| DJF | 1.8 | 1.6 | 1.5 | 1.2 | 1.7 | 1.9 |
| MAM | 1.9 | 1.8 | 1.8 | 1.9 | 1.9 | 1.9 |
| JJA | 2.9 | 2.7 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 2.9 |
| SON | 2.7 | 2.5 | 2.5 | 2.4 | 2.7 | 2.7 |

[-3 -2 -1 1 2 3 °C]

Tab. 2.4.136 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 3.6 | 3.5 | 3.4 | 3.7 | 3.6 | 3.5 |
| DJF | 2.1 | 1.8 | 1.9 | 1.9 | 2.3 | 2.4 |
| MAM | 2.7 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.8 | 3.0 |
| JJA | 3.6 | 3.5 | 3.4 | 3.7 | 3.6 | 3.5 |
| SON | 3.7 | 3.8 | 3.9 | 3.7 | 3.8 | 3.6 |

[-3 -2 -1 1 2 3 °C]

RCP 4.5 : En moyenne cantonale, les valeurs maximales très rares de la température de l'air journalière augmentent de 2,9 °C sur une base annuelle. Les différences entre les régions sont faibles. D'un point de vue saisonnier, le contraste est grand entre l'hiver (DJF) et le printemps (MAM) d'une part, et l'été (JJA) et l'automne (SON) d'autre part. Les augmentations en été/automne sont environ 1 à 1,2 °C plus importantes qu'en hiver/automne.

RCP 8.5 : Sur une base annuelle, l'augmentation des valeurs maximales annuelles très rares par rapport à la période de référence 1981–2010 est de 3,6 °C. Les valeurs régionales ne s'écartent que très peu de cette moyenne cantonale. Sur le plan saisonnier, on retrouve à nouveau la division en deux parties déjà mentionnée sous RCP 4.5 : hiver/printemps et été/automne. Les différences se situent ici majoritairement dans une fourchette de 1,5 à 2,0 °C.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.137 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2.9 | 2.9 | 2.8 | 2.6 | 2.9 | 3.1 |
| DJF | 1.8 | 1.6 | 1.6 | 1.7 | 2.0 | 2.3 |
| MAM | 2.0 | 1.8 | 2.0 | 1.8 | 1.9 | 2.3 |
| JJA | 2.9 | 2.9 | 2.8 | 2.6 | 2.9 | 3.1 |
| SON | 3.8 | 3.6 | 3.7 | 3.6 | 3.8 | 3.8 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

Tab. 2.4.138 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 6.4 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.4 | 6.5 |
| DJF | 3.5 | 3.5 | 3.4 | 3.6 | 3.7 | 3.8 |
| MAM | 4.5 | 4.1 | 4.1 | 4.2 | 4.3 | 4.9 |
| JJA | 6.4 | 6.8 | 6.8 | 6.7 | 6.4 | 6.5 |
| SON | 7.3 | 7.4 | 7.2 | 7.3 | 7.4 | 6.9 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

RCP 4.5 : Sur une base annuelle, les valeurs maximales annuelles très rares augmentent en moyenne cantonale de 2,9 °C par rapport à la période de référence 1981–2010. Cette augmentation correspond à celle observée pour le futur moyen. Ici aussi, les différences régionales sont plutôt faibles. La plus grande augmentation est observée dans la région PreAlp. Sur le plan saisonnier, les valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière augmentent de l'hiver (DJF) à l'automne (SON). Les différences entre les plus petites valeurs en hiver et les plus grandes valeurs en automne sont considérables et se situent autour des 2 °C.

RCP 8.5 : Avec ce scénario, les valeurs maximales annuelles très rares augmentent en moyenne cantonale de 6,4 °C sur l'ensemble de l'année. Cela représente une augmentation de 3,5 °C par rapport au scénario 4.5 (!). D'un point de vue saisonnier, le réchauffement est le plus faible en hiver et le plus important en automne. Une fois de plus, deux groupes se distinguent clairement, à savoir hiver/printemps et été/automne.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- - : augmentation/diminution moyenne

+++/ - - - : augmentation/diminution importante

++++/- - - - : augmentation/diminution très importante

L'évaluation des écarts de la température de l'air par rapport à la période de référence 1981–2010 se base sur des différences absolues de température. Il est à noter que les valeurs seuils nécessaires à cet effet ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

RCP 4.5

Tab. 2.4.139 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2055 | Saisons | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 2085 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| 2085 | Saisons | 12 | 11 | 12 | 11 | 12 | 14 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.140 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|------|
| vers 2055 | important | +++ | gross | ++ | ++ | +++ | +++ |
| vers 2085 | important | +++ | important | ++ | ++ | +++ | ++++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.141 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2055 | Saisons | 14 | 13 | 13 | 13 | 14 | 15 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Saisons | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.142 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|-----------------------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| vers 2055 | très important | ++++ | très important | +++ | +++ | ++++ | ++++ |
| vers 2085 | très important | ++++ | très important | ++++ | ++++ | ++++ | ++++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

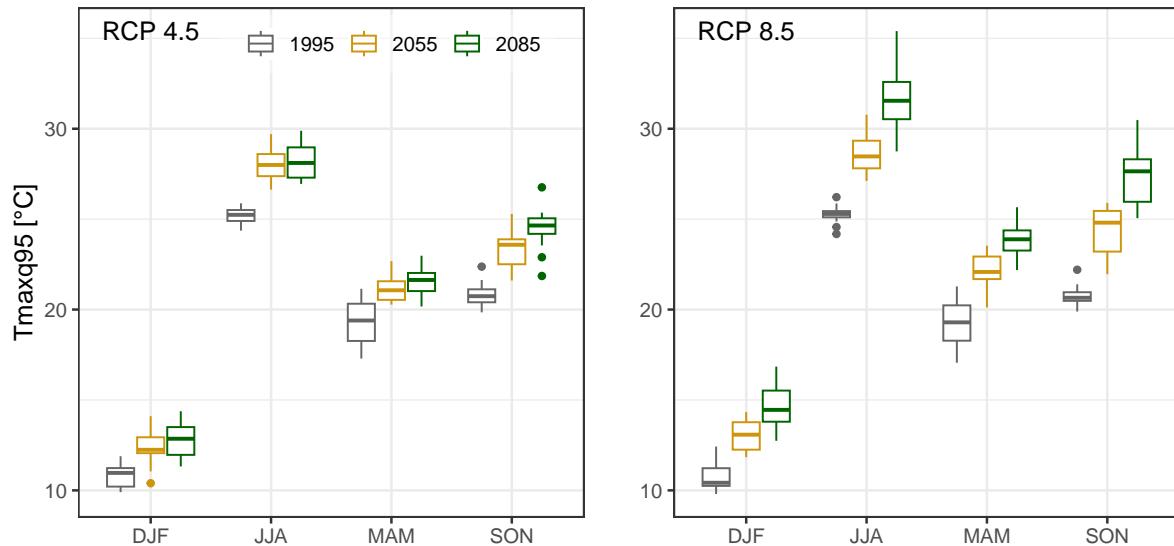


Fig. 2.32 : Valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 95 % des 16 chaînes de modèles respectives.

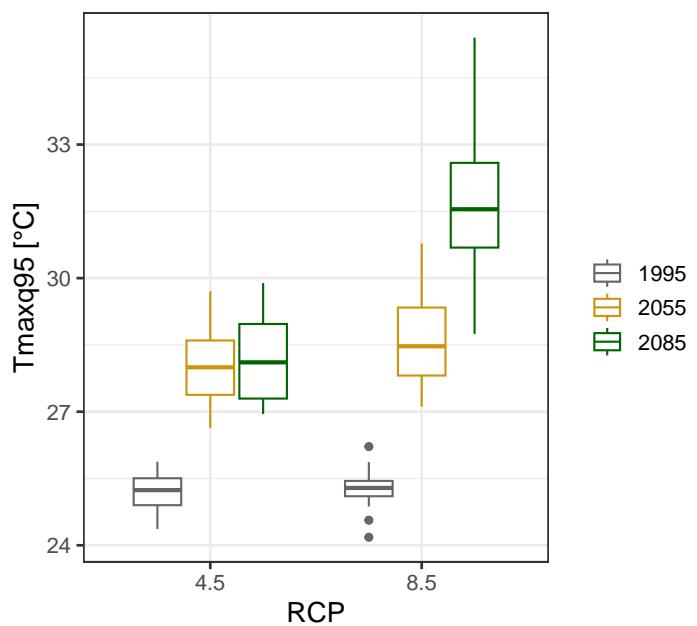


Fig. 2.33 : Valeurs maximales annuelles très rares de la température de l'air journalière dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 95 % des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.16 Valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière

Définition de l'indicateur

Valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière [°C] sur une période de 30 ans avec une granularité par année et par saison.

Démarche : (1) Détermination des températures maximales annuelles et saisonnières pour chaque année individuelle. (2) À partir de la distribution des trente plus hautes températures de l'air, la valeur qui est dépassée dans 1 % des cas et qui n'est pas atteinte dans 99 % des cas est déterminée. Les valeurs seuils pour l'évaluation de la qualité de la modélisation se basent sur les valeurs absolues qui ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.143 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 26.1 | 27.7 | 28.1 | 27.3 | 26.5 | 23.6 |
| 2 | Année | TabsD | 24.9 | 26.5 | 27.6 | 25.9 | 25.4 | 23.2 |
| 3 | Année | Δ | 1.2 | 1.3 | 0.6 | 1.4 | 1.0 | 0.4 |
| 5 | DJF | CH2018 | 11.6 | 12.5 | 12.8 | 12.4 | 12.2 | 10.2 |
| 6 | DJF | TabsD | 11.9 | 13.1 | 12.1 | 12.9 | 13.0 | 10.0 |
| 7 | DJF | Δ | -0.3 | -0.6 | 0.6 | -0.5 | -0.8 | 0.3 |
| 9 | MAM | CH2018 | 20.4 | 21.8 | 22.6 | 21.6 | 20.9 | 18.3 |
| 10 | MAM | TabsD | 22.3 | 23.3 | 23.6 | 23.2 | 23.1 | 19.9 |
| 11 | MAM | Δ | -1.9 | -1.6 | -1.0 | -1.6 | -2.2 | -1.6 |
| 13 | JJA | CH2018 | 26.1 | 27.7 | 28.1 | 27.3 | 26.5 | 23.6 |
| 14 | JJA | TabsD | 24.9 | 26.5 | 27.6 | 25.9 | 25.4 | 23.2 |
| 15 | JJA | Δ | 1.2 | 1.3 | 0.6 | 1.4 | 1.0 | 0.4 |
| 17 | SON | CH2018 | 21.5 | 23.0 | 23.6 | 22.5 | 21.8 | 19.4 |
| 18 | SON | TabsD | 21.7 | 23.1 | 22.9 | 22.7 | 22.6 | 19.1 |
| 19 | SON | Δ | -0.2 | -0.2 | 0.7 | -0.2 | -0.7 | 0.3 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent de manière tout juste suffisante les valeurs annuelles TabsD. Ainsi, la qualité de la modélisation est insuffisante dans les régions PlaSud, PlaNor, BasBro ainsi que pour le canton dans son ensemble. Au niveau des saisons, la qualité de la modélisation est insuffisante au printemps et suffisante pour les autres saisons. Il convient donc de garder à l'esprit la qualité globalement tout juste suffisante de la modélisation lors de l'interprétation des résultats.

Tab. 2.4.144 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière [°C] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 25.9 | 27.6 | 28.2 | 27.2 | 26.3 | 23.5 |
| 2 | Année | TabsD | 24.9 | 26.5 | 27.6 | 25.9 | 25.4 | 23.2 |
| 3 | Année | Δ | 1.0 | 1.1 | 0.6 | 1.3 | 0.9 | 0.3 |
| 5 | DJF | CH2018 | 11.8 | 12.6 | 12.9 | 12.4 | 12.3 | 10.2 |
| 6 | DJF | TabsD | 11.9 | 13.1 | 12.1 | 12.9 | 13.0 | 10.0 |
| 7 | DJF | Δ | -0.2 | -0.5 | 0.8 | -0.5 | -0.7 | 0.2 |
| 9 | MAM | CH2018 | 20.7 | 22.1 | 22.8 | 21.8 | 21.1 | 18.4 |
| 10 | MAM | TabsD | 22.3 | 23.3 | 23.6 | 23.2 | 23.1 | 19.9 |
| 11 | MAM | Δ | -1.6 | -1.2 | -0.8 | -1.4 | -2.0 | -1.6 |
| 13 | JJA | CH2018 | 25.9 | 27.6 | 28.2 | 27.2 | 26.3 | 23.5 |
| 14 | JJA | TabsD | 24.9 | 26.5 | 27.6 | 25.9 | 25.4 | 23.2 |
| 15 | JJA | Δ | 1.0 | 1.1 | 0.6 | 1.3 | 0.9 | 0.3 |
| 17 | SON | CH2018 | 21.5 | 23.1 | 23.5 | 22.5 | 21.8 | 19.2 |
| 18 | SON | TabsD | 21.7 | 23.1 | 22.9 | 22.7 | 22.6 | 19.1 |
| 19 | SON | Δ | -0.2 | 0.0 | 0.6 | -0.2 | -0.8 | 0.1 |

Sous **RCP 8.5**, la qualité de la modélisation des valeurs annuelles est à nouveau seulement suffisante. Elle est insuffisante pour le canton dans son ensemble et pour les régions BasBro et PlaNor, suffisante pour les régions GraMar et PlaSud et bonne pour la région PreAlp. La qualité varie également selon les saisons. La qualité de la modélisation passe d'insuffisante au printemps (MAM) à suffisante en été (JJA) et bonne en hiver (DJF) et en automne (SON). Au niveau régional, la région PlaSud est modélisée de manière insuffisante et les autres régions de manière suffisante.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.145 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2.5 | 2.6 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.6 |
| DJF | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 1.7 |
| MAM | 1.9 | 1.8 | 1.7 | 1.7 | 1.8 | 2.1 |
| JJA | 2.5 | 2.6 | 2.5 | 2.5 | 2.5 | 2.6 |
| SON | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.3 | 2.4 | 2.4 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

Tab. 2.4.146 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 3.7 | 3.6 | 3.4 | 3.7 | 3.6 | 3.4 |
| DJF | 2.0 | 1.8 | 1.7 | 1.9 | 2.1 | 2.5 |
| MAM | 3.2 | 2.5 | 2.4 | 2.6 | 3.1 | 3.6 |
| JJA | 3.7 | 3.6 | 3.4 | 3.7 | 3.6 | 3.4 |
| SON | 4.0 | 4.2 | 4.2 | 4.0 | 3.9 | 4.2 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

RCP 4.5 : Sur une base annuelle, les valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière augmentent de 2,5 °C par rapport à la période de référence 1981–2010 pour le canton de Fribourg dans son ensemble. Les différences entre les régions sont faibles. Au niveau saisonnier, on observe une différence entre l'hiver (DJF)/le printemps (MAM) et l'été (JJA)/l'automne (SON). Les augmentations sont nettement plus importantes en été/automne.

RCP 8.5 : L'augmentation sur l'année entière et en moyenne cantonale par rapport à la période de référence est ici supérieure de 1,2 °C à celle sous RCP 4.5. L'augmentation globale est de 3,7 °C. Les hausses de température dans les régions ne permettent pas de dégager une structure claire, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de différences entre les régions situées à plus basse altitude et celles situées à plus haute altitude. Sur une base saisonnière, l'augmentation est beaucoup plus faible en hiver qu'au cours des autres saisons. L'augmentation la plus importante se produit en automne.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.147 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 2.9 | 2.7 | 2.5 | 2.6 | 2.8 | 3.1 |
| DJF | 2.2 | 1.7 | 1.7 | 1.9 | 2.1 | 2.3 |
| MAM | 1.7 | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.6 | 2.2 |
| JJA | 2.9 | 2.7 | 2.5 | 2.6 | 2.8 | 3.1 |
| SON | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 3.4 | 3.5 | 3.6 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

Tab. 2.4.148 : Changements absolus des valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 6.2 | 6.3 | 6.2 | 6.3 | 6.3 | 6.4 |
| DJF | 3.6 | 3.5 | 3.2 | 3.6 | 3.8 | 4.0 |
| MAM | 4.2 | 4.0 | 4.1 | 4.0 | 4.1 | 4.5 |
| JJA | 6.2 | 6.3 | 6.2 | 6.3 | 6.3 | 6.4 |
| SON | 7.5 | 7.4 | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 7.2 |

■ -3 ■ -2 ■ -1 ■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ [°C]

RCP 4.5 : L'augmentation moyenne sur l'ensemble du canton et de l'année est de 2,9 °C. La région PreAlp est touchée par l'augmentation la plus importante. Sur une base saisonnière, les augmentations par rapport à la période de référence sont nettement plus faibles en hiver (DJF) et au printemps (MAM) qu'en été (JJA) et en automne (SON). Ici aussi, les augmentations sont les plus importantes en automne.

RCP 8.5 : Avec ce scénario, les valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température journalière augmentent de 6,2 °C par rapport à la période de référence 1981–2010. Cette augmentation est supérieure de 3,3 °C à celle observée sous RCP 4.5. La différence saisonnière entre l'hiver/le printemps d'une part et l'été/l'automne d'autre part est à nouveau très importante. Par exemple, en automne, l'augmentation est plus de deux fois plus importante qu'en hiver.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- - : augmentation/diminution moyenne

+++/ - - - : augmentation/diminution importante

++++/- - - - : augmentation/diminution très importante

L'évaluation des écarts de la température de l'air par rapport à la période de référence 1981–2010 se base sur des différences absolues de température. Il est à noter que les valeurs seuils nécessaires à cet effet ont été fixées sur avis d'expert (cf. chap. 2.3.5).

RCP 4.5

Tab. 2.4.149 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2055 | Saisons | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 |
| 2085 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| 2085 | Saisons | 12 | 11 | 11 | 11 | 12 | 14 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.150 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|------|
| vers 2055 | important | +++ | gross | ++ | ++ | +++ | +++ |
| vers 2085 | important | +++ | important | ++ | ++ | +++ | ++++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.151 : Synthèse des changements des valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2055 | Saisons | 15 | 13 | 13 | 13 | 15 | 15 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Saisons | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.152 : Évaluation finale des écarts des valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|-----------------------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| vers 2055 | très important | ++++ | sehr gross | +++ | +++ | ++++ | ++++ |
| vers 2085 | très important | ++++ | très important | ++++ | ++++ | ++++ | ++++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

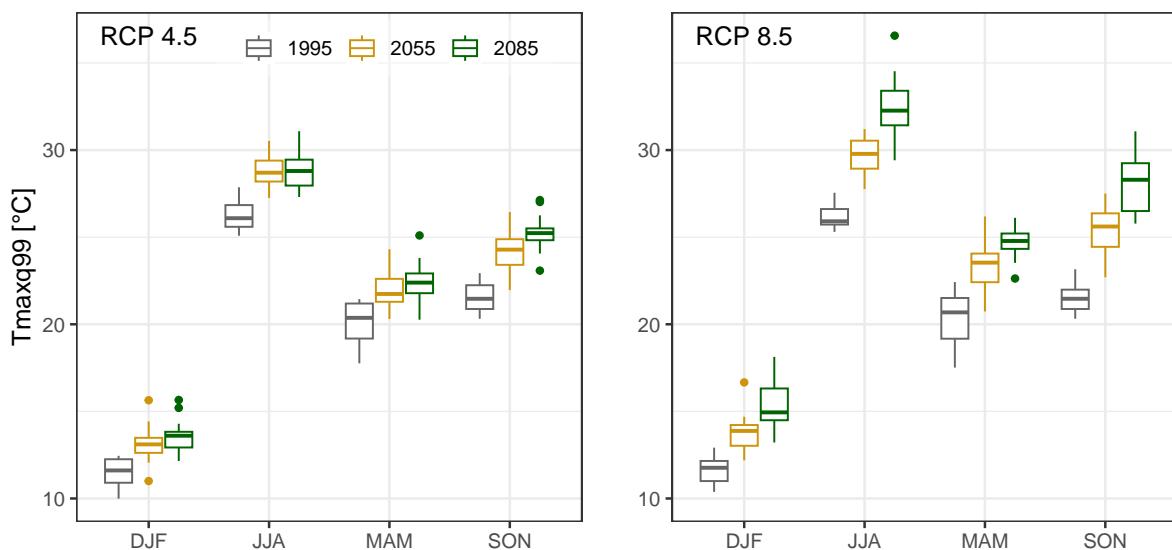


Fig. 2.34 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 99 % des 16 chaînes de modèles respectives.

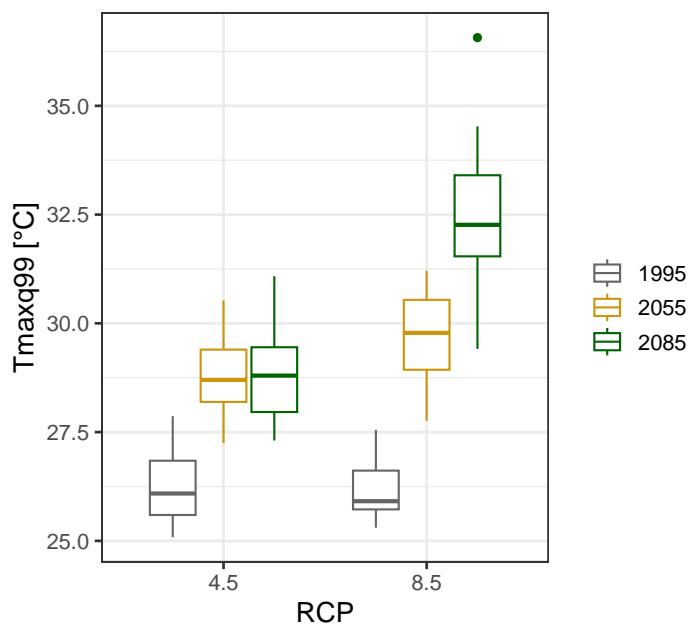


Fig. 2.35 : Valeurs maximales annuelles extrêmement rares de la température de l'air journalière dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des quantiles 99 % des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.17 Nombre moyen de jours chauds par année

Définition de l'indicateur

Nombre moyen de jours chauds par année [d/dt]. L'évaluation de cet indicateur n'est effectuée que sur une base annuelle.

Démarche : (1) Détermination du nombre de jours chauds, c'est-à-dire de jours avec une température moyenne de l'air > 20 °C par année individuelle. (2) Calcul de la moyenne à partir de la répartition du nombre de jours chauds des années individuelles.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Les valeurs de référence de cet indicateur pour la période 1981–2010 sont souvent petites, voire très petites. Par conséquent, même de faibles changements absolus entraînent de grands changements relatifs. C'est pourquoi les différences absolues et relatives entre les valeurs de référence et les valeurs modélisées sont toutes deux présentées ici. L'évaluation s'appuie toutefois sur les valeurs objectives des changements relatifs.

Tab. 2.4.153 : Nombre moyen de jours chauds par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 11.5 | 27.5 | 34.0 | 23.0 | 14.5 | 1 |
| Année | TabsD | 10.0 | 25.5 | 32.0 | 21.5 | 12.5 | 1 |
| Année | Δ | 1.5 | 2.0 | 2.0 | 1.5 | 2.0 | 0 |
| Année | Δ% | 15.0 | 7.8 | 6.2 | 7.0 | 16.0 | 0 |

Sous **RCP 4.5**, la qualité de la modélisation est bonne. Les écarts ne dépassent pas deux jours, bien que – il convient de le souligner une nouvelle fois – les valeurs de référence varient considérablement (voir ci-dessus).

Tab. 2.4.154 : Nombre moyen de jours chauds par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 11.8 | 27.0 | 34.0 | 22.5 | 14.5 | 1 |
| Année | TabsD | 10.0 | 25.5 | 32.0 | 21.5 | 12.5 | 1 |
| Année | Δ | 1.8 | 1.5 | 2.0 | 1.0 | 2.0 | 0 |
| Année | Δ% | 17.5 | 5.9 | 6.2 | 4.7 | 16.0 | 0 |

La qualité de la modélisation est également bonne sous **RCP 8.5**. Les différences absolues entre la référence et le modèle sont inférieures à deux jours.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.155 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours chauds par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|--------------------------------------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | 19.5 | 21.5 | 23.5 | 21.2 | 18.5 | 9.5 |
| Année | Δ% | 169.6 | 78.2 | 69.1 | 92.2 | 127.6 | 950.0 |
| ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | | |

Tab. 2.4.156 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours chauds par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|--------------------------------------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | 24 | 30.2 | 32.8 | 27.2 | 23.8 | 11.5 |
| Année | Δ% | 203.4 | 111.9 | 96.5 | 120.9 | 164.1 | 1150.0 |
| ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | | |

RCP 4.5 : En moyenne cantonale et dans les régions BasBro, GraMar et PlaNor, le nombre de jours chauds double presque par rapport à la période de référence 1981–2010. Dans la région PreAlp, le nombre moyen de jours chauds passe de 1 à environ 10.

RCP 8.5 : Par rapport à RCP 4.5, les valeurs sont ici supérieures de 2 (PreAlp) à environ 9 jours (BasBro, GraMar). En moyenne cantonale, elles sont supérieures d'environ cinq jours.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.157 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours chauds par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|--|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | 23 | 28 | 29.8 | 26.5 | 23.5 |
| Année | Δ% | 200.0 | 101.8 | 87.6 | 115.2 | 1150.0 |
| [■] -20 [■] -10 [■] -5 [■] 5 [■] 10 [■] 20 [■] [%] | | | | | | |

Tab. 2.4.158 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours chauds par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|--|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | 48.2 | 56.2 | 56.5 | 54 | 48.2 |
| Année | Δ% | 408.5 | 208.1 | 166.2 | 240.0 | 3050.0 |
| [■] -20 [■] -10 [■] -5 [■] 5 [■] 10 [■] 20 [■] [%] | | | | | | |

RCP 4.5 : En moyenne cantonale ainsi que dans les régions BasBro, GraMar et PlaNor, le nombre de jours chauds double par rapport à la période de référence. Dans la région PreAlp, située en altitude, l'augmentation relative est très importante.

RCP 8.5 : Sous le scénario RCP 8.5, le nombre de jours chauds triple par rapport au scénario RCP 4.5 pour la région PreAlp et double pour toutes les autres régions. Comme pour le scénario 4.5, l'augmentation relative est très importante dans la région de haute altitude PreAlp.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément et les résultats résumés sous forme de tableaux. Les tableaux montrent le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Ces écarts

sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence.

En raison des faibles, voire très faibles valeurs de référence et des augmentations relativement importantes constatées, les pourcentages des changements sont très importants, avec des valeurs comprises entre +69 % et +3050 %, la moitié des valeurs se situant entre +69 % et +189 %. Les trois quarts des augmentations sont en outre inférieures à 284 %. Une augmentation de 100 % correspond à un doublement des valeurs de référence, une augmentation de 200 % à un triplement de ces valeurs. Sur la base de cette situation initiale, les seuils utilisés pour déterminer le degré d'augmentation ont été fixés comme suit sur avis d'expert :

faible : < 25 %

moyen : 25 à < 75 %

important : 75 à < 150 %

très important : > 150 %

RCP 4.5

Tab. 2.4.159 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours chauds par année sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|---|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 3 | 2 | 3 | 3 | 4 |
| 2085 | Année | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| ■ faibles ■ moyens ■ importants ■ très importants [-] | | | | | | | |

RCP 8.5

Tab. 2.4.160 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours chauds par année sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|---|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| ■ faibles ■ moyens ■ importants ■ très importants [-] | | | | | | | |

Les changements en un clin d'œil

La figure suivante résume les résultats sous forme graphique. Organisée en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elle montre la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que

la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

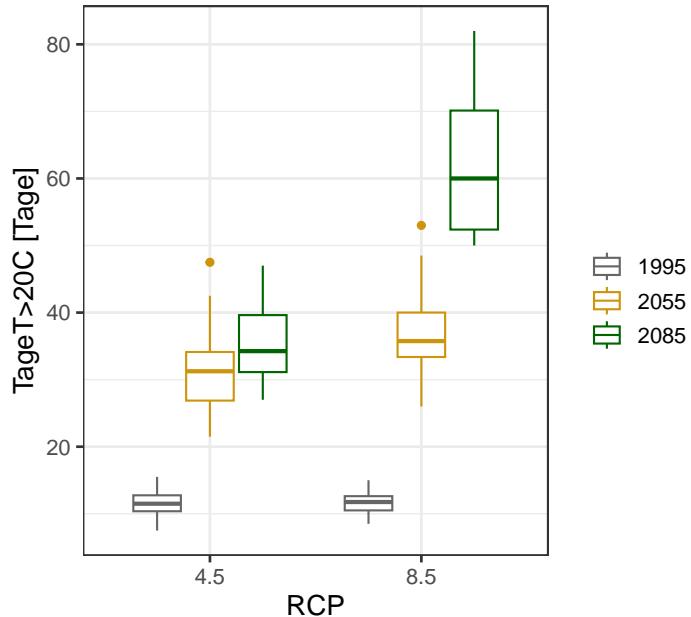


Fig. 2.36 : Nombre moyen de jours chauds par année dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.18 Nombre moyen de jours très chauds par année

Définition de l'indicateur

Nombre moyen de jours très chauds par année [d/dt]. L'évaluation de cet indicateur n'est effectuée que sur une base annuelle.

Démarche : (1) Détermination du nombre de jours très chauds, c'est-à-dire de jours avec une température moyenne de l'air $> 25^{\circ}\text{C}$ par année individuelle. (2) Calcul de la moyenne à partir de la répartition du nombre de jours très chauds des années individuelles.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Comme la plupart des valeurs initiales (valeurs de référence) ont une valeur de 0 ou se situent entre 0 et 1, il n'est pas possible d'indiquer des changements en pourcentage pour cet indicateur (problème : division par 0). Par conséquent, les seuils utilisés pour les jours chauds ne peuvent pas être utilisés. Il n'est toutefois pas judicieux d'introduire un système d'évaluation spécifique aux jours très chauds, car cela empêcherait toute comparaison. C'est pourquoi nous n'indiquons que l'ampleur de l'augmentation en jours [d] et renonçons également à présenter une synthèse.

Tab. 2.4.161 : Nombre moyen de jours très chauds par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Année | TabsD | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Année | Δ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles TabsD.

Tab. 2.4.162 : Nombre moyen de jours très chauds par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | o | o | o | o | o |
| Année | TabsD | o | o | o | o | o |
| Année | Δ | o | o | o | o | o |

Sous le scénario **RCP 8.5** également, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles TabsD.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.163 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours très chauds par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1 | 4.8 | 6.2 | 3.8 | 2 | 0 |

Tab. 2.4.164 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours très chauds par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1.8 | 5.8 | 7 | 4 | 2.2 | 0 |

RCP 4.5 : Contrairement à la période de référence, on observe maintenant quelques jours très chauds dans toutes les régions sauf dans la région PreAlp. Il est évident que le nombre est plus élevé dans les régions de basse altitude que dans celles de haute altitude.

RCP 8.5 : L'augmentation du nombre de jours très chauds par rapport à la période de référence est supérieure d'environ 1 jour dans ce scénario par rapport à RCP 4.5. La distribution spatiale reste la même.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.165 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours très chauds par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 1.5 | 5.3 | 8 | 4 | 2.8 | 0 |

Tab. 2.4.166 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours très chauds par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 12 | 23 | 24.8 | 18 | 11.5 | 3.5 |

Alors que l'ordre de grandeur de l'augmentation sous RCP 4.5 correspond à celui du futur moyen, le scénario RCP 8.5 représente un « autre monde ». Dans les régions de basse altitude, le nombre moyen de jours très chauds par année est de l'ordre de 20 à 25 jours, dans les régions de moyenne altitude (PlaNor, PlaSud) de 10 à 20 jours. Même dans la région PreAlp, des jours très chauds apparaissent pour la première fois selon ce scénario.

Les changements en un clin d'œil

La figure suivante résume les résultats sous forme graphique. Organisée en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elle montre la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

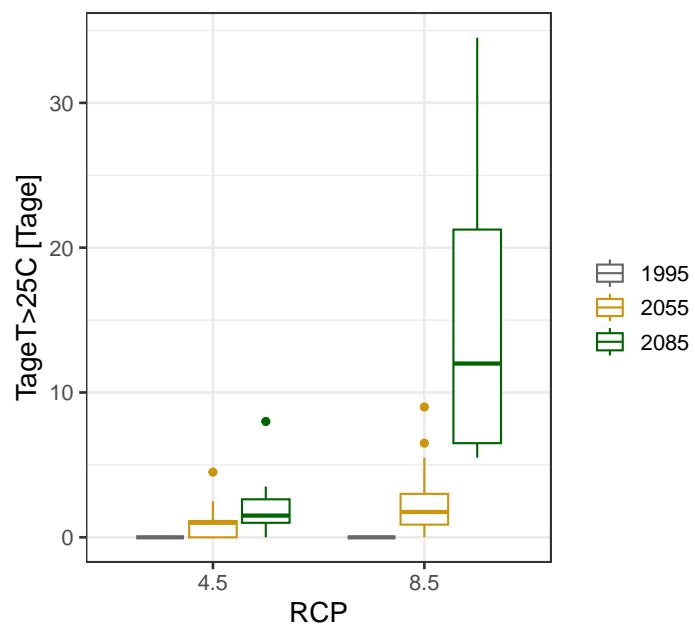


Fig. 2.37 : Nombre moyen de jours très chauds par année dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.19 Nombre moyen de jours froids par année

Définition de l'indicateur

Nombre moyen de jours froids par année [d/dt]. L'évaluation de cet indicateur n'est effectuée que sur une base annuelle.

Démarche : (1) Détermination du nombre de jours froids, c'est-à-dire de jours avec une température moyenne de l'air < 0 °C par année individuelle. (2) Calcul de la moyenne à partir de la répartition du nombre de jours froids des années individuelles.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.167 : Nombre moyen de jours froids par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 56.0 | 42 | 35.0 | 48.2 | 55.0 | 80.2 |
| Année | TabsD | 57.5 | 42 | 34.5 | 47.5 | 56.0 | 82.5 |
| Année | Δ | -1.5 | 0 | 0.5 | 0.8 | -1.0 | -2.2 |
| Année | Δ% | -2.6 | 0 | 1.4 | 1.6 | -1.8 | -2.7 |

Sous **RCP 4.5**, toutes les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles TabsD.

Tab. 2.4.168 : Nombre moyen de jours froids par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 57.0 | 41.8 | 34.8 | 47.8 | 55.0 | 80.8 |
| Année | TabsD | 57.5 | 42.0 | 34.5 | 47.5 | 56.0 | 82.5 |
| Année | Δ | -0.5 | -0.2 | 0.2 | 0.2 | -1.0 | -1.8 |
| Année | Δ% | -0.9 | -0.6 | 0.7 | 0.5 | -1.8 | -2.1 |

Sous **RCP 8.5** également, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent partout très bien les valeurs annuelles TabsD.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.169 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours froids par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | -20.5 | -19.5 | -16.8 | -19.8 | -20 | -24 |
| Année | Δ% | -36.6 | -46.4 | -48.0 | -41.1 | -36.4 | -29.9 |
| | | ■ -20 | ■ -10 | ■ -5 | ■ 5 | ■ 10 | ■ 20 |

Tab. 2.4.170 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours froids par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | -26.5 | -20.2 | -17.8 | -21.5 | -23.5 | -33 |
| Année | Δ% | -46.5 | -48.3 | -51.1 | -45.0 | -42.7 | -40.8 |
| | | ■ -20 | ■ -10 | ■ -5 | ■ 5 | ■ 10 | ■ 20 |

Le nombre moyen de jours froids par année change dans une très large mesure par rapport à la période de référence 1981–2010. Le nombre de jours froids diminue de 21 jours en moyenne cantonale sous RCP 4.5 et de 27 jours sous RCP 8.5. En termes relatifs, les diminutions sont plus importantes dans les régions de basse altitude (BasBro à PlaSud) que dans la région PreAlp.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.171 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours froids par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | -26.5 | -22.2 | -19.5 | -24.2 | -26 | -29.8 |
| Année | Δ% | -47.3 | -52.9 | -55.7 | -50.2 | -47.3 | -37.2 |
| | | ■ -20 | ■ -10 | ■ -5 | ■ 5 | ■ 10 | ■ 20 |

Tab. 2.4.172 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours froids par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp | |
|-------|--|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Année | Δ | -40.8 | -32.5 | -29.2 | -34.2 | -39 | -52.2 |
| Année | Δ% | -71.6 | -77.8 | -83.9 | -71.5 | -70.9 | -64.6 |
| | [■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]] | | | | | | |

En moyenne cantonale, le nombre de jours froids diminue de 27 jours par rapport à la période de référence sous RCP 4.5, puis de 41 jours sous RCP 8.5. En termes relatifs, cela représente une diminution de 47 % resp. de 72 %. Une fois de plus, les diminutions relatives sont les plus faibles dans la région PreAlp.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément et les résultats résumés sous forme de tableaux. Les tableaux montrent le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence.

RCP 4.5

Tab. 2.4.173 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours froids par année sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| | [■ faibles ■ moyens ■ importants ■ très importants [-]] | | | | | | |

RCP 8.5

Tab. 2.4.174 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours froids par année sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Les changements en un clin d'œil

La figure suivante résume les résultats sous forme graphique. Organisée en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elle montre la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

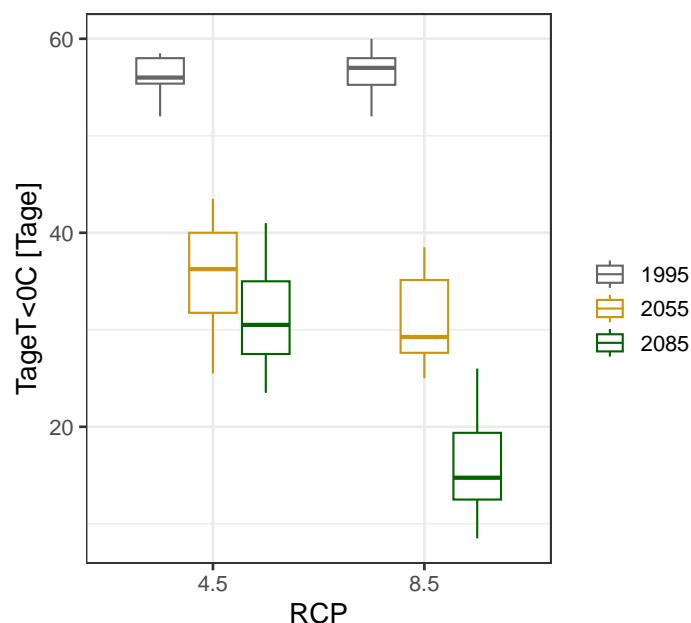


Fig. 2.38 : Nombre moyen de jours froids par année dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.20 Nombre moyen de jours très froids par année

Définition de l'indicateur

Nombre moyen de jours très froids par année [d/dt]. L'évaluation de cet indicateur n'est effectuée que sur une base annuelle.

Démarche : (1) Détermination du nombre de jours très froids, c'est-à-dire de jours avec une température moyenne de l'air < -5 °Cpar année individuelle. (2) Calcul de la moyenne à partir de la répartition du nombre de jours très froids des années individuelles.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.175 : Nombre moyen de jours très froids par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 9.8 | 4.5 | 2.8 | 6.8 | 9.8 | 21.8 |
| Année | TabsD | 8.5 | 4.0 | 3.0 | 6.0 | 9.0 | 22.0 |
| Année | Δ | 1.2 | 0.5 | -0.2 | 0.8 | 0.8 | -0.2 |
| Année | Δ% | 14.7 | 12.5 | -8.3 | 12.5 | 8.3 | -1.1 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent bien les valeurs annuelles TabsD. La qualité de la modélisation varie assez fortement entre les régions. Ainsi, la région PreAlp est très bien modélisée, la région BasBro seulement de manière suffisante.

Tab. 2.4.176 : Nombre moyen de jours très froids par année [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 10.8 | 4 | 2.5 | 6.8 | 10.2 | 22 |
| Année | TabsD | 8.5 | 4 | 3.0 | 6.0 | 9.0 | 22 |
| Année | Δ | 2.2 | 0 | -0.5 | 0.8 | 1.2 | 0 |
| Année | Δ% | 26.5 | 0 | -16.7 | 12.5 | 13.9 | 0 |

Sous **RCP 8.5**, la qualité de la modélisation est dans l'ensemble seulement suffisante. À noter les grandes différences entre les régions.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.177 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours très froids par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | -6.5 | -3.5 | -2.5 | -4.5 | -6.2 | -11.8 |
| Année | Δ% | -66.3 | -77.8 | -89.3 | -66.2 | -63.3 | -54.1 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.178 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours très froids par année dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | -7.5 | -4 | -2.5 | -5.8 | -7.2 | -12 |
| Année | Δ% | -69.4 | -100.0 | -100.0 | -85.3 | -70.6 | -54.5 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Dans les deux scénarios, le nombre moyen de jours très froids diminue dans une très large mesure d'un point de vue relatif : -66 % sous RCP 4.5 et -69 % sous RCP 8.5 (en moyenne cantonale). Cela correspond à une diminution de 7–8 jours. En termes relatifs, les diminutions sont plus importantes dans les régions de basse altitude que dans la région PreAlp.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.179 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours très froids par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp | |
|-------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Année | Δ | -7 | -4 | -2.8 | -5.2 | -7 | -13.5 |
| Année | Δ% | -71.4 | -88.9 | -100.0 | -76.5 | -71.4 | -61.9 |
| | ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

Tab. 2.4.180 : Changements absolus et relatifs du nombre moyen de jours très froids par année dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp | |
|-------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Année | Δ | -10.2 | -4 | -2.5 | -6.8 | -10 | -20 |
| Année | Δ% | -94.4 | -100.0 | -100.0 | -100.0 | -98.0 | -90.9 |
| | ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

Sous RCP 4.5, les diminutions relatives s'approchent de -100 %; c'est-à-dire que les jours très froids disparaissent peu à peu. Sous RCP 8.5, ils ne se produiront pratiquement plus.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément et les résultats résumés sous forme de tableaux. Les tableaux montrent le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence.

RCP 4.5

Tab. 2.4.181 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours très froids par année sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

RCP 8.5

Tab. 2.4.182 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours très froids par année sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Évaluation générale : écart très important par rapport à la période de référence 1981–2010.

Les changements en un clin d'œil

La figure suivante résume les résultats sous forme graphique. Organisée en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elle montre la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

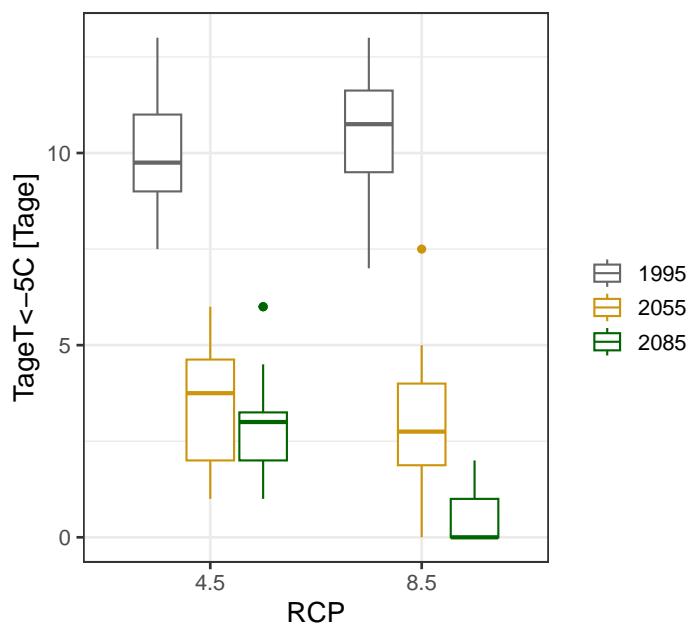


Fig. 2.39 : Nombre moyen de jours très froids par année dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.21 Nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies de 200 °C

Définition de l'indicateur

Nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies de 200 °C [d/dt]. Il est à noter qu'une seule valeur par année peut être déterminée pour cet indicateur.

Démarche : (1) Calcul de la somme des températures pour prairies en additionnant les températures journalières moyennes positives. Les températures positives sont multipliées par le facteur 0,5 en janvier, par le facteur 0,75 en février et par le facteur 1 à partir de mars. (2) Détermination du jour de l'année où la somme des températures de 200 °C est atteinte. (3) Calcul de la moyenne de ces jours pour obtenir la valeur caractéristique pour la période de 30 ans en question.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.183 : Nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies de 200 °C [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 107 | 92 | 87 | 96 | 105 | 134 |
| Année | TabsD | 107 | 91 | 87 | 96 | 105 | 133 |
| Année | Δ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Année | Δ% | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles TabsD.

Tab. 2.4.184 : Nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies de 200 °C [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 108 | 92 | 87 | 96 | 105 | 134 |
| Année | TabsD | 107 | 91 | 87 | 96 | 105 | 133 |
| Année | Δ | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| Année | Δ% | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |

Sous **RCP 8.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent à nouveau très bien les valeurs annuelles TabsD.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.185 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | -15 | -16 | -15 | -16 | -16 | -19 |
| | -21 | -14 | -7 | 7 | 14 | 21 |

[d]

Tab. 2.4.186 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | -19 | -19 | -17 | -20 | -19 | -25 |
| | -21 | -14 | -7 | 7 | 14 | 21 |

[d]

RCP 4.5 : Sous ce scénario, la somme des températures pour prairies est atteinte en moyenne cantonale 15 jours plus tôt et même 19 jours plus tôt dans la région PreAlp. Il s'agit donc de diminutions importantes.

RCP 8.5 : Sous ce scénario, la somme des températures pour prairies est atteinte en moyenne 19 jours plus tôt que durant la période de référence. Les changements sont importants à très importants.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.187 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | -22 | -19 | -16 | -21 | -23 | -24 |
| [d] | -21 | -14 | -7 | 7 | 14 | 21 |

Tab. 2.4.188 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | -38 | -32 | -29 | -34 | -39 | -52 |
| [d] | -21 | -14 | -7 | 7 | 14 | 21 |

RCP 4.5 : En moyenne, la somme des températures pour prairies est atteinte environ trois semaines plus tôt que durant la période de référence. Cela correspond en majorité à de très importantes diminutions.

RCP 8.5 : La somme des températures pour prairies est atteinte ici environ cinq semaines plus tôt que durant la période de référence, et même sept à huit semaines plus tôt dans la région PreAlp. Il s'agit donc dans l'ensemble de changements très importants.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément et les résultats résumés sous forme de tableaux. Les tableaux montrent le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence.

RCP 4.5

Tab. 2.4.189 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2085 | Année | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

RCP 8.5

Tab. 2.4.190 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Les changements en un clin d'œil

La figure suivante résume les résultats sous forme graphique. Organisée en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elle montre la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

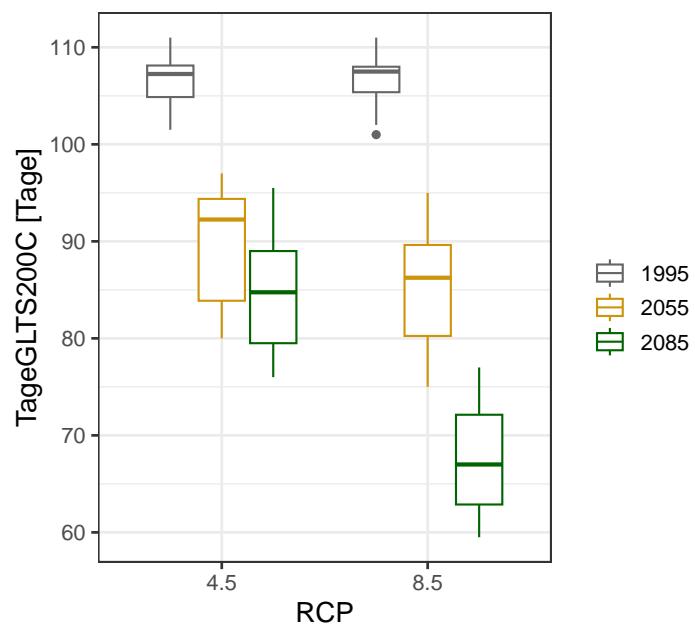


Fig. 2.40 : Nombre moyen annuel des jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies de 200 °C dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.22 Nombre moyen de jours de gel tardif

Nombre moyen de jours de gel tardif [d/dt]. Les jours de gel tardif sont les jours avec une température journalière moyenne de <5 °C ayant lieu après que la somme des températures pour prairies de 200 °C a été atteinte. Démarche : (1) Le calcul de la somme des températures pour prairies en additionnant les températures moyennes journalières positives donne chaque année le jour déterminant pour les calculs suivants. À partir de ce jour, l'occurrence de jours de gel tardif est vérifiée. Les jours de gel tardif sont additionnés pour obtenir le nombre de jours de gel tardif. (2) Calcul de la moyenne du nombre de jours de gel tardif par année individuelle afin d'obtenir la valeur caractéristique pour la période de 30 ans considérée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Les valeurs de référence de cet indicateur pour la période 1981–2010 sont très petites. Par conséquent, même de faibles changements absous entraînent de grands changements relatifs. C'est pourquoi les différences absolues et relatives entre les valeurs de référence et les valeurs modélisées sont présentées ici.

Tab. 2.4.191 : Nombre moyen de jours de gel tardif [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 3.5 | 2.5 | 2.5 | 2.2 | 3.5 | 0.5 |
| Année | TabsD | 4.0 | 5.0 | 4.0 | 5.5 | 4.0 | 2.0 |
| Année | Δ | -0.5 | -2.5 | -1.5 | -3.2 | -0.5 | -1.5 |
| Année | Δ% | -12.5 | -50.0 | -37.5 | -59.1 | -12.5 | -75.0 |

Tab. 2.4.192 : Nombre moyen de jours de gel tardif [d/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | CH2018 | 3 | 2 | 2.2 | 2.0 | 3 | 0.8 |
| Année | TabsD | 4 | 5 | 4.0 | 5.5 | 4 | 2.0 |
| Année | Δ | -1 | -3 | -1.8 | -3.5 | -1 | -1.2 |
| Année | Δ% | -25 | -60 | -43.8 | -63.6 | -25 | -62.5 |

Une évaluation objective de la qualité de la modélisation est difficile pour les deux scénarios, car de petits changements absolus entraînent de très grands changements relatifs en raison des très petites valeurs de référence. Néanmoins, le modèle peut probablement tout de même être utilisé pour donner un ordre de grandeur de l'évolution des jours de gel tardif.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.193 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours de gel tardif dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | 1.5 | 1 | 1.8 | 1.8 | 1.5 | 2.5 |
| Année | Δ% | 42.9 | 40.0 | 72.0 | 81.8 | 42.9 | 500.0 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.194 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours de gel tardif dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | 1.2 | 1.5 | 1.2 | 2 | 1.2 | 3.2 |
| Année | Δ% | 40.0 | 75.0 | 54.5 | 100.0 | 40.0 | 400.0 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Le nombre moyen de jours de gel tardif dans le canton et ses régions augmente de 1 à 2,5 jours sous RCP 4.5. Il s'agit d'une augmentation très importante au vu des valeurs de référence très faibles de la période 1981–2010. Les augmentations observées sous RCP 8.5 sont du même ordre de grandeur. Dans les deux scénarios,

l'augmentation la plus importante concerne la région PreAlp, où le nombre moyen de jours de gel tardif fait plus que doubler par rapport à la période de référence.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.195 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours de gel tardif dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | 1.8 | 0.5 | 1.2 | 1 | 1.8 | 2.8 |
| Année | Δ% | 51.4 | 20.0 | 48.0 | 45.5 | 51.4 | 560.0 |
| | | ■ -20 | ■ -10 | ■ -5 | ■ 5 | ■ 10 | ■ 20 |

Tab. 2.4.196 : Changements absolu et relatifs du nombre moyen de jours de gel tardif dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|----|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | Δ | 4 | 2 | 1.5 | 2.5 | 3 | 7.8 |
| Année | Δ% | 133.3 | 100.0 | 68.2 | 125.0 | 100.0 | 975.0 |
| | | ■ -20 | ■ -10 | ■ -5 | ■ 5 | ■ 10 | ■ 20 |

Sous RCP 4.5, le nombre de jours de gel tardif présente des augmentations du même ordre de grandeur par rapport à la période de référence. Sous RCP 8.5, le nombre de jours de gel tardif est nettement plus élevé, notamment dans la région PreAlp. Cela s'explique par le fait que la somme des températures pour prairies est atteinte beaucoup plus tôt pour ce scénario que durant la période de référence.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément et les résultats résumés sous forme de tableaux. Les tableaux montrent le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence.

RCP 4.5

Tab. 2.4.197 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours de gel tardif sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

RCP 8.5

Tab. 2.4.198 : Synthèse des changements du nombre moyen de jours de gel tardif sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Les changements en un clin d'œil

La figure suivante résume les résultats sous forme graphique. Organisée en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elle montre la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

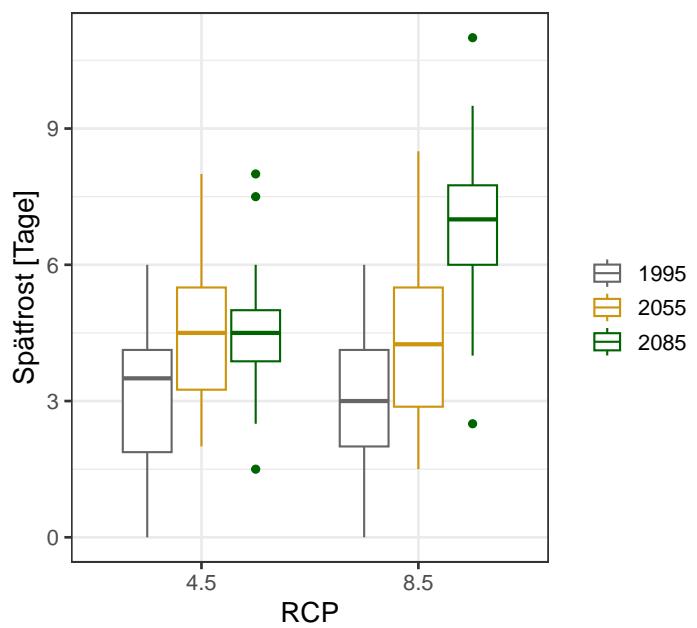


Fig. 2.41 : Nombre moyen annuel de jours de gel tardif dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.4.23 Évapotranspiration potentielle

Définition de l'indicateur

L'évapotranspiration potentielle [mm/dt] est calculée selon l'approche de Hamon avec une granularité par année et par saison. L'approche de Hamon est une méthode largement utilisée pour calculer l'évapotranspiration potentielle à partir de la température de l'air.

Démarche : (1) Calcul de l'évapotranspiration potentielle pour chaque année individuelle. (2) Calcul de la moyenne de ces valeurs pour obtenir la valeur caractéristique pour la période de 30 ans considérée.

Valeurs initiales et évaluation de la qualité de la modélisation

Les deux tableaux suivants comparent les valeurs de référence TabsD de la période 1981–2020 avec les valeurs modélisées CH2018 de la même période, et ce pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5. Comme chaque scénario d'émissions représente un environnement modélisé distinct avec les chaînes de modèles correspondantes, les valeurs CH2018 modélisées peuvent différer légèrement.

Tab. 2.4.199 : Évapotranspiration potentielle [mm/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 4.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 611 | 673 | 698 | 657 | 621 | 526 |
| 2 | Année | TabsD | 611 | 672 | 700 | 658 | 621 | 525 |
| 4 | Année | Δ% | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | DJF | CH2018 | 30 | 33 | 34 | 32 | 31 | 27 |
| 6 | DJF | TabsD | 30 | 33 | 33 | 32 | 31 | 28 |
| 8 | DJF | Δ% | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | -1 |
| 9 | MAM | CH2018 | 150 | 168 | 174 | 164 | 153 | 127 |
| 10 | MAM | TabsD | 156 | 173 | 179 | 169 | 159 | 131 |
| 12 | MAM | Δ% | -3 | -3 | -3 | -3 | -4 | -3 |
| 13 | JJA | CH2018 | 318 | 351 | 365 | 342 | 323 | 272 |
| 14 | JJA | TabsD | 313 | 345 | 359 | 337 | 318 | 267 |
| 16 | JJA | Δ% | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 17 | SON | CH2018 | 111 | 120 | 124 | 117 | 112 | 98 |
| 18 | SON | TabsD | 109 | 118 | 121 | 115 | 111 | 97 |
| 20 | SON | Δ% | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |

Sous **RCP 4.5**, les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles TabsD, et ce dans pour toutes les saisons et régions.

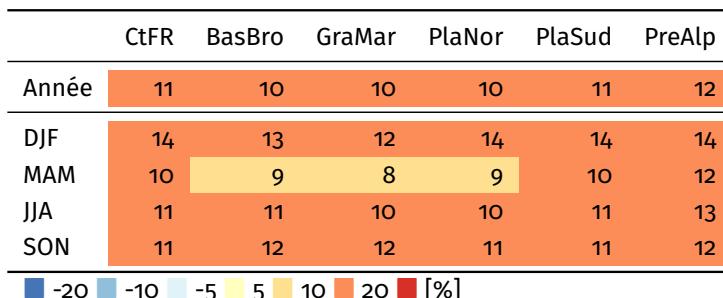
Tab. 2.4.200 : Évapotranspiration potentielle [mm/dt] : Comparaison entre les données des scénarios climatiques CH2018 et les données d'observation maillées TabsD pour la période 1981–2010 sous RCP 8.5.

| | | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|----|-------|--------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | Année | CH2018 | 611 | 673 | 698 | 656 | 621 | 525 |
| 2 | Année | TabsD | 611 | 672 | 700 | 658 | 621 | 525 |
| 4 | Année | Δ% | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | DJF | CH2018 | 30 | 33 | 33 | 32 | 31 | 27 |
| 6 | DJF | TabsD | 30 | 33 | 33 | 32 | 31 | 28 |
| 8 | DJF | Δ% | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | -1 |
| 9 | MAM | CH2018 | 150 | 167 | 174 | 164 | 153 | 127 |
| 10 | MAM | TabsD | 156 | 173 | 179 | 169 | 159 | 131 |
| 12 | MAM | Δ% | -3 | -3 | -3 | -3 | -4 | -3 |
| 13 | JJA | CH2018 | 319 | 351 | 366 | 343 | 324 | 272 |
| 14 | JJA | TabsD | 313 | 345 | 359 | 337 | 318 | 267 |
| 16 | JJA | Δ% | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 17 | SON | CH2018 | 111 | 120 | 124 | 117 | 112 | 98 |
| 18 | SON | TabsD | 109 | 118 | 121 | 115 | 111 | 97 |
| 20 | SON | Δ% | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 |

Sous **RCP 8.5** également, toutes les valeurs modélisées CH2018 reproduisent très bien les valeurs annuelles TabsD.

Changements vers 2055

Tab. 2.4.201 : Changements relatifs de l'évapotranspiration potentielle dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.



Tab. 2.4.202 : Changements relatifs de l'évapotranspiration potentielle dans le futur moyen (2040–2069) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 14 | 13 | 13 | 13 | 14 | 16 |
| DJF | 16 | 15 | 14 | 16 | 16 | 16 |
| MAM | 13 | 12 | 12 | 12 | 13 | 16 |
| JJA | 15 | 14 | 14 | 14 | 15 | 18 |
| SON | 16 | 16 | 17 | 16 | 16 | 17 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

RCP 4.5 : Les changements de l'évapotranspiration potentielle annuelle par rapport à la période de référence 1981–2010 sont de l'ordre de 10 %. Les différences entre les régions sont minimes. L'augmentation relative de l'évapotranspiration potentielle est légèrement plus importante en hiver qu'au cours des autres saisons. Autrement, l'ampleur des changements est partout très similaire.

RCP 8.5 : Pour ce scénario aussi, les valeurs annuelles sont uniformes sur l'ensemble du territoire cantonal. Comme c'est déjà le cas sous RCP 4.5, l'augmentation est la plus importante dans la région PreAlp. Les valeurs saisonnières varient entre 12 et 18 %.

Changements vers 2085

Tab. 2.4.203 : Changements relatifs de l'évapotranspiration potentielle dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 15 | 13 | 13 | 13 | 15 | 16 |
| DJF | 15 | 16 | 16 | 15 | 15 | 15 |
| MAM | 13 | 11 | 11 | 11 | 13 | 14 |
| JJA | 14 | 13 | 13 | 13 | 13 | 16 |
| SON | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 2.4.204 : Changements relatifs de l'évapotranspiration potentielle dans le futur lointain (2070–2099) par rapport à la période de référence (1981–2010) sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|-------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Année | 28 | 26 | 26 | 26 | 28 | 32 |
| DJF | 33 | 32 | 29 | 33 | 35 | 33 |
| MAM | 25 | 23 | 23 | 23 | 25 | 31 |
| JJA | 30 | 27 | 27 | 27 | 29 | 33 |
| SON | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 | 29 |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 30 [%]

RCP 4.5 : L'évapotranspiration potentielle évolue de manière très uniforme par rapport à la période de référence, tant au niveau régional que saisonnier, avec des valeurs comprises entre 11 et 16 %.

RCP 8.5 : Dans ce scénario, l'évapotranspiration potentielle annuelle augmente de 26 à 32 % par rapport à la période de référence. L'augmentation est la plus importante dans la région PreAlp. Les augmentations saisonnières varient entre 23 et 33 %. Les augmentations ont tendance à être plus faibles au printemps (MAM) qu'au cours des autres saisons.

Synthèse et vue d'ensemble

Dans ce chapitre, l'évolution de l'indicateur est synthétisée en une vue d'ensemble. La démarche est décrite au chap. 2.3.5. Les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5 sont traités séparément. Les résultats sont résumés par scénario dans deux tableaux qui devraient parler d'eux-mêmes.

Le premier tableau montre le degré d'écart des valeurs de l'indicateur par rapport à la période de référence 1981–2010 dans tout le canton ainsi que dans les cinq régions. Une distinction est faite entre les écarts sur une base annuelle et – condensé en une seule valeur – sur une base saisonnière. Ces écarts sont donnés pour le futur moyen et lointain. Les tons verts indiquent des écarts faibles à moyens, les tons violets des écarts importants à très importants par rapport à la période de référence. Les écarts indiqués dans le tableau ne tiennent pas compte des signes, à savoir s'il s'agit d'augmentations ou de diminutions par rapport à la période de référence.

Le deuxième tableau regroupe ces informations en une évaluation finale des écarts (écart Y, écart Saisons). Cette évaluation finale permet une comparaison directe du degré d'écart de tous les indicateurs climatiques dans la synthèse globale au chapitre 2.5. En outre, les signes des changements sont cette fois-ci pris en compte. Cette évaluation est le résultat de la combinaison des évolutions saisonnières dans le canton et dans les régions : + signifie une augmentation des valeurs par rapport à la période de référence, - une diminution. ± signifie que les signes des changements pour les différentes saisons dans les cinq régions ne

sont pas les mêmes et que l'évolution n'est donc pas uniforme. L'ampleur des changements est décrite par le nombre de signes plus ou moins :

+/- : faible augmentation/diminution

++/- - : augmentation/diminution moyenne

+++/- - - : augmentation/diminution importante

++++/- - - - : augmentation/diminution très importante

RCP 4.5

Tab. 2.4.205 : Synthèse des changements de l'évapotranspiration potentielle sur la base du scénario d'émissions RCP 4.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2055 | Saisons | 12 | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 |
| 2085 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2085 | Saisons | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.206 : Évaluation finale des écarts de l'évapotranspiration potentielle sous RCP 4.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|------------------|-----|------------------|-----|-----|-----|-----|
| vers 2055 | important | +++ | important | +++ | ++ | +++ | +++ |
| vers 2085 | important | +++ | important | +++ | +++ | +++ | +++ |

RCP 8.5

Tab. 2.4.207 : Synthèse des changements de l'évapotranspiration potentielle sur la base du scénario d'émissions RCP 8.5.

| | | CtFR | BasBro | GraMar | PlaNor | PlaSud | PreAlp |
|------|---------|------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2055 | Année | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2055 | Saisons | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| 2085 | Année | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| 2085 | Saisons | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 |

■ faibles | ■ moyens | ■ importants | ■ très importants | [-]

Tab. 2.4.208 : Évaluation finale des écarts de l'évapotranspiration potentielle sous RCP 8.5. Y : année, DJF : hiver, MAM : printemps, JJA : été, SON : automne.

| Période | écart Y | Y | écart saisons | DJF | MAM | JJA | SON |
|-----------|-----------------------|------|-----------------------|------|------|------|------|
| vers 2055 | important | +++ | important | +++ | +++ | +++ | +++ |
| vers 2085 | très important | ++++ | très important | ++++ | ++++ | ++++ | ++++ |

Les changements en un clin d'œil

Les figures suivantes résument les résultats sous forme graphique. Organisées en fonction des deux scénarios d'émissions et des trois périodes, elles montrent la dispersion des valeurs des 16 chaînes de modèles ainsi que la valeur médiane de ces chaînes de modèles à l'aide de ce que l'on appelle des box plots. La boîte (box), délimitée par les quartiles supérieur et inférieur, contient les 50 % centraux des valeurs. Les valeurs situées en dehors de cette boîte sont représentées par des lignes (moustaches/whiskers), les valeurs aberrantes par des points.

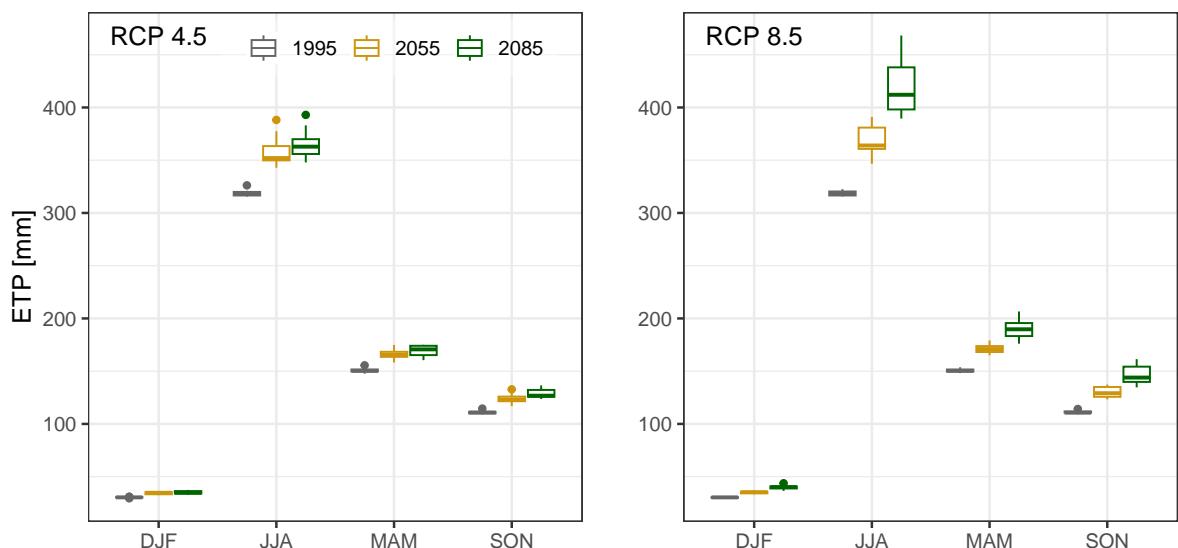


Fig. 2.42 : Évapotranspiration potentielle moyenne par saison dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

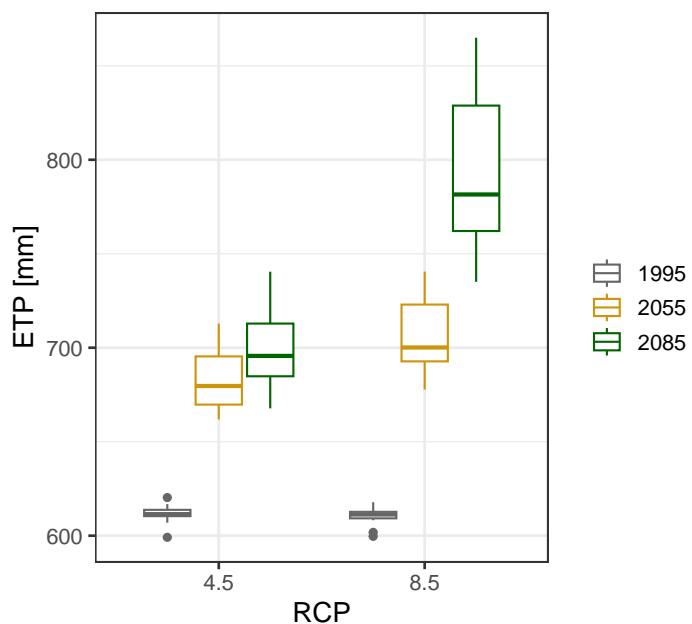


Fig. 2.43 : Évapotranspiration potentielle moyenne annuelle dans le canton de Fribourg : les boxplots montrent la dispersion des valeurs médianes des 16 chaînes de modèles respectives.

2.5 Synthèse des changements

Le présent rapport documente, à la manière d'un ouvrage de référence, l'évolution future des principaux indicateurs climatiques dans le contexte des changements climatiques. Dans cette synthèse globale, les résultats des différents indicateurs sont présentés en une vue d'ensemble divisée en trois parties :

1. Aperçu des écarts par rapport à la période de référence 1981–2010;
2. Aperçu des changements annuels et saisonniers par rapport à la période de référence;
3. Description des aspects centraux des changements.

Dans ces trois parties, les mêmes résultats sont examinés sous différents angles afin de tenir compte de leur caractère multidimensionnel.

Nous illustrons ici la nature et l'ampleur des écarts et des changements dans le futur moyen et lointain. Ce rapport n'a cependant pas pour but de déterminer les répercussions de ces changements, c'est-à-dire leurs conséquences sur la société et l'économie, sur la vie dans le canton de Fribourg et dans ses régions. Nous laissons aux spécialistes le soin de répondre à ces questions.

Dans ce contexte, il convient de souligner une nouvelle fois les différences entre « écart » et « changement ». L'écart indique de manière globale, à l'aide d'un seul indice, dans quelle mesure le futur moyen ou lointain diffère de la période de référence 1981–2010. Les changements incluent également des informations sur la saison, le signe et l'ampleur de l'écart. Selon le niveau de synthèse souhaité, il est ainsi indiqué de se référer à l'un ou l'autre tableau.

2.5.1 Écarts par rapport à la période de référence 1981–2010

Les deux tableaux de ce chapitre montrent les écarts par rapport à la période de référence. Le tableau 2.5.1 se réfère aux valeurs annuelles, le tableau 2.5.2 se réfère aux valeurs saisonnières résumées en un seul indice (catégorie). La méthodologie appliquée pour le calcul de cet indice est décrite au chapitre 2.3.5 et plus particulièrement dans la figure 2.5.

a) Valeurs annuelles

Ce chapitre fait référence au tableau 2.5.1. Dans la partie supérieure du tableau figurent les indicateurs de précipitations et dans la partie inférieure les indicateurs de température de l'air.

Les deux premières colonnes décrivent la qualité de la modélisation pour la période de référence (cf. chap. 2.3.4). Pour 2/3 des indicateurs, la qualité de la modélisation est très bonne. Dans seulement 1/8 des cas, le modèle est suffisant. En ce qui concerne l'indicateur des valeurs minimales annuelles moyennes de la somme

des précipitations sur 3 semaines, aucun résultat n'a pu être obtenu en raison de la qualité insuffisante de la modélisation.

Tab. 2.5.1 : Evaluation synthétique des changements climatiques dans le canton de Fribourg et ses régions sur une base annuelle pour le futur moyen (2055) et le futur lointain (2085) sous RCP 4.5 et RCP 8.5. Qualité : évaluation de la qualité de l'ensemble des chaînes de modèles M16 de CH2018 du point de vue de l'indicateur respectif.

| Indicateur | Changement vers | | | | | | | |
|--|-----------------|-----|------|-----|------|-----|--|--|
| | Qualité* | | 2055 | | 2085 | | | |
| | 4.5 | 8.5 | 4.5 | 8.5 | 4.5 | 8.5 | | |
| Quantité moyenne de précipitations | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| Valeurs max. annuelles moyennes des précipitations journalières | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 2 | | |
| Valeurs max. ann. rares des précipitations journalières | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 3 | | |
| Valeurs max. ann. très rares des précipitations journalières | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | | |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares des précipitations journalières | 2 | 2 | 2 | 3 | 2 | 4 | | |
| Valeurs max. ann. moyennes des précipitations sur 3 jours | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | | |
| Valeurs max. ann. rares des précipitations sur 3 jours | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 | | |
| Valeurs max. ann. très rares des précipitations sur 3 jours | 2 | 2 | 3 | 2 | 2 | 3 | | |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares des précipitations sur 3 jour | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | | |
| Valeurs min. ann. moyennes de la somme des précip. sur 3 semaines | 4 | 4 | | | | | | |
| Nombre moyen de jours sans précipitations par année | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| Température moyenne de l'air | 1 | 1 | 2 | 3 | 3 | 4 | | |
| Valeurs max. ann. moyennes de la temp. de l'air journalière | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | | |
| Valeurs max. annuelles rares de la temp. de l'air journalière | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 4 | | |
| Valeurs max. ann. très rares de la temp. de l'air journalière | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | | |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares de la temp. de l'air journalière | 3 | 3 | 3 | 4 | 3 | 4 | | |
| Nombre moyen de jours chauds par année | 1 | 1 | 3 | 4 | 4 | 4 | | |
| Nombre moyen de jours très chauds par année | 1 | 1 | | | | | | |
| Nombre moyen de jours froids par année | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | | |
| Nombre moyen de jours très froids par année | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 4 | | |
| Nombre moyen de jours extrêmement froids par année | 1 | 1 | | | | | | |
| N. moy. de jours jusqu'à la somme des temp. pour prairies est 200°C | 1 | 1 | 3 | 3 | 4 | 4 | | |
| Nombre moyen de jours de gel tardif | 1 | 1 | 4 | 4 | 4 | 4 | | |
| Évapotranspiration potentielle selon Hamon | 1 | 1 | 3 | 3 | 3 | 4 | | |

*Qualité de la modélisation : ■ très bonne | ■ bonne | ■ suffisante | ■ insuffisante | [-]

Changement : ■ faible | ■ moyen | ■ important | ■ très important | [-]

Tab. 2.5.2 : Evaluation synthétique des changements climatiques dans le canton de Fribourg et ses régions pour le futur moyen (2055) et le futur lointain (2085) sous RCP 4.5 et RCP 8.5 sur la base des modélisation saisonnières. Qualité : évaluation de la qualité de l'ensemble des chaînes de modèles M16 de CH2018 du point de vue de l'indicateur respectif.

| Indicateur | Changement vers | | | | | |
|--|-----------------|-----|------|-----|------|-----|
| | Qualité* | | 2055 | | 2085 | |
| | 4.5 | 8.5 | 4.5 | 8.5 | 4.5 | 8.5 |
| Quantité moyenne de précipitations | 1 | 1 | 7 | 9 | 9 | 12 |
| Valeurs max. annuelles moyennes des précipitations journalières | 2 | 1 | 5 | 7 | 7 | 9 |
| Valeurs max. ann. rares des précipitations journalières | 2 | 2 | 6 | 9 | 6 | 10 |
| Valeurs max. ann. très rares des précipitations journalières | 3 | 2 | 6 | 9 | 6 | 12 |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares des précipitations journalières | 2 | 2 | 6 | 9 | 7 | 11 |
| Valeurs max. annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours | 2 | 2 | 6 | 7 | 5 | 8 |
| Valeurs max. annuelles rares des précipitations sur 3 jours | 3 | 3 | 5 | 8 | 5 | 10 |
| Valeurs max. annuelles très rares des précipitations sur 3 jours | 3 | 3 | 6 | 8 | 7 | 10 |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares des précip. sur 3 jour | 3 | 3 | 10 | 7 | 10 | 9 |
| Nombre moyen de jours sans précipitations par année | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 8 |
| Température moyenne de l'air | 1 | 2 | 8 | 11 | 11 | 16 |
| Valeurs max. ann. moyennes de la temp. de l'air journalière | 2 | 3 | 10 | 12 | 12 | 16 |
| Valeurs max. annuelles rares de la temp. de l'air journalière | 2 | 2 | 11 | 14 | 12 | 16 |
| Valeurs max. ann. très rares de la temp. de l'air journalière | 3 | 3 | 10 | 14 | 12 | 16 |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares de la temp. de l'air journalière | 3 | 3 | 10 | 14 | 12 | 16 |
| Évapotranspiration potentielle selon Hamon | 1 | 1 | 12 | 12 | 12 | 16 |

*Qualité de la modélisation : ■ très bonne | □ bonne | ■ suffisante | ■ insuffisante | [-]

Changement : ■ faible | ■ moyen | ■ important | ■ très important | [-]

Indicateurs de précipitations

Ce groupe comprend un total de 10 indicateurs. Sous RCP 4.5, 50 % des indicateurs ne s'écartent que légèrement (écart faible) de la période de référence 1981–2010 dans le futur moyen (2055). Dans le futur lointain (2085), il n'y a plus que 3 indicateurs sur 10 qui ne diffèrent que peu de la période de référence.

Comme l'illustre la comparaison tant pour le futur moyen que pour le futur lointain, une nette différence se dégage entre les deux scénarios climatiques RCP 4.5 (mesures de protection du climat limitées) et RCP 8.5 (sans mesures de protection du climat). Le « régime fribourgeois des précipitations » à la fin du siècle sera différent sous RCP 4.5, avec des écarts généralement moyens par rapport à la période de référence, et sous RCP 8.5, avec des écarts généralement importants. Il convient toutefois de souligner que même sous

RCP 8.5, les quantités annuelles moyennes de précipitations ne s'écartent que peu de celles de la période de référence.

Indicateurs de température de l'air

Déjà dans le futur moyen sous RCP 4.5, les 13 indicateurs de ce groupe s'écartent pour la plupart dans une mesure importante à très importante de la période de référence 1981–2010. L'ampleur des écarts est encore plus marquée sous RCP 8.5. Dans le futur lointain, 10 indicateurs sur 13 s'écartent dans une mesure très importante de la période de référence.

b) Saisons

Ce chapitre fait référence au tableau 2.5.2. Les indicateurs de précipitations figurent à nouveau dans la moitié supérieure du tableau et les indicateurs de température de l'air dans la moitié inférieure. Pour certains indicateurs relatifs à la température de l'air, aucune valeur saisonnière n'a pu être calculée en raison de la définition même de l'indicateur (par ex. nombre moyen de jours chauds par année).

Considérons tout d'abord la qualité de la modélisation. Il apparaît d'emblée que la qualité de la modélisation n'est pas aussi bonne pour cette résolution temporelle que pour les valeurs annuelles. Seuls 1/4 des indicateurs affichent une qualité de modélisation très bonne.

Indicateurs de précipitations

À la différence des valeurs annuelles, les écarts par rapport à la période de référence 1981–2010 sont plus importants pour les valeurs saisonnières :

RCP 4.5 : vers 2055 et 2085 généralement moyens ;

RCP 8.5 : vers 2055 généralement moyens et vers 2085 moyens à importants.

Les écarts les plus faibles dans l'ensemble concernent le nombre moyen de jours sans précipitations.

Indicateurs de température de l'air

L'ampleur des écarts est relativement homogène sur l'ensemble des indicateurs :

RCP 4.5 : écarts importants dans le futur moyen et lointain. Même si les écarts pour les deux périodes futures tombent dans la même catégorie, les valeurs additionnées (par exemple 10–12 pour les valeurs maximales annuelles moyennes de la température journalière moyenne) montrent que les écarts par rapport à la période de référence sont un peu plus importants dans le futur lointain.

RCP 8.5 : Changements importants à très importants dans le futur moyen et écarts invariablement très importants dans le futur lointain.

2.5.2 Changements par rapport à la période de référence

Les tableaux 2.5.3 et 2.5.4 représentent la combinaison des tableaux « Évaluation finale des écarts » des différents indicateurs. Ils montrent pour chaque indicateur la moyenne des changements annuels et saisonniers par rapport à la période de référence 1981–2010 sur l’ensemble des régions dans le futur moyen et lointain. Une distinction est faite entre les deux scénarios d’émissions RCP 4.5 et RCP 8.5.

Indicateurs de précipitations

Les considérations suivantes se réfèrent aux tableaux 2.5.3.

Vers 2055, on remarque d’abord le contraste entre les changements sous RCP 4.5 et RCP 8.5. Sous RCP 4.5, les changements par rapport à la période de référence sont majoritairement faibles. Quelques changements plus importants (moyens à importants) peuvent toutefois aussi être constatés. Il s’agit – à une exception près (quantité moyenne de précipitations en été (JJA)) – d’augmentations (tons violettes). Les valeurs maximales annuelles rares, très rares et extrêmement rares des précipitations sur 3 jours présentent quant à elles des augmentations moyennes à importantes, ce qui indique une augmentation globale des quantités de précipitations continues rares et extrêmes. Les valeurs annuelles sont en règle générale plus importantes que les valeurs saisonnières, car elles incluent chaque année la valeur la plus élevée, qui peut se produire à différentes saisons d’une année à l’autre.

La quantité moyenne de précipitations estivales diminue de manière moyenne, se détachant ainsi de la tendance générale.

Sous RCP 8.5, la situation est sensiblement différente : les tons violettes dominent et plus particulièrement celui symbolisant une augmentation moyenne par rapport à la période de référence. Une fois de plus, la quantité moyenne de précipitations estivales ne reflète pas cette situation globale. Le schéma du changement des quantités moyennes de précipitations, bien connu d’autres régions de Suisse – augmentation en hiver, diminution en été – est ici aussi clairement reconnaissable.

En ce qui concerne les valeurs maximales annuelles des précipitations journalières et des précipitations sur 3 jours, les augmentations moyennes à importantes dominent en hiver. Il faut toutefois tenir compte du fait que les valeurs initiales de la période de référence 1981–2010 sont plus faibles en hiver qu’en été, ce qui relativise l’importance de ces augmentations.

Vers 2085, le contraste entre les scénarios est plus marqué que vers 2055. Si les changements sous RCP 4.5 se situent dans l’ordre de grandeur faible à moyen, ils sont majoritairement moyens sous RCP 8.5.

Examinons maintenant de manière plus détaillée les changements dans le futur lointain sous RCP 8.5 : un contraste marqué peut être observé au niveau des précipitations moyennes entre l’hiver avec d’importantes augmentations et l’été avec d’importantes diminutions. Par ailleurs, la quantité moyenne de précipitations augmente également dans une mesure moyenne au printemps. Il convient également de souligner que les

Tab. 2.5.3 : Comparaison des changements des indicateurs de précipitations sous RCP 4.5 et RCP 8.5 dans le futur moyen 2040–2069 (2055) et dans le futur lointain 2070–2099 (2085).

2055

| Indicateur | RCP4.5 | | | | | RCP8.5 | | | | |
|--|--------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|
| | An | DJF | MAM | JJA | SON | An | DJF | MAM | JJA | SON |
| Quantité moyenne de précipitations | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. ann. moyennes des précipitations journalières | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. ann. rares des précipitations journalières | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. ann. très rares des précipitations journalières | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. annuelles extrêmement rares des précipitations journalières | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. annuelles rares des précipitations sur 3 jours | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. annuelles très rares des précipitations sur 3 jours | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares des précip. sur 3 jour | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs min. ann. moyennes de la somme des précip. sur 3 sem. | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Nombre moyen de jours sans précipitations par année | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

■ importante | ■ moyenne | ■ faible diminution | ■ peu de changement | ■ faible | ■ moyenne | ■ importante augmentation | [-]

2085

| Indicateur | RCP4.5 | | | | | RCP8.5 | | | | |
|--|--------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|
| | An | DJF | MAM | JJA | SON | An | DJF | MAM | JJA | SON |
| Quantité moyenne de précipitations | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. ann. moyennes des précipitations journalières | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. ann. rares des précipitations journalières | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. ann. très rares des précipitations journalières | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. annuelles extrêmement rares des précipitations journalières | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. annuelles rares des précipitations sur 3 jours | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. annuelles très rares des précipitations sur 3 jours | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares des précip. sur 3 jour | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs min. ann. moyennes de la somme des précip. sur 3 sem. | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Nombre moyen de jours sans précipitations par année | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

■ importante | ■ moyenne | ■ faible diminution | ■ peu de changement | ■ faible | ■ moyenne | ■ importante augmentation | [-]

précipitations annuelles moyennes, c'est-à-dire la quantité totale d'eau disponible au cours d'une année, ne changent pratiquement pas en moyenne.

Les valeurs maximales annuelles des précipitations journalières et sur 3 jours présentent les tendances suivantes : augmentations sur une base annuelle, en hiver, au printemps et en automne; diminution en été, en particulier pour les précipitations sur 3 jours. L'assèchement estival se dessine également au niveau du nombre moyen de jours sans précipitations : Le nombre de jours sans précipitations augmente.

Indicateurs de température de l'air

Les observations suivantes font référence aux tableaux 2.5.4.

Les informations contenues dans ces tableaux sont aisément résumées : la température de l'air et les valeurs des indicateurs qui lui sont associés augmentent toutes. L'ampleur de ces augmentations dépend du scénario d'émissions et de l'horizon temporel, futur moyen ou lointain.

Dans le futur moyen, les augmentations sont majoritairement moyennes sous RCP 4.5 et varient entre des augmentations moyennes et importantes sous RCP 8.5. Dans le futur lointain, les augmentations sont moyennes à importantes sous RCP 4.5 et finalement exclusivement très importantes sous RCP 8.5.

Les tableaux 2.5.4 démontrent de manière flagrante que les changements climatiques peuvent être décrits de manière encore plus pertinente comme un « réchauffement climatique », et ce également dans le canton de Fribourg.

2.5.3 Aspects centraux des changements

Dans ce dernier chapitre, les aspects centraux des changements dans le canton de Fribourg sont mis en évidence et résumés. La structure du chapitre et le choix des aspects suivent le modèle de la brochure du NCCS « CH2018-Scénarios climatiques pour la Suisse »⁴.

La description d'un aspect s'appuie sur plusieurs indicateurs thématiquement proches. Les changements des valeurs de ces indicateurs sont documentés sur la base des trois groupes de régions similaires en termes d'altitude (cf. chap. 2.2).

Les commentaires sur les différents aspects sont volontairement succincts. Les chiffres parlent d'eux-mêmes. Ainsi, les lectrices et lecteurs pourront reconnaître des différences entre les trois entités spatiales et constater plus particulièrement que les conditions climatiques dans le canton de Fribourg seront parfois très différentes selon le scénario d'émissions (RCP 4.5 ou RCP 8.5) dans le futur lointain.

Des années toujours humides, mais plus chaudes

La disponibilité annuelle moyenne des ressources en eau provenant des précipitations ne change pratiquement pas. En revanche, les températures annuelles moyennes augmentent encore au moins dans les mêmes proportions qu'au cours des 150 dernières années.

⁴<https://www.nccs.admin.ch/nccs/fr/home/changement-climatique-et-impacts/scenarios-climatiques-suisses.html>

Tab. 2.5.5 : Changements des valeurs annuelles des précipitations et de la température

Quantité moyenne de précipitations

| | BasBro, GraMar, PlaNor | |
|-----------|------------------------|---------|
| 1981–2010 | 1009 à 1068 | |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 2040–2069 | -1 à -3 | 3 à 6 |
| 2070–2099 | 2 à 4 | 1 à 3 |

| PlaSud | |
|---------|---------|
| 1290 | |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| -3 | 1 |
| 1 | -1 |

| PreAlp | | Unité |
|---------|---------|-------|
| 1549 | | mm |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| -3 | -1 | Δ% |
| 0 | -2 | Δ% |

Température moyenne de l'air

| | BasBro, GraMar, PlaNor | |
|-----------|------------------------|-----------|
| 1981–2010 | 9.4 à 10 | |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 2040–2069 | 1.5 à 1.6 | 2.2 à 2.3 |
| 2070–2099 | 2.0 | 3.9 à 4.0 |

| PlaSud | |
|---------|---------|
| 8.2 | |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 1.6 | 2.4 |
| 2.2 | 4.2 |

| PreAlp | | Unité |
|---------|---------|-------|
| 5.8 | | °C |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 1.7 | 2.5 | Δ°C |
| 2.3 | 4.4 | Δ°C |

Étés secs

Les précipitations estivales diminuent. Il y a moins de jours de pluie. Les températures estivales moyennes augmentent, ce qui entraîne une augmentation de l'évapotranspiration potentielle.

Tab. 2.5.6 : Changements en été

Quantité moyenne de précipitations en été

| | BasBro, GraMar, PlaNor | | PlaSud | | PreAlp | | Unité |
|-----------|------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1981-2010 | 289 à 324 | | 387 | | 481 | | mm |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 2040-2069 | -11 à -13 | -7 à -9 | -13 | -11 | -13 | -11 | Δ% |
| 2070-2099 | -8 à -10 | -21 à -24 | -13 | -26 | -11 | -27 | Δ% |

Température moyenne de l'air en été

| | BasBro, GraMar, PlaNor | | PlaSud | | PreAlp | | Unité |
|-----------|------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1981-2010 | 17.2 à 18.4 | | 16.2 | | 13.3 | | °C |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 2040-2069 | 1.8 à 1.8 | 2.2 | 1.8 | 2.3 | 1.9 | 2.6 | Δ°C |
| 2070-2099 | 2.1 | 4.1 à 4.2 | 2.1 | 4.2 | 2.3 | 4.7 | Δ°C |

Nombre moyen de jours sans précipitations en été

| | BasBro, GraMar, PlaNor | | PlaSud | | PreAlp | | Unité |
|-----------|------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1981-2010 | 56 à 58 | | 54 | | 50 | | d |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 2040-2069 | 4.0 à 5.1 | 4.0 à 4.6 | 3.8 | 4.3 | 3.5 | 4.5 | Δd |
| 2070-2099 | 3.4 à 4.6 | 8.0 - 9.7 | 4.9 | 10.8 | 3.5 | 10 | Δd |

Evapotranspiration potentielle en été

| | BasBro, GraMar, PlaNor | | PlaSud | | PreAlp | | Unité |
|-----------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1981-2010 | 337 à 359 | | 318 | | 267 | | mm |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 2040-2069 | 10 à 11 | 14 | 11 | 15 | 13 | 18 | Δ% |
| 2070-2099 | 13 | 27 | 13 | 29 | 16 | 33 | Δ% |

Hivers chauds et humides

Les hivers connaissent des températures plus chaudes, il pleut plus et il neige moins. Avec l'augmentation de la température, l'isotherme du zéro degré grimpe également de 200 m par degré Celsius d'augmentation de la température. Au cours de la période de référence 1981-2010, l'isotherme du zéro degré se situait à environ 900 m au-dessus du niveau de la mer. Il s'élève de 320 à 440 m dans le futur moyen et de 420 à 840 m dans le futur lointain par rapport à l'altitude de référence de 900 m au-dessus du niveau de la mer.

Tab. 2.5.7 : Changements en hiver

Quantité moyenne de précipitations en hiver

| | BasBro, GraMar, PlaNor | |
|-----------|------------------------|---------|
| 1981-2010 | 202 à 220 | |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 2040-2069 | 8 à 9 | 12 à 14 |
| 2070-2099 | 12 à 18 | 23 à 29 |

| PlaSud | |
|---------|---------|
| 256 | |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 7 | 11 |
| 10 | 17 |

| PreAlp | | Unité |
|---------|---------|-------|
| 331 | | mm |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 5 | 11 | Δ% |
| 8 | 12 | Δ% |

Température moyenne de l'air en hiver

| | BasBro, GraMar, PlaNor | |
|-----------|------------------------|-----------|
| 1981-2010 | 0.9 à 1.8 | |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 2040-2069 | 1.6 à 2.0 | 2.0 à 2.2 |
| 2070-2099 | 2.1 à 2.3 | 3.8 à 4.1 |

| PlaSud | |
|---------|---------|
| 0.4 | |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 1.9 | 2.2 |
| 2.2 | 4.3 |

| PreAlp | | Unité |
|---------|---------|-------|
| -1.2 | | °C |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 1.9 | 2.2 | Δ°C |
| 2.1 | 4.2 | Δ°C |

Moins froid et toujours plus chaud

Le nombre de jours chauds avec des températures journalières moyennes supérieures à 20 °C est au moins doublé. Les jours froids avec des températures journalières moyennes inférieures à 0 °C disparaissent progressivement.

Tab. 2.5.8 : Changements du nombre moyen de jours chauds et froids

Nombre moyen de jours chauds

| | BasBro, GraMar, PlaNor | |
|-----------|------------------------|-------------|
| 1981-2010 | 21.5 à 32 | |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 2040-2069 | 21.2 à 23.5 | 27.2 à 32.8 |
| 2070-2099 | 26.5 à 29.8 | 54 à 56.5 |

| PlaSud | |
|---------|---------|
| 12.5 | |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 18.5 | 23.8 |
| 23.5 | 48.2 |

| PreAlp | | Unité |
|---------|---------|-------|
| 1 | | d |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 9.5 | 11.5 | Δd |
| 11.5 | 30.5 | Δd |

Nombre moyen de jours froids

| | BasBro, GraMar, PlaNor | |
|-----------|------------------------|---------------|
| 1981-2010 | 34.5 à 47.5 | |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 2040-2069 | -16.8 à -19.8 | -17.8 à -21.5 |
| 2070-2099 | -19.5 à -24.2 | -29.2 à -34.2 |

| PlaSud | |
|---------|---------|
| 56 | |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| -20 | -23.5 |
| -26 | -39 |

| PreAlp | | Unité |
|---------|---------|-------|
| 82.5 | | d |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| -24 | -33 | Δd |
| -29.8 | -52.2 | Δd |

Précipitations plus intenses

L'intensité des fortes précipitations, et en particulier des fortes précipitations extrêmes, augmente de manière significative.

Tab. 2.5.9 : Changements au niveau des fortes précipitations

Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations journalières

| | BasBro, GraMar, PlaNor | | PlaSud | | PreAlp | | Unité |
|-----------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1981-2010 | 43 à 46 | | 48 | | 50 | | mm |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 2040-2069 | 2 à 4 | 8 à 12 | 0 | 7 | 0 | 5 | Δ% |
| 2070-2099 | 6 | 8 à 16 | 4 | 7 | 2 | 6 | Δ% |

Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations journalières

| | BasBro, GraMar, PlaNor | | PlaSud | | PreAlp | | Unité |
|-----------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1981-2010 | 73 à 79 | | 74 | | 83 | | mm |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 2040-2069 | 3 à 9 | 10 à 20 | 6 | 16 | 8 | 19 | Δ% |
| 2070-2099 | 8 à 15 | 15 à 25 | 6 | 19 | 6 | 15 | Δ% |

Valeurs maximales annuelles moyennes des précipitations sur 3 jours

| | BasBro, GraMar, PlaNor | | PlaSud | | PreAlp | | Unité |
|-----------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1981-2010 | 65 à 70 | | 76 | | 86 | | mm |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 2040-2069 | -4 à 0 | 5 à 8 | -1 | 4 | -1 | -2 | Δ% |
| 2070-2099 | 2 à 3 | 10 à 12 | 2 | 7 | -1 | 5 | Δ% |

Valeurs maximales annuelles extrêmement rares des précipitations sur 3 jours

| | BasBro, GraMar, PlaNor | | PlaSud | | PreAlp | | Unité |
|-----------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|
| 1981-2010 | 111-145 | | 114 | | 140 | | mm |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | RCP 4.5 | RCP 8.5 | |
| 2040-2069 | 14 à 20 | 9 à 18 | 3 | 6 | 9 | 5 | Δ% |
| 2070-2099 | 9 à 25 | 12 à 22 | 8 | 7 | 12 | 6 | Δ% |

Période de végétation prolongée avec augmentation du risque de gel tardif

Le début de la période de végétation, exprimé ici par le nombre de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies de 200 °C, est avancé de jusqu'à 40 jours. En même temps, le risque de gel tardif, phénomène qui survient après que la somme des températures pour prairies a été atteinte, augmente.

Tab. 2.5.10 : Changements au niveau de la période de végétation et du risque de gel tardif

N. moyen de jours jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies de 200 °C

| | BasBro, GraMar, PlaNor | |
|-----------|------------------------|-----------|
| 1981-2010 | 87 à 96 | |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 2040-2069 | -18 à -17 | -20 à -21 |
| 2070-2099 | -18 à -22 | -33 à -35 |

| PlaSud | |
|---------|---------|
| 105 | |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| -15 | -18 |
| -22 | -37 |

| PreAlp | Unité |
|---------|---------|
| 133 | d |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| -14 | -19 |
| -18 | -39 |

Nombre moyen de jours de gel tardif

| | BasBro, GraMar, PlaNor | |
|-----------|------------------------|-----------|
| 1981-2010 | 4 à 5.5 | |
| | RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 2040-2069 | 1 à 1.8 | 1.5 à 2 |
| 2070-2099 | 0.5 à 1.2 | 1.5 à 2.5 |

| PlaSud | |
|---------|---------|
| 4 | |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 1.5 | 1.2 |
| 1.8 | 3 |

| PreAlp | Unité |
|---------|---------|
| 2 | d |
| RCP 4.5 | RCP 8.5 |
| 2.5 | 3.2 |
| 2.8 | 7.8 |

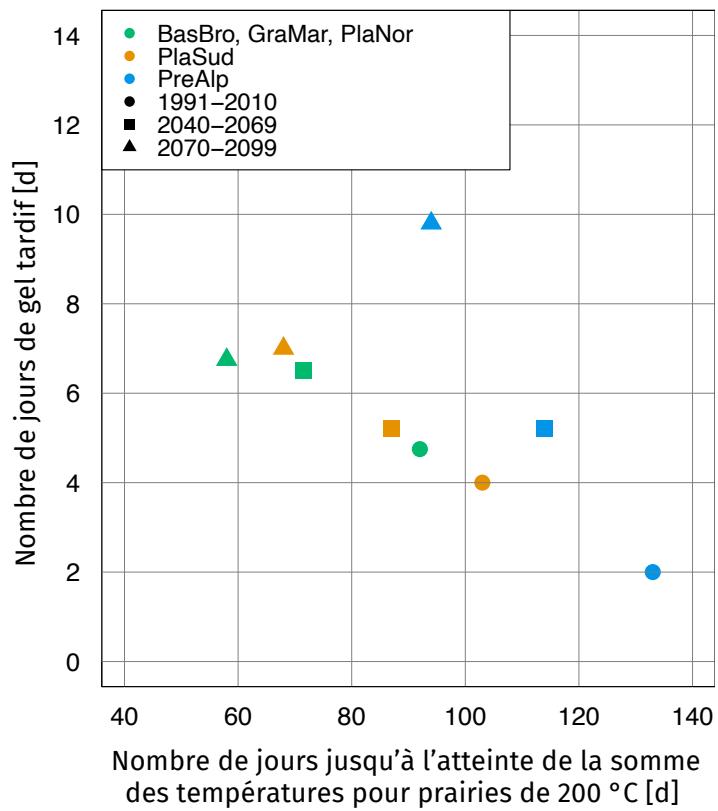


Fig. 2.44 : Évolution du début de la période de végétation (nombre de jours à partir du 1er janvier jusqu'à l'atteinte de la somme des températures pour prairies de 200 °C) et des jours de gel tardif sous RCP 8.5

Tab. 2.5.4 : Comparaison des changements des indicateurs de température de l'air sous RCP 4.5 et RCP 8.5 dans le futur moyen 2040–2069 (2055) et dans le futur lointain 2070–2099 (2085).

2055

| Indicateur | RCP4.5 | | | | | RCP8.5 | | | | |
|--|--------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|
| | An | DJF | MAM | JJA | SON | An | DJF | MAM | JJA | SON |
| Température moyenne de l'air | | | | | | | | | | |
| Valeurs max. ann. moyennes de la temp. de l'air journalière | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Valeurs max. annuelles rares de la temp. de l'air journalière | ■ | | ■ | | | ■ | ■ | | | |
| Valeurs max. ann. très rares de la temp. de l'air journalière | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares de la temp. de l'air journalière | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours chauds par année | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours très chauds par année | | | | | | | | | | |
| Nombre moyen de jours froids par année | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours très froids par année | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours extrêmement froids par année | | | | | | | | | | |
| N. moy. de jours jusqu'à la somme des temp. pour prairies est 200°C | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours de gel tardif | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Évapotranspiration potentielle selon Hamon | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

■ importante | ■ moyenne | ■ faible diminution | ■ peu de changement | ■ faible | ■ moyenne | ■ importante augmentation | [-]

2085

| Indicateur | RCP4.5 | | | | | RCP8.5 | | | | |
|--|--------|-----|-----|-----|-----|--------|-----|-----|-----|-----|
| | An | DJF | MAM | JJA | SON | An | DJF | MAM | JJA | SON |
| Température moyenne de l'air | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| Valeurs max. ann. moyennes de la temp. de l'air journalière | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Valeurs max. annuelles rares de la temp. de l'air journalière | ■ | ■ | | | | ■ | | | | |
| Valeurs max. ann. très rares de la temp. de l'air journalière | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Valeurs max. ann. extrêmement rares de la temp. de l'air journalière | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours chauds par année | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours très chauds par année | | | | | | | | | | |
| Nombre moyen de jours froids par année | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours très froids par année | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours extrêmement froids par année | | | | | | | | | | |
| N. moy. de jours jusqu'à la somme des temp. pour prairies est 200°C | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Nombre moyen de jours de gel tardif | ■ | | | | | ■ | | | | |
| Évapotranspiration potentielle selon Hamon | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

■ importante | ■ moyenne | ■ faible diminution | ■ peu de changement | ■ faible | ■ moyenne | ■ importante augmentation | [-]

3 Changements hydrologiques dans les régions et bassins versants du canton de Fribourg

3.1 Situation initiale et objectifs

Le climat va changer – y compris dans le canton de Fribourg. Le chapitre précédent a clairement démontré que ces changements se produisent à une large échelle et présentent de nombreuses facettes. Ce ne sont pas seulement les indicateurs liés à la température de l'air qui changent, mais aussi ceux liés aux précipitations. Ce chapitre aborde la question des conséquences concrètes de ces changements sur le régime hydrique et les conditions de débit dans le canton de Fribourg, ses régions et ses bassins versants.

Pour arriver à ces conclusions, de nombreuses modélisations hydrologiques ont été réalisées sur la base de données quotidiennes sur les précipitations et la température de l'air. Cette résolution temporelle se prête très bien aux analyses du régime hydrique et de ses éléments, notamment du débit. Cependant, en ce qui concerne les crues et leur évolution, une résolution journalière n'est pas suffisante pour l'analyse des événements de crue, phénomènes qui se produisent à l'échelle horaire.

3.2 Bassins versants et régions

Comme pour les analyses des changements climatiques, l'étude des changements hydrologiques se concentre sur les cinq régions du canton de Fribourg. Contrairement aux indicateurs climatiques, qui ont pu être calculés sous forme de moyennes spatiales pour chaque région, les indicateurs hydrologiques sont liés aux bassins versants, étant donné que les modèles hydrologiques ne peuvent être calibrés et validés que dans le cadre de ces entités spatiales. Afin de tout de même pouvoir tirer des conclusions sur la région dans son ensemble, un bassin versant représentatif a été choisi pour chaque région.

Les deux tableaux suivants décrivent les bassins versants étudiés à l'aide d'indicateurs géographiques. Le tableau 3.2.1 contient les bassins versants représentatifs des cinq régions. Le tableau 3.2.2 présente les autres bassins versants et leur appartenance régionale.

Tab. 3.2.1 : Caractéristiques géographiques des bassins versants représentatifs modélisés et leur appartenance régionale

| Indicateur | Unité | BibKer | PGlVil | ArbAve | SioVui | SenTho |
|--|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Superficie des bassins versants | km ² | 49.0 | 75.5 | 71.9 | 43.4 | 351.2 |
| Altitude moyenne | m s.m. | 543.0 | 561.0 | 596.0 | 869.0 | 1070.0 |
| Altitude minimale | m s.m. | 442.0 | 435.0 | 434.0 | 682.0 | 555.0 |
| Altitude maximale | m s.m. | 670.0 | 817.0 | 813.0 | 1412.0 | 2184.0 |
| Classes d'utilisation du sol sélectionnées | | | | | | |
| Terres agricoles | % | 60.8 | 79.1 | 58.3 | 58.1 | 31.4 |
| Prairies | % | 5.6 | 0.0 | 8.7 | 9.7 | 27.1 |
| Forêt de conifères | % | 0.0 | 0.3 | 1.6 | 10.9 | 24.1 |
| Forêt mixte | % | 18.6 | 8.9 | 17.9 | 5.1 | 8.9 |
| Zones urbanisées | % | 9.3 | 7.6 | 9.5 | 15.8 | 1.6 |
| Bassin versant représentatif pour la région | | | | | | |
| | | GraMar | BasBro | PlaNor | PlaSud | PreAlp |

Tab. 3.2.2 : Caractéristiques géographiques des autres bassins versants modélisés et leur appartenance régionale

| Indicateur | Unité | GerMar | GlaMat | GlaRom | VevVev | BroPay | SarBro |
|---|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Superficie des bassins versants | km ² | 70.5 | 180.1 | 34.5 | 64.5 | 415.9 | 636.3 |
| Altitude moyenne | m s.m. | 1063.0 | 786.0 | 793.0 | 1098.0 | 719.0 | 1497.0 |
| Altitude minimale | m s.m. | 621.0 | 576.0 | 686.0 | 397.0 | 447.0 | 683.0 |
| Altitude maximale | m s.m. | 1715.0 | 1205.0 | 957.0 | 2011.0 | 1512.0 | 3243.0 |
| Classes d'utilisation du sol sélectionnées | | | | | | | |
| Terres agricoles | % | 2.1 | 75.7 | 81.1 | 22.7 | 69.1 | 4.7 |
| Prairies | % | 40.1 | 1.6 | 0.0 | 25.3 | 1.7 | 42.5 |
| Forêt de conifères | % | 34.0 | 8.3 | 8.6 | 24.3 | 6.5 | 21.1 |
| Forêt mixte | % | 14.5 | 7.7 | 5.1 | 20.4 | 14.9 | 7.0 |
| Zones urbanisées | % | 6.2 | 6.3 | 5.2 | 6.5 | 5.6 | 2.2 |
| Autre bassin versant dans la région | | | | | | | |
| | | PlaSud | PlaSud | PlaSud | — | — | — |

La superficie des bassins versants varie entre 30 et 640 km². La moitié des bassins versants ont une superficie comprise entre environ 50 et 170 km². Dans l'ensemble, il s'agit donc de petits bassins versants dont le régime hydrique et les débits sont marqués par des processus locaux à régionaux. Ils sont donc d'une grande pertinence d'un point de vue spatial. L'altitude moyenne de ces bassins versants est comprise entre 500 et 1500 m. Les bassins versants situés à basse altitude se trouvent donc dans la zone de régime d'écoulement

pluvial, tandis que les zones les plus élevées présentent un caractère préalpin-nival.¹ En ce qui concerne l'utilisation du sol, il est intéressant de constater que l'agriculture domine dans une grande partie des bassins versants avec une part de surface d'eau moins 50 %. L'utilisation du sol actuelle est conservée pour les modélisations hydrologiques des changements futurs.

3.3 Méthodologie

3.3.1 Le modèle hydrologique GR4J/CemaNeige

Structure du modèle GR4J

Les considérations suivantes sur le modèle GR4J se basent essentiellement sur la source suivante : <https://wiki.ewater.org.au>, mot clé GR4J.

GR4J est un modèle de régime hydrique qui permet de calculer le débit à partir de données journalières des précipitations et de l'évapotranspiration. Le modèle comporte deux réservoirs et quatre paramètres ajustables x_1 , x_2 , x_3 et x_4 . Il a été développé dans les années 1980 au CEMAGREF par Claude Michel. La structure du modèle GR4J a principalement été créée de manière empirique. L'objectif était de trouver une structure de modèle aussi simple, efficace et robuste que possible. Le modèle est très répandu dans le monde entier et est constamment amélioré grâce aux nombreuses utilisatrices et nombreux utilisateurs.

La figure 3.1 décrit la structure du modèle GR4J. Les explications suivantes se réfèrent à un seul pas de temps $dt = 1$ jour. Y est représentée la manière dont la valeur d'entrée des précipitations de bassin P est traitée par le modèle au cours de ce pas de temps.

¹<https://atlashydrologique.ch/produits/version-imprimee/cours-d-eau-et-lacs/planche-5-2>

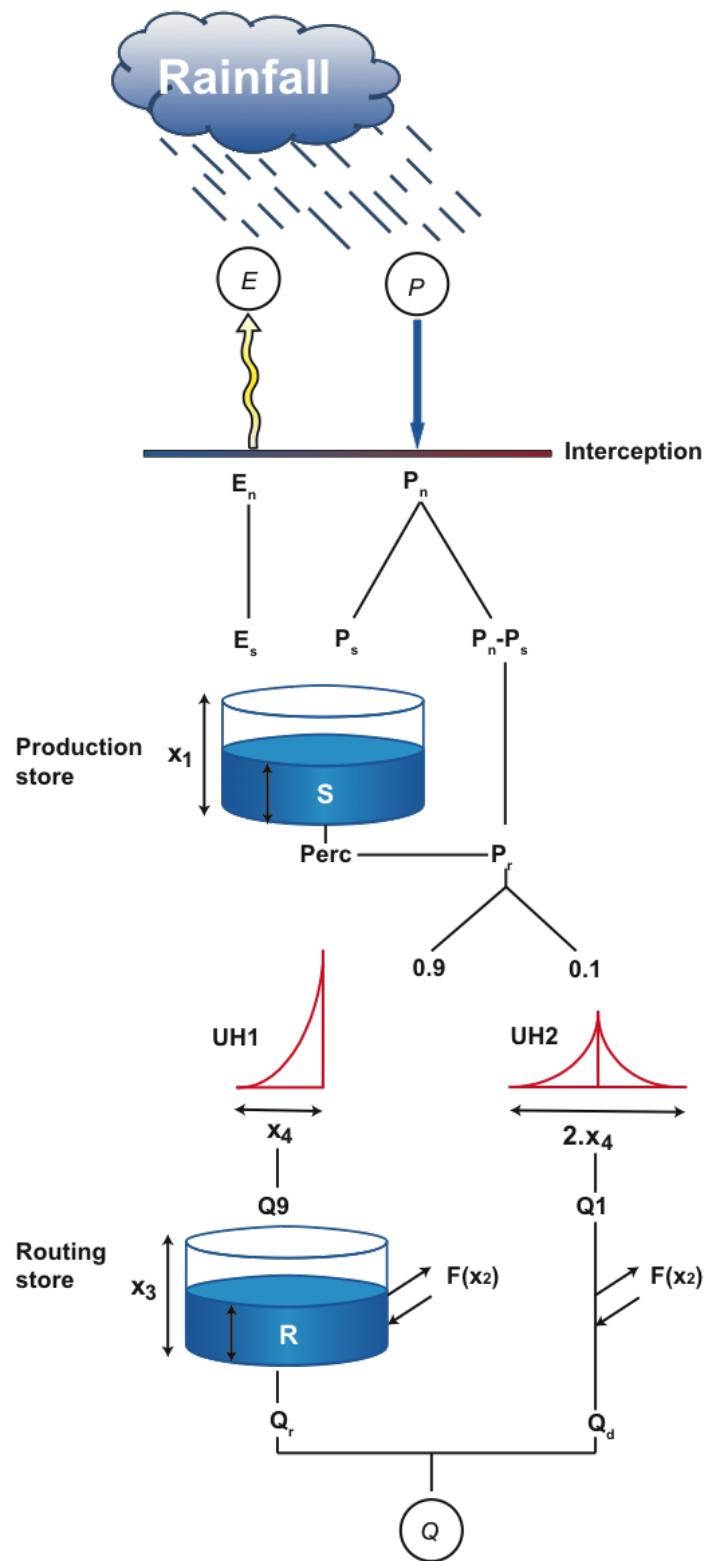


Fig. 3.1 : Le modèle GR4J

En plus des précipitations, il faut aussi fournir au modèle l'évapotranspiration potentielle E . La première opération consiste à comparer E et P . Un jour où $P \geq E$, la quantité nette de pluie $P_r = P - E$ est calculée, dans le cas contraire, $P_r = 0$ et la capacité d'évapotranspiration nette est alors $E_n = E - P$.

Une partie de P_r , à savoir P_s , alimente le « Production store », qui peut être interprété comme réservoir d'eau du sol et dont la capacité de stockage est décrite par x_1 . De l'eau sort à son tour de ce réservoir par percolation et rejoint le débit $P_r - P_s$ pour former les précipitations effectives P_T , c'est-à-dire les précipitations agissant directement sur le débit.

P_T est ensuite divisé en deux composantes de débit selon une répartition fixe : 90 % de P_T sont routés par l'hydrogramme unitaire $UH1$ vers le réservoir non-linéaire « Routing store ». Les 10 % restants sont routés directement par l'hydrogramme unitaire $UH2$. $UH1$ et $UH2$ permettent de simuler le décalage temporel entre l'événement de précipitation et le pic de débit qui en résulte. Leurs ordonnées sont utilisées dans le modèle pour répartir la quantité de précipitations effectives sur plusieurs pas de temps consécutifs. Les deux hydrogrammes unitaires dépendent du même paramètre temporel x_4 exprimé en jours. Cependant, $UH1$ a un temps de base de x_4 jours, tandis que $UH2$ a un temps de base de $2 \cdot x_4$ jours. x_4 est supérieur à 0,5 jour. Il en résulte les deux composantes de débit Q_g et Q_1 .

$F(x_2)$ est utilisé dans le modèle pour simuler les débits souterrains et superficiels vers le bassin versant ou hors du bassin versant. x_2 représente ce que l'on appelle le coefficient d'échanges d'eau. Le débit Q_1 modifié par $UH2$ est augmenté ou diminué de $F(x_2)$. Il en résulte le débit direct Q_d .

Le niveau du « Routing store » est contrôlé par l'apport Q_g de $UH1$ et les débits entrants ou sortants $F(x_2)$. Le paramètre x_3 décrit la capacité de rétention de ce réservoir. L'eau qui s'écoule de ce réservoir est désignée par Q_r . Il s'agit d'une composante de débit fortement différée, puisque le réservoir de routage « Routing store » simule de manière simplifiée les processus d'écoulement dans le sous-sol. Q_r correspond donc au débit de base.

De la confluence de Q_r et Q_d résulte le débit total Q .

Au total, le modèle GR4J comprend quatre paramètres ajustables :

- x_1 : Capacité de rétention du « Production store »
- x_2 : Coefficient d'échanges d'eau
- x_3 : Capacité de rétention du « Routing store »
- x_4 : Paramètres de temps des deux hydrogrammes unitaires

Structure du module neige CemaNeige

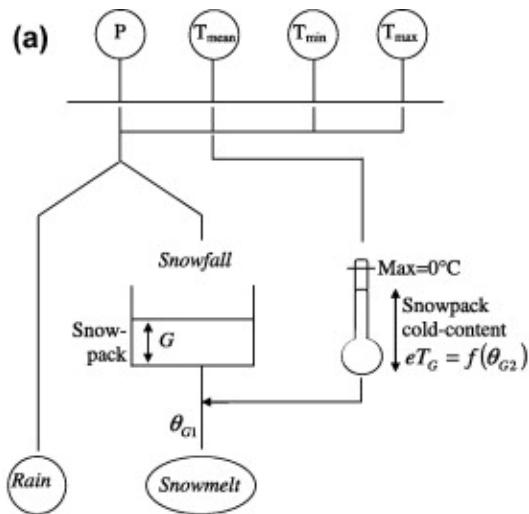


Fig. 3.2 : Structure du module CemaNeige

Pour les bassins versants affectés par les processus d'accumulation et de fonte de neige, GR4J peut être complété par le module CemaNeige. Cette section s'appuie sur l'article scientifique de Valéry et al. (2010)². Les seules données d'entrée nécessaires au calcul du module CemaNeige sont les précipitations moyennes par bassin versant (P) sous forme de somme journalière et la température de l'air (T) sous forme de moyenne journalière ou de minimum journalier et de maximum journalier. CemaNeige comporte deux paramètres ajustables :

- Coefficient de pondération C_{TG} de l'état thermique de la neige avec des valeurs comprises entre 0 et 1.
- Facteur degrés-jours K_f (en mm/°C/d) avec des valeurs généralement comprises entre 2 et 6 mm/°C/d

Dans un premier temps, le bassin versant est divisé en cinq zones altitudinales de surfaces égales. Les données d'entrée sont converties à l'altitude moyenne de ces cinq zones sur la base des gradients suivants :

- un gradient altitudinal multiplicatif pour les précipitations (déterminé sur une base annuelle) et
- un gradient altitudinal additif mensuel pour la température de l'air.

Ces données d'entrée sont ensuite utilisées pour déduire les paramètres suivants pour chaque pas de temps (jour) et chacune des cinq zones altitudinales :

1. **Part de neige dans les précipitations :** Transition de la pluie à la neige dans la fourchette de température de +3 °C (100 % de pluie) à -1 °C (100 % de neige).

²Valéry, A. et al. (2010) : <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.058>

2. **Accumulation de neige :** La quantité journalière de neige fraîche est additionnée en tant qu'équivalent en eau du manteau neigeux G .
3. **Mise à jour de l'état thermique du manteau neigeux :** L'état thermique du manteau neigeux est calculé à partir des températures de l'air des jours précédents et du coefficient de pondération à calibrer C_{TG} .
4. **Fonte potentielle de la neige :** La fonte potentielle de la neige est calculée selon la méthode degré-jour avec le facteur degré-jour C_{TG} comme paramètre ajustable, la fonte n'ayant lieu que si l'état thermique du manteau neigeux est égal à 0°C .
5. **Fonte effective de la neige :** La quantité réelle de neige qui fond est déterminée en fonction de la quantité de neige restante dans le manteau neigeux G en tenant compte d'une valeur seuil empirique.

Les états internes du modèle pour le manteau neigeux G en tant qu'équivalent en eau et son état thermique eT_G varient indépendamment dans chaque zone d'altitude en fonction des données d'entrée fournies. Trois résultats sont calculés pour chaque zone d'altitude à chaque pas de temps : la quantité d'eau provenant de la pluie, celle provenant de la fonte de la neige ainsi que la somme des deux. Pour estimer la quantité totale d'eau provenant de la pluie et de la fonte de la neige selon CemaNeige au niveau du bassin versant, la moyenne des résultats des cinq zones altitudinales est calculée (avec une pondération égale, étant donné que chaque zone correspond à un cinquième du bassin versant). Cette quantité d'eau cumulée pour le bassin versant est ensuite utilisée comme donnée d'entrée pour le modèle hydrologique GR4J.

Correction des précipitations : extension du modèle GR4J

Les mesures instrumentales des précipitations sont toujours sujettes à une erreur de mesure plus ou moins importante. Il est raisonnable de supposer que les précipitations enregistrées sont toujours inférieures à celles réellement tombées à l'emplacement de l'instrument de mesure. L'expérience montre que cette sous-estimation de la quantité des précipitations est particulièrement importante en cas de chutes de neige accompagnées de vent. Comme GR4J ne dispose d'aucun paramètre de correction des précipitations, il existe un risque que les quatre paramètres libres de GR4J et les deux paramètres libres de CemaNeige compensent cette erreur lors de l'étalonnage et se trouvent donc dans des plages de valeurs irréalistes. Afin d'éviter ce problème, une correction des précipitations en fonction de la température a été introduite pour ce projet. Un facteur de correction des précipitations sous forme de pluie et un autre pour les précipitations sous forme de neige sont utilisés en cas de précipitations associées à des températures supérieures ou inférieures à une température limite. Les plages de valeurs suivantes ont été définies pour les trois nouveaux paramètres :

- **Température limite :** Température de l'air servant à distinguer la neige de la pluie, plage de valeurs : $0,5$ à 2°C
- **Facteur de correction du volume pour la pluie :** Plage de valeurs : $0,8$ à $1,05$
- **Facteur de correction du volume pour la neige :** Plage de valeurs : $0,9$ à $1,4$

Étalonnage et validation

En matière de modélisation hydrologique, il convient de distinguer l'étalonnage et la validation d'un modèle hydrologique. Les périodes temporelles utilisées pour l'étalonnage et la validation doivent impérativement être différentes. Pour cette raison, seuls les bassins versants disposant d'une série de mesures suffisamment longue peuvent être pris en compte. Pour le canton de Fribourg, neuf bassins versants remplissant ces conditions ont pu être modélisés. La période 2011–2020 a été utilisée comme période d'étalonnage. La période 1981–2010 a servi de période de validation. Cependant, toutes les séries d'observations ne couvraient pas la totalité de la période 1981–2010. Des périodes plus courtes ont donc également été utilisées pour la validation.

Pour l'étalonnage du modèle, 198 étalonnages (variantes de modèle) ont été effectués dans chaque bassin versant avec différentes corrections des précipitations. Les trois paramètres décrits ci-dessus et leurs plages de valeurs ont été utilisés pour la correction des précipitations. Les valeurs des trois paramètres ont été modulées de manière systématique à l'intérieur des plages de valeurs pour ainsi effectuer une correction des précipitations. Les quatre paramètres libres de GR4J et les deux paramètres libres de CemaNeige ont ensuite été automatiquement calibrés et le modèle validé en utilisant les précipitations corrigées comme données d'entrée. À partir de ces 198 étalonnages, nous avons ensuite sélectionné les quatre meilleures variantes de modèle, c'est-à-dire celles qui reproduisent le mieux les données d'observation. Cette sélection s'est faite sur la base d'un catalogue de critères comprenant les mesures les plus diverses pour évaluer la qualité de la modélisation. De plus, la variante zéro (caloo1), c'est-à-dire le jeu de paramètres avec précipitations non corrigées, a été reprise pour toutes les modélisations suivantes.

Parmi les quatre meilleures variantes de modèle, nous avons choisi celle avec laquelle nous avons finalement réalisé la modélisation et sur laquelle se basent les résultats présentés dans ce rapport. La procédure de sélection du modèle final est brièvement décrite ci-dessous.

Les indicateurs de débit suivants sont au centre de la modélisation hydrologique :

- le débit annuel moyen (MQ),
- les débits saisonniers moyens,
- trois indicateurs d'étiage ($Qq01$, $Qq05$, $Qq10$),
- trois indicateurs de crue ($Qq90$, $Qq95$, $Qq99$).

Pour choisir la variante de modèle finale, ces indicateurs ont été calculés à partir des données d'observation et comparés aux indicateurs correspondants de chaque variante de modèle. Les résultats de cette comparaison sont présentés dans les tableaux 3.3.1 et 3.3.2.

Tab. 3.3.1 : Évaluation de la qualité de la modélisation des meilleures variantes de modèle dans les différents bassins versants sur la base des indicateurs mentionnés dans le texte pour la période de validation indiquée. Sont indiqués et assortis de couleurs les écarts en pourcentage des indicateurs modélisés par rapport aux valeurs observées.

| Période | Source | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | MQ | Unité |
|--------------------------------------|--------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|---------------------|
| Bibere@Kerzers | | | | | | | | | |
| 1981-2010 | obs | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 1.7 | 2.3 | 4.6 | 1.0 | mm/d |
| 1981-2010 | obs | 4.2 | 4.6 | 5.1 | 20.0 | 27.1 | 53.2 | 11.7 | l/s/km ² |
| 1981-2010 | cal001 | -8.3 | 0.0 | 4.6 | 2.3 | -4.7 | -23.0 | -1.0 | % |
| 1981-2010 | cal138 | -8.3 | 0.0 | 4.6 | 2.3 | -4.3 | -22.8 | 0.0 | % |
| 1981-2010 | cal161 | -2.8 | 5.0 | 9.1 | 3.5 | -3.4 | -24.1 | 2.0 | % |
| 1981-2010 | cal185 | -5.6 | 2.5 | 4.6 | 2.9 | -4.3 | -23.5 | 0.0 | % |
| Broye@Payerne | | | | | | | | | |
| 1981-2010 | obs | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 3.6 | 5.2 | 10.0 | 1.7 | mm/d |
| 1981-2010 | obs | 3.5 | 4.2 | 4.9 | 41.5 | 60.5 | 116.1 | 19.6 | l/s/km ² |
| 1981-2010 | cal001 | -13.3 | -2.8 | 4.8 | 6.4 | 2.1 | -4.7 | 4.1 | % |
| 1981-2010 | cal143 | -16.7 | -8.3 | 0.0 | 6.7 | 3.4 | -4.6 | 3.0 | % |
| 1981-2010 | cal150 | -13.3 | -5.6 | 0.0 | 8.4 | 3.4 | -5.8 | 4.7 | % |
| 1981-2010 | cal152 | -13.3 | -5.6 | 2.4 | 9.2 | 4.4 | -5.6 | 5.3 | % |
| Arbogne@Avenches | | | | | | | | | |
| 1993-2010 | obs | 0.2 | 0.3 | 0.3 | 1.7 | 2.3 | 4.4 | 0.9 | mm/d |
| 1993-2010 | obs | 2.9 | 3.5 | 4.0 | 19.8 | 26.6 | 51.5 | 10.7 | l/s/km ² |
| 1993-2010 | cal001 | -20.0 | -16.7 | -14.3 | 8.8 | 7.8 | -2.5 | 2.2 | % |
| 1993-2010 | cal019 | -24.0 | -20.0 | -17.1 | 10.5 | 8.7 | -2.0 | 2.2 | % |
| 1993-2010 | cal152 | -20.0 | -16.7 | -14.3 | 9.4 | 8.7 | -3.8 | 2.2 | % |
| 1993-2010 | cal154 | -16.0 | -10.0 | -11.4 | 9.4 | 7.8 | -5.4 | 3.3 | % |
| Petite Glâne@Villars-le-Grand | | | | | | | | | |
| 1993-2010 | obs | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 2.2 | 3.3 | 6.7 | 1.1 | mm/d |
| 1993-2010 | obs | 3.5 | 3.9 | 4.4 | 25.8 | 37.7 | 77.2 | 13.2 | l/s/km ² |
| 1993-2010 | cal001 | -16.7 | -8.8 | -2.6 | 2.2 | -4.3 | -19.9 | 1.8 | % |
| Singine@Thörishaus | | | | | | | | | |
| 1981-2010 | obs | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 4.3 | 6.0 | 10.7 | 2.2 | mm/d |
| 1981-2010 | obs | 6.0 | 6.8 | 7.8 | 50.2 | 69.6 | 124.0 | 25.1 | l/s/km ² |
| 1981-2010 | cal001 | -13.5 | -5.1 | -1.5 | 5.1 | 1.7 | 0.1 | 1.8 | % |
| 1981-2010 | cal146 | -11.5 | -3.4 | 1.5 | 8.3 | 5.0 | -3.0 | 4.2 | % |
| 1981-2010 | cal147 | -13.5 | -3.4 | 0.0 | 9.0 | 5.3 | -3.9 | 4.2 | % |
| 1981-2010 | cal150 | -11.5 | -3.4 | 1.5 | 10.1 | 5.8 | -5.4 | 4.6 | % |
| 1981-2010 | cal183 | -15.4 | -6.8 | -3.0 | 6.7 | 3.8 | -1.8 | 2.3 | % |

Légende : ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 3.3.2 : Évaluation de la qualité de la modélisation des meilleures variantes de modèle dans les différents bassins versants sur la base des indicateurs mentionnés dans le texte pour la période de validation indiquée. Sont indiqués et assortis de couleurs les écarts en pourcentage des indicateurs modélisés par rapport aux valeurs observées (suite).

| Période | Source | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | MQ | Unité |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| Gérine@Marly | | | | | | | | | |
| 2006-2010 | obs | 0.5 | 0.9 | 1.1 | 8.4 | 12.5 | 25.1 | 3.7 | mm/d |
| 2006-2010 | obs | 5.6 | 11.0 | 12.3 | 97.6 | 144.3 | 290.9 | 43.2 | l/s/km ² |
| 2006-2010 | cal001 | -31.2 | -54.7 | -50.9 | -29.8 | -31.1 | -40.9 | -32.2 | % |
| 2006-2010 | cal085 | -22.9 | -50.5 | -48.1 | -24.9 | -29.8 | -44.0 | -31.1 | % |
| 2006-2010 | cal149 | -25.0 | -51.6 | -49.1 | -25.7 | -31.1 | -44.8 | -32.2 | % |
| 2006-2010 | cal150 | -27.1 | -52.6 | -50.0 | -25.6 | -31.2 | -44.8 | -32.2 | % |
| Sarine@Broc | | | | | | | | | |
| 1981-2010 | obs | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 6.0 | 7.4 | 11.3 | 2.9 | mm/d |
| 1981-2010 | obs | 7.3 | 8.3 | 9.5 | 69.8 | 85.7 | 130.7 | 33.7 | l/s/km ² |
| 1981-2010 | cal001 | 11.1 | 13.9 | 17.1 | -4.3 | -2.8 | -4.4 | -1.7 | % |
| 1981-2010 | cal144 | 17.5 | 19.4 | 20.7 | 0.0 | 0.9 | -4.9 | -0.3 | % |
| 1981-2010 | cal145 | 17.5 | 18.1 | 19.5 | -1.5 | -0.3 | -4.2 | -0.7 | % |
| 1981-2010 | cal147 | 19.0 | 20.8 | 20.7 | 0.5 | 1.2 | -5.0 | 0.0 | % |
| 1981-2010 | cal159 | 17.5 | 19.4 | 19.5 | 0.7 | 1.4 | -4.7 | 0.0 | % |
| Sionge@Vuippens | | | | | | | | | |
| 1981-2010 | obs | 0.4 | 0.5 | 0.5 | 5.1 | 7.4 | 13.6 | 2.3 | mm/d |
| 1981-2010 | obs | 4.5 | 5.3 | 6.2 | 58.9 | 86.1 | 157.4 | 26.3 | l/s/km ² |
| 1981-2010 | cal001 | -7.7 | 4.3 | 7.4 | -1.8 | -3.6 | -9.7 | 3.1 | % |
| 1981-2010 | cal151 | -7.7 | 0.0 | 3.7 | 2.5 | 0.5 | -6.8 | 4.4 | % |
| 1981-2010 | cal158 | -2.6 | 4.3 | 7.4 | -0.6 | -2.3 | -8.4 | 4.0 | % |
| 1981-2010 | cal160 | -7.7 | 2.2 | 5.6 | 0.8 | -1.1 | -7.4 | 4.4 | % |
| 1981-2010 | cal187 | -15.4 | -4.3 | 0.0 | 0.6 | 0.0 | -6.3 | 3.5 | % |
| Veveyse@Vevey | | | | | | | | | |
| 1984-2010 | obs | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 6.5 | 9.2 | 16.5 | 2.8 | mm/d |
| 1984-2010 | obs | 4.2 | 5.2 | 6.2 | 75.5 | 106.7 | 191.3 | 32.6 | l/s/km ² |
| 1984-2010 | cal001 | -13.9 | -8.9 | -3.7 | -4.6 | -3.7 | -8.9 | -4.6 | % |
| 1984-2010 | cal146 | -8.3 | -4.4 | -1.9 | -2.0 | -3.6 | -11.1 | -3.9 | % |
| 1984-2010 | cal147 | -16.7 | -11.1 | -7.4 | -0.8 | -2.9 | -11.6 | -4.3 | % |
| 1984-2010 | cal183 | -25.0 | -17.8 | -11.1 | -2.9 | -2.8 | -9.4 | -4.6 | % |

Légende : ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Les résultats de la validation attestent d'une bonne, voire très bonne modélisation des indicateurs de débit. Ils peuvent être résumés comme suit :

- Le modèle GR4J reproduit les indicateurs de débit avec une précision satisfaisante à très bonne. Il n'y a que pour la Gérine que la qualité de la modélisation est insuffisante pour tous les indicateurs de débit.
- La qualité de la modélisation du débit annuel moyen est *très bonne* dans tous les bassins versants.
- La qualité de la modélisation des indicateurs de crue est soit *très bonne*, soit *bonne*.
- Les écarts entre le modèle et les observations sont les plus importants pour les indicateurs d'étiage, bien que même dans le cas le « moins bon », la qualité de la modélisation est toujours *satisfaisante*.

De plus, la qualité de la modélisation de l'évapotranspiration effective moyenne et de la neige a également été évaluée.

La figure 3.3 compare les valeurs de l'évapotranspiration réelle de l'Atlas hydrologique de la Suisse (hydromaps .ch) calculées avec le modèle TRAIN³ et les valeurs calculées avec GR4J. Les faibles écarts, de l'ordre de -9 % pour GerMar à +2,5 % pour SarBro, attestent de la bonne qualité des résultats de la modélisation. Il faut néanmoins tenir compte du fait que les périodes temporelles sur lesquelles se base la comparaison ne sont pas identiques. En même temps, il convient également de mentionner que l'évapotranspiration est un indicateur très conservateur.

³https://www.geog.uni-heidelberg.de/md/chemgeo/geog/hydro/train-beschreibung_dez2011.pdf

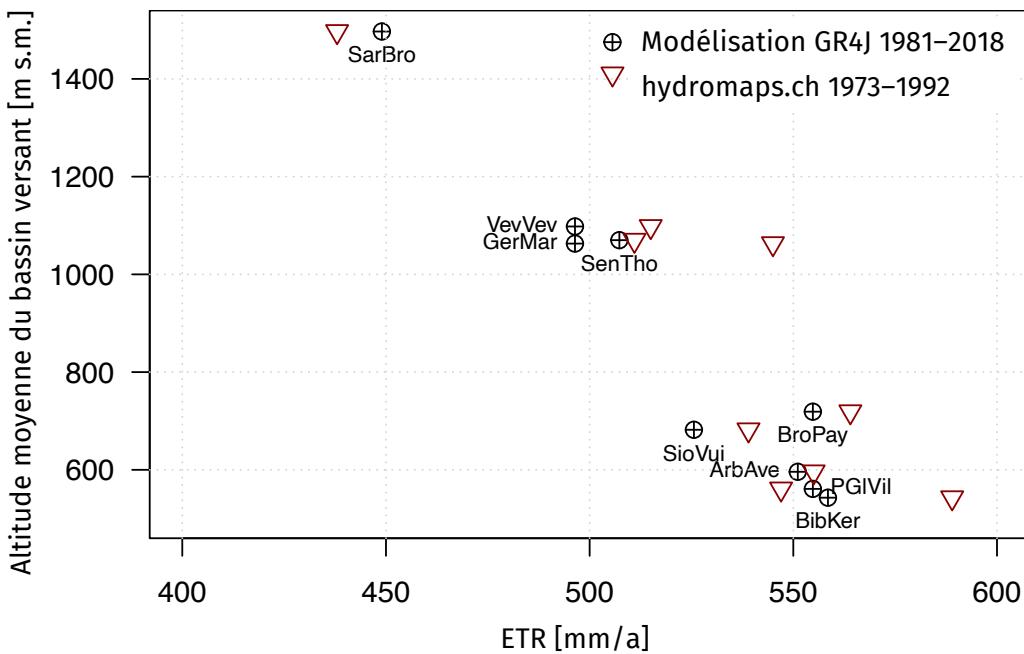


Fig. 3.3 : Dépendance entre l'évapotranspiration réelle modélisée et l'altitude moyenne des bassins versants.
À titre de comparaison, évapotranspiration réelle de hydromaps.ch

Pour évaluer la qualité de la modélisation en ce qui concerne la neige (modèle CemaNeige), la dépendance de l'altitude des trois indicateurs suivants a été testée : Part de la neige dans le total des précipitations, part de l'eau de fonte dans le débit total et taux de fonte (cf. fig. 3.4 à fig. 3.6).

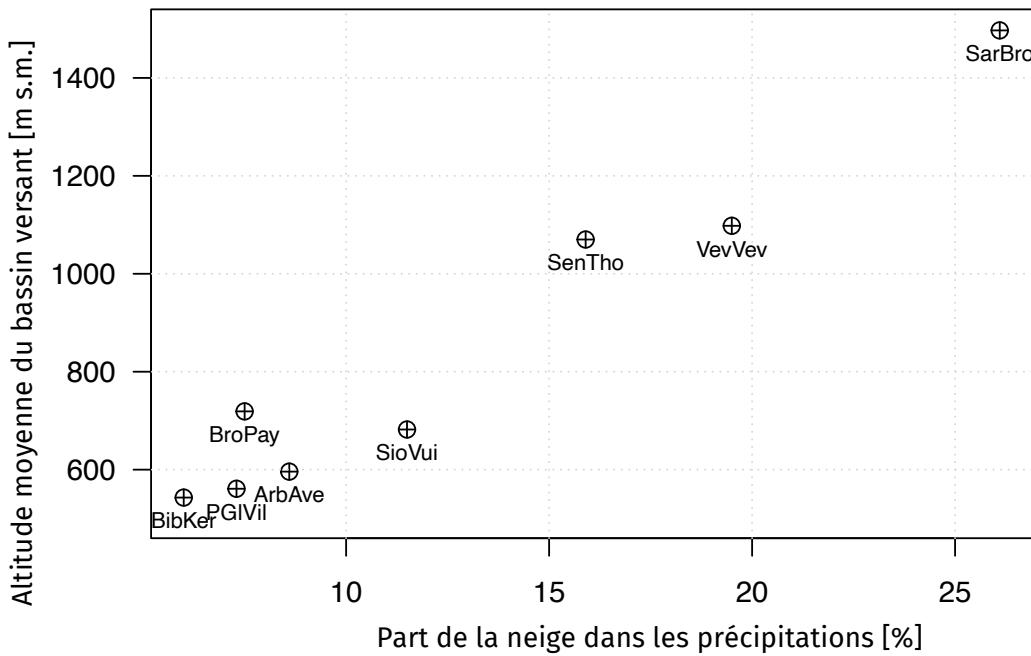


Fig. 3.4 : Dépendance entre la part modélisée de la neige dans le total des précipitations et l'altitude moyenne des bassins versants

Comme on pouvait s'y attendre, la part de la neige dans le total des précipitations augmente de manière presque linéaire avec l'altitude moyenne des bassins versants. En revanche, la part de l'eau de fonte dans le débit total révèle une image diffuse inattendue. Aucune dépendance à l'altitude moyenne du bassin n'est reconnaissable. En ce qui concerne la part d'eau de fonte, la Bibere@Kerzers se distingue avec une part de > 18 %, ce qui n'est pas plausible compte tenu de la faible altitude de la région. Dans l'ensemble, on constate que la modélisation de la neige avec CemaNeige est insuffisante dans les bassins versants du canton de Fribourg situés à plus basse altitude.

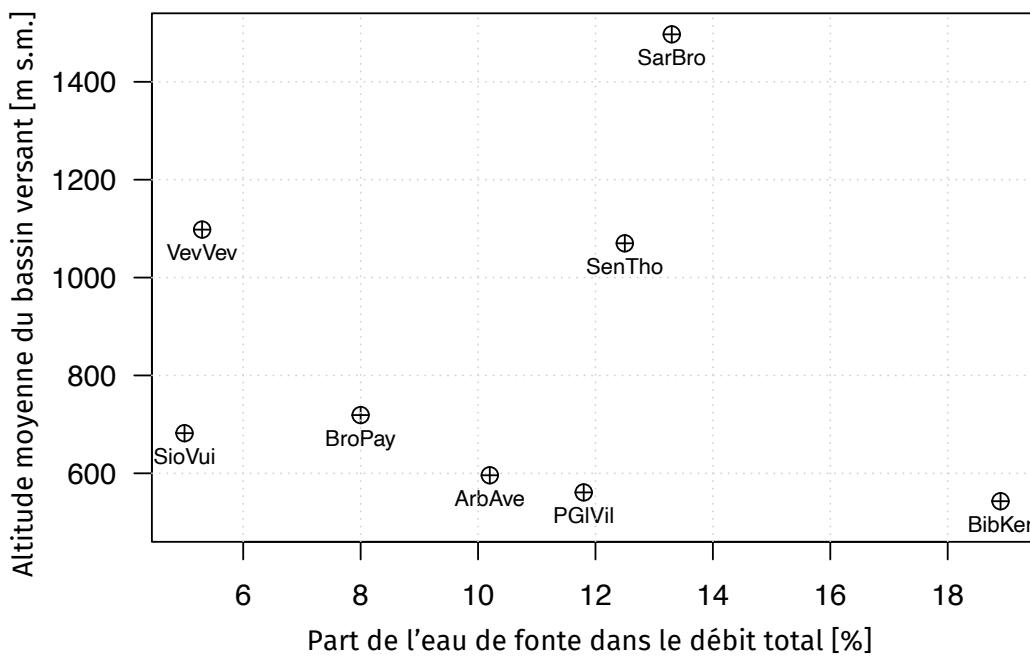


Fig. 3.5 : Dépendance entre la part modélisée de l'eau de fonte dans le débit total et l'altitude moyenne des bassins versants

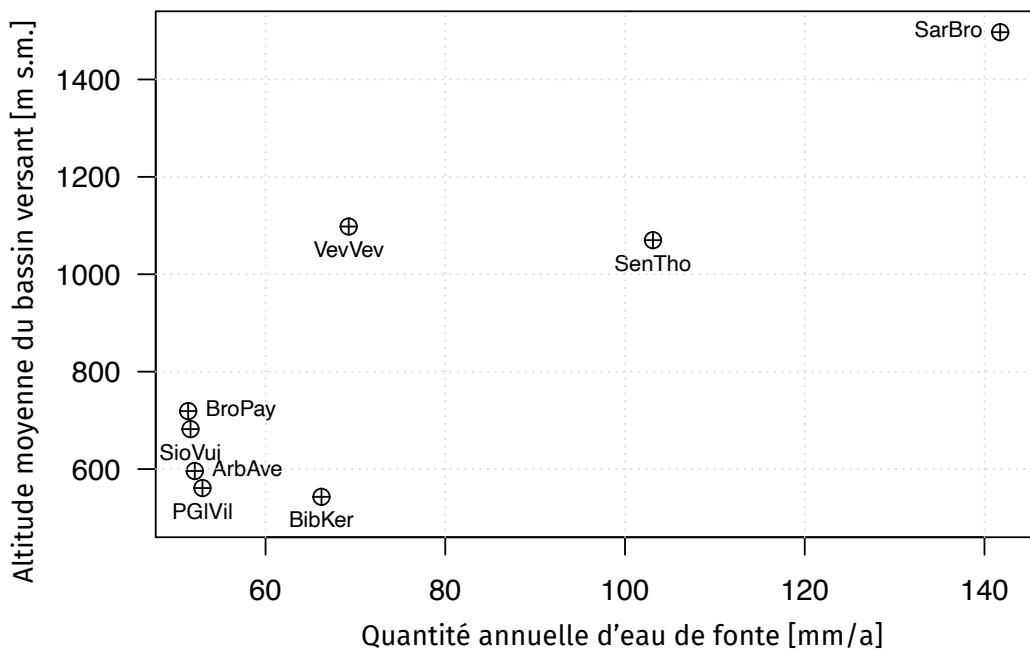


Fig. 3.6 : Quantité annuelle moyenne d'eau de fonte par rapport à l'altitude moyenne des bassins versants

Dans une deuxième étape de validation, nous avons vérifié si le modèle reproduisait bien le bilan hydrique annuel moyen à long terme. Pour ce faire, il a d'abord fallu le calculer à partir des données d'observation. Pour le bilan annuel, il peut être supposé que l'élément de réservoir correspond à $\Delta\text{Res} \approx 0$. Lors des calculs, il s'est avéré que le bilan hydrique décrit par la simple équation de bilan

$$\text{Précipitations (P)} = \text{Débit (Q)} + \text{Évapotranspiration (ET)} \quad (3.1)$$

ne constituait pas un système fermé. C'est pourquoi l'équation du bilan a dû être complétée par un élément résiduel (ER) :

$$P = Q + ET + ER \quad (3.2)$$

Lors de la présentation des résultats, il n'est pas possible de tenir compte de l'influence d'un changement notable du réservoir, tout simplement parce que les données en la matière font défaut. À l'aide de cartes hydrogéologiques, nous avons essayé d'évaluer si le bassin versant connaissait des apports et/ou des pertes souterraines et avons ensuite ajusté l'équation du bilan en conséquence. Concrètement, la composante de débit souterrain déterminée à partir de la carte hydrogéologique a été attribuée à l'élément résiduel de l'équation du bilan calculé à partir des précipitations, du débit superficiel et de l'évapotranspiration. Ce faisant, il n'a pas été tenu compte du fait que d'éventuelles erreurs au niveau des observations sont également comprises dans cet élément résiduel.

La validation du bilan hydrique modélisé à l'aide des observations a montré que la variante de modèle caloo1, basée sur des précipitations non corrigées, était la plus performante, de sorte que nous l'avons utilisée pour les calculs finaux. Comme il ressort de la figure 3.7, les éléments du bilan hydrique modélisés avec caloo1 sont également plausibles dans le contexte géographique du canton de Fribourg. Non seulement les gradients d'altitude sont reproduits tels qu'attendus, mais leurs valeurs sont également plausibles.

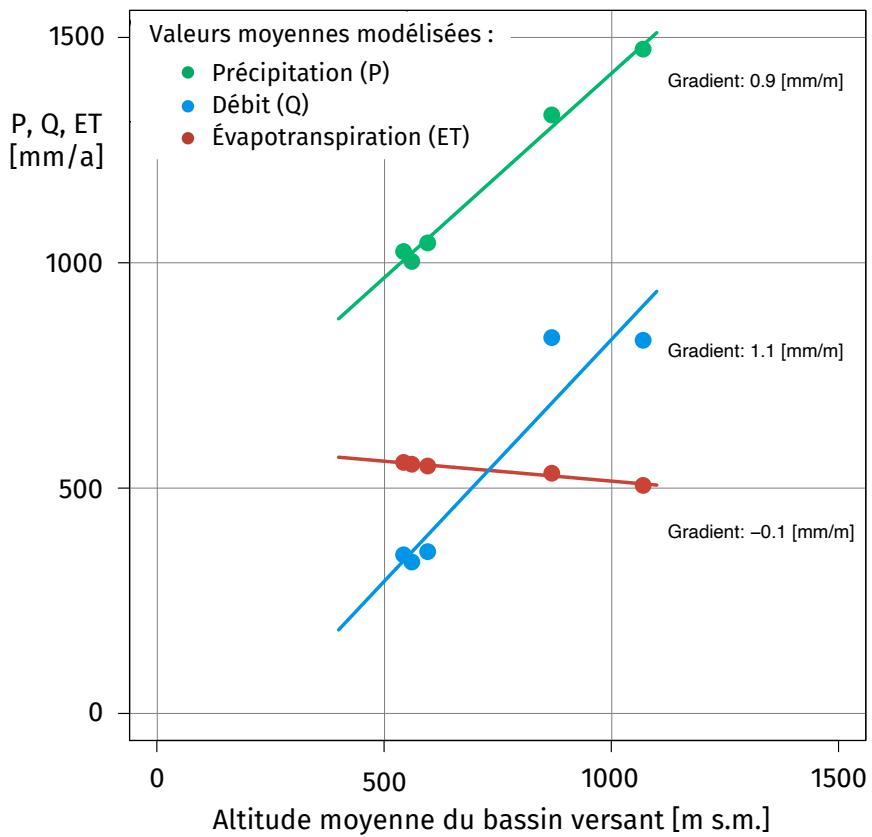


Fig. 3.7 : Gradients des éléments modélisés du bilan hydrique

La variante de modèle caloo1 est la meilleure du point de vue du bilan hydrique. Bien qu'il existe d'autres variantes de modèle qui reproduisent (légèrement) mieux les indicateurs de débit, la variante caloo1 représente globalement un bon compromis.

La qualité de la modélisation des bassins versants représentatifs est discutée en détail dans la présentation des résultats.

3.3.2 Présentation des résultats

La présentation des résultats de la partie hydrologique est centrée sur les régions. La description des changements hydrologiques dans les régions se base sur le bassin versant représentatif. Pour chaque région, une documentation permettant de visualiser les principaux résultats au moyen de tableaux et de diagrammes et de les discuter dans de courts textes a été élaborée. Quelques aspects importants concernant la structure et la conception des différents tableaux et figures sont détaillés ici :

- Les tableaux des changements des indicateurs de débit sont mis en couleur pour une meilleure lisibilité.
- Dans les diagrammes mettant en relation les changements de débit et les changements de précipitations, les valeurs de la période de référence 1981–2010 figurent au milieu du diagramme (coordonnée (0,0)). Les changements futurs sont représentés sous forme de valeurs relatives.
- Un graphique très parlant sur le bilan hydrique est le diagramme de Budyko⁴ représenté dans la figure 3.8. Il met en relation le régime hydrique et le régime énergétique. Dans ce diagramme, l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP) sont normalisées par la hauteur des précipitations (P). Le rapport ETP/P (axe x) est un indicateur climatique. Si les valeurs sont > 1, il s'agit d'un système limité en eau. Si les valeurs sont < 1, il s'agit d'un système limité en énergie. Le rapport ETR/P (axe y) décrit la part de l'évapotranspiration réelle dans le total des précipitations. Si les valeurs sont > 0,5, l'évapotranspiration domine le bilan hydrique, tandis que si les valeurs sont < 0,5, l'écoulement domine le bilan hydrique. Nous présentons uniquement la courbe de Budyko pour l'été (JJA), car c'est à cette période de l'année que les situations de pénurie et de limitation des ressources en eau sont les plus probables. Nous sommes toutefois contraints de laisser de côté l'influence d'un changement notable du réservoir, car les données en la matière font tout simplement défaut.

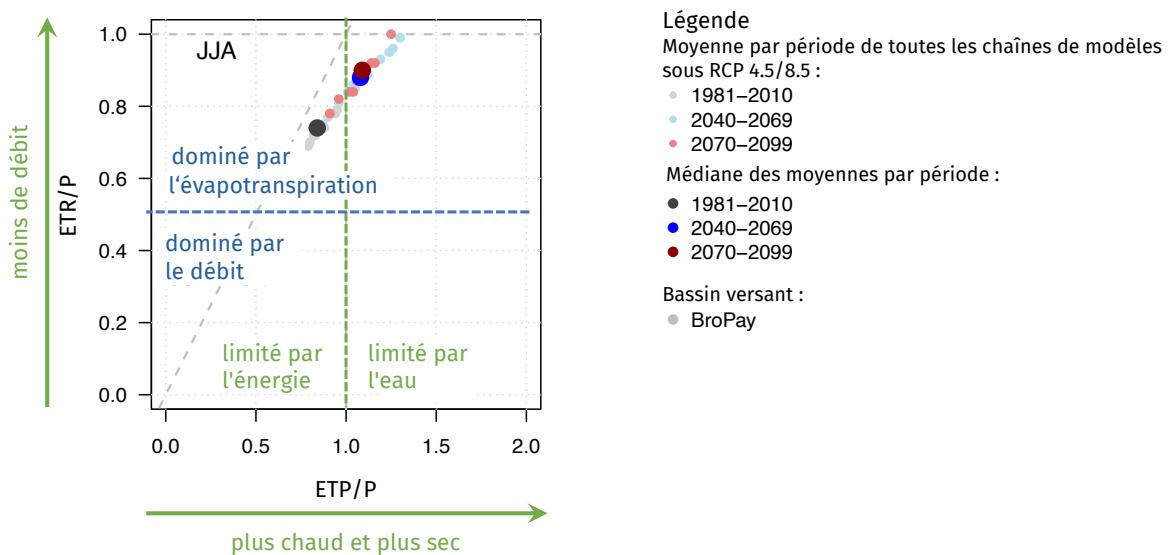


Fig. 3.8 : Explication du diagramme de Budyko

Des boxplots sont également utilisés pour visualiser les résultats. Les boxplots représentent la dispersion des valeurs d'un indicateur. Dans la boîte se trouvent les 50 % centraux des données. La boîte est délimitée par le quartile supérieur et le quartile inférieur. La longueur de la boîte correspond à l'écart interquartile.

⁴Budyko, M. (1976) : Climate and Life. New York

Les valeurs situées en dehors de la boîte sont représentées par les moustaches (whiskers). La figure 3.9⁵ illustre la définition des moustaches (whiskers). Les valeurs statistiquement aberrantes sont représentées par des points.

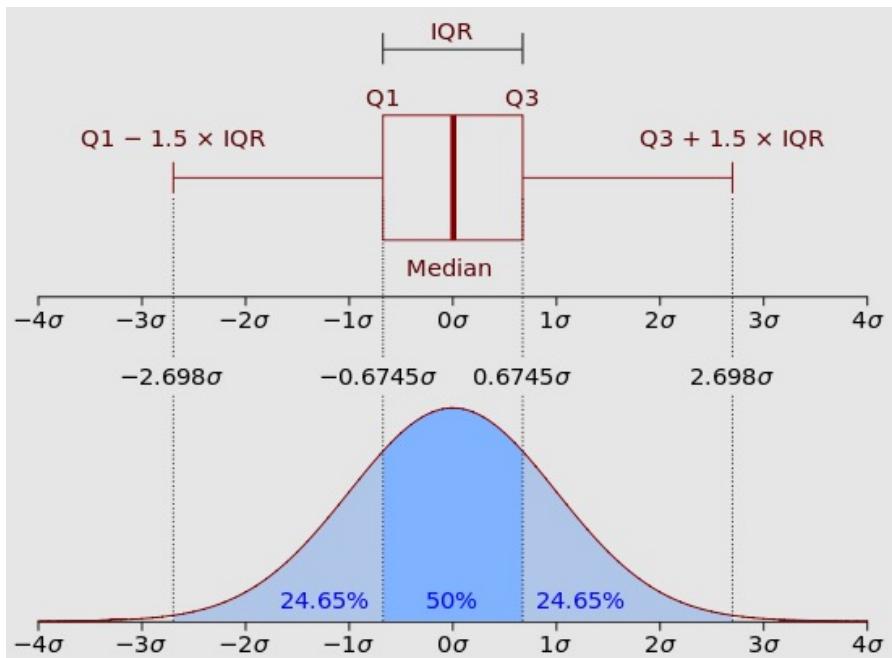


Fig. 3.9 : Définition des boxplots

⁵source : <https://www.r-bloggers.com/2012/06/whisker-of-boxplot/>

3.4 Résultats

3.4.1 Région des 3 Lacs - Grand Marais, Region Seeland-Grosses Moos

Situation initiale

La région des 3 Lacs - Grand Marais (GraMar) est représentée par le bassin versant de Bibere@Kerzers. Ce bassin versant présente les caractéristiques suivantes :

- Superficie : 49 km²
- Altitudes :
 - Altitude minimale : 442 m
 - Altitude moyenne : 543 m
 - Altitude maximale : 670 m

Le bassin versant de la Bibere est le bassin situé aux plus basses altitudes parmi tous ceux étudiés dans ce rapport. Même si l'altitude moyenne ne diffère que peu de celle des bassins versants de la Petite Glâne et de l'Arbogne, l'altitude maximale du bassin versant de la Bibere se trouve environ 150 m en dessous de celle des deux autres bassins versants. À l'intérieur du bassin versant de la Bibere, la différence d'altitude entre l'altitude maximale et l'altitude minimale n'est que de 230 m. Il s'agit donc d'un bassin versant très plat. En ce qui concerne l'utilisation du sol, les terres arables sont prédominantes avec une part de surface d'environ 60 %, suivies par la forêt avec une part d'environ 20 %. La part des zones urbanisées est relativement importante et s'élève à environ 10 %.

Les valeurs hydrologiques sont généralement exprimées en millimètres. Pour le bassin versant de la Bibere, cela implique que 1 mm \equiv 49'000 m³.

Détermination du bilan hydrique

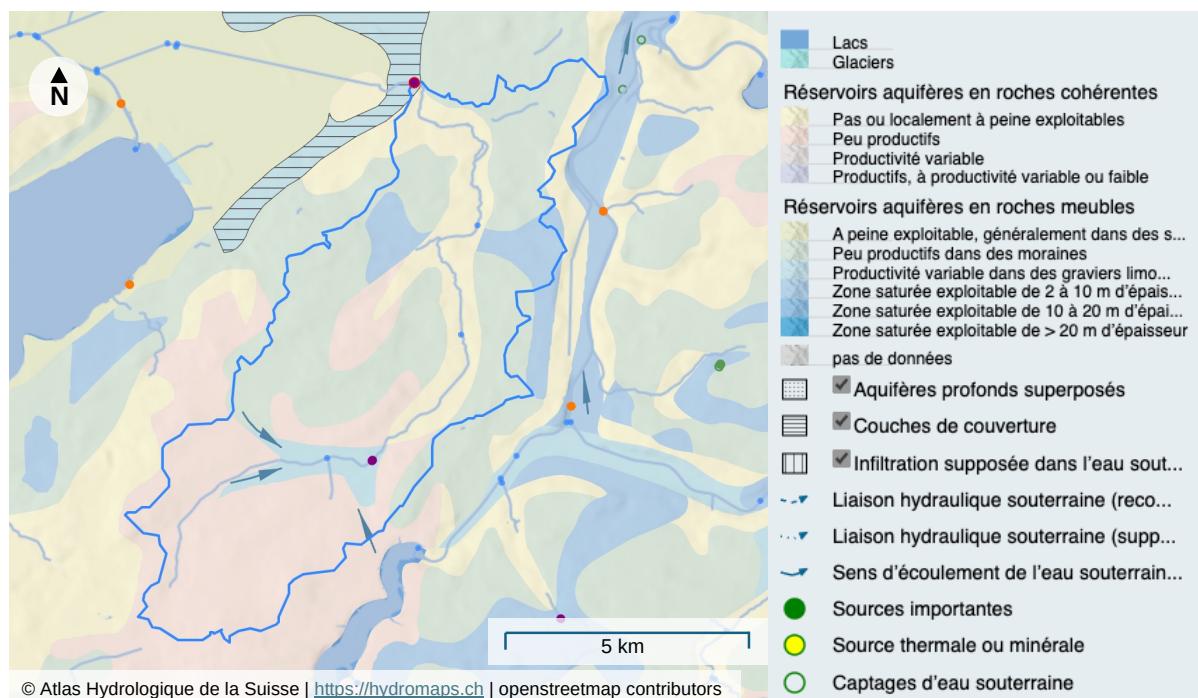


Fig. 3.10 : Situation hydrogéologique de la Bibere. Extrait de l'Atlas hydrologique de la Suisse

Selon l'Atlas hydrogéologique de la Suisse⁶, des apports souterrains affluent dans le bassin versant de la Bibere (fig. 3.10). Compte tenu de cette situation, le bilan hydrique suivant peut être attendu :

$$\text{Précipitations (P)} = \text{Débit superficiel (Q}_{\text{sup}}\text{)} - \text{Apport souterrain (A}_{\text{sout}}\text{)} + \text{Évapotranspiration (ET)} \quad (3.3)$$

Le bilan hydrique effectif peut être déduit des données d'observation de la période 1981–2010. Il est présenté dans le tableau 3.4.1 (cf. « obs »). Le débit superficiel correspond au débit s'écoulant dans le lit du cours d'eau.

⁶<https://hydromaps.ch>

Tab. 3.4.1 : Comparaison du bilan hydrique observé et modélisé de la Bibere pour la période 1981–2010. P : précipitations, Q_{sup} : débit superficiel, Q_{sout} : débit souterrain, ET : évapotranspiration, obs : observations. Précipitations déduites de RhiresD et débit déduit de mesures de l’OFEV, évapotranspiration reprise des données du modèle, Q_{sout} : calculé en tant qu’élément résiduel du bilan hydrique, mod : données modélisées (version de modèle RCP 4.5)

| | Période | mm/a | | | | % | | | | |
|--|---------|-----------|------------------|-------------------|-----|-----|------------------|-------------------|----|----|
| | | P | Q_{sup} | Q_{sout} | ET | P | Q_{sup} | Q_{sout} | ET | |
| | | obs | 1981–2010 | 1039 | 377 | 105 | 557 | 100 | 36 | 10 |
| | mod | 1981–2010 | 1024 | 353 | 114 | 557 | 100 | 34 | 11 | 55 |

Aucun apport souterrain (A_{sout}) ne ressort du bilan hydrique observé. Il suggère plutôt un débit souterrain et l’équation du bilan est donc la suivante :

$$P = Q_{\text{sup}} + (Q_{\text{sout}} + ET) \quad (3.4)$$

Le débit souterrain est l’élément résiduel du bilan hydrique :

$$Q_{\text{sout}} = P - Q_{\text{sup}} - ET \quad (3.5)$$

À noter que cet élément résiduel contient également toutes les erreurs de mesure. Pour les considérations concernant le bilan hydrique observé, nous avons dû recourir à l’évapotranspiration annuelle de 557 mm modélisée avec GR4J. La comparaison avec l’évapotranspiration de 589 mm (période 1973–1992) indiquée dans l’Atlas hydrologique – avec un écart absolu de -32 mm et une erreur relative de -5 % – confirme la pertinence de cette valeur modélisée.

Les précipitations annuelles moyennes observées dans le bassin versant de la Bibere sont légèrement supérieures à 1000 mm. Environ 30 % de ces précipitations annuelles tombent en été (JJA), les différences avec les autres précipitations saisonnières étant inférieures à 100 mm (fig. 3.11). En ce qui concerne le débit, ces précipitations sont masquées par le caractère saisonnier prononcé de l’évapotranspiration, de sorte que surtout en été, il ne se forme que peu de débit, soit 72 mm en moyenne. Aujourd’hui déjà, la région peut être considérée comme affectée par la sécheresse estivale.

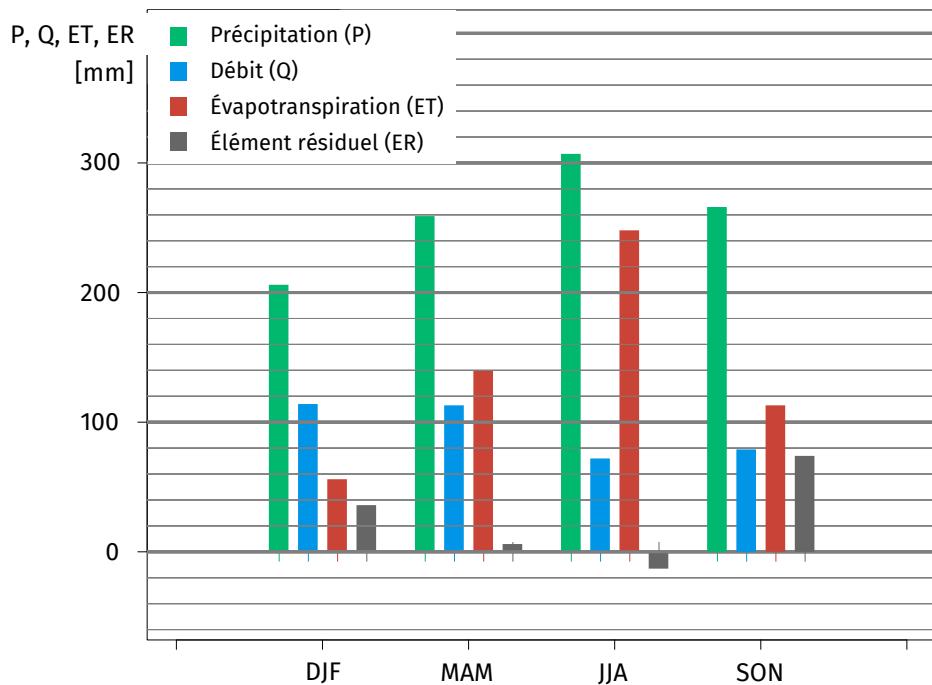


Fig. 3.11 : Bilan hydrique saisonnier moyen de la Bibere pour la période 1981–2012, sur la base des données d'observation

Évaluation de la qualité de la modélisation

Le modèle hydrologique GR4J reproduit très bien le bilan hydrique annuel observé dans son ensemble. Le tableau 3.4.2 montre que dans l'ensemble, le modèle GR4J reproduit bien les précipitations (P) et le débit superficiel (MQ) de la période de référence. En ce qui concerne les valeurs annuelles moyennes, la qualité de la modélisation est excellente pour les précipitations et bonne pour le débit. Au niveau saisonnier, les précipitations hivernales sont également très bien modélisées pour les deux scénarios d'émissions. Par contre, des différences existent au niveau de la qualité de la modélisation des débits saisonniers : la modélisation est très bonne en automne, satisfaisante au printemps et en été et tout juste insuffisante en hiver.

Tab. 3.4.2 : Comparaison des valeurs saisonnières observées et modélisées des précipitations (P) et du débit moyen superficiel (MQ) de la Bibere pour la période 1981–2010 et selon les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

| | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|-------|--------|---------|-----|---------|-----|
| | | P | MQ | P | MQ |
| Année | CH2018 | 1027 | 356 | 1027 | 355 |
| Année | OBS | 1023 | 377 | 1023 | 377 |
| Année | Δ mm | 4 | -21 | 4 | -22 |
| Année | Δ% | 0 | -6 | 0 | -6 |
| DJF | CH2018 | 218 | 91 | 215 | 91 |
| DJF | OBS | 217 | 114 | 217 | 114 |
| DJF | Δ mm | 1 | -23 | -2 | -23 |
| DJF | Δ% | 0 | -20 | -1 | -20 |
| MAM | CH2018 | 253 | 99 | 253 | 99 |
| MAM | OBS | 253 | 113 | 253 | 113 |
| MAM | Δ mm | 0 | -14 | 0 | -14 |
| MAM | Δ% | 0 | -12 | 0 | -12 |
| JJA | CH2018 | 295 | 85 | 294 | 85 |
| JJA | OBS | 289 | 72 | 289 | 72 |
| JJA | Δ mm | 6 | 13 | 5 | 13 |
| JJA | Δ% | 2 | 18 | 2 | 18 |
| SON | CH2018 | 264 | 80 | 265 | 80 |
| SON | OBS | 264 | 79 | 264 | 79 |
| SON | Δ mm | 0 | 1 | 1 | 1 |
| SON | Δ% | 0 | 1 | 0 | 1 |

Conclusion : Le modèle hydrologique reproduit très bien les précipitations observées, mais atteint ses limites en ce qui concerne les débits hivernaux.

Changements des précipitations moyennes

Les tableaux 3.4.3 et 3.4.4 décrivent les changements relatifs des précipitations moyennes, tandis que les deux figures 3.12 et 3.13 montrent d'une part les changements absolus et indiquent d'autre part la dispersion des chaînes de modèles et donc les incertitudes des modélisations.

Les changements des précipitations annuelles moyennes sont faibles pour la Bibera; la valeur relative des changements est inférieure à 4 mm. En hiver (DJF), les augmentations des précipitations moyennes sont moyennes à importantes sous RCP 4.5 et importantes à très importantes sous RCP 8.5. L'augmentation maximale atteint 25 %. Au printemps (MAM) aussi, les précipitations augmentent systématiquement, dans une

moindre mesure sous RCP 4.5 que sous RCP 8.5. En été, les précipitations moyennes diminuent pour toutes les combinaisons entre périodes et scénarios d'émissions. Sous RCP 4.5 les diminutions atteignent -12 % et sous RCP 8.5 même -23 %. On remarquera la diminution plus importante des précipitations par rapport à la période de référence dans le futur moyen que dans le futur lointain pour le scénario RCP 4.5. Sous RCP 8.5 par contre, plus on s'éloigne de la période de référence, plus le déficit est important. En automne, les changements – tous des augmentations – sont majoritairement faibles.

Tab. 3.4.3 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de la Bibere@Kerzers (BibKer). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1025.7 | 217.2 | 252.8 | 293.8 | 263.7 | mm |
| 2040-2069 | -1.8 | 5.9 | 1.4 | -12.4 | 2.1 | % |
| 2070-2099 | 2.8 | 10.9 | 8.7 | -6.8 | 5.5 | % |

Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▢ 5 ▣ 10 □ 20 ▢ [%]

Tab. 3.4.4 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de la Bibere@Kerzers (BibKer). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1025.7 | 215.3 | 252.8 | 293.8 | 264.6 | mm |
| 2040-2069 | 3.9 | 15.7 | 12.3 | -7.1 | 3.8 | % |
| 2070-2099 | 1.4 | 25.0 | 15.2 | -23.0 | 0.7 | % |

Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▢ 5 ▣ 10 □ 20 ▢ [%]

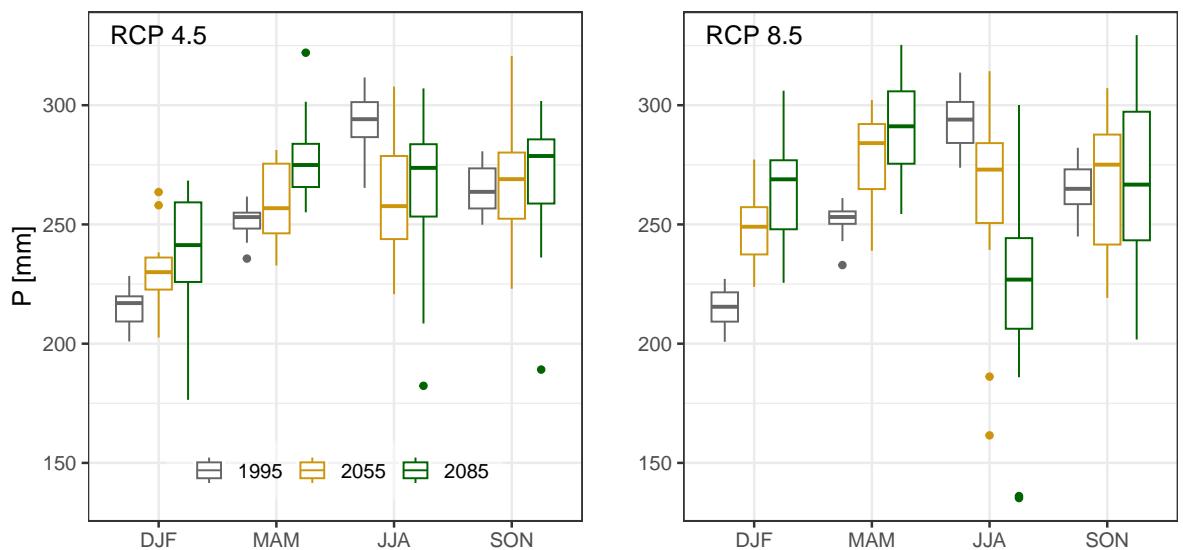


Fig. 3.12 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des sommes de précipitations saisonnières moyennes à long terme dans le bassin versant de la Bibere pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

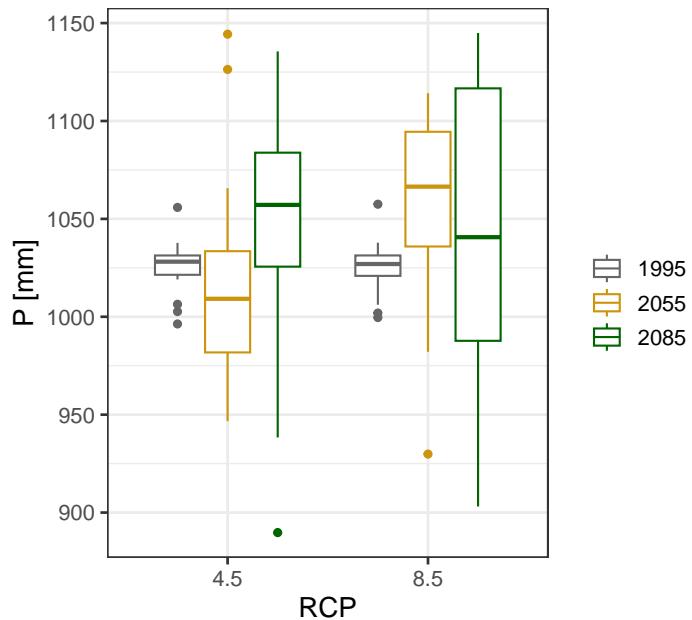


Fig. 3.13 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des précipitations annuelles moyennes à long terme dans le bassin versant de la Bibere pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements du débit moyen

Une tendance intéressante se dessine sous RCP 4.5 pour le débit annuel. Après une diminution initialement importante par rapport à la période de référence 1981–2010 dans le futur moyen, le débit annuel moyen se rapproche à nouveau de celui de la période de référence dans le futur lointain. Sous RCP 8.5 en revanche, le débit annuel moyen s'éloigne davantage du débit annuel de la période de référence dans le futur lointain, atteignant une diminution d'environ -21 % (cf. tab. 3.4.5 et 3.4.6 ainsi que fig. 3.14 et 3.15) :

Pour les débits saisonniers, toutes les combinaisons entre scénarios d'émissions et périodes futures présentent des diminutions sous RCP 4.5. Les diminutions sont importantes en été (JJA) et en automne (SON). À l'exception de l'hiver et du printemps dans le futur moyen, c'est également le cas pour le scénario RCP 8.5, pour lequel l'amplitude des diminutions dans le futur lointain est beaucoup plus importante que sous RCP 4.5. En été et en automne, les diminutions se situent entre -30 et -40 %. La Bibere est le seul bassin versant dans lequel les débits moyens hivernaux diminuent (exception : RCP 8.5, futur moyen). Dans tous les autres bassins versants, ils augmentent dans des proportions parfois importantes.

Tab. 3.4.5 : Débits annuels et saisonniers moyens de la Bibere@Kerzers (BibKer). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|------|------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 354.0 | 90.3 | 99.5 | 84.9 | 79.4 | mm |
| 2040-2069 | -12.4 | -2.0 | -8.3 | -19.4 | -14.9 | % |
| 2070-2099 | -6.2 | -2.0 | -0.9 | -10.8 | -12.6 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

Tab. 3.4.6 : Débits annuels et saisonniers moyens de la Bibere@Kerzers (BibKer). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 354.0 | 91.2 | 98.6 | 84.9 | 80.3 | mm |
| 2040-2069 | -5.2 | 5.0 | 3.7 | -11.8 | -18.2 | % |
| 2070-2099 | -20.6 | -13.0 | -6.5 | -31.2 | -39.8 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

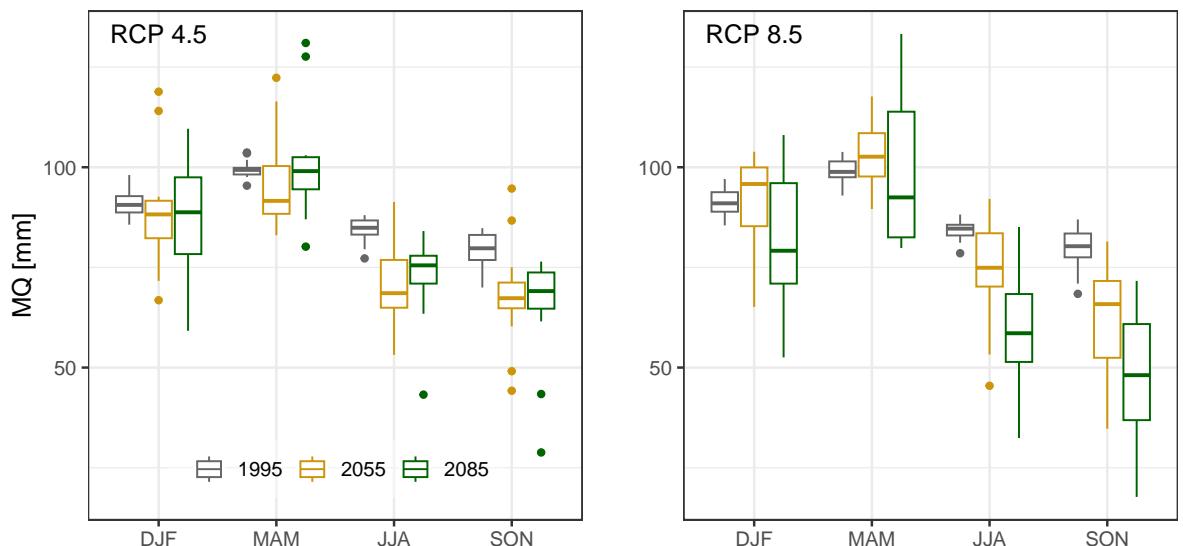


Fig. 3.14 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits saisonniers moyens à long terme de la Bibere pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

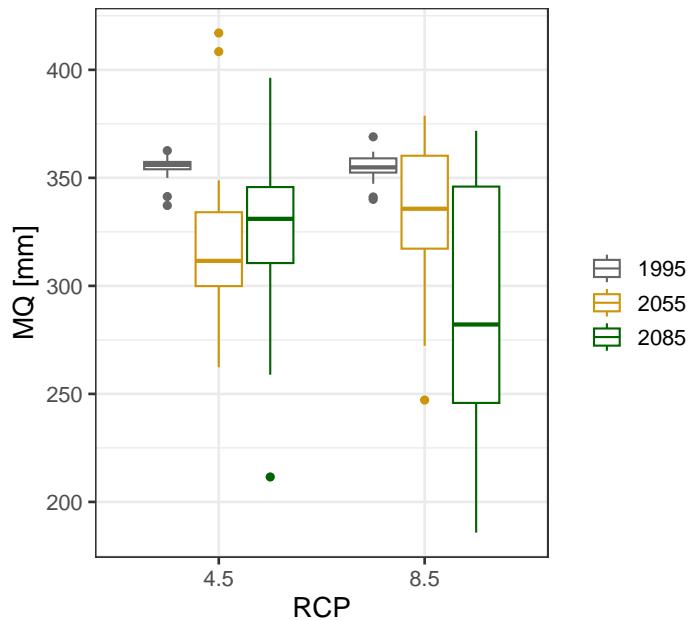


Fig. 3.15 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits annuels moyens à long terme de la Bibere pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

La figure 3.16 place les changements relatifs modélisés dans le contexte des observations de la période de référence 1981–2010. Elle visualise d'une part les écarts entre les valeurs médianes et positionne d'autre part les valeurs médianes futures dans la zone de dispersion des valeurs des années individuelles de la période de référence 1981–2010.

En hiver (DJF), les médianes futures sont proches de la médiane de la période de référence, mais majoritairement plus faibles que cette médiane. On remarquera la diminution sous RCP 8.5 dans le futur lointain. La médiane se situe au bord inférieur de la boîte. Elle est dépassée par environ 75 % des débits des années individuelles entre 1981–2010. Comme mentionné plus haut, la diminution des débits moyens en hiver n'est pas typique en comparaison avec les autres bassins versants étudiés. Au printemps, les médianes futures sont proches de la valeur médiane de la période de référence. En été et en automne, la majorité des diminutions se trouvent à l'intérieur de la boîte. Dans le futur lointain, la diminution dépasse le cadre sous RCP 8.5, ce qui souligne la très grande ampleur de ces changements.

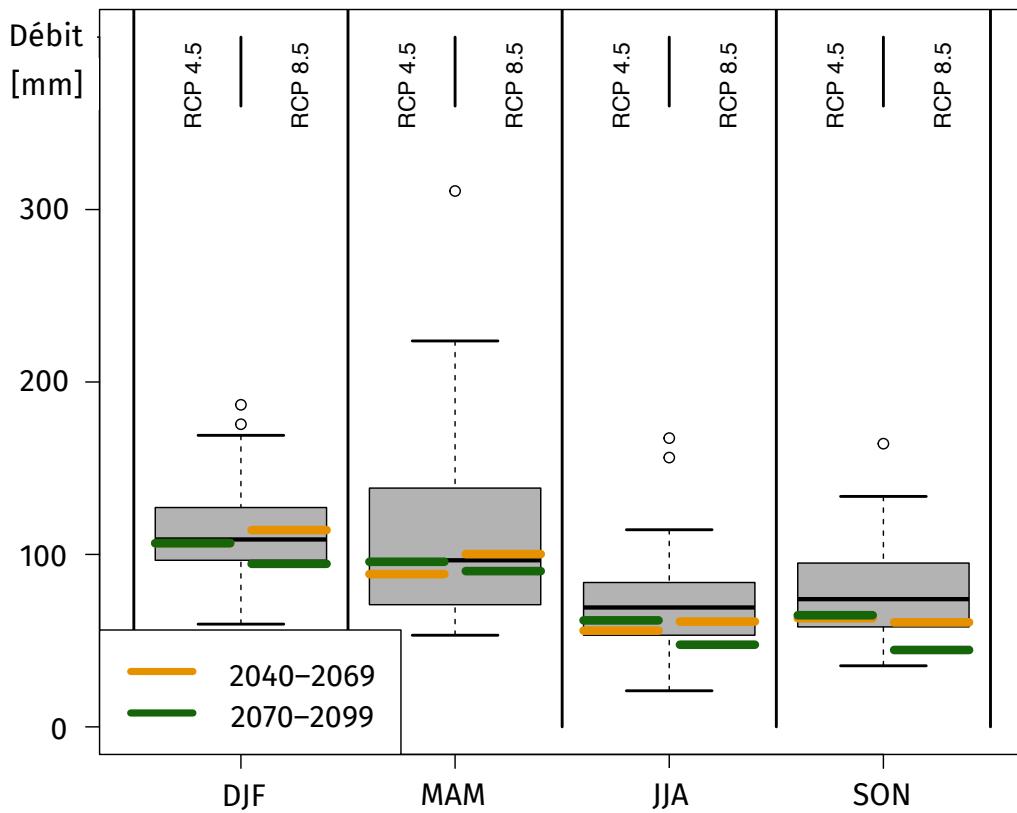


Fig. 3.16 : Distribution des débits saisonniers de la Bibere pour la période 1981–2010, déduits des observations de l’OFEV et du canton de Fribourg, comparés aux débits médians du futur moyen et du futur lointain pour les deux scénarios d’émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de l’évapotranspiration réelle

L’évapotranspiration réelle annuelle moyenne augmente d’environ 5 à 20 % selon la période future et le scénario d’émissions.

Sur une base saisonnière, les changements se situent entre 6 et 15 % sous RCP 4.5 et entre 10 et 26 % sous RCP 8.5. Sous RCP 4.5, les augmentations sont plus importantes en hiver et au printemps qu’au cours des autres saisons. De plus, les augmentations par rapport à la période de référence sont plus importantes dans le futur lointain que dans le futur moyen.

Sous RCP 8.5, les augmentations dans le futur moyen fluctuent autour de 10 %, tandis que dans le futur lointain, elles se situent entre 17 et 26 %. La valeur de 26 % en hiver ne doit cependant pas induire en erreur sur le fait que les augmentations absolues sont plutôt faibles en raison de la faible valeur initiale pour la période de référence (55,7 mm).

Tab. 3.4.7 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de la Bibere@Kerzers (BibKer) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 558.5 | 55.7 | 138.7 | 247.3 | 115.0 | mm |
| 2040-2069 | 6.5 | 11.5 | 7.2 | 5.9 | 5.6 | % |
| 2070-2099 | 9.8 | 14.8 | 10.5 | 9.2 | 8.7 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 □ -10 △ -5 ▲ 5 ▨ 10 ▢ 20 ▨ [%] | | | | | | |

Tab. 3.4.8 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de la Bibere@Kerzers (BibKer) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 558.5 | 55.7 | 138.7 | 247.3 | 114.1 | mm |
| 2040-2069 | 11.1 | 14.8 | 11.2 | 10.3 | 10.4 | % |
| 2070-2099 | 19.0 | 26.2 | 19.7 | 17.3 | 16.8 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 □ -10 △ -5 ▲ 5 ▨ 10 ▢ 20 ▨ [%] | | | | | | |

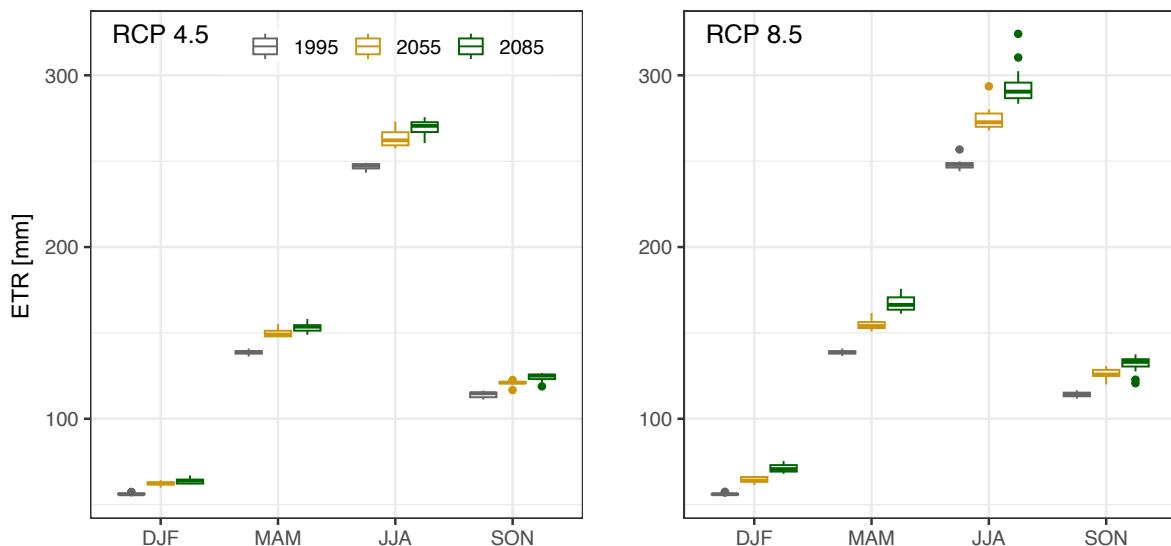


Fig. 3.17 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation de l'évapotranspiration saisonnière moyenne à long terme dans le bassin versant de la Bibere pour la période de référence 1981-2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

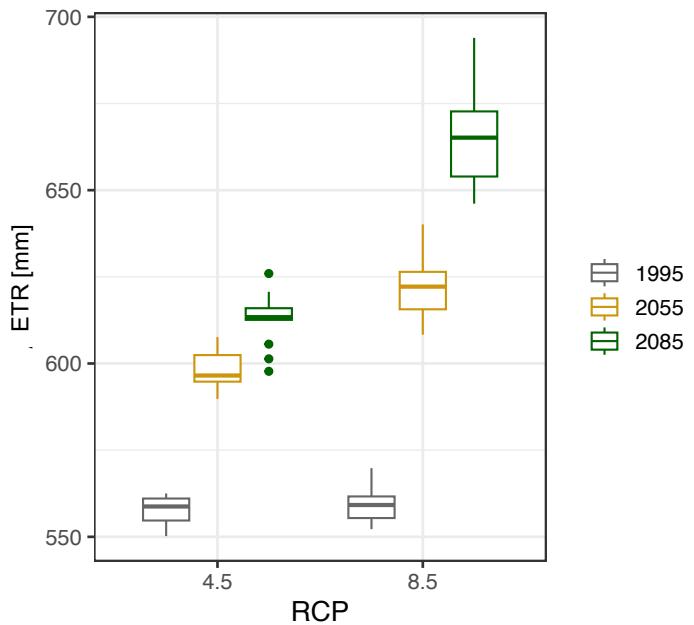


Fig. 3.18 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation de l'évapotranspiration annuelle moyenne à long terme dans le bassin versant de la Bibere pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de la neige

L'influence de la neige sur le régime d'écoulement est faible dans ce bassin versant en raison de sa basse altitude. C'est probablement l'une des raisons pour lesquelles le modèle GR4J associé au module de neige CemaNeige n'a pas réussi à modéliser de manière plausible la part de la neige dans le total des précipitations. Par conséquent, nous renonçons ici à présenter les résultats.

Considérations sur le bilan hydrique

Dans ce chapitre, nous examinons les changements des éléments du bilan hydrique dans leur interaction. Pour ce faire, les changements relatifs des précipitations (P), du débit (Q) et de l'évapotranspiration réelle (ET) indiqués dans les tableaux ci-dessus sont appliqués aux observations de la période de référence 1981–2010 (cf. tab. 3.4.2). L'objectif principal est de comprendre les changements du débit dans le contexte des changements des autres éléments du bilan hydrique. Dans cette optique, le bilan peut être décrit par l'équation suivante :

$$\Delta Q = \Delta P - \Delta ET - \Delta ER \quad (3.6)$$

Les signes doivent impérativement être pris en compte lors du calcul de cette équation. Ainsi, la relation suivante s'applique au débit annuel sous RCP 4.5 dans le futur moyen (vers 2055, cf. fig. 3.19) :

$$-47 = -19 - 36 - (-8) \text{ [mm]} \quad (3.7)$$

L'équation démontre que la diminution du débit annuel (-47 mm) est influencée de manière décisive par l'augmentation de l'évapotranspiration annuelle (36 mm), mais que la diminution des précipitations annuelles (-19 mm) joue également un rôle. Dans le futur lointain sous RCP 4.5, les précipitations annuelles moyennes augmentent par rapport à la période de référence. Cependant, le débit annuel moyen n'augmente pas pour autant de manière proportionnelle, car l'effet des précipitations annuelles moyennes plus importantes est compensé par l'évapotranspiration réelle moyenne. Le même scénario se produit sous RCP 8.5 dans le futur moyen. Les conditions sont très différentes dans le futur lointain (RCP 8.5) : Comme les précipitations annuelles pour cette période sont à nouveau similaires à celles de la période de référence, la forte augmentation de l'évapotranspiration fait que le débit diminue dès lors fortement.

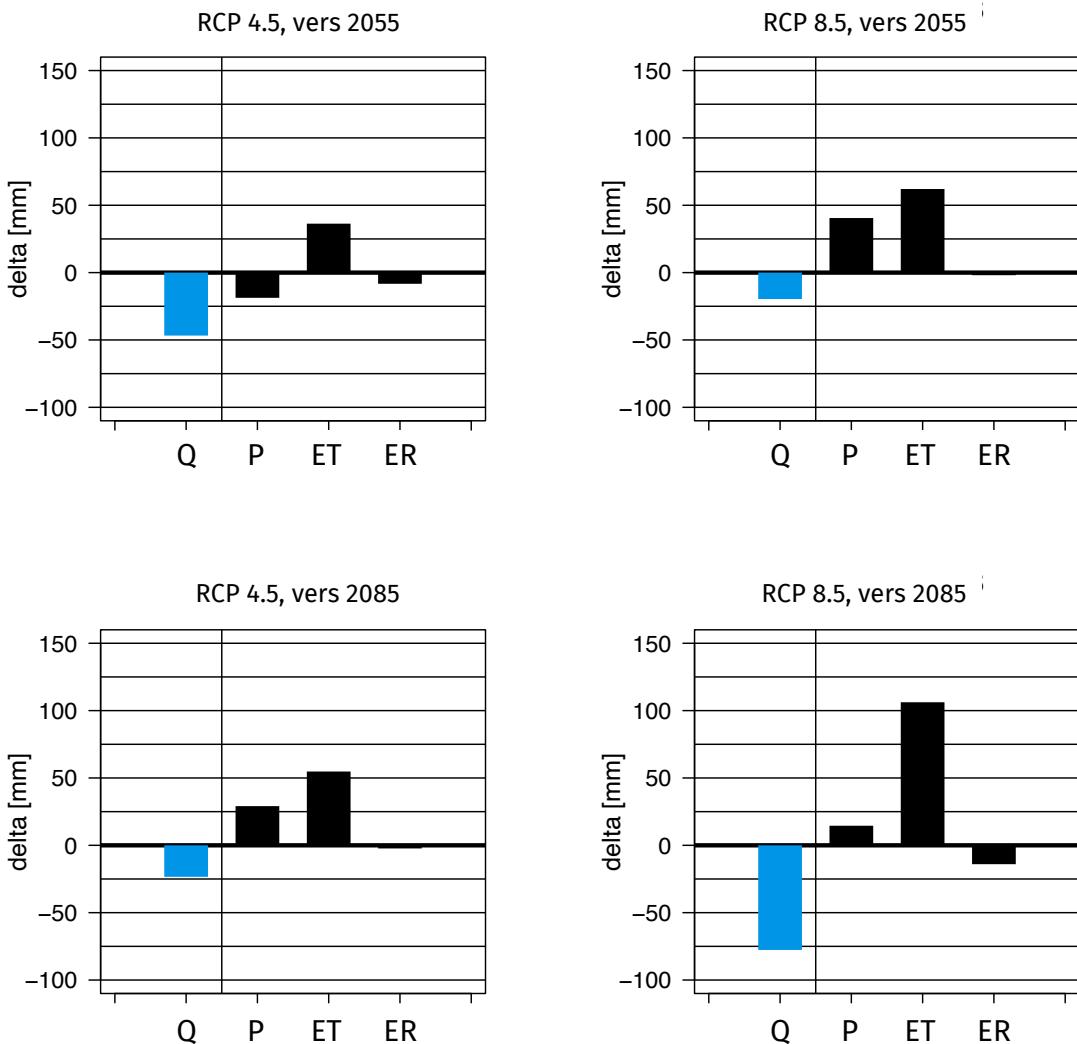


Fig. 3.19 : Comparaison des changements du bilan annuel dans le bassin versant de la Bibere@Kerzers. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

Les diminutions du débit en été sont caractérisées par l'interaction entre la diminution des précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration. Dans le futur moyen sous RCP 4.5 et dans le futur lointain sous RCP 8.5, l'effet de la diminution des précipitations annuelles moyennes est plus important que celui de l'augmentation de l'évapotranspiration. Dans les deux autres combinaisons, les effets des changements des précipitations et de l'évapotranspiration s'équilibrivent.

L'importante valeur négative de l'élément résiduel dans le futur lointain sous RCP 8.5 suggère la présence d'eau supplémentaire dans le système, probablement suite au vidage du réservoir d'eau souterraine. En conséquence, le déficit du débit est moins important. Cela démontre non seulement l'importance des réservoirs, mais aussi que le déficit de débit serait beaucoup plus important si aucun apport d'eau ne provenait du réservoir d'eau souterraine.

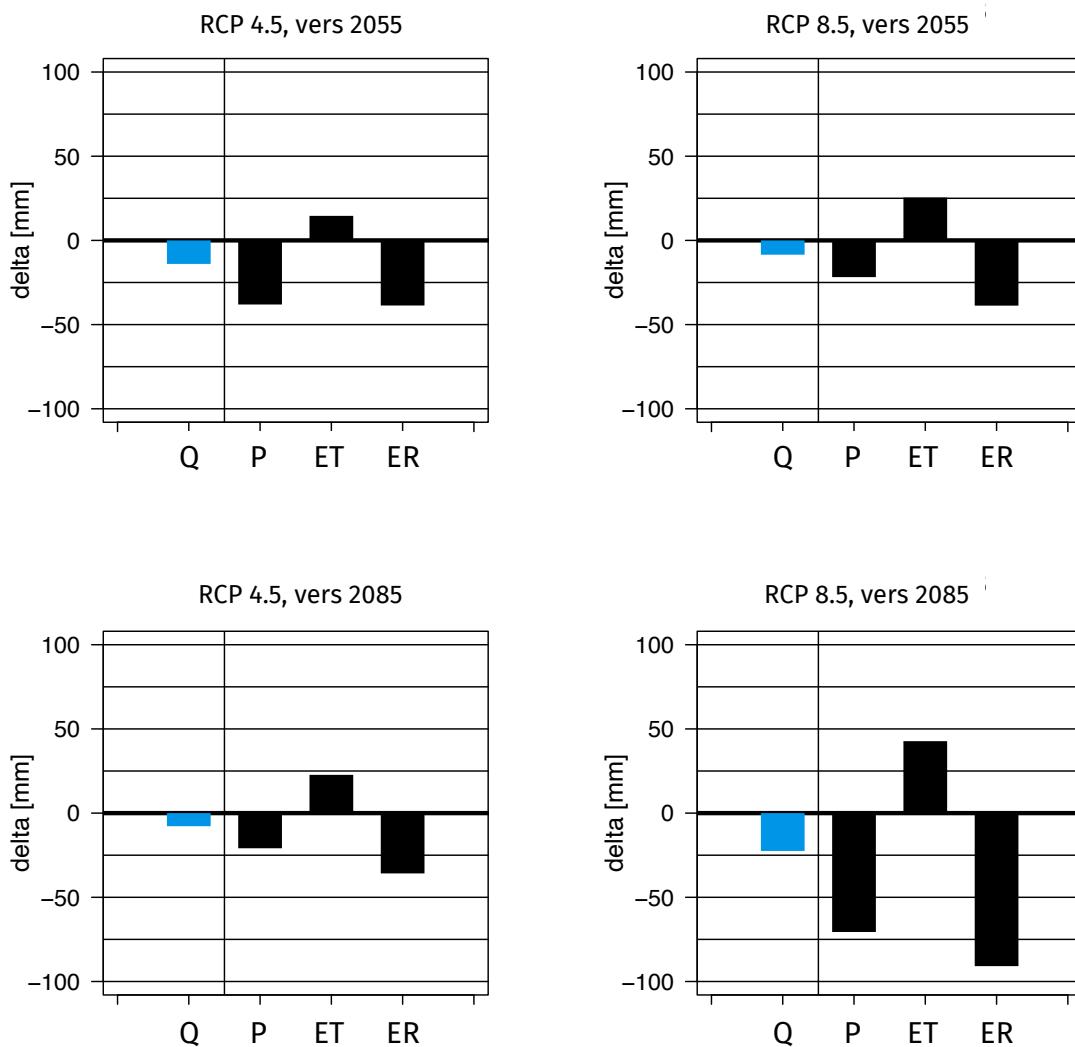


Fig. 3.20 : Comparaison des changements du bilan hydrique en été (JJA) dans le bassin versant de la Biere@Kerzers. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

Les figures 3.21 et 3.22 (graphiques en haut à droite, JJA) apportent un regard légèrement différent sur l'interaction entre la diminution des précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration conduisant à une diminution du débit en été. Si la diminution du débit était uniquement contrôlée par la diminution des précipitations, la valeur médiane des changements se situerait sur la bissectrice. Dans les graphiques, les valeurs médianes se situent cependant en dessous de la bissectrice, ce qui démontre l'influence de l'évapotranspiration réelle.

Considérons maintenant les changements de débit en hiver (graphiques en haut à gauche) : bien que les précipitations moyennes augmentent, les débits moyens n'augmentent guère ou diminuent même. Selon le bilan hydrique, le débit moyen devrait augmenter en hiver, car l'augmentation de l'évapotranspiration est inférieure à l'augmentation des précipitations. Mais ce n'est pas le cas. C'est là qu'intervient le coefficient de débit. Il décrit la part des précipitations qui parvient au débit. Le coefficient de débit moyen en hiver est de 0,51 pendant la période de référence (données d'observation) et diminue à 0,35 dans le futur lointain sous RCP 8.5. Cela signifie que l'impact de l'augmentation des précipitations sur le débit est réduit, voire compensé par un coefficient de débit plus faible. Ce phénomène ainsi que l'augmentation de l'évapotranspiration moyenne pourraient conduire à une diminution du débit moyen en hiver.

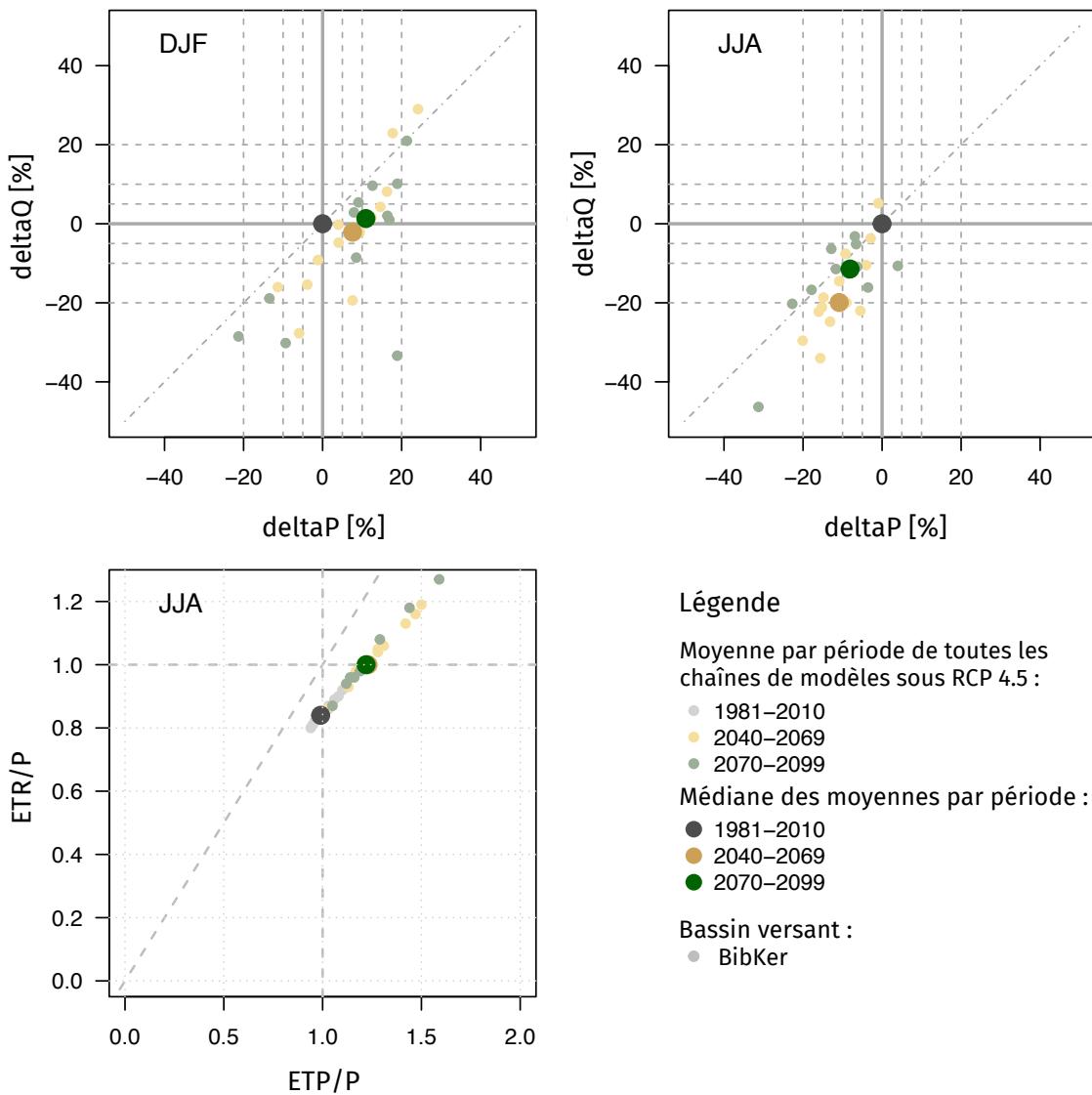


Fig. 3.21 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de la Bibere@Kerzers en hiver (DJF) et en été (JJA) sous RCP 4.5. Les deux diagrammes du haut montrent les changements relatifs des précipitations (deltaP) et du débit (deltaQ). Le diagramme de Budyko est présenté et décrit dans la partie Méthodologie. Les trois diagrammes montrent la dispersion des moyennes par période de toutes les chaînes de modèles utilisées, ainsi que la valeur médiane de ces moyennes par période.

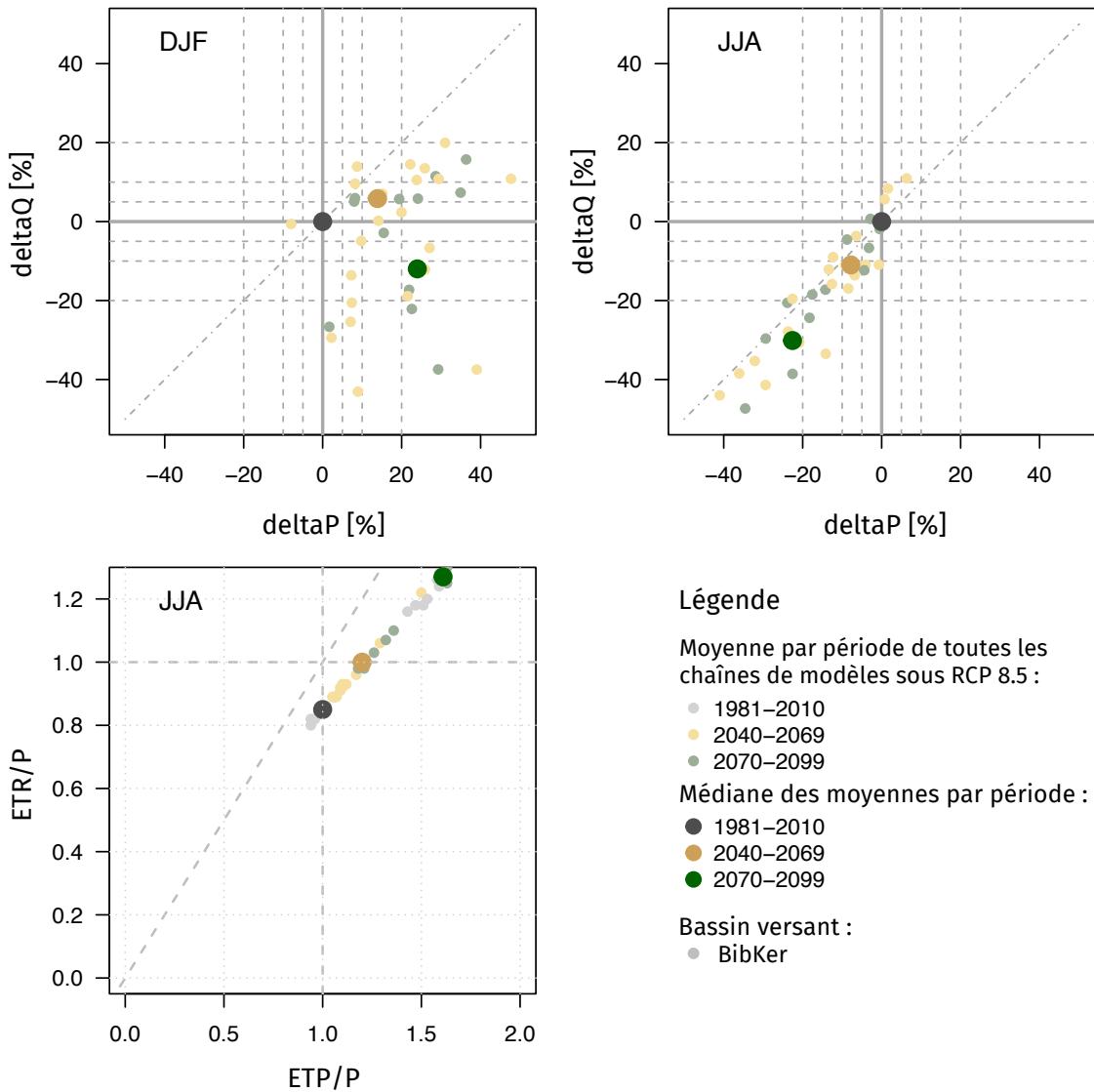


Fig. 3.22 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de la Bibere@Kerzers sous RCP 8.5

La dispersion des valeurs des différentes chaînes de modèles autour de la médiane dans les figures 3.21 et 3.22 montre avec quelle précision les différentes chaînes de modèles représentent la valeur médiane. Prenons l'exemple de la modélisation sous RCP 4.5. En été, les chaînes de modèles concordent largement sur le signe des changements, mais résultent en des conclusions différentes quant à l'ampleur des changements. En hiver, la situation n'est pas aussi claire. Ainsi, certaines chaînes de modèles prévoient une augmentation des précipitations et du débit, d'autres une diminution. Néanmoins, la plupart des chaînes de modèles restent relativement proches des valeurs médianes. Cette dispersion des chaînes de modèles doit être prise en compte dans les réflexions sur l'incertitude. Dans le présent rapport, cette dispersion est représentée par les figures avec les boxplots.

Selon les deux diagrammes de Budyko dans les figures 3.21 et 3.22, la Bibere se trouve déjà en transition d'une limitation énergétique à une limitation hydrique au cours de la période de référence; en d'autres termes, le manque d'eau est déjà un problème lors d'une année moyenne au cours de la période de référence. Avec le réchauffement climatique, cette limitation hydrique va encore augmenter, et ce de manière beaucoup plus marquée sous RCP 8.5. La sécheresse estivale devient un défi majeur dans le bassin versant de la Bibere!

Changements des plus faibles et plus importants débits journaliers

Il convient de préciser encore une fois que nous analysons ici de très petits et de très grands débits journaliers. Les très grands débits journaliers ne sont pas des crues ou des pics de crue au sens strict du terme. De telles crues se produisent à une échelle horaire et ne sauraient être saisies avec les valeurs journalières utilisées ici. En revanche, les plus petits débits sont bien saisis avec une résolution journalière, étant donné que les fluctuations dans le domaine des étiages sont très lentes. Les débits journaliers les plus faibles et les plus élevés sont décrits par ce que l'on appelle des quantiles (q). Le quantile du débit (Q_{q10}) par exemple, indique le débit (Q) qui est atteint ou n'est pas dépassé en moyenne lors de 10 % des jours – soit 37 jours en une année.

Tab. 3.4.9 : Plus faibles et plus importants débits de la Bibere@Kerzers (BibKer). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|------|------------|
| 1981-2010 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 1.7 | 2.2 | 3.6 | mm/d |
| 1981-2010 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 1.0 | 1.2 | 2.1 | m^3/s |
| 1981-2010 | 3.8 | 4.4 | 5.0 | 19.6 | 25.0 | 41.2 | $l/s/km^2$ |
| 2040-2069 | -27.3 | -23.7 | -20.9 | -9.5 | -9.3 | -7.0 | % |
| 2070-2099 | -21.2 | -18.0 | -15.9 | -2.4 | -2.8 | -1.7 | % |
| ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | | |

Tab. 3.4.10 : Plus faibles et plus importants débits de la Bibere@Kerzers (BibKer). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------------|
| 1981-2010 | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 1.7 | 2.2 | 3.6 | mm/d |
| 1981-2010 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 1.0 | 1.3 | 2.1 | m^3/s |
| 1981-2010 | 3.7 | 4.3 | 4.9 | 19.4 | 25.2 | 42.0 | $l/s/km^2$ |
| 2040-2069 | -21.0 | -17.9 | -15.8 | 0.1 | -0.7 | 3.3 | % |
| 2070-2099 | -41.4 | -40.3 | -38.2 | -14.2 | -12.8 | -7.9 | % |
| ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | | |

En ce qui concerne les débits journaliers rares les diminutions par rapport à la période de référence dominent. Ces diminutions sont plus importantes pour les plus faibles débits journaliers que pour les débits les plus importants.

En ce qui concerne les plus faibles débits journaliers, plus ils sont faibles, plus les diminutions sont importantes. Sous RCP 8.5, les diminutions peuvent atteindre -40 % dans le futur lointain.

En ce qui concerne les débits journaliers les plus importants, une nette différence se dessine entre les deux scénarios d'émissions. Sous RCP 4.5, les diminutions sont faibles à moyennes, se situant toutes entre 0 et -10 %. Les écarts sont plus importants dans le futur moyen que dans le futur lointain. En d'autres termes, les débits journaliers les plus importants du futur lointain se rapprochent à nouveau des valeurs de la période de référence. Sous RCP 8.5 en revanche, les diminutions par rapport à la période de référence s'intensifient du futur moyen au futur lointain.

3.4.2 Région Basse Broye, Region Untere Broye

Situation initiale

La région Basse Broye (BasBro) est représentée par le bassin versant de la Petite Glâne@Villars-le-Grand.

Ce bassin versant possède les caractéristiques suivantes :

- Superficie : $75,5 \text{ km}^2$
- Altitudes :
 - Altitude minimale : 435 m
 - Altitude moyenne : 561 m
 - Altitude maximale : 817 m

L'utilisation du sol est dominée par les terres arables, qui représentent environ 80 % de la superficie.

Les valeurs hydrologiques sont généralement exprimées en millimètres. Pour le bassin versant de la Petite Glâne, cela implique que $1 \text{ mm} \hat{=} 75'500 \text{ m}^3$.

Détermination du bilan hydrique

La carte hydrogéologique de l'Atlas hydrologique de la Suisse⁷ ne mentionne aucun apport ou écoulement souterrain. Il peut donc être supposé que la région représente un système hydrologique fermé. Par conséquent, le bilan hydrique annuel du bassin versant de la Petite Glâne devrait pouvoir être décrit par l'équation suivante, dans laquelle nous supposons que le taux de remplissage des réservoirs (Res), c'est-à-dire, dans ce cas, de la nappe phréatique, est équilibré sur une moyenne à long terme, de sorte que $\Delta \text{Res} = 0$.

$$\text{Précipitations (P)} = \text{Débit (Q)} + \text{Évapotranspiration (ET)} \quad (3.8)$$

⁷<https://hydromaps.ch>

Tab. 3.4.11 : Comparaison des bilans hydriques annuels observés et modélisés de la Petite Glâne pour la période 1993–2010. P : précipitations, Q_{sup} : débit superficiel, Q_{sout} : débit souterrain, ET : évapotranspiration, obs : observations. Précipitations déduites de RhiresD et débit déduit de mesures de l'OFEV, évapotranspiration reprise des données du modèle, Q_{sout} : calculé en tant qu'élément résiduel du bilan hydrique, mod : données modélisées (version de modèle RCP 4.5)

| | Période | mm/a | | | | % | | | | |
|--|---------|-----------|------------------|-------------------|----|-----|------------------|-------------------|----|----|
| | | P | Q_{sup} | Q_{sout} | ET | P | Q_{sup} | Q_{sout} | ET | |
| | obs | 1993–2010 | 998 | 416 | 29 | 553 | 100 | 42 | 3 | 55 |
| | mod | 1993–2010 | 999 | 443 | 3 | 553 | 100 | 44 | 0 | 56 |

Pour les considérations concernant le bilan hydrique, nous avons dû recourir à la valeur d'évapotranspiration modélisée de 553 mm. La comparaison avec la valeur de 547 mm indiquée dans l'Atlas hydrologique de la Suisse (période 1973–1992) démontre que l'évapotranspiration annuelle modélisée est très fiable.

L'hypothèse selon laquelle le bassin versant est hydrogéologiquement fermé est confirmée par le bilan hydrique observé ainsi que par le bilan hydrologique modélisé (cf. tableau 3.4.11).

Les précipitations annuelles moyennes observées dans le bassin versant de la Petite Glâne sont inférieures à 1000 mm. Environ 30 % des précipitations annuelles tombent en été (JJA), les différences avec les précipitations des autres saisons étant inférieures à 100 mm (fig. 3.23). Du point de vue du débit, ces précipitations sont masquées par la forte saisonnalité de l'évapotranspiration, si bien qu'en été surtout, il ne se forme que peu de débit, soit 63 mm en moyenne. Aujourd'hui déjà, la région peut être considérée comme affectée par la sécheresse estivale.

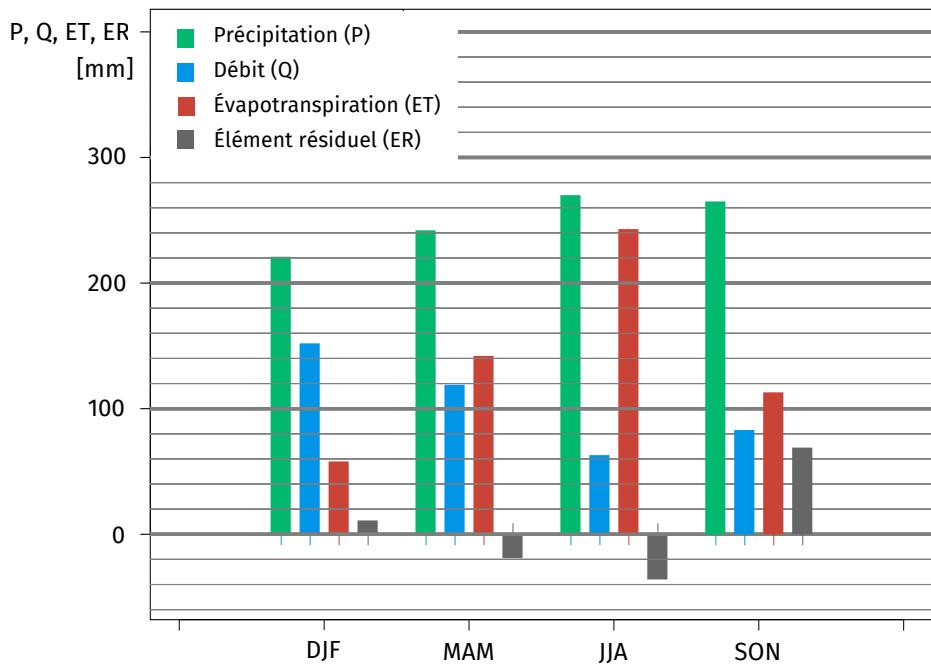


Fig. 3.23 : Bilan hydrologique saisonnier moyen de la Petite Glâne pour la période 1993–2010, sur la base des données d'observation

Évaluation de la qualité des modélisations

Comme le démontre la comparaison avec le bilan hydrologique observé, le modèle reproduit très bien le bilan hydrologique annuel observé dans son ensemble (cf. tab. 3.4.11).

Le tableau suivant montre avec quelle précision le modèle GR4J reproduit les précipitations et le débit superficiel de la période de mesure 1993–2010. Les précipitations annuelles et saisonnières moyennes (P) sont toutes très bien modélisées. Sauf pour l'été, la qualité de la modélisation du débit (Q) est bonne à très bonne. Avec un écart entre la valeur observée et la valeur modélisée de 40 %, la qualité de la modélisation est insuffisante en été. De manière générale, le modèle surestime les débits estivaux. Pour la période de mesure, il les surestime de 14 mm. Il faut donc en tenir compte lors de l'interprétation des résultats de la modélisation. Les valeurs « réelles » des périodes futures sont probablement plus basses que les valeurs modélisées.

Tab. 3.4.12 : Comparaison des valeurs saisonnières observées et modélisées des précipitations (P) et du débit moyen superficiel (MQ) de la Petite Glâne pour la période 1993–2010 selon les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

| | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|-------|--------|---------|-----|---------|-----|
| | | P | MQ | P | MQ |
| Année | CH2018 | 1001 | 443 | 1002 | 445 |
| Année | OBS | 998 | 416 | 998 | 416 |
| Année | Δ mm | 3 | 27 | 4 | 29 |
| Année | Δ% | 0 | 6 | 0 | 7 |
| DJF | CH2018 | 223 | 120 | 221 | 121 |
| DJF | OBS | 222 | 152 | 222 | 152 |
| DJF | Δ mm | 1 | -32 | -1 | -31 |
| DJF | Δ% | 0 | -21 | 0 | -20 |
| MAM | CH2018 | 241 | 140 | 243 | 137 |
| MAM | OBS | 242 | 119 | 242 | 119 |
| MAM | Δ mm | -1 | 21 | 1 | 18 |
| MAM | Δ% | 0 | 18 | 0 | 15 |
| JJA | CH2018 | 274 | 88 | 274 | 88 |
| JJA | OBS | 272 | 63 | 272 | 63 |
| JJA | Δ mm | 2 | 25 | 2 | 25 |
| JJA | Δ% | 1 | 40 | 1 | 40 |
| SON | CH2018 | 265 | 95 | 268 | 97 |
| SON | OBS | 264 | 83 | 264 | 83 |
| SON | Δ mm | 1 | 12 | 4 | 14 |
| SON | Δ% | 0 | 14 | 2 | 17 |

Conclusion: Le modèle hydrologique reproduit très bien toutes les précipitations observées, mais il atteint ses limites pour les débits estivaux.

Changements des précipitations moyennes

Les tableaux 3.4.13 et 3.4.14 décrivent les changements relatifs des précipitations moyennes, tandis que les deux figures 3.24 et 3.25 montrent d'une part les changements absolu et indiquent d'autre part la dispersion des chaînes de modèles et donc les incertitudes des modélisations.

Les précipitations annuelles ne changent que peu dans l'ensemble, avec des variations allant jusqu'à un maximum de 5,8 % dans le futur moyen sous RCP 8.5. Les changements varient de manière diffuse.

L'augmentation des précipitations hivernales moyennes est nettement plus importante sous RCP 8.5 que sous RCP 4.5. Elle atteint presque la barre des 30 %. Les précipitations printanières présentent les mêmes différences que les précipitations hivernales, avec cependant des augmentations plus faibles dans l'ensemble. En été, les précipitations moyennes présentent des écarts allant jusqu'à -20,7 %. On remarquera les différentes évolutions temporelles de ces diminutions selon le scénario d'émissions. Sous RCP 4.5, la diminution par rapport à la période de référence est plus faible dans le futur lointain que dans le futur moyen, alors que sous RCP 8.5, ces diminutions s'amplifient au cours du siècle. C'est en automne que les changements saisonniers – principalement des augmentations – sont les plus faibles.

Tab. 3.4.13 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de la Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGlVil).
Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1000.1 | 220.8 | 241.8 | 272.8 | 264.6 | mm |
| 2040-2069 | -0.7 | 7.9 | 2.3 | -12.7 | 4.1 | % |
| 2070-2099 | 4.4 | 14.0 | 10.9 | -8.0 | 7.2 | % |

Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▢ 5 ▤ 10 ▥ 20 ▦ [%]

Tab. 3.4.14 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de la Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGlVil).
Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1000.1 | 220.8 | 242.7 | 273.8 | 267.4 | mm |
| 2040-2069 | 5.8 | 15.3 | 13.2 | -8.7 | 6.5 | % |
| 2070-2099 | 1.5 | 28.9 | 16.5 | -20.7 | -0.3 | % |

Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▢ 5 ▤ 10 ▥ 20 ▦ [%]

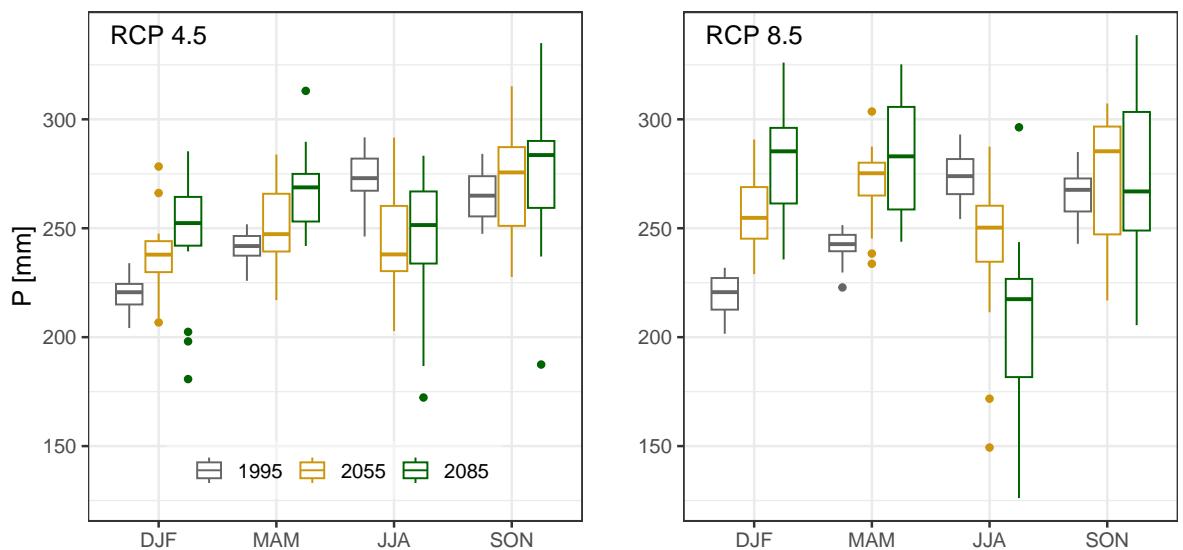


Fig. 3.24 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des sommes de précipitations saisonnières moyennes à long terme dans le bassin versant de la Petite Glâne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

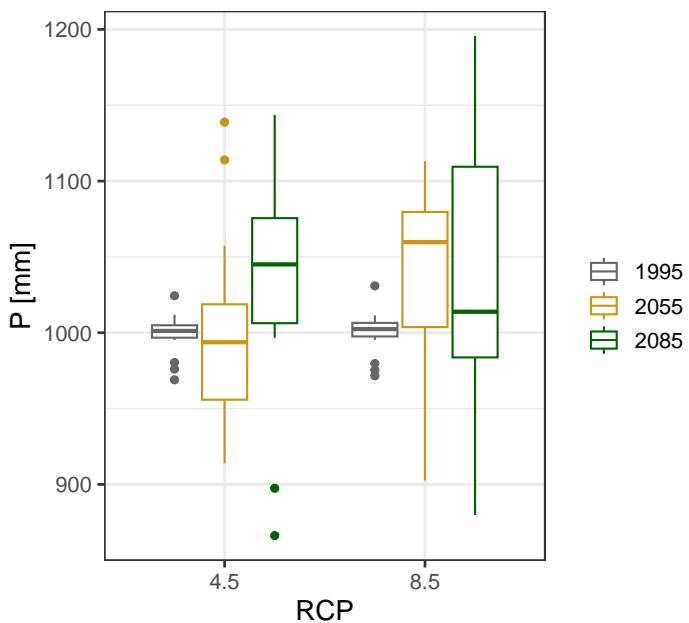


Fig. 3.25 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des précipitations annuelles moyennes à long terme dans le bassin versant de la Petite Glâne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changement des débits moyens

Le débit annuel moyen change de manière particulièrement importante par rapport à la période de référence 1981–2010 dans le futur lointain sous RCP 8.5. Il diminue d'environ 18 %. Sous RCP 4.5, les diminutions sont faibles à moyennes.

D'un point de vue saisonnier, on obtient deux binômes opposés : hiver/printemps et été/automne.

En hiver, tous les débits augmentent dans les différentes combinaisons entre les scénarios d'émissions et les périodes futures. Les changements sous RCP 8.5 sont remarquables : alors que le débit hivernal augmente de 17 % dans le futur moyen, il ne change pratiquement pas par rapport à la période de référence 1981–2010 dans le futur lointain. Au printemps, les changements sont moyens à faibles et oscillent autour de la valeur de la période de référence ; il s'agit aussi bien d'augmentations que de diminutions.

Le binôme saisonnier été/automne affiche une tendance claire. Les débits saisonniers moyens diminuent systématiquement, avec des valeurs allant de -11 à -20 % sous RCP 4.5. Sous RCP 8.5, les diminutions sont importantes dans le futur moyen et même très importantes dans le futur lointain, avec des changements allant jusqu'à environ -50 %.

Tab. 3.4.15 : Débits annuels et saisonniers moyens de la Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGlVil). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------|
| 1981-2010 | 441.6 | 120.4 | 139.6 | 88.5 | 95.8 | mm |
| 2040-2069 | -6.4 | 11.6 | -7.8 | -20.8 | -13.0 | % |
| 2070-2099 | -2.3 | 18.2 | -0.9 | -14.6 | -10.5 | % |
| | | | | | | ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] |

Tab. 3.4.16 : Débits annuels et saisonniers moyens de la Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGlVil). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------------------|
| 1981-2010 | 445.3 | 121.4 | 137.8 | 88.5 | 96.7 | mm |
| 2040-2069 | 1.0 | 17.8 | 5.7 | -15.0 | -16.4 | % |
| 2070-2099 | -15.5 | 18.9 | 6.8 | -35.9 | -44.0 | % |
| | | | | | | ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] |

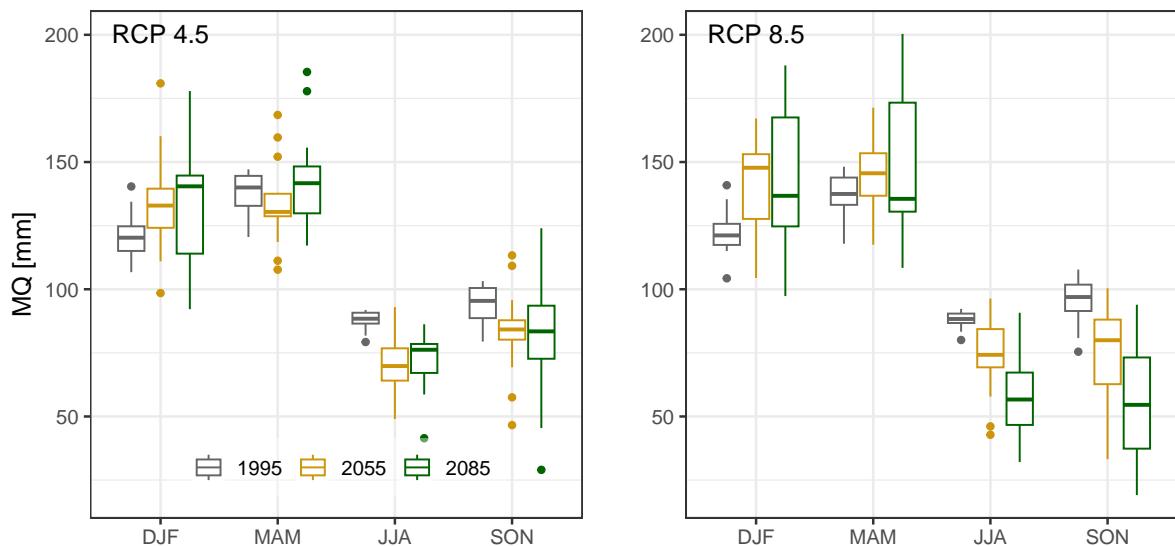


Fig. 3.26 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits saisonniers moyens à long terme de la Petite Glâne pour la période de référence 1981-2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

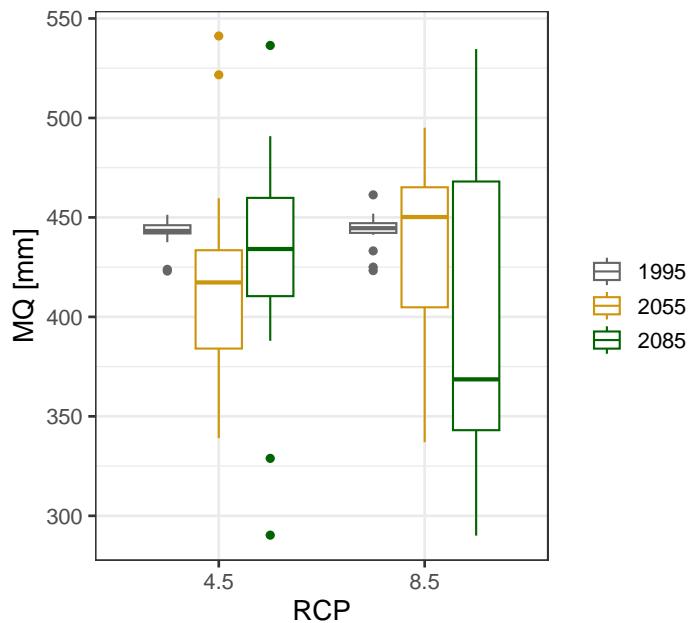


Fig. 3.27 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits annuels moyens à long terme de la Petite Glâne pour la période 1993–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

La figure 3.28 place les changements relatifs modélisés dans le contexte des observations de la période 1993–2010⁸. Elle visualise d'une part les écarts entre les valeurs médianes et positionne d'autre part les valeurs médianes futures dans la zone de dispersion des valeurs des années individuelles de la période des mesures.

En hiver (DJF), les médianes futures – à l'exception de celle du futur moyen (2040–2069) sous RCP 8.5 – se situent à l'intérieur de la boîte du diagramme de la période de référence. Les médianes futures se trouvent donc majoritairement à l'intérieur de la marge de fluctuation plus étroite des années individuelles de la période 1993–2010. Au printemps (MAM), les écarts entre la période de référence et les périodes futures sont minimes. À l'inverse, en été (JJA), plus de 75 % des débits des années individuelles de la période de référence sont plus importants que les médianes futures. La valeur médiane pour le futur lointain sous RCP 8.5 se rapproche même du plus petit débit observé lors d'une année individuelle de la période de mesure. Les changements sont donc importants en été. Il est également à noter que les débits des années individuelles des périodes futures sont à leur tour dispersés autour de la médiane indiquée, de sorte que des débits très faibles seront enregistrés certaines années. Les changements en automne ressemblent à ceux de l'été.

⁸Les mesures du débit n'ont commencé qu'en 1993, de sorte que toute la période de référence 1981–2010 ne peut pas être couverte

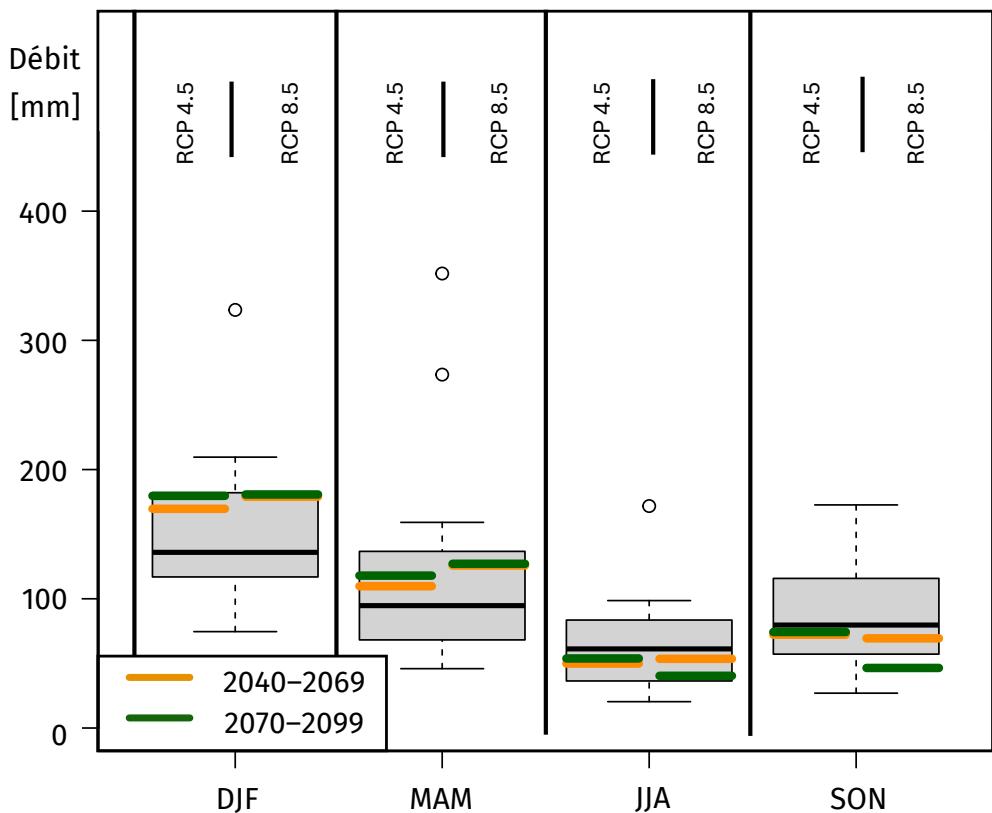


Fig. 3.28 : Distribution des débits saisonniers de la Petite Glâne pour la période 1993–2010, déduits des observations de l’OFEV et du canton de Fribourg, comparés aux débits médians du futur moyen et du futur lointain pour les deux scénarios d’émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de l’évapotranspiration réelle moyenne

L’évapotranspiration réelle annuelle augmente de 5 à 16 % en fonction de la période future et du scénario d’émissions.

Sur une base saisonnière, les changements sous RCP 4.5 se situent entre 3 et 14 % et sous RCP 8.5 entre 8 et 27 %. Comme cela a également été observé dans les autres bassins versants, les augmentations de l’évapotranspiration sont plus importantes en hiver (DJF) et au printemps (MAM) qu’en été (JJA) et en automne (SON). La modélisation prévoit la plus grande augmentation en hiver dans le futur lointain sous RCP 8.5. L’augmentation atteint ici 27 %. Il convient toutefois de rappeler que la valeur de départ hivernale de la période de référence est très faible par rapport aux valeurs d’évapotranspiration des autres saisons (cf. fig. 3.23).

Tab. 3.4.17 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de la Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGlVil) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 554.8 | 57.5 | 140.5 | 242.7 | 113.2 | mm |
| 2040-2069 | 5.9 | 11.1 | 7.8 | 4.1 | 3.2 | % |
| 2070-2099 | 9.2 | 14.3 | 11.0 | 7.9 | 7.3 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 □ -10 △ -5 ▲ 5 ▨ 10 ▢ 20 ▨ [%] | | | | | | |

Tab. 3.4.18 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de la Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGlVil) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 554.8 | 57.5 | 140.5 | 241.8 | 113.2 | mm |
| 2040-2069 | 9.9 | 14.3 | 11.0 | 9.4 | 8.1 | % |
| 2070-2099 | 16.4 | 27.0 | 20.1 | 13.2 | 9.7 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 □ -10 △ -5 ▲ 5 ▨ 10 ▢ 20 ▨ [%] | | | | | | |

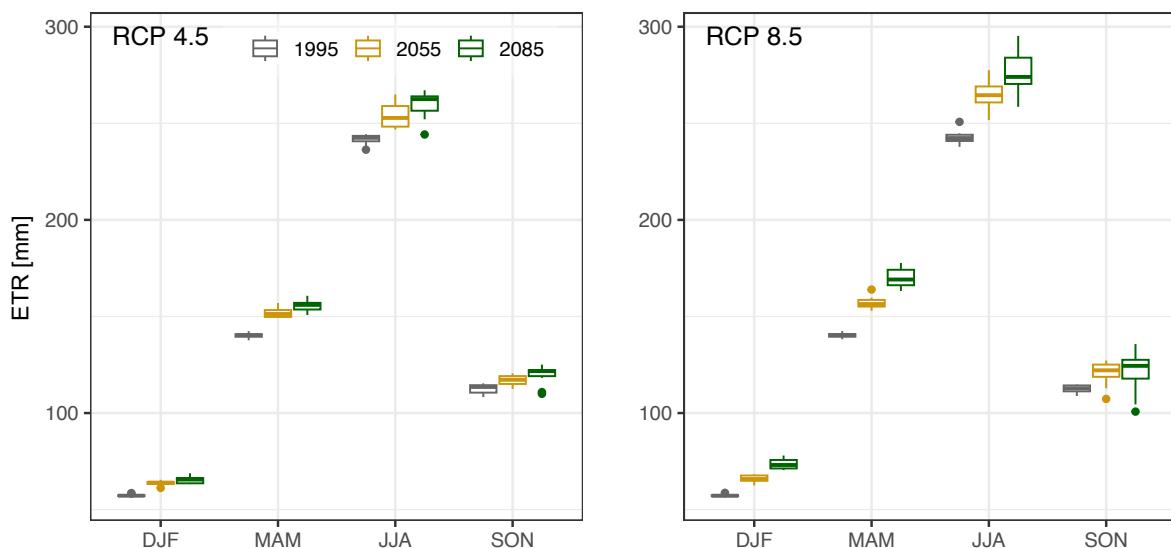


Fig. 3.29 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des sommes de précipitations saisonnières moyennes à long terme dans le bassin versant de la Petite Glâne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

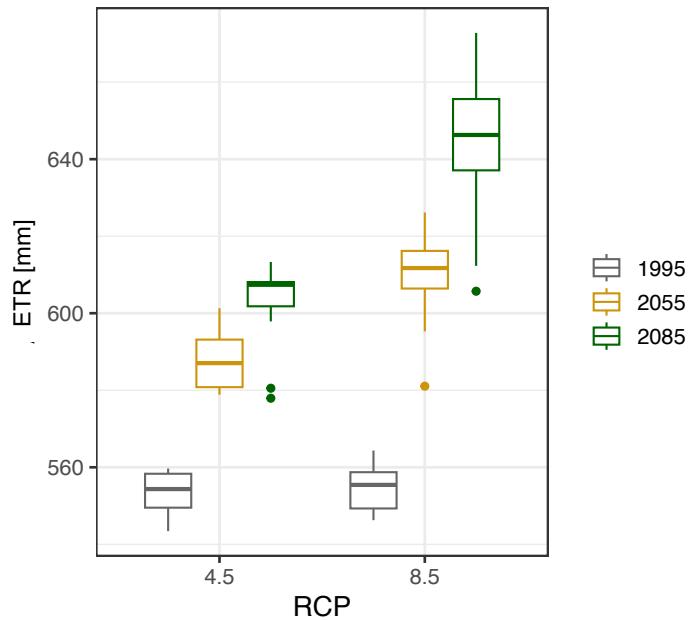


Fig. 3.30 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation de l'évapotranspiration annuelle moyenne à long terme dans le bassin versant de la Petite Glâne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de la neige

L'importance de la neige est relativement faible dans ce bassin versant. Il n'a malgré tout pas été possible de modéliser la part de la neige dans le total des précipitations de manière plausible avec le modèle GR4J combiné au module de neige CemaNeige. Par conséquent, nous renonçons ici à une présentation des résultats.

Considérations sur le bilan hydrique

Dans ce chapitre, nous examinons les changements des éléments du bilan hydrique dans leur interaction. Pour ce faire, les changements relatifs des précipitations (P), du débit (Q) et de l'évapotranspiration réelle (ET) indiqués dans les tableaux ci-dessus sont appliqués aux observations de la période de référence 1981–2010 (cf. fig. 3.31). L'objectif principal est de comprendre les changements du débit dans le contexte des changements des autres éléments du bilan hydrique. Dans cette optique, on considère que :

$$\Delta Q = \Delta P - \Delta ET - \Delta ER \quad (3.9)$$

Les signes doivent impérativement être pris en compte lors du calcul de cette équation. Ainsi, la relation suivante s'applique au débit annuel sous RCP 4.5 dans le futur moyen (vers 2055, cf. fig. 3.31) :

$$-28 = -7 - 29 - (-8) \text{ [mm]} \quad (3.10)$$

L'équation démontre que le changement du débit annuel (-28 mm) est influencé par l'augmentation de l'évapotranspiration annuelle (29 mm).

Dans le futur lointain sous RCP 4.5, les précipitations annuelles moyennes augmentent par rapport à la période de référence, mais le débit annuel moyen ne change pratiquement pas, car les précipitations annuelles désormais plus importantes sont directement absorbées par l'évapotranspiration réelle. Le même scénario se produit sous RCP 8.5 dans le futur moyen. Les conditions sont tout autres dans le futur lointain (RCP 8.5) : Comme les précipitations annuelles de cette période sont à nouveau similaires à celles de la période de référence, la forte augmentation de l'évapotranspiration conduit à une forte diminution du débit.

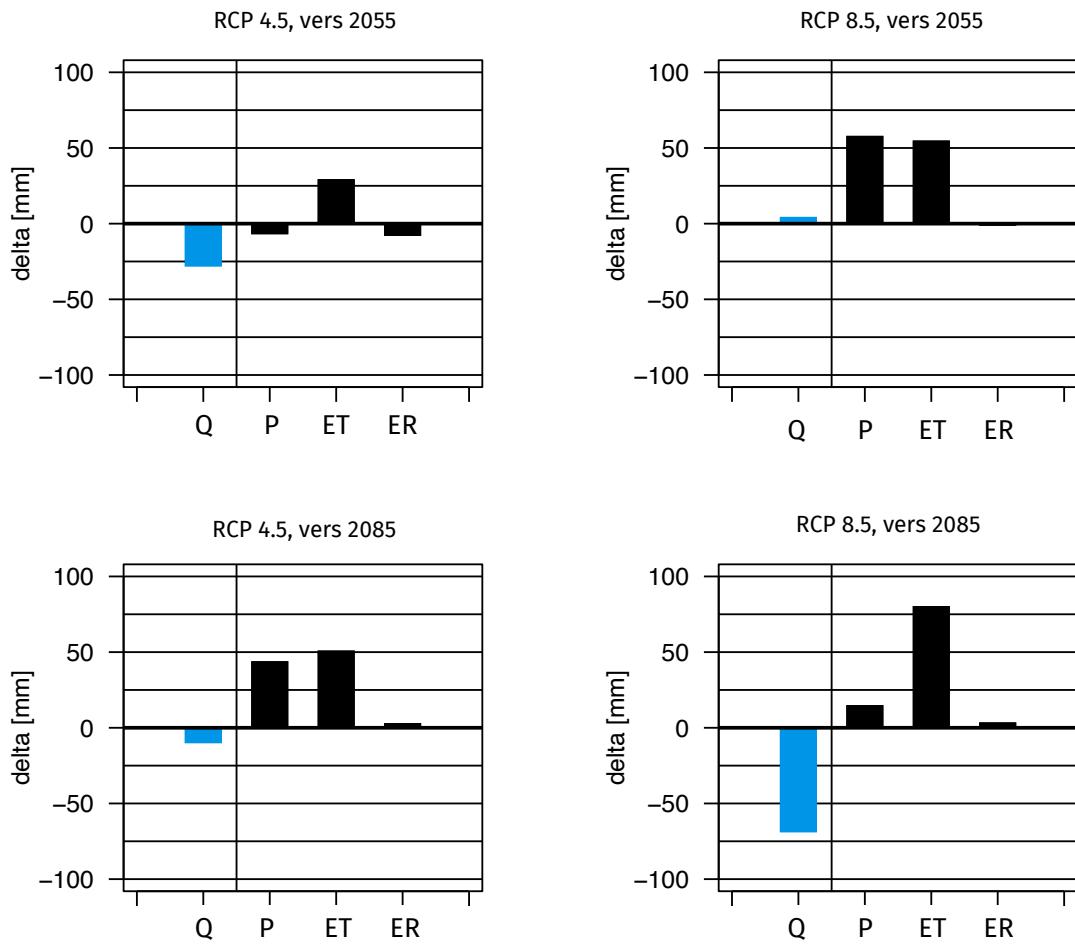


Fig. 3.31 : Comparaison des changements du bilan annuel dans le bassin versant de la Petite Glâne@Villars-le-Grands. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

Considérons maintenant les changements du débit estival et leurs causes (fig. 3.32). Durant cette saison, les diminutions relatives du débit sont importantes à très importantes. En raison des valeurs initiales déjà passablement faibles de 63 mm, les changements sont particulièrement significatifs.

Les baisses de débit sont principalement dues à la diminution des précipitations. L'augmentation de l'évapotranspiration a un effet amplificateur. Même si le caractère incertain de l'élément résiduel dans les analyses saisonnières interdit de lui accorder trop d'importance, son importante valeur négative dans le futur lointain sous RCP 8.5 interpelle. La valeur négative de l'élément résiduel suggère que de l'eau supplémentaire est présente dans le système, probablement du fait de la vidange du réservoir d'eau souterraine. En consé-

quence, le déficit au niveau du débit est moins important. Cela illustre non seulement l'importance des réservoirs, mais indique également que le déficit du débit serait beaucoup plus important si aucun apport d'eau provenant du réservoir d'eau souterraine n'avait lieu.

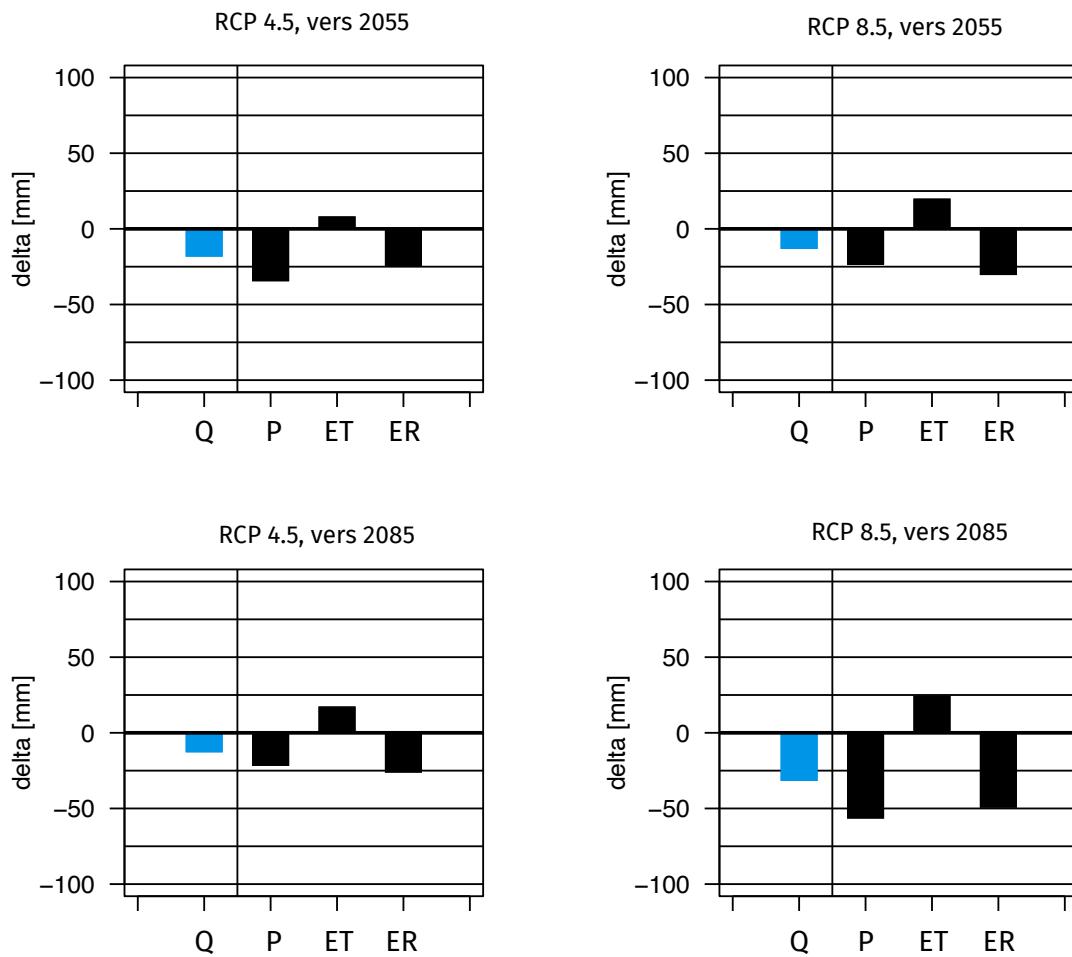


Fig. 3.32 : Comparaison des changements du bilan hydrique en été (JJA) dans le bassin versant de la Petite Glâne@Villars-le-Grand. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

Les figures 3.33 et 3.34 (graphique en haut à droite) éclairent cette interaction entre les précipitations et l'évapotranspiration sous un angle légèrement différent. Les futures médianes se trouvent toutes plus ou moins sous la bissectrice, ce qui permet de déduire l'influence de l'évapotranspiration réelle sur la diminution du débit.

Le graphique en haut à gauche illustre la situation en hiver : Sous RCP 4.5, on constate la forte dépendance de l'augmentation du débit vis-à-vis de l'augmentation des précipitations. Les médianes étant toutefois légèrement en dessous de la bissectrice, on peut également en déduire une influence de l'augmentation de l'évapotranspiration. Sous RCP 8.5, la situation à la fin du siècle (futur lointain) mérite d'être relevée. Le débit hivernal moyen ne réagit que faiblement à la forte augmentation des précipitations hivernales moyennes. Cela ne peut toutefois pas s'expliquer uniquement par l'augmentation de l'évapotranspiration en hiver, qui est également très importante en termes relatifs, mais qui ne représente qu'environ un quart de l'augmentation des précipitations en termes absolus. Il est probable que ce déséquilibre dans les augmentations des précipitations et du débit soit lié à un changement du coefficient de débit. Le coefficient de débit décrit la part des précipitations qui parvient au débit.

Tab. 3.4.19 : Coefficient de débit moyen saisonnier de la Petite Glâne basé sur les observations (obs) pour la période de référence et basé sur les données modélisées pour le futur lointain sous RCP 8.5.

| | Année | DJF | MAM | JJA | SON |
|--------------------|-------|------|------|------|------|
| obs | 0.42 | 0.68 | 0.49 | 0.23 | 0.31 |
| RCP 8.5, vers 2085 | 0.35 | 0.63 | 0.45 | 0.19 | 0.17 |

Le coefficient de débit moyen hivernal diminue dans le futur lointain sous RCP 8.5 par rapport à la valeur de la période de référence (cf. tab. 3.4.19). Cela pourrait être lié à la diminution du degré de saturation des sols. Dans un futur lointain, la transformation des précipitations en débit est moins efficace que qu'au cours de la période de référence, ce qui pourrait expliquer la faible augmentation du débit par rapport à celle des précipitations.

La dispersion des valeurs des différentes chaînes de modèles autour de la médiane montre avec quelle précision les différentes chaînes de modèles représentent la valeur médiane. Prenons l'exemple de la modélisation sous RCP 4.5. En été, les chaînes de modèles concordent largement sur le signe des changements, mais résultent en des conclusions différentes quant à l'ampleur des changements. En hiver, la situation n'est pas aussi claire. Ainsi, certaines chaînes de modèles prévoient une augmentation des précipitations et du débit, d'autres une diminution. Une chaîne de modèles décrit même une augmentation des précipitations accompagnée d'une diminution du débit. Ceci n'est évidemment pas très plausible. Néanmoins, la plupart des chaînes de modèles restent relativement proches des valeurs médianes. Cette dispersion des chaînes de modèles doit être prise en compte dans les réflexions sur l'incertitude de la modélisation. Dans le présent rapport, cette dispersion est représentée par les figures avec les boxplots.

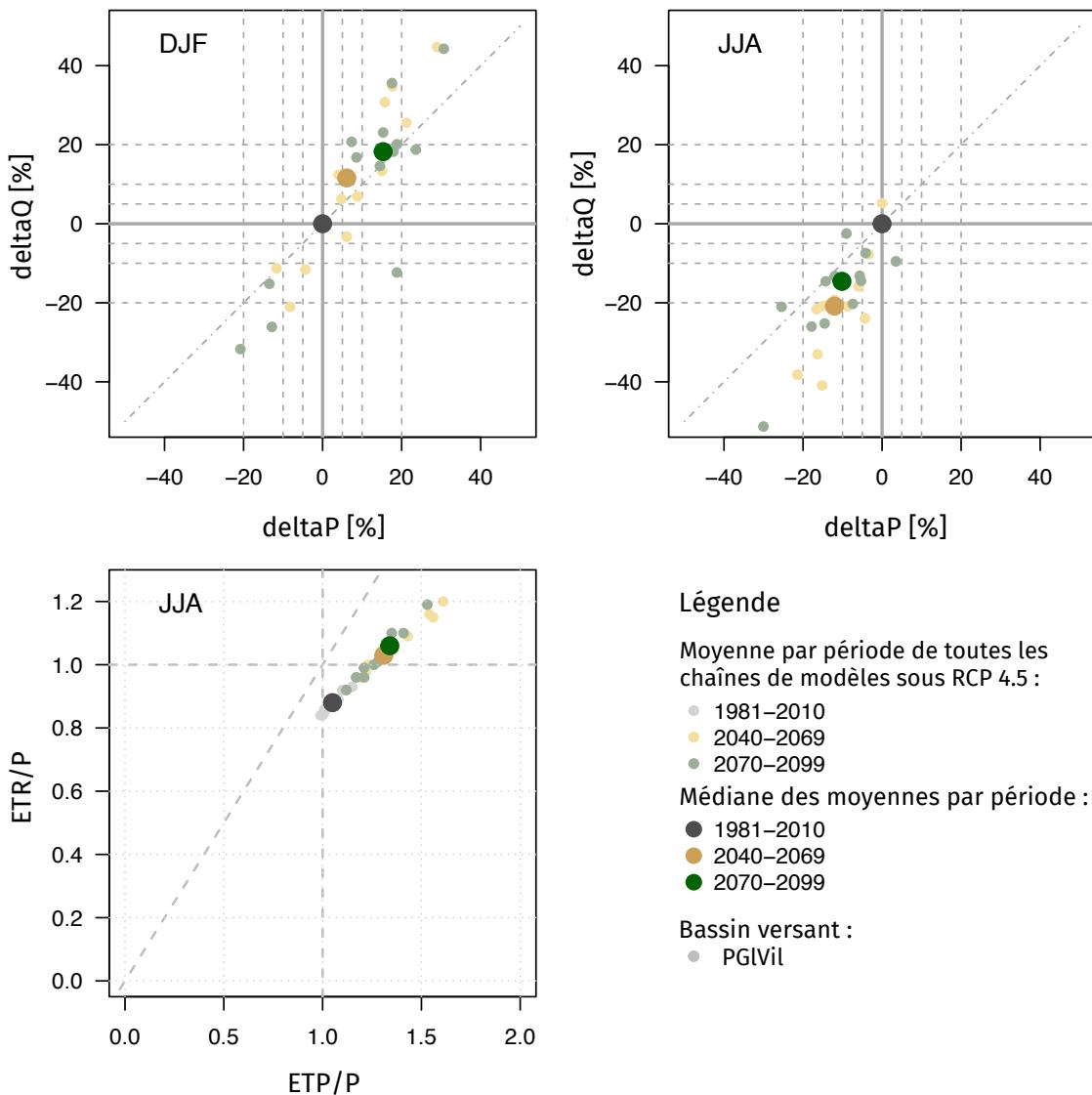


Fig. 3.33 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de la Petite Glâne@Villars-le-Grand en hiver (DJF) et en été (JJA) sous RCP 4.5. Les deux diagrammes du haut montrent les changements relatifs des précipitations (deltaP) et du débit (deltaQ). Le diagramme de Budyko est présenté et décrit dans la partie Méthodologie. Les trois diagrammes montrent la dispersion des moyennes par période de toutes les chaînes de modèles utilisées, ainsi que la valeur médiane de ces moyennes par période.

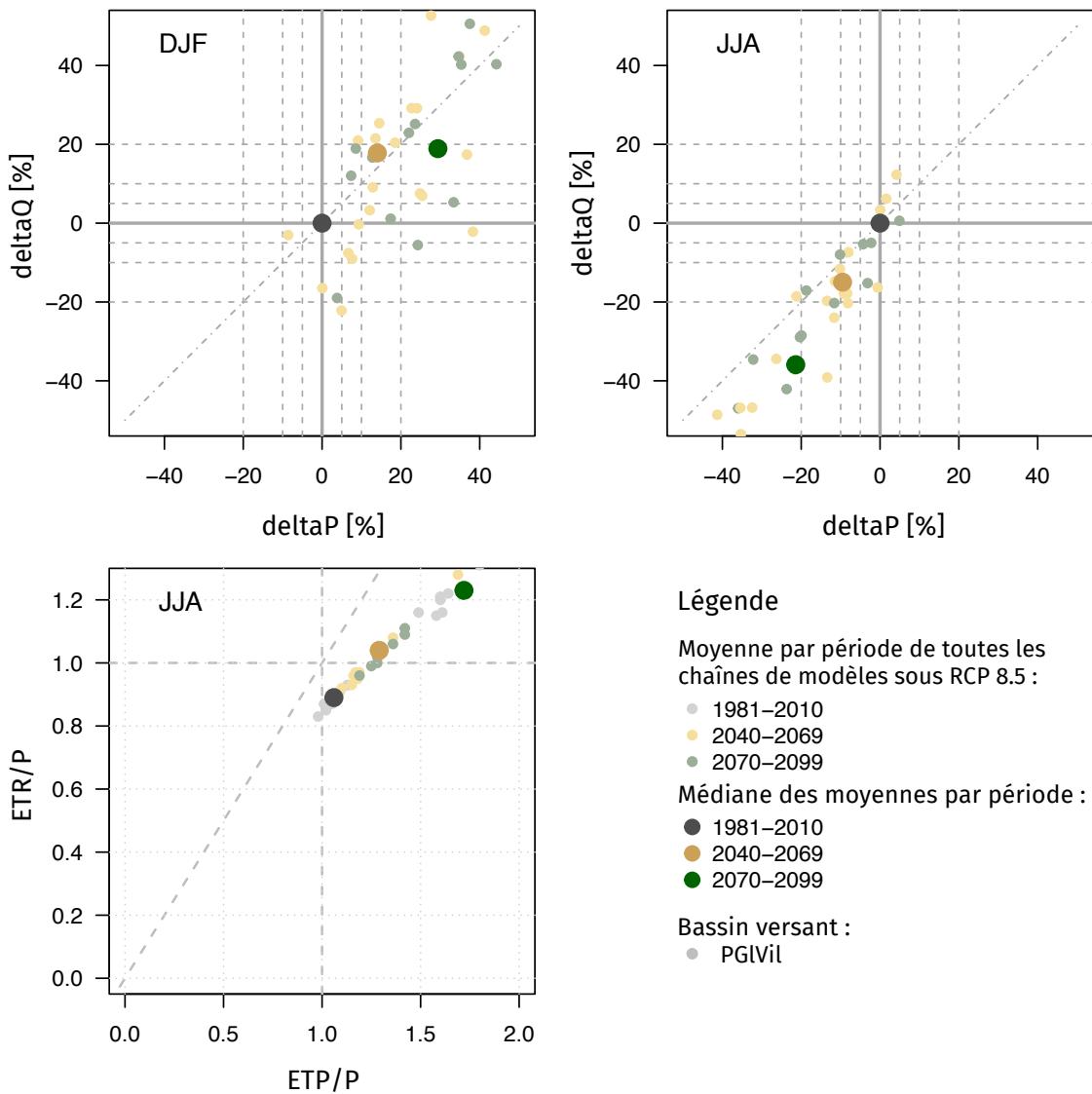


Fig. 3.34 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de la Petite Glâne@Villars-le-Grand sous RCP 8.5

Enfin, le diagramme de Budyko en bas à gauche indique que le bassin versant de la Petite Glâne connaît déjà des situations de stress hydrique en été au cours de la période de référence 1981–2010. Au cours d'une année moyenne, le système connaît déjà une limitation de l'eau. L'évapotranspiration domine le bilan hydrique avec une part d'environ 90 % des précipitations. Dans l'avenir, cette limitation hydrique va encore s'accentuer. Elle est plus importante sous RCP 8.5 que sous RCP 4.5.

Changements futurs des plus faibles et plus importants débits journaliers

Il convient de préciser encore une fois que nous analysons ici de très petits et de très grands débits journaliers. Les très grands débits journaliers ne sont pas des crues ou des pics de crue au sens strict du terme. De telles crues se produisent à une échelle horaire et ne sauraient être saisies avec les valeurs journalières utilisées ici. En revanche, les plus petits débits sont bien saisis avec une résolution journalière, étant donné que les fluctuations dans le domaine des étiages sont très lentes. Les débits journaliers les plus faibles et les plus élevés sont décrits par ce que l'on appelle des quantiles (q). Le quantile du débit (Q_{q10}) par exemple, indique le débit (Q) qui est atteint ou n'est pas dépassé en moyenne lors de 10 % des jours – soit 37 jours en une année.

Tab. 3.4.20 : Plus faibles et plus importants débits de la Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGlVil). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5. $Q_{q01}, Q_{q05}, Q_{q10}, \dots$: quantile (q) du débit (Q) : 1 %, 5 %, 10 %, 90 %, 95 % et 99 %

| | Q_{q01} | Q_{q05} | Q_{q10} | Q_{q90} | Q_{q95} | Q_{q99} | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1981-2010 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 2.2 | 3.1 | 5.9 | mm/d |
| 1981-2010 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 1.9 | 2.7 | 5.2 | m^3/s |
| 1981-2010 | 2.1 | 2.8 | 3.4 | 25.5 | 35.8 | 68.8 | $l/s/km^2$ |
| 2040-2069 | -30.0 | -26.9 | -24.1 | 0.0 | -0.3 | 2.0 | % |
| 2070-2099 | -27.8 | -25.9 | -24.1 | 5.0 | 6.6 | 3.8 | % |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 3.4.21 : Plus faibles et plus importants débits de la Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGlVil). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5. $Q_{q01}, Q_{q05}, Q_{q10}, \dots$: quantile (q) du débit (Q) : 1 %, 5 %, 10 %, 90 %, 95 % et 99 %

| | Q_{q01} | Q_{q05} | Q_{q10} | Q_{q90} | Q_{q95} | Q_{q99} | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1981-2010 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 2.2 | 3.1 | 6.1 | mm/d |
| 1981-2010 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 1.9 | 2.7 | 5.3 | m^3/s |
| 1981-2010 | 2.0 | 2.5 | 3.1 | 25.2 | 35.9 | 70.8 | $l/s/km^2$ |
| 2040-2069 | -31.2 | -29.3 | -28.0 | 6.5 | 8.1 | 9.7 | % |
| 2070-2099 | -51.3 | -53.3 | -52.5 | -4.9 | 0.0 | 1.2 | % |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Ce qui est frappant en regardant les deux tableaux, c'est la différence entre les plus importants et les plus faibles débits journaliers. Les plus faibles débits journaliers diminuent de manière très importante, à savoir de -24 à -30 % sous RCP 4.5 et de -28 à -31 % dans le futur moyen et de jusqu'à environ -50 % dans le futur lointain sous RCP 8.5.

En revanche, les débits journaliers les plus importants ne changent pratiquement pas par rapport à la période de référence. Les changements sont donc majoritairement faibles et aucune tendance claire ne se dégage. Certains changements sont légèrement positifs, d'autres légèrement négatifs.

3.4.3 Région Plateau Nord, Region Nördliches Mittelland

Situation initiale

La région Plateau Nord (PlaNor) est représentée par le bassin versant de l'Arbogne@Avenches. Ce bassin versant possède les caractéristiques suivantes :

- Superficie : 71,9 km²
- Altitudes :
 - Altitude minimale : 434 m
 - Altitude moyenne : 596 m
 - Altitude maximale : 813 m

En termes d'utilisation du sol, les terres arables occupent environ 60 % de la superficie. La forêt – principalement des forêts mixtes – occupe environ 20 % de la surface. La part de la surface bâtie est de 10 %.

Les valeurs hydrologiques sont généralement exprimées en millimètres. Pour le bassin versant de l'Arbogne, cela implique que 1 mm $\hat{=}$ 71'900 m³.

Détermination du bilan hydrique

Selon l'Atlas hydrogéologique de la Suisse⁹, le bassin versant n'est pas fermé du point de vue hydrologique. Des écoulements souterrains se produisent dans la partie sud-ouest du bassin versant (cf. fig. 3.35). On peut donc s'attendre au bilan hydrique suivant :

$$\text{Précipitations } (P) = \text{Débit superficiel } (Q_{sup}) + \text{Débit souterrain } (Q_{sout}) + \text{Évapotranspiration } (ET) \quad (3.11)$$

⁹<https://hydromaps.ch>

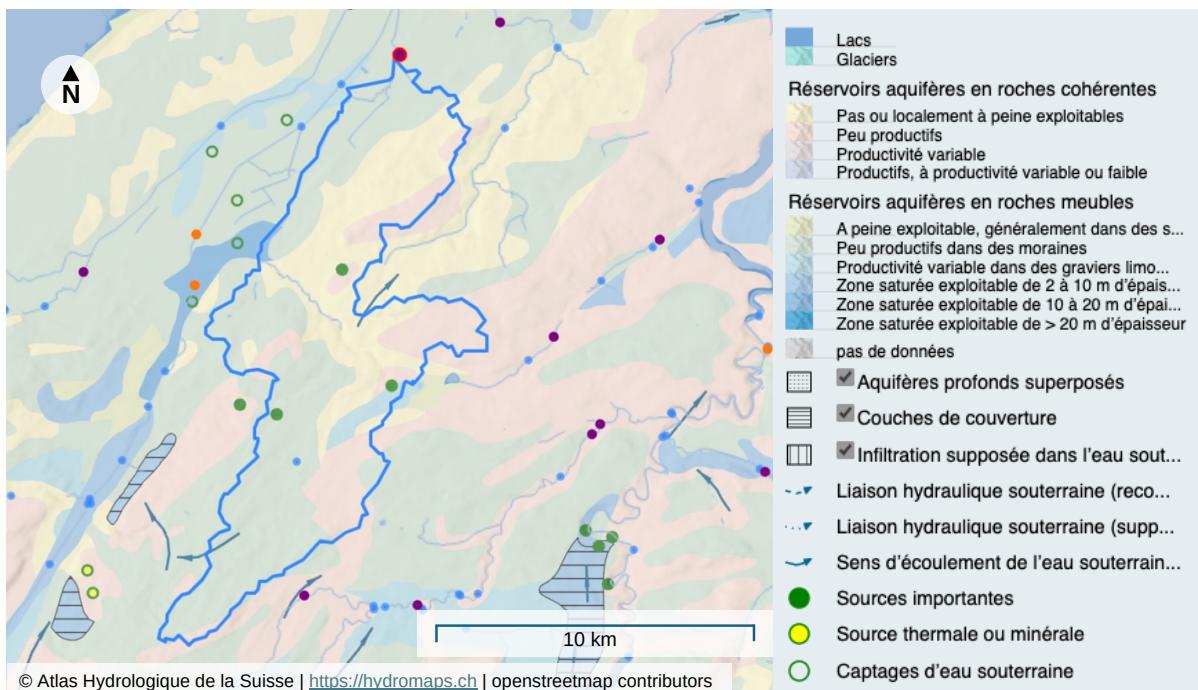


Fig. 3.35 : Situation hydrogéologique du bassin versant de l'Arbogne. Extrait de l'Atlas hydrologique de la Suisse

Le bilan hydrique annuel moyen observé figurant dans le tableau 3.4.22 confirme l'hypothèse d'un écoulement souterrain. Avec un débit de 145 mm, celui-ci est très important par rapport au débit superficiel de 338 mm. Pour les considérations relatives au bilan, nous avons dû recourir à une valeur d'évapotranspiration modélisée. Une comparaison entre l'évapotranspiration annuelle de 549 mm calculée à l'aide de GR4J et la valeur de 555 mm tirée de l'Atlas hydrologique (période 1973–1992) démontre la fiabilité de cette valeur.

Considérons maintenant les bilans hydriques moyens sur une base saisonnière, en se basant à nouveau sur les observations. Les précipitations saisonnières moyennes ne sont pas réparties de manière égale. Les précipitations estivales se distinguent des précipitations hivernales par une différence d'un peu plus de 100 mm. Entre les deux, les précipitations printanières et automnales atteignent des hauteurs de précipitations similaires.

En raison du caractère résolument saisonnier de l'évapotranspiration réelle, aucune relation linéaire directe ne peut être établie entre les précipitations et le débit. Ainsi, en raison de la forte évapotranspiration estivale et bien que les précipitations soient les plus importantes à cette saison, le débit moyen est à son niveau le plus bas en été, affichant une valeur d'environ 58 mm seulement. Du fait de l'influence de l'évapotranspiration, les débits moyens en hiver et au printemps sont également très similaires, bien que les deux saisons se distinguent nettement du point de vue des quantités moyennes de précipitations.

Comme le suggère l'élément résiduel du bilan hydrique, le bassin versant connaît également des pertes par écoulement souterrain tout au long de l'année. Il est plausible que ces débits souterrains soient plutôt faibles en été. Les fluctuations au cours des autres saisons sont par contre difficiles à interpréter. Par exemple, comment expliquer le débit souterrain relativement important en automne ? Cela illustre le fait que l'élément résiduel du bilan hydrique comprend toutes les incertitudes liées aux observations. De plus, l'élément de réservoir Δ Res n'est pas explicitement pris en compte ici, bien qu'il faille s'attendre à des variations des réservoirs au cours des saisons, notamment au niveau des eaux souterraines.

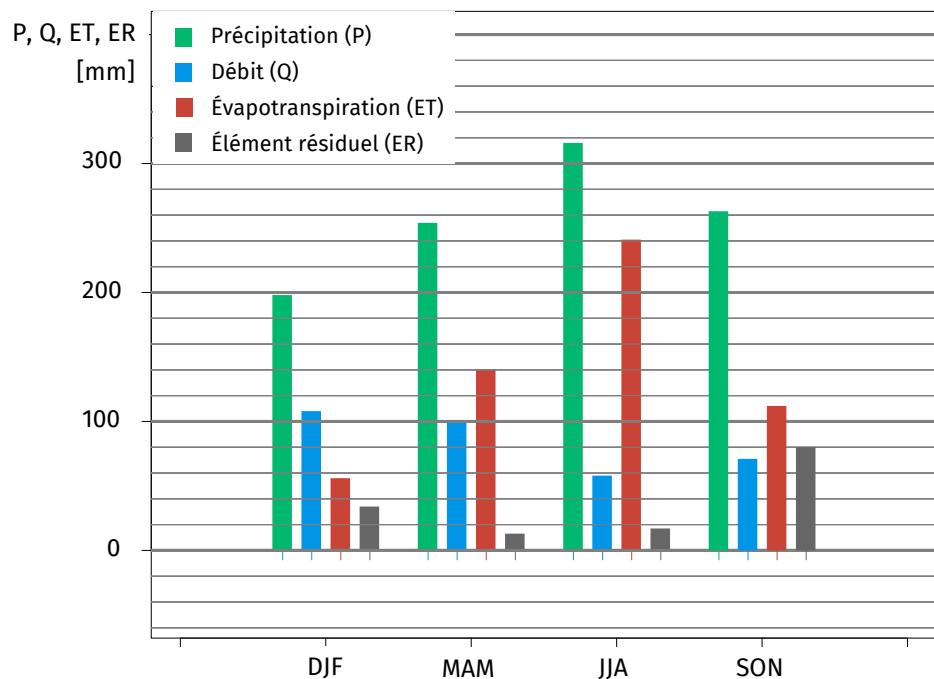


Fig. 3.36 : Bilan hydrique saisonnier moyen de l'Arbogna pour la période 1993–2010 sur la base des données d'observation

Évaluation de la qualité de la modélisation

Comme l'illustre le tableau 3.4.22, la modélisation avec GR4J reproduit très bien le bilan hydrique annuel moyen.

Tab. 3.4.22 : Comparaison des bilans hydriques annuels observés et modélisés de l'Arbogne pour la période 1993–2010. P : précipitations, Q_{sup} : débit superficiel, Q_{sout} : débit souterrain, ET : évapotranspiration, obs : observations. Précipitations déduites de RhiresD et débit déduit de mesures de l'OFEV, évapotranspiration reprise des données du modèle, Q_{sout} : calculé en tant qu'élément résiduel du bilan hydrique, mod : données modélisées (version de modèle RCP 4.5)

| | Période | mm/a | | | | % | | | | |
|--|---------|-----------|------------------|-------------------|-----|-----|------------------|-------------------|----|----|
| | | P | Q_{sup} | Q_{sout} | ET | P | Q_{sup} | Q_{sout} | ET | |
| | obs | 1993–2010 | 1041 | 338 | 154 | 549 | 100 | 32 | 15 | 53 |
| | mod | 1993–2010 | 1039 | 359 | 131 | 549 | 100 | 35 | 13 | 52 |

Le tableau suivant permet d'évaluer la qualité de la modélisation des précipitations et du débit superficiel à l'aide de GR4J sur une base saisonnière.

Tab. 3.4.23 : Comparaison des valeurs saisonnières observées et modélisées des précipitations (P) et du débit moyen superficiel (MQ) de l'Arbogne pour la période 1993–2010 et selon les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

| | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|-------|--------|---------|-----|---------|-----|
| | | P | MQ | P | MQ |
| Année | CH2018 | 1046 | 361 | 1046 | 363 |
| Année | OBS | 1041 | 338 | 1041 | 338 |
| Année | Δ mm | 5 | 23 | 5 | 25 |
| Année | Δ% | 0 | 7 | 0 | 7 |
| DJF | CH2018 | 220 | 99 | 218 | 99 |
| DJF | OBS | 219 | 108 | 219 | 108 |
| DJF | Δ mm | 1 | -9 | -1 | -9 |
| DJF | Δ% | 0 | -8 | 0 | -8 |
| MAM | CH2018 | 258 | 106 | 262 | 110 |
| MAM | OBS | 261 | 101 | 261 | 101 |
| MAM | Δ mm | -3 | 5 | 1 | 9 |
| MAM | Δ% | -1 | 5 | 0 | 9 |
| JJA | CH2018 | 298 | 78 | 296 | 78 |
| JJA | OBS | 291 | 58 | 291 | 58 |
| JJA | Δ mm | 7 | 20 | 5 | 20 |
| JJA | Δ% | 2 | 34 | 2 | 34 |
| SON | CH2018 | 267 | 78 | 269 | 79 |
| SON | OBS | 269 | 70 | 269 | 70 |
| SON | Δ mm | -2 | 8 | 0 | 9 |
| SON | Δ% | -1 | 11 | 0 | 13 |

Les précipitations annuelles et saisonnières moyennes (P) de la période de référence 1993–2010 sont très bien reproduites par le modèle. En outre, il n'y a pas de différences significatives entre les deux scénarios d'émissions. La qualité de la modélisation est moins bonne pour le débit moyen, qui présente de grandes différences d'une saison à l'autre. Les valeurs hivernales et printanières ainsi que la valeur annuelle sont bien reproduites par le modèle GR4J. La qualité de la modélisation est insuffisante en été et seulement satisfaisante en automne. Sur l'ensemble des saisons, il s'agit d'une qualité de modélisation satisfaisante.

Conclusion : Le modèle hydrologique permet une très bonne reproduction de toutes les précipitations observées, mais atteint ses limites pour la modélisation des débits, notamment des débits estivaux.

Changements des précipitations moyennes

Les tableaux 3.4.24 et 3.4.25 décrivent les changements relatifs des précipitations moyennes, tandis que les deux figures 3.37 et 3.38 montrent d'une part les changements absolu et indiquent d'autre part la dispersion des chaînes de modèles et donc les incertitudes des modélisations.

Pour les précipitations annuelles, les changements se situent entre -2,4 et +4,2 %. Les changements sont donc faibles pour les deux scénarios d'émissions. Cependant, en raison des grandes valeurs de départ, ces faibles changements relatifs entraînent d'importants changements absolu.

Si l'on compare les saisons, on constate des augmentations majoritairement importantes des précipitations moyennes en hiver et au printemps et, à l'inverse, des diminutions d'une ampleur variant de moyenne à très importante en été. En hiver, les différences entre les scénarios d'émissions sont considérables. À la fin du siècle, les précipitations augmentent de plus de 24 % par rapport à la période de référence sous RCP 8.5, soit une augmentation absolue d'environ 50 mm. Au printemps également, l'augmentation des précipitations est plus importante sous RCP 8.5 que sous RCP 4.5. Des différences considérables apparaissent entre les deux scénarios d'émissions en été, notamment dans le futur lointain : une diminution de -9,5 % sous RCP 4.5 contraste avec une diminution de -23,1 % sous RCP 8.5. Cela correspond tout de même à une diminution d'environ -70 mm. En revanche, les changements des précipitations sont variables et peu prononcés en automne.

Tab. 3.4.24 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de l'Arbogne@Avenches (ArbAve). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1043.9 | 219.0 | 259.1 | 296.6 | 269.2 | mm |
| 2040-2069 | -2.4 | 5.8 | 1.8 | -13.2 | 1.7 | % |
| 2070-2099 | 2.1 | 10.8 | 10.2 | -9.5 | 5.4 | % |

Légende : ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 3.4.25 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de l'Arbogne@Avenches (ArbAve). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1043.9 | 218.1 | 261.9 | 296.6 | 269.2 | mm |
| 2040-2069 | 4.2 | 15.1 | 11.8 | -8.9 | 4.4 | % |
| 2070-2099 | 0.7 | 24.3 | 15.3 | -23.1 | -3.1 | % |

Légende : ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

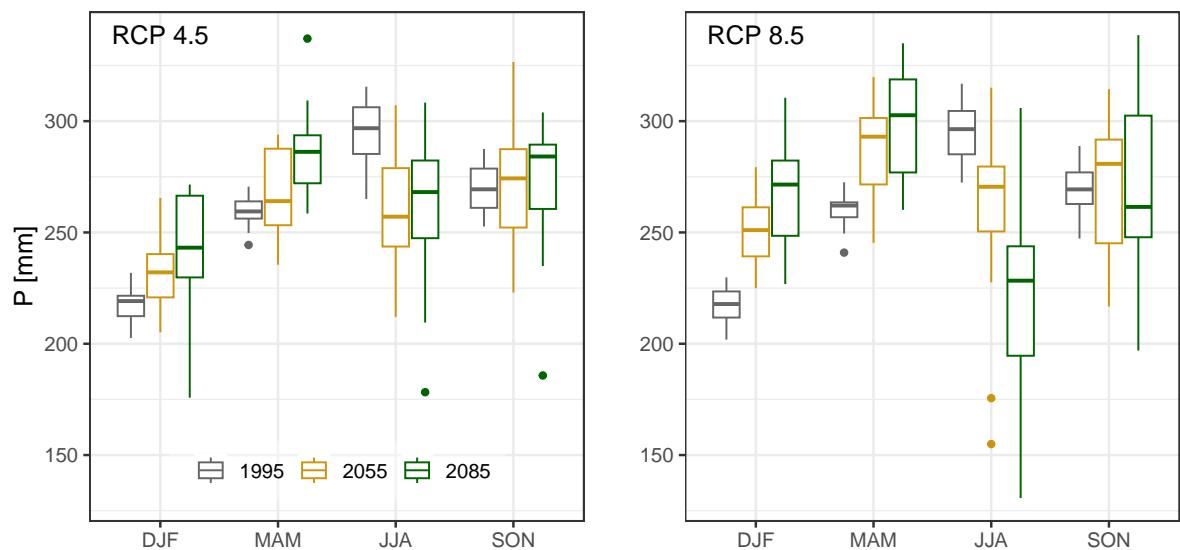


Fig. 3.37 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des sommes de précipitations saisonnières moyennes à long terme dans le bassin versant de l'Arbogne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

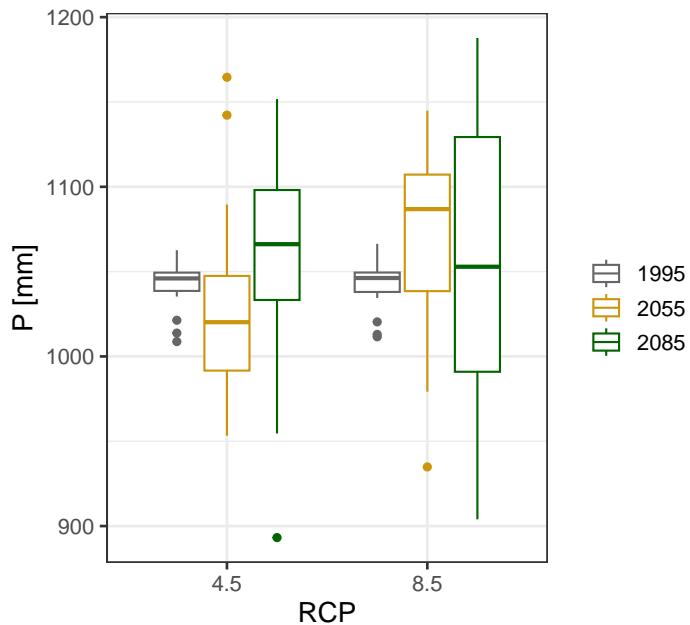


Fig. 3.38 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des précipitations annuelles moyennes à long terme dans le bassin versant de l'Arbogne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements du débit moyen

Les débits annuels moyens à long terme diminuent par rapport à la période de référence 1981–2010 : dans une mesure moyenne à faible sous RCP 4.5 et dans une mesure faible (futur moyen) à importante (futur lointain) sous RCP 8.5 (tab. 3.4.26 et 3.4.27 ainsi que fig. 3.40).

On remarquera les différents schémas de diminution entre les deux scénarios d'émissions. Dans le cas du scénario RCP 4.5, la diminution par rapport à la période de référence est plus importante dans le futur moyen que dans le futur lointain ; sous RCP 8.5, c'est exactement l'inverse, à savoir que les diminutions du débit sont plus importantes dans le futur lointain que dans le futur moyen. Les diminutions relativement importantes sous RCP 4.5 (-11,1 %) et sous RCP 8.5 (-17,2 %) entraînent d'importantes diminutions du débit annuel moyen de 40 et 60 mm respectivement.

En ce qui concerne les débits saisonniers, on constate une dualité entre hiver (DJF)/printemps (MAM) d'une part et été (JJA)/automne (SON) d'autre part. Alors que les débits saisonniers moyens augmentent en hiver/printemps, ils diminuent en été/automne. De plus, l'ampleur des changements diffère passablement. Les augmentations en hiver/printemps atteignent au maximum 15 % sur les deux scénarios d'émissions, mais se situent généralement en dessous de 6 %. En été et en automne en revanche, les diminutions relatives sont

plus importantes qu'en hiver/printemps. Elles se situent entre -16,5 et -21,2 % sous RCP 4.5 et atteignent près de -50 % sous RCP 8.5. L'été et l'automne se distinguent clairement par des diminutions importantes, voire très importantes. Étant donné que les valeurs de référence sont déjà très faibles à ces périodes, l'impact de ces diminutions importantes à très importantes sur le système hydrologique est considérable.

Tab. 3.4.26 : Débits annuels et saisonniers moyens de l'Arbogne@Avenches (ArbAve). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 361.4 | 99.5 | 105.8 | 77.6 | 77.6 | mm |
| 2040-2069 | -11.1 | 5.5 | 0.9 | -21.2 | -16.5 | % |
| 2070-2099 | -6.1 | 4.6 | 5.2 | -16.5 | -16.5 | % |

Légende : ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.27 : Débits annuels et saisonniers moyens de l'Arbogne@Avenches (ArbAve). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 361.4 | 98.6 | 109.5 | 78.5 | 78.5 | mm |
| 2040-2069 | -2.0 | 14.8 | 4.2 | -19.8 | -23.3 | % |
| 2070-2099 | -17.2 | 0.9 | 5.0 | -37.2 | -47.7 | % |

Légende : ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

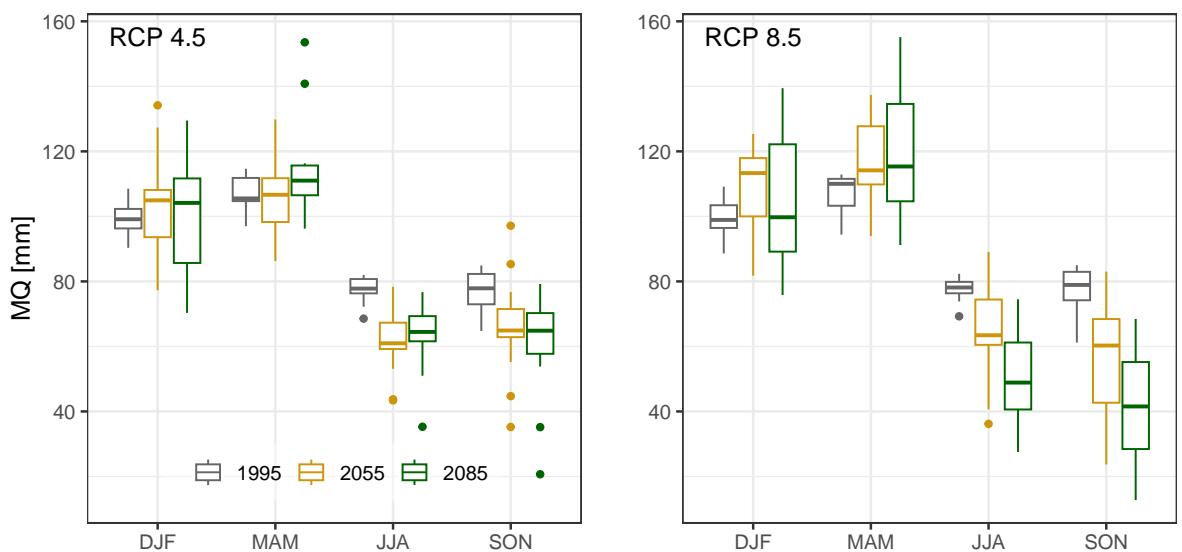


Fig. 3.39 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits saisonniers moyens à long terme de l'Arbogne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

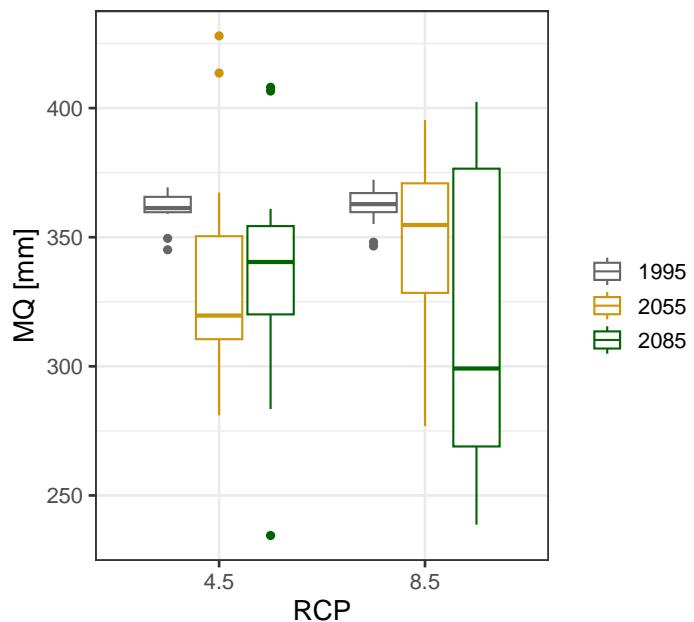


Fig. 3.40 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits annuels moyens à long terme de l'Arbogne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

La figure 3.41 place les changements relatifs modélisés dans le contexte des observations de la période 1993–2010.¹⁰ Elle visualise d'une part les écarts entre les valeurs médianes et positionne d'autre part les valeurs médianes futures dans la zone de dispersion des valeurs des années individuelles de la période 1993–2010.

En hiver (DJF), les médianes futures ne se situent pas seulement au-dessus de la boîte, mais se rapprochent même de la plus grande valeur annuelle de la période 1993–2010. Dans le cas du futur moyen sous RCP 8.5, celle-ci est même dépassée. Au printemps (MAM), seules de petites différences se dessinent entre les périodes futures et la période de référence. En été (JJA), plus de 75 % des débits annuels de la période de référence sont plus importants que les médianes futures. La valeur médiane du futur lointain sous RCP 8.5 se rapproche même du plus petit débit observé au cours d'une année individuelle de la période de référence. De plus, les débits des années individuelles des périodes futures sont à leur tour dispersés autour de la médiane indiquée, de sorte que certaines années ne présentent que de très faibles débits. En automne, les diminutions sont plus faibles sous RCP 4.5 que sous RCP 8.5. Dans ce scénario, il faut à nouveau s'attendre à une diminution très importante dans le futur lointain.

¹⁰Les mesures du débit n'ont commencé qu'en 1993, de sorte que toute la période de référence 1981–2010 ne peut pas être couverte

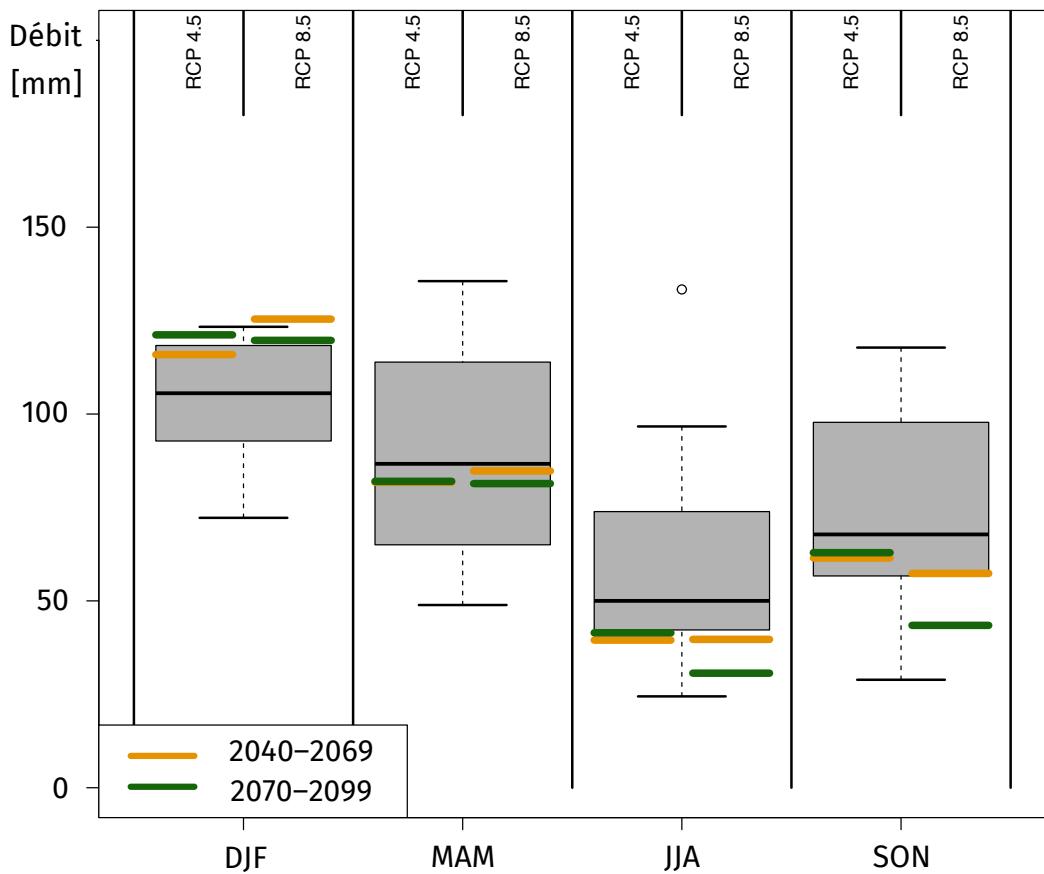


Fig. 3.41 : Distribution des débits saisonniers de l'Arbogne pour la période 1993–2010, déduits des observations de l'OFEV et du canton de Fribourg, comparés aux débits médians du futur moyen et du futur lointain pour les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de l'évapotranspiration réelle moyenne

Dans le sillage du réchauffement climatique, l'évapotranspiration augmente en toutes saisons, pour les deux périodes futures ainsi que sous les deux scénarios d'émissions. Sous RCP4.5, l'évapotranspiration réelle augmente de 2 à 13 % selon les saisons dans le futur moyen et de 5 à 16 % dans le futur lointain, les augmentations relatives les plus importantes se produisant en hiver et au printemps. L'évapotranspiration annuelle moyenne augmente de 5 à 9 %. Sous RCP8.5, le schéma des augmentations est similaire, avec toutefois des augmentations plus importantes dans l'ensemble. Ainsi, en hiver et au printemps, l'évapotranspiration augmente de jusqu'à 30 % par rapport à la période de référence 1981–2010. L'augmentation de l'évapotranspiration annuelle est également plus importante d'environ 5 points de pourcentage que sous RCP4.5.

Tab. 3.4.28 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de l'Arbogne@Avenches (ArbAve) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 551.1 | 56.6 | 139.6 | 240.9 | 113.2 | mm |
| 2040-2069 | 5.3 | 12.9 | 7.2 | 4.2 | 2.4 | % |
| 2070-2099 | 8.6 | 16.1 | 11.1 | 6.4 | 4.8 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 □ -10 △ -5 ▲ 5 ▨ 10 ▢ 20 ▨ [%] | | | | | | |

Tab. 3.4.29 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de l'Arbogne@Avenches (ArbAve) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 551.1 | 56.6 | 138.7 | 240.9 | 112.2 | mm |
| 2040-2069 | 9.3 | 14.5 | 11.8 | 7.6 | 7.3 | % |
| 2070-2099 | 14.6 | 29.0 | 22.4 | 9.5 | 8.1 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 □ -10 △ -5 ▲ 5 ▨ 10 ▢ 20 ▨ [%] | | | | | | |

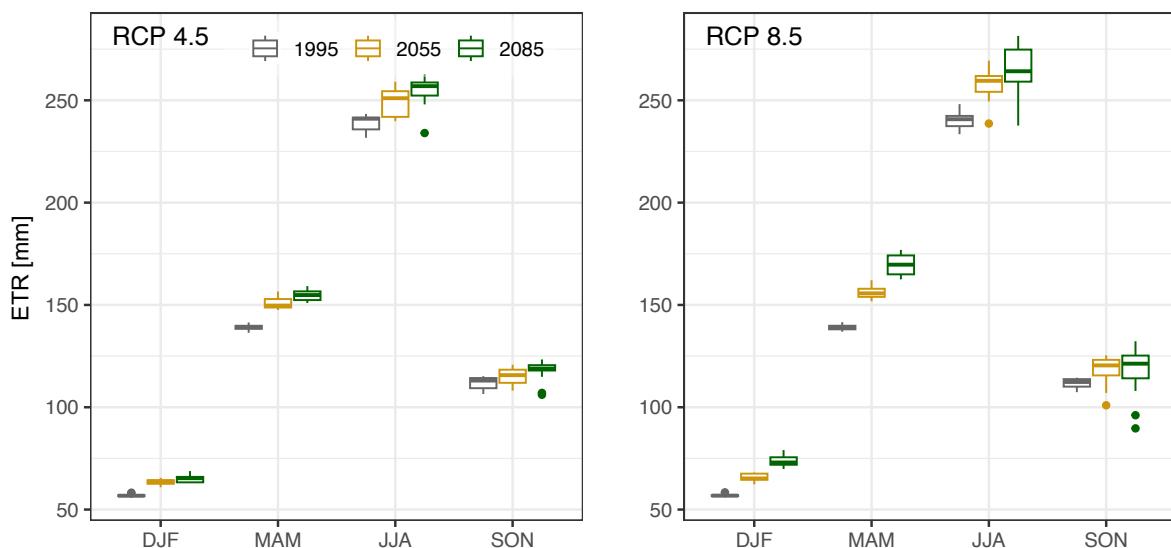


Fig. 3.42 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des sommes d'évapotranspiration saisonnières moyennes à long terme dans le bassin versant de l'Arbogne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

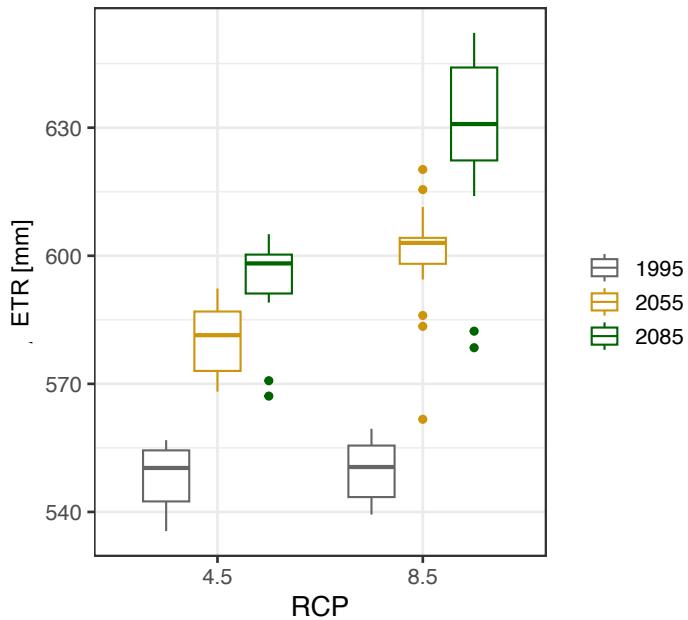


Fig. 3.43 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation de l'évapotranspiration annuelle moyenne à long terme dans le bassin versant de l'Arbogne pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de la neige

La neige n'a qu'une faible importance dans ce bassin versant. Malgré cette faible importance, ou peut-être précisément pour cette raison, le modèle GR4J combiné au module de neige CemaNeige n'a pas été en mesure de modéliser de manière plausible la part de la neige dans le total des précipitations. C'est pourquoi nous renonçons ici à présenter des résultats.

Considérations sur le bilan hydrique

Dans ce chapitre, nous examinons les changements des éléments du bilan hydrique dans leur interaction. Pour ce faire, les changements relatifs des précipitations (P), du débit (Q) et de l'évapotranspiration réelle (ET) indiqués dans les tableaux ci-dessus sont appliqués aux observations de la période de référence 1981–2010 (cf. fig. 3.44). L'objectif principal est de comprendre les changements du débit dans le contexte des changements des autres éléments du bilan hydrique. Dans cette optique, on considère que :

$$\Delta Q = \Delta P - \Delta ET - \Delta ER \quad (3.12)$$

Les signes doivent impérativement être pris en compte lors du calcul de cette équation. Ainsi, la relation suivante s'applique au débit annuel dans le futur moyen (vers 2055) sous RCP 4.5 (cf. fig. 3.44) :

$$-37 = -25 - 28 - (-16) \text{ [mm]} \quad (3.13)$$

L'équation démontre que le changement du débit annuel (-37 mm) est dû à parts à peu près égales à la diminution des précipitations annuelles (-25 mm) et à l'augmentation de l'évapotranspiration annuelle (28 mm). Pour toutes les autres combinaisons période/scénario, les précipitations annuelles moyennes augmentent. Dans le futur lointain sous RCP 4.5 et dans le futur moyen sous RCP 8.5, l'augmentation de l'évapotranspiration compensate celle des précipitations annuelles, avec pour conséquence des changements de débit plutôt faibles. En revanche, la forte augmentation de l'évapotranspiration dans le futur lointain (RCP 8.5) a un impact direct sur la diminution du débit, étant donné que les changements des précipitations annuelles par rapport à la période de référence 1981–2010 sont très faibles. L'évapotranspiration réelle joue donc un rôle primordial dans l'évolution du débit.

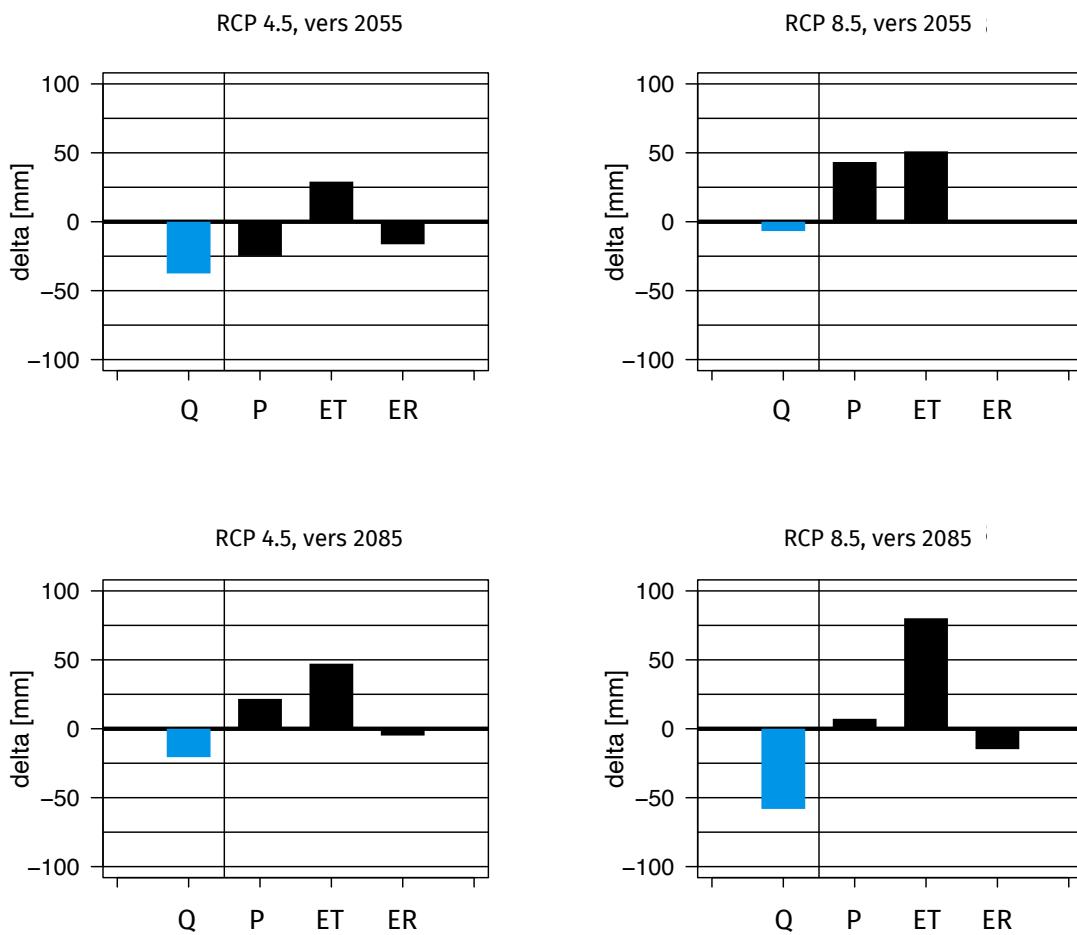


Fig. 3.44 : Comparaison des changements du bilan annuel dans le bassin versant de l'Arbogne@Avenches. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

Considérons maintenant les changements du débit estival et leurs causes (fig. 3.45). À cette période de l'année, les diminutions relatives du débit sont importantes à très importantes. En raison de la valeur initiale plutôt faible de 60 mm (observation), les changements absolus sont certes faibles, mais revêtent une importance particulière précisément en raison de la faiblesse de la valeur initiale.

Les diminutions du débit sont principalement dues à la diminution des précipitations. L'augmentation de l'évapotranspiration a un effet amplificateur. Même si le caractère incertain de l'élément résiduel dans les analyses saisonnières interdit de lui accorder trop d'importance, son importante valeur négative dans le futur lointain sous RCP 8.5 interpelle. La valeur négative de l'élément résiduel suggère que de l'eau supplémentaire est présente dans le système, probablement du fait de la vidange du réservoir d'eau souterraine.

En conséquence, le déficit du débit est moins important que l'élément résiduel. Cela illustre non seulement l'importance des réservoirs, mais indique également que le déficit du débit serait beaucoup plus important si aucun apport d'eau provenant du réservoir d'eau souterraine n'avait lieu.

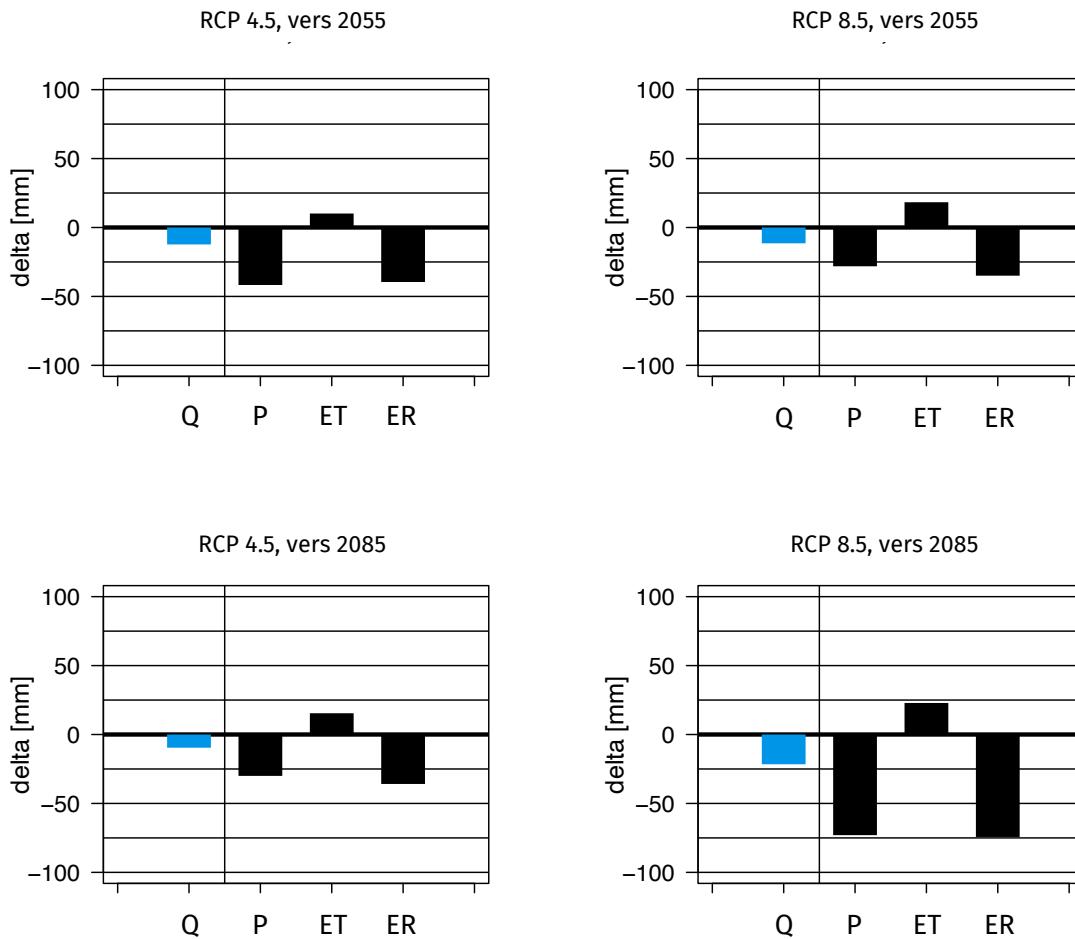


Fig. 3.45 : Comparaison des changements du bilan hydrique en été (JJA) dans le bassin versant de l'Arboigne@Avenches. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

Ces observations sont confirmées par les figures 3.46 et 3.47 (cf. JJA), qui comparent les changements des précipitations (ΔP) aux changements du débit (ΔQ). On remarque la diminution plus importante du débit par rapport à celle des précipitations. Les valeurs médianes se trouvent en dessous de la bissectrice, ce qui met en évidence l'influence de l'augmentation de l'évapotranspiration réelle.

En hiver (DJF) par contre, les valeurs du scénario d'émissions RCP 4.5 sont proches de la bissectrice. Cela signifie que les augmentations du débit sont étroitement liées aux augmentations des précipitations. La situation est différente en hiver sous RCP 8.5. Le débit moyen ne réagit que peu à la forte augmentation des précipitations moyennes. Pour l'interprétation de ce comportement non linéaire, veuillez vous référer au chapitre 3.4.2.

La dispersion des valeurs des différentes chaînes de modèles autour de la médiane montre avec quelle précision les différentes chaînes de modèles représentent la valeur médiane (cf. fig. 3.46 et 3.47). Prenons l'exemple de la modélisation sous RCP 4.5. En été, les chaînes de modèles concordent largement sur le signe des changements, mais résultent en des conclusions différentes quant à l'ampleur des changements. En hiver, la situation n'est pas aussi claire. Ainsi, certaines chaînes de modèles prévoient une augmentation des précipitations et du débit, d'autres une diminution. Néanmoins, la plupart des chaînes de modèles restent relativement proches des valeurs médianes. Cette dispersion des chaînes de modèles doit être prise en compte dans les réflexions sur l'incertitude de la modélisation. Dans le présent rapport, cette dispersion est représentée par les figures avec les boxplots.

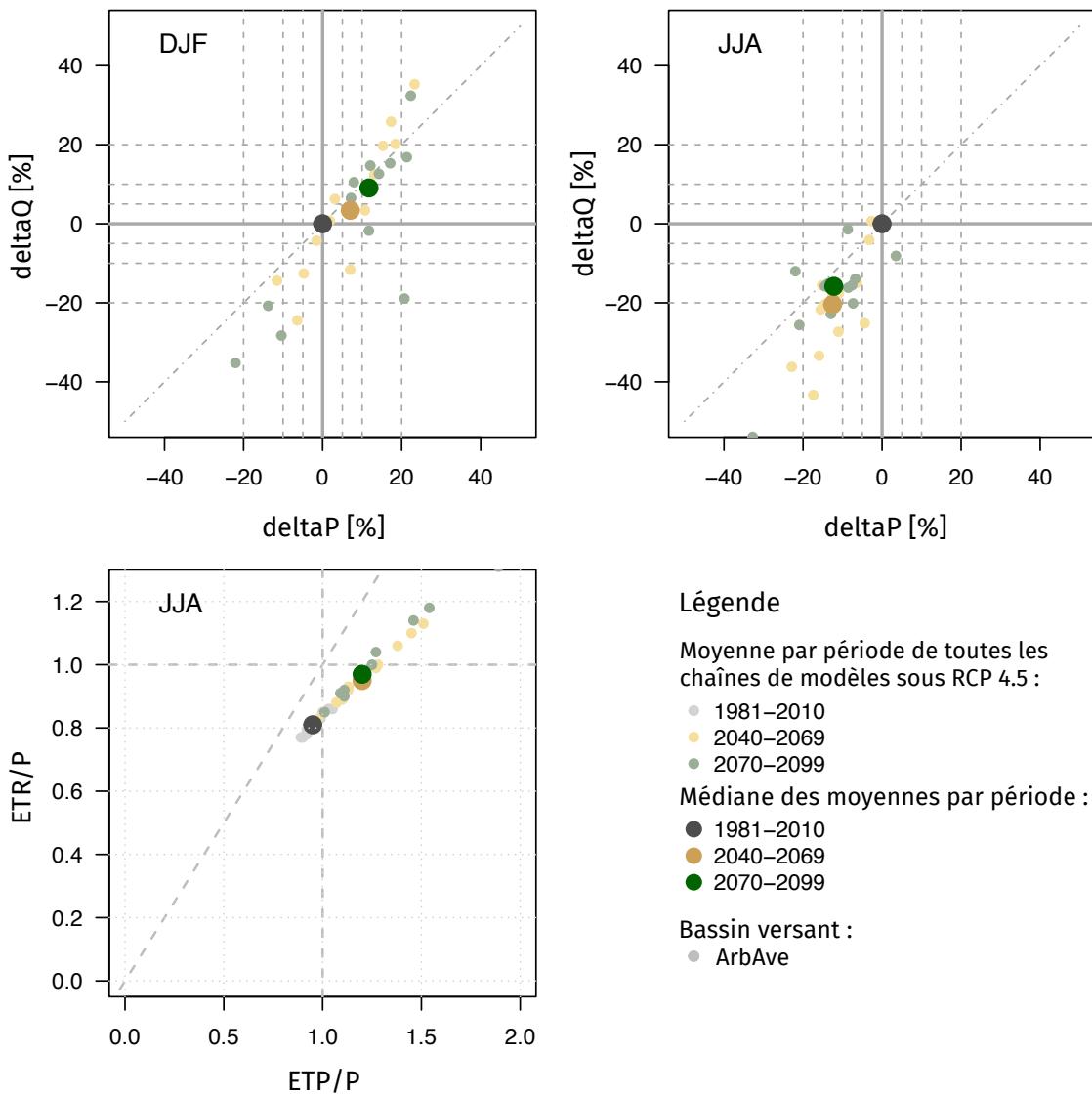


Fig. 3.46 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de l'Arbogne@Avenches en hiver (DJF) et en été (JJA) sous RCP 4.5. Les deux diagrammes du haut montrent les changements relatifs des précipitations (deltaP) et du débit (deltaQ). Le diagramme de Budyko est présenté et décrit dans la partie Méthodologie. Les trois diagrammes montrent la dispersion des moyennes par période de toutes les chaînes de modèles utilisées, ainsi que la valeur médiane de ces moyennes par période.

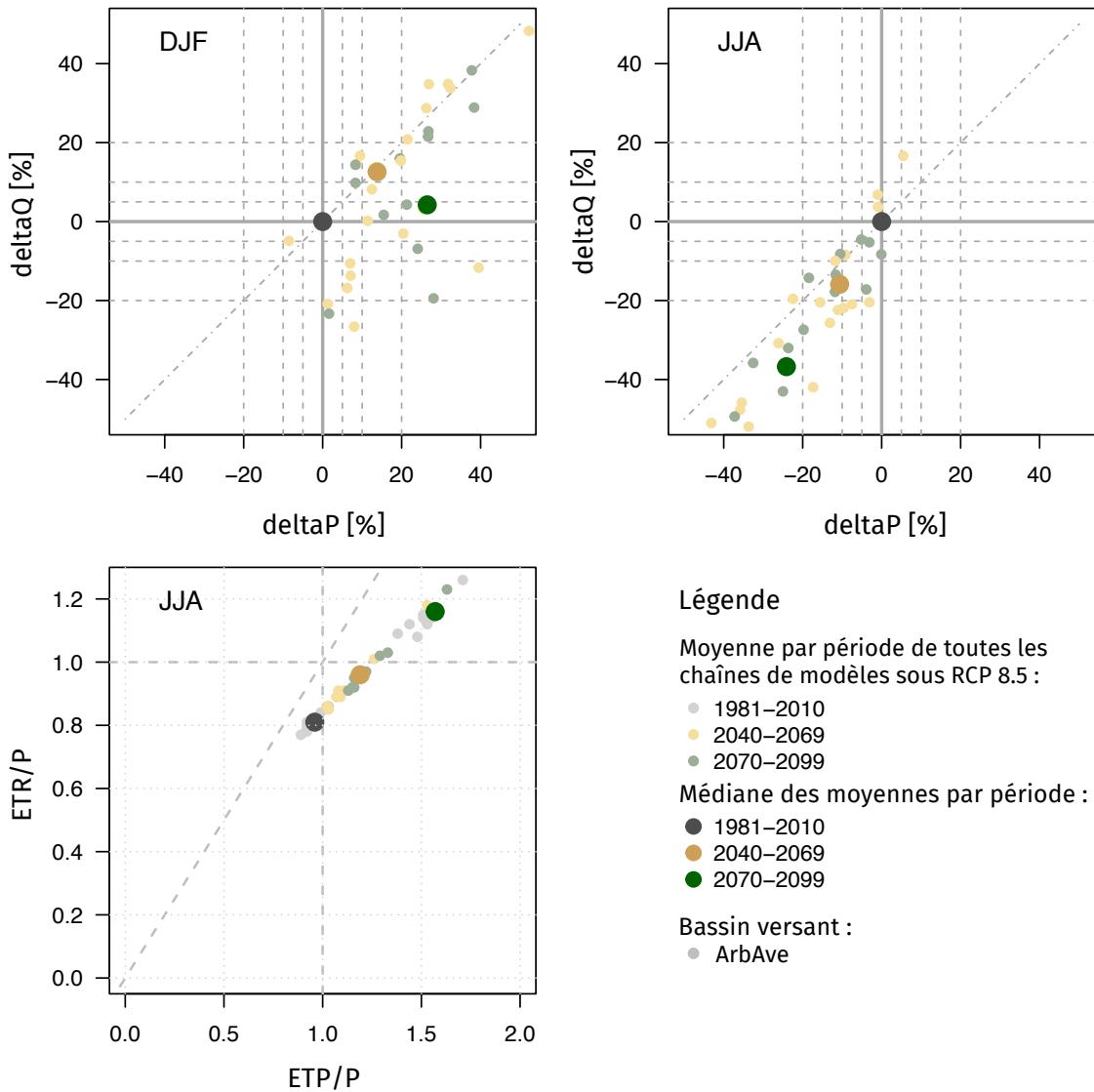


Fig. 3.47 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de l'Arbogne@Avenches sous RCP 8.5

Selon le diagramme de Budyko (fig. 3.46 et 3.47 en bas à gauche), le bilan hydrique de la région PlaNor reste tout juste limité énergétiquement en été au cours de la période de référence, l'évapotranspiration dominant le bilan hydrique avec une part d'environ 80 % des précipitations. À l'avenir, l'importance de l'évapotranspiration continuera à augmenter dans les deux scénarios et la situation du bilan hydrique passera d'une limitation énergétique à une limitation hydrique, et ce de manière bien plus prononcée sous RCP 8.5. Le manque d'eau deviendra de plus en plus problématique. Ces résultats ne sont pas surprenants si l'on considère que le débit estival moyen de la période de référence n'est que de 60 mm (valeur d'observation de la période de référence).

À la lecture de ce diagramme, la question se pose de savoir si l'indicateur ETR/P peut réellement connaître des valeurs >1. En réalité, le diagramme de Budyko a été développé pour des situations dans lesquelles l'élément de réservoir Δ Res est négligeable. Ceci n'est pas nécessairement le cas dans le cadre d'une approche saisonnière. Il est dès lors possible que de l'eau puisse encore s'évaporer même si aucune eau de pluie n'est plus disponible. C'est le cas lorsque de l'eau est retirée du réservoir.

Changements des plus faibles et plus importants débits journaliers

Il convient de préciser encore une fois que nous analysons ici de très petits et de très grands débits journaliers. Les très grands débits journaliers ne sont pas des crues ou des pics de crue au sens strict du terme. De telles crues se produisent à une échelle horaire et ne sauraient être saisies avec les valeurs journalières utilisées ici. En revanche, les plus petits débits sont bien saisis avec une résolution journalière, étant donné que les fluctuations dans le domaine des étiages sont très lentes. Les débits journaliers les plus faibles et les plus élevés sont décrits par ce que l'on appelle des quantiles (q). Le quantile du débit (Q_{q10}) par exemple, indique le débit (Q) qui est atteint ou n'est pas dépassé en moyenne lors de 10 % des jours – soit 37 jours en une année.

Tab. 3.4.30 : Plus faibles et plus importants débits de l'Arbogne@Avenches (ArbAve). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|------|------------|
| 1981-2010 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 1.9 | 2.6 | 4.9 | mm/d |
| 1981-2010 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 1.6 | 2.2 | 4.1 | m^3/s |
| 1981-2010 | 2.3 | 2.9 | 3.5 | 22.4 | 30.6 | 56.8 | $l/s/km^2$ |
| 2040-2069 | -28.6 | -28.0 | -23.3 | -4.8 | -2.7 | -6.6 | % |
| 2070-2099 | -25.0 | -25.0 | -22.6 | 0.5 | 0.4 | -0.9 | % |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.31 : Plus faibles et plus importants débits de l'Arbogne@Avenches (ArbAve). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|------|------------|
| 1981-2010 | 0.2 | 0.2 | 0.3 | 2.0 | 2.7 | 5.0 | mm/d |
| 1981-2010 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 1.6 | 2.3 | 4.2 | m^3/s |
| 1981-2010 | 2.1 | 2.7 | 3.4 | 22.6 | 31.5 | 57.9 | $l/s/km^2$ |
| 2040-2069 | -29.9 | -27.0 | -28.8 | 3.2 | 3.8 | 6.0 | % |
| 2070-2099 | -52.7 | -52.3 | -50.0 | -9.0 | -6.5 | -1.1 | % |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

La nette différence entre les changements des plus faibles et des plus importants débits journaliers saute aux yeux lorsque l'on examine les deux tableaux : tous les plus faibles débits journaliers diminuent de façon très importante, avec des diminutions allant de -23 à -29 % dans les deux périodes futures sous RCP 4.5 et des diminutions allant de -27 à -30 % dans le futur moyen et même jusqu'à -53 % dans le futur lointain sous RCP 8.5. La situation d'étiage de l'Arbogne change donc considérablement!

Par contre, les diminutions des plus grands débits journaliers sont généralement faibles.

3.4.4 Région Plateau Sud, Region Südliches Mittelland

Situation initiale

La Région Plateau Sud (PlaSud) est représentée par le bassin versant de la Sionge@Vuippens, qui présente les caractéristiques suivantes :

- Superficie : 43,4 km²
- Altitudes :
 - Altitude minimale : 682 m
 - Altitude moyenne : 869 m
 - Altitude maximale : 1412 m

Cette région est la deuxième plus élevée des cinq régions analysées dans le canton. En ce qui concerne l'utilisation du sol, la part des terres arables s'élève à environ 60 %. La forêt, notamment la forêt de résineux, occupe environ 15 % de la surface, tandis que la proportion de surfaces bâties est relativement élevée avec une part d'environ 15 %. Les 10 % restants sont des espaces verts.

Les valeurs hydrologiques sont généralement exprimées en millimètres. Pour le bassin versant de la Sionge, cela implique que 1 mm $\cong 43'400 \text{ m}^3$.

Détermination du bilan hydrique

Selon l'Atlas hydrogéologique de la Suisse¹¹, le bassin versant n'est pas fermé. Des apports souterrains (A_{sout}) sont à envisager dans sa partie sud-est (cf. fig. 3.48). Par ailleurs, une importante nappe phréatique se trouve dans la partie nord du bassin versant, où des écoulements souterrains (Q_{sout}) ont probablement lieu et ne sont pas détectés par la station de mesure du débit de Vuippens (point rouge). Le bilan hydrique supposé se présente donc comme suit :

$$P = Q_{\text{sup}} + Q_{\text{sout}} - A_{\text{sout}} + ET \quad (3.14)$$

avec :

P : Précipitations

Q_{sup} : Débit superficiel

Q_{sout} : Débit souterrain

A_{sout} : Apport souterrain

ET : Évapotranspiration

¹¹<https://hydromaps.ch>

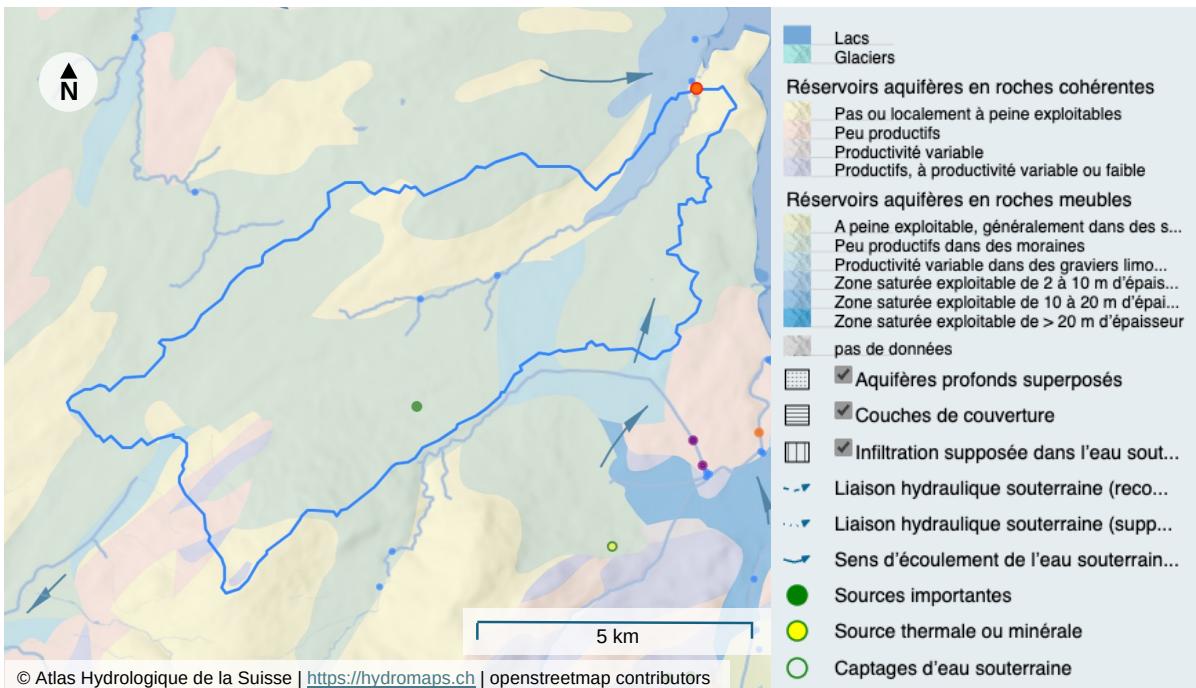


Fig. 3.48 : Situation hydrogéologique de la Siong. Extrait de l'Atlas hydrologique de la Suisse

Un élément résiduel (ER) a dû être introduit dans le bilan pour les données d'observation afin que ce bilan hydrique soit équilibré. Cet élément résiduel regroupe aussi bien les apports souterrains que les débits sortants souterrains, ceux-ci ne pouvant être séparés quantitativement. Il contient cependant également les éventuelles erreurs dans les données d'observation. Le signe de l'élément résiduel met en évidence le fait que les apports souterrains sont plus importants que les débits sortants souterrains. En effet :

$$P = Q_{\text{sup}} + ET - ER \rightarrow P + ER = Q_{\text{sup}} + ET \quad (3.15)$$

Pour pouvoir effectuer les bilans, nous avons dû recourir à une valeur d'évapotranspiration modélisée. Une comparaison de l'évapotranspiration annuelle de 533 mm calculée à l'aide de GR4J avec celle de 539 mm issue de l'Atlas hydrologique (période 1973–1992) montre que cette valeur est très fiable. Le tableau 3.4.32 présente le bilan hydrique annuel moyen de la période de référence basé sur des données d'observation.

Tab. 3.4.32 : Comparaison du bilan hydrique observé et modélisé de la Sionge. P : précipitations, Q_{sup} : débit superficiel, I : débit sortant souterrain – apport souterrain, ET : évapotranspiration, obs : observations. Précipitations déduites de RhiresD et débits déduits des mesures de l'OFEV, évapotranspiration reprise des données modélisées, ER : calculé en tant qu'élément résiduel du bilan hydrique, mod : données modélisées

| | Période | mm/a | | | | % | | | |
|-----|-----------|-----------|------------------|-----|-----|-----|------------------|----|----|
| | | P | Q_{sup} | ER | ET | P | Q_{sup} | ER | ET |
| | obs | 1981–2010 | 1343 | 864 | -54 | 533 | 100 | 64 | -4 |
| mod | 1981–2010 | 1331 | 834 | -36 | 533 | 100 | 63 | -3 | 40 |

Selon l'Atlas hydrologique de la Suisse¹², la Sionge possède un régime nivo-pluvial, mais se situe dans la zone de transition vers le régime pluvial supérieur en raison de l'altitude moyenne de la région (869 m), ce que confirme la figure 3.49, les débits étant très similaires en hiver (DJF) et au printemps (MAM). En tout cas, aucun « pic de fonte des neiges » n'est visible au printemps. Les débits les plus faibles sont enregistrés en été (JJA) et en automne (SON). Les précipitations estivales (JJA) sont les plus importantes avec environ 400 mm de pluie. Au printemps (MAM) et en automne (SON), les précipitations sont de l'ordre de 330 mm. Les précipitations saisonnières les plus faibles se produisent en hiver, avec une valeur d'environ 280 mm. En termes d'évapotranspiration, on constate une saisonnalité déterminée par le bilan radiatif, avec de petites valeurs en hiver et de grandes valeurs en été. L'élément résiduel suggère que les composantes de débit souterrain sont dominées par les apports souterrains vers le bassin en hiver et au printemps et par les débits souterrains sortants hors du bassin en été et en automne.

¹²<https://atlashydrologique.ch> (planche 5.2)

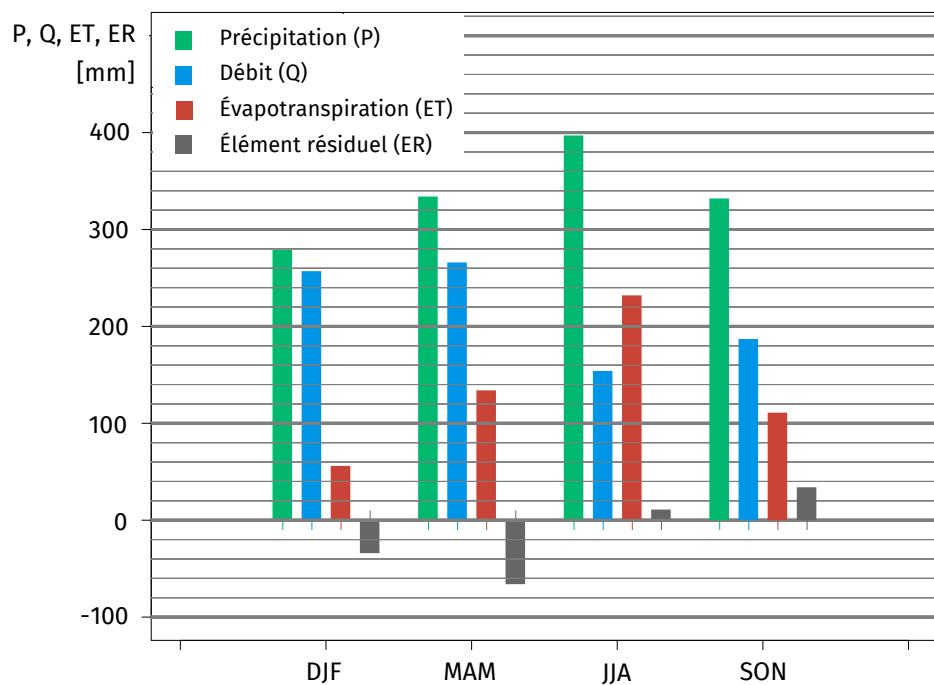


Fig. 3.49 : Bilan hydrique saisonnier moyen de la Sionge pour la période 1981–2010 sur la base des données d'observation

Évaluation de la qualité des modélisations

La modélisation à l'aide de GR4J permet une très bonne reproduction du bilan hydrique et de ses éléments (tab. 3.4.32). Il est vrai que l'erreur relative pour le terme I est importante (-33%). Afin d'évaluer l'impact de cette erreur sur le bilan hydrique, il faut cependant considérer l'erreur absolue, qui, avec une valeur de 18 mm, est très faible.

Le tableau suivant permet d'évaluer la qualité de la modélisation des précipitations (P) et du débit superficiel (MQ) à l'aide de GR4J sur une base saisonnière.

Tab. 3.4.33 : Comparaison des valeurs saisonnières observées et modélisées des précipitations (P) et du débit moyen superficiel (MQ) de la Sionge pour la période 1981–2010 et selon les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

| | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|-------|--------|---------|-----|---------|-----|
| | | P | MQ | P | MQ |
| Année | CH2018 | 1325 | 838 | 1331 | 841 |
| Année | OBS | 1323 | 864 | 1323 | 864 |
| Année | Δ mm | 2 | -26 | 8 | -23 |
| Année | Δ% | 0 | -3 | 1 | -3 |
| DJF | CH2018 | 294 | 230 | 295 | 234 |
| DJF | OBS | 295 | 257 | 295 | 257 |
| DJF | Δ mm | -1 | -27 | 0 | -23 |
| DJF | Δ% | 0 | -10 | 0 | -9 |
| MAM | CH2018 | 331 | 243 | 333 | 244 |
| MAM | OBS | 334 | 266 | 334 | 266 |
| MAM | Δ mm | -3 | -23 | -1 | -22 |
| MAM | Δ% | -1 | -9 | 0 | -8 |
| JJA | CH2018 | 371 | 177 | 370 | 176 |
| JJA | OBS | 364 | 154 | 364 | 154 |
| JJA | Δ mm | 7 | 23 | 6 | 22 |
| JJA | Δ% | 2 | 15 | 2 | 14 |
| SON | CH2018 | 326 | 187 | 329 | 190 |
| SON | OBS | 328 | 187 | 328 | 187 |
| SON | Δ mm | -2 | 0 | 1 | 3 |
| SON | Δ% | -1 | 0 | 0 | 2 |

Le modèle reproduit très bien les précipitations moyennes de la période de référence 1981–2010. En revanche, pour les débits saisonniers, la qualité de la modélisation est globalement bonne, bien qu'il existe des différences selon les saisons. La qualité de la modélisation des débits est très bonne en automne, bonne au printemps et bonne à très bonne en hiver. Les plus grands déficits sont constatés en été, où la qualité de la modélisation n'est que suffisante. Il n'y a que peu de différences entre les deux scénarios d'émissions du point de vue de la qualité de la modélisation.

Dans le cadre du projet CH2018, Muelchi et al. (2021)¹³ ont également réalisé des modélisations hydrologiques dans le contexte du réchauffement climatique pour certains bassins versants de Suisse. Les résultats de ces modélisations sont publiés dans l'atlas hydrologique¹⁴. Ils ont également utilisé comme données

¹³Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R. und Martius, O. (2021). River runoff in Switzerland in a changing climate—runoff regime changes and their time of emergence. In : Hydrology and Earth System Sciences 25.6, p. 3071–3086. DOI : 10.5194/hess-25-3071-2021

¹⁴<https://hydromapscc.ch/>

d'entrée les chaînes de modèles CH2018, qui ne sont toutefois pas tout à fait identiques à celles utilisées ici. De même, la période considérée pour le futur moyen n'est pas tout à fait identique : 2045–2074 chez Muelchi et al.; 2040–2069 pour l'étude fribourgeoise. Malgré ces réserves, la comparaison des deux modélisations est intéressante, car Muelchi et al. utilisent le modèle PREVAH¹⁵, un modèle hydrologique plus complexe que GR4J.

La comparaison des modèles dans la fig. 3.50 montre que les résultats des deux modélisations indépendantes concordent très bien.

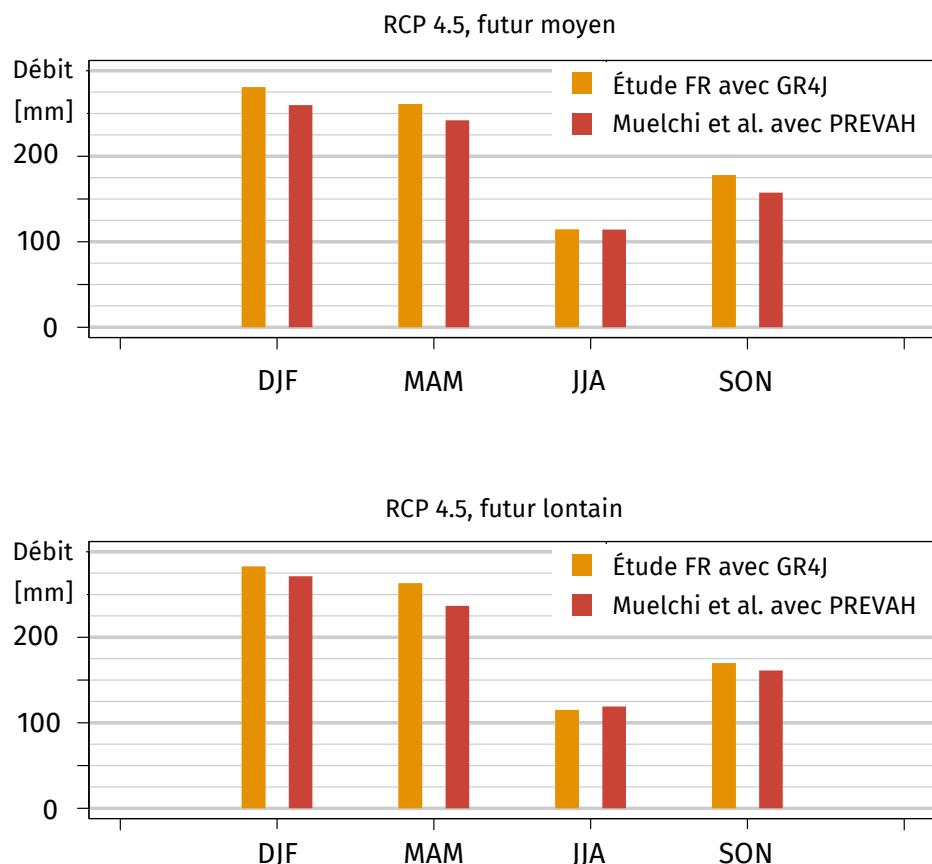


Fig. 3.50 : Comparaison des débits saisonniers moyens de la Sionge modellisés à l'aide de différents modèles et sur la base de données d'entrée similaire sous RCP 4.5

Conclusion : Dans l'ensemble, les différentes validations montrent que GR4J est capable de produire des modélisations de bonne, voire très bonne qualité des conditions hydrologiques de la Sionge pour la période de référence.

¹⁵Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. et Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH. In : Environmental Modelling and Software 24.10. DOI : 10.1016/j.envsoft.2009

Changements des précipitations moyennes

Les tableaux 3.4.34 et 3.4.35 décrivent les changements relatifs des précipitations moyennes, tandis que les deux figures 3.52 et 3.51 montrent d'une part les changements absolus et indiquent d'autre part la dispersion des chaînes de modèles et donc les incertitudes des modélisations.

Pour les précipitations annuelles, les changements se situent entre 0 et -4% : cela signifie que les précipitations annuelles moyennes ne diminueront que peu à l'avenir. Cependant, en raison des grandes valeurs initiales, les faibles changements relatifs signifient de grands changements absolus. Les différents scénarios d'émissions se distinguent par des schémas évolutifs différents :

- RCP 4.5 : Diminution par rapport à la période de référence dans le futur moyen, rapprochement de la période de référence dans le futur lointain.
- RCP 8.5 : Diminution continue au fil du temps. Grande incertitude de modélisation dans le futur lointain.

D'un point de vue saisonnier, les précipitations augmentent en hiver et au printemps. Ces augmentations s'accentuent vers la fin du siècle et atteignent des valeurs supérieures d'environ 5 points de pourcentage sous RCP 8.5 par rapport à RCP 4.5. L'augmentation est plus faible au printemps qu'en hiver, avec cependant les mêmes différences entre les scénarios d'émissions. En été, les précipitations diminuent systématiquement. Sous RCP 4.5 elles diminuent de 13 à 14%, mais les différences entre le futur moyen et le futur lointain sont minimes. Le scénario RCP 8.5 en revanche signale une forte diminution et de grandes différences entre le futur moyen et le futur lointain. En automne, les précipitations moyennes ne diminuent pratiquement pas sous RCP 4.5 et d'environ 7% d'ici la fin du siècle sous RCP 8.5.

Tab. 3.4.34 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de la Sionge. Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1325.0 | 295.7 | 331.2 | 369.6 | 326.7 | mm |
| 2040-2069 | -3.9 | 5.9 | 0.8 | -14.3 | 0.0 | % |
| 2070-2099 | 0.0 | 10.2 | 5.2 | -13.1 | -0.6 | % |

Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▤ 5 ▥ 10 ▦ 20 ▧ [%]

Tab. 3.4.35 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de la Sionge. Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5.

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1328.6 | 294.7 | 333.1 | 369.6 | 328.5 | mm |
| 2040-2069 | -0.5 | 11.8 | 6.8 | -13.1 | -0.6 | % |
| 2070-2099 | -3.8 | 15.2 | 10.1 | -27.2 | -6.9 | % |

Légende : ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

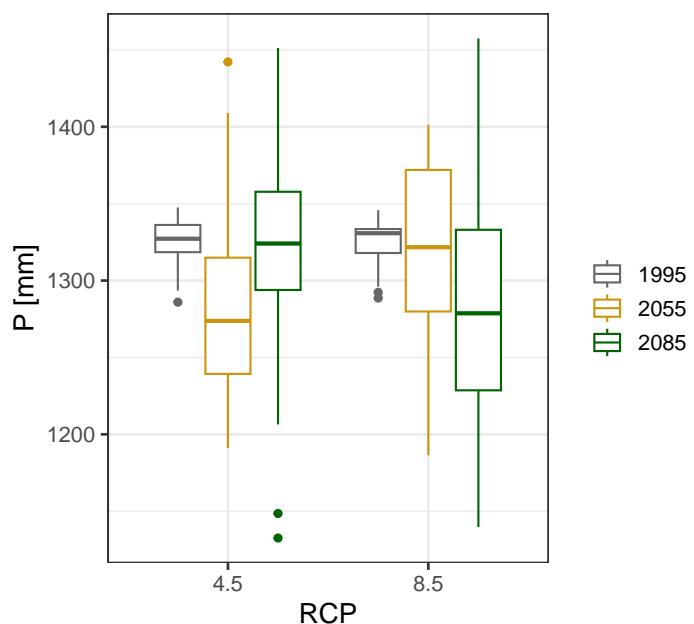


Fig. 3.51 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des précipitations annuelles moyennes à long terme dans le bassin versant de la Sionge pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

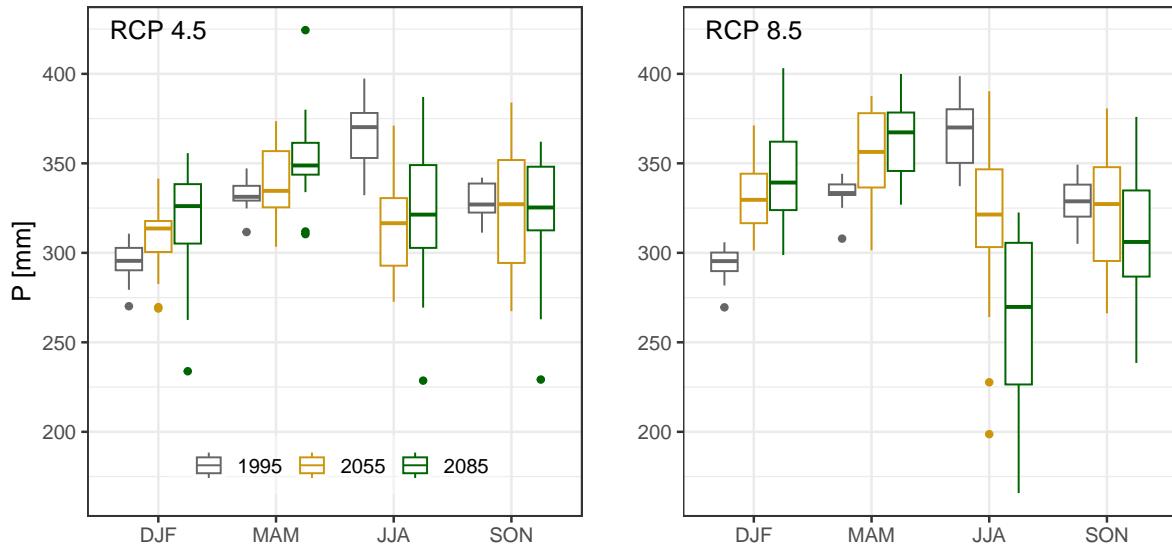


Fig. 3.52 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des sommes de précipitations saisonnières moyennes à long terme dans le bassin versant de la Sionge pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements des débits moyens

Les débits annuels moyens à long terme diminuent tous par rapport à la période de référence 1981–2010, et ce dans un ordre de grandeur de -10 à -16 % environ (cf. tab. 3.4.36 et 3.4.37).

Les différences entre les deux scénarios sont remarquables : Alors que pour le scénario RCP 4.5, les diminutions sont plus importantes dans le futur moyen que dans le futur lointain (toujours par rapport à la période de référence), sous RCP 8.5, la diminution dans le futur lointain est non seulement plus prononcée que dans le futur moyen, mais elle atteint également une valeur relativement importante de -16,5 %, soit environ -140 mm.

En ce qui concerne les débits saisonniers, trois phases se distinguent : augmentation des débits en hiver, diminution des débits en été et en automne et peu de changements au printemps. Les augmentations des débits hivernaux avoisinent les 10 %, indépendamment de la période future et du scénario d'émissions. Toutes les diminutions des débits estivaux sont très importantes, avec cependant des différences considérables entre les scénarios. Sous RCP 4.5, les diminutions sont de l'ordre de -25 %, alors que sous RCP 8.5, elles sont comprises entre -24 et -43 %. Si l'on tient compte également des diminutions de débit en automne, qui sont également très importantes dans le futur lointain sous RCP 8.5 avec une valeur d'environ -37 %, l'amplitude des changements prévisibles des conditions de débit de la Sionge au cours du semestre d'été devient évidente.

Tab. 3.4.36 : Débits annuels et saisonniers moyens de la Sionge@Vuippens (SioVui). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 835.9 | 229.0 | 242.7 | 177.0 | 186.2 | mm |
| 2040-2069 | -10.5 | 9.2 | -1.9 | -25.8 | -4.9 | % |
| 2070-2099 | -7.0 | 10.0 | -1.1 | -25.3 | -9.3 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

Tab. 3.4.37 : Débits annuels et saisonniers moyens de la Sionge@Vuippens (SioVui). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 839.5 | 233.6 | 243.6 | 175.2 | 190.7 | mm |
| 2040-2069 | -7.0 | 13.3 | 0.4 | -24.0 | -19.1 | % |
| 2070-2099 | -16.5 | 11.3 | -1.9 | -43.2 | -36.8 | % |
| <i>Légende :</i> ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

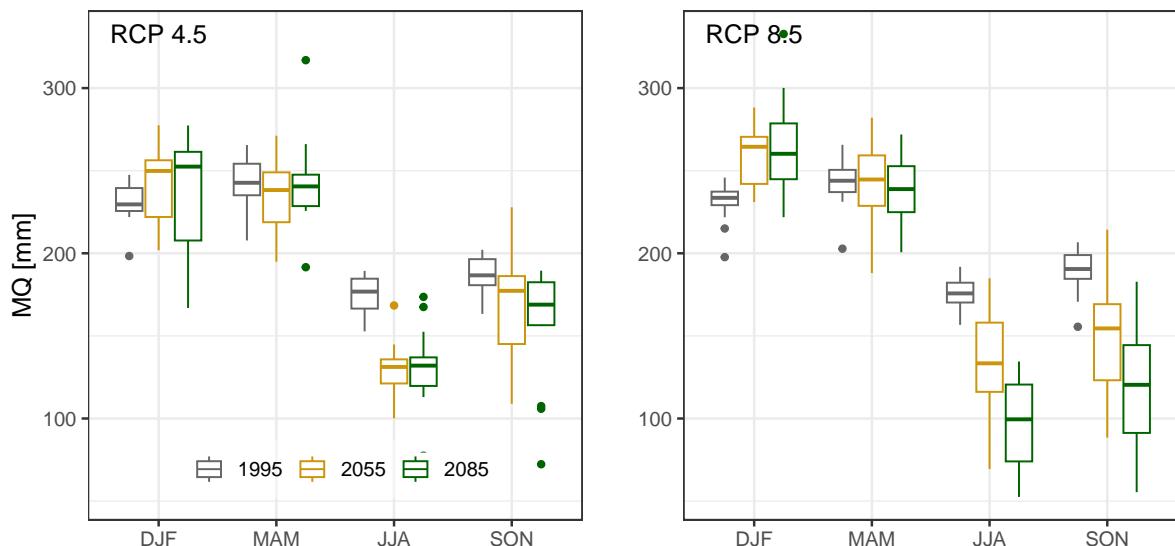


Fig. 3.53 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits saisonniers moyens à long terme de la Sionge pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

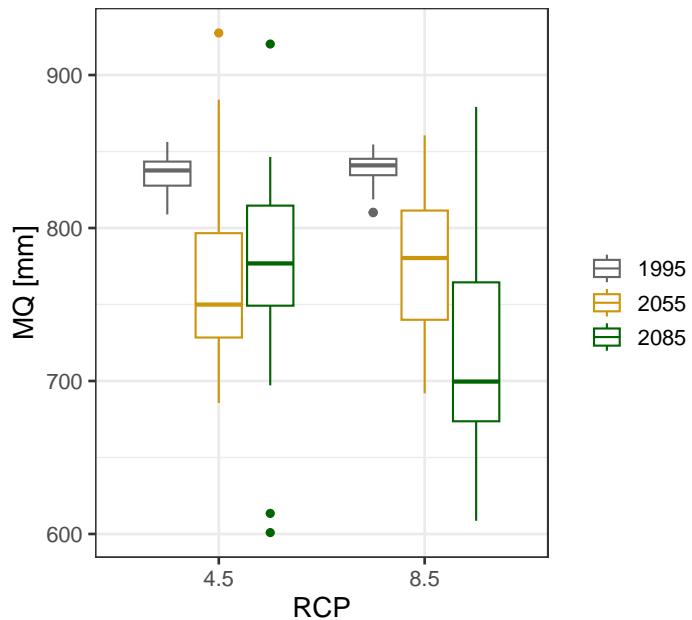


Fig. 3.54 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits annuels moyens à long terme de la Sionge pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

La figure 3.55 place les changements relatifs modélisés dans le contexte des observations de la période de référence 1981–2010. Elle visualise d'une part les écarts entre les valeurs médianes et positionne d'autre part les valeurs médianes futures dans la zone de dispersion des valeurs des années individuelles de la période de référence.

En hiver, au printemps et en automne (sauf dans le futur lointain sous RCP 8.5), les valeurs médianes futures se situent dans la plage de dispersion des débits saisonniers des années individuelles de la période de référence. En revanche, en été, au moins 75 % des valeurs annuelles de la période de référence sont supérieures aux valeurs médianes futures. Enfin, on observe d'importantes différences entre les scénarios d'émissions.

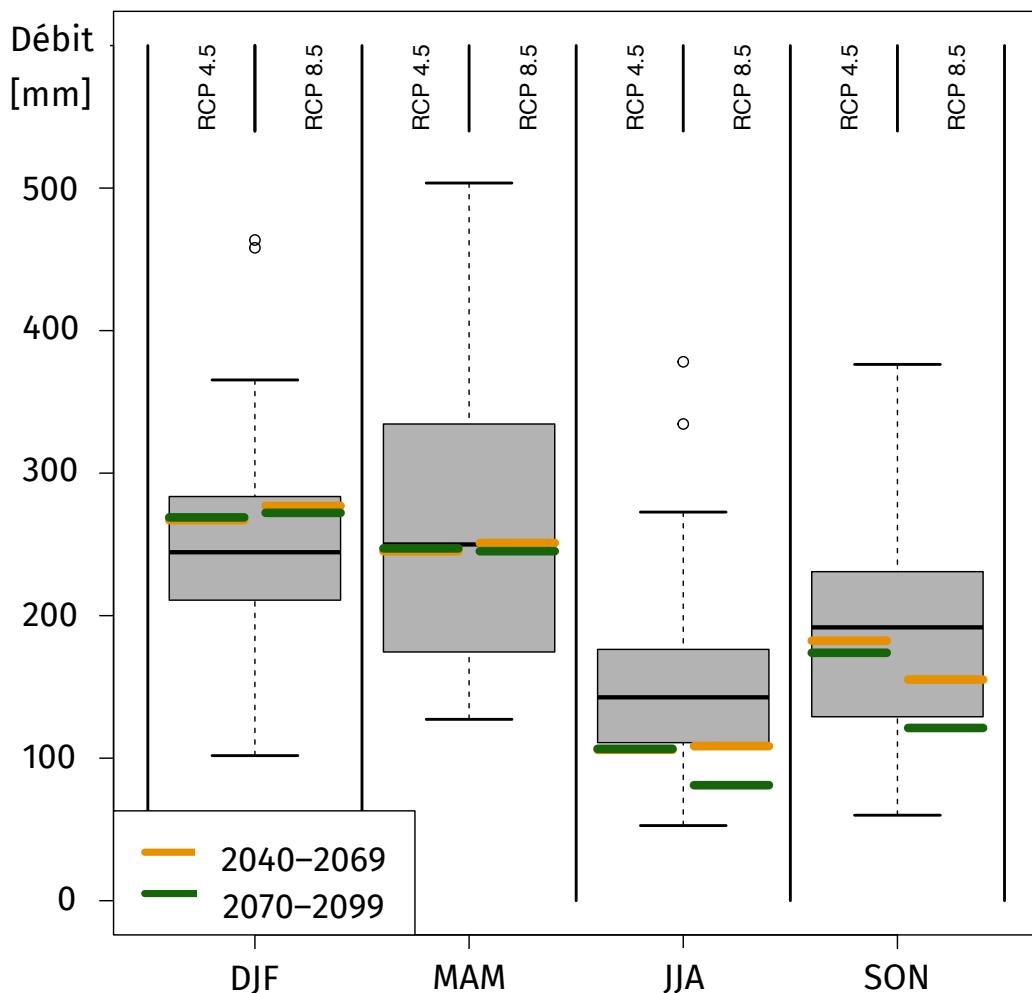


Fig. 3.55 : Distribution des débits saisonniers de la Sionge pour la période 1981–2010, déduits des observations de l’OFEV, comparés aux débits moyens du futur moyen et du futur lointain pour les deux scénarios d’émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de l’évapotranspiration réelle moyenne

Du fait du réchauffement climatique, l’évapotranspiration augmente à toutes les saisons, dans les deux périodes futures et pour les deux scénarios d’émissions. Des augmentations importantes, voire très importantes – entre 15 et 34 % – sont observées en hiver (DJF) et au printemps (MAM), c'est-à-dire au cours de saisons durant lesquelles l’évapotranspiration est plutôt faible. L’augmentation relative de 34,4 % dans le futur lointain sous RCP 8.5 conduit à une augmentation absolue de l’évapotranspiration de 20 mm.

En été et en automne, les augmentations de l'évapotranspiration réelle sont inférieures à 10 %. Ceci est surprenant dans la mesure où l'augmentation de l'évapotranspiration dans la région voisine des Préalpes, située à plus haute altitude, est beaucoup plus importante et atteint des valeurs maximales de plus de 20 %.

Tab. 3.4.38 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de la Sionge@Vuippens (SioVui) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 532.9 | 55.7 | 132.3 | 229.9 | 112.2 | mm |
| 2040-2069 | 5.5 | 14.8 | 8.3 | 4.4 | 1.6 | % |
| 2070-2099 | 8.9 | 16.4 | 12.4 | 6.7 | 5.7 | % |

Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▢ 5 ▣ 10 ▢ 20 ▢ [%]

Tab. 3.4.39 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de la Sionge@Vuippens (SioVui) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 532.9 | 55.7 | 132.3 | 230.9 | 112.2 | mm |
| 2040-2069 | 8.9 | 18.0 | 12.4 | 5.9 | 7.3 | % |
| 2070-2099 | 13.7 | 34.4 | 24.1 | 6.7 | 7.3 | % |

Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▢ 5 ▣ 10 ▢ 20 ▢ [%]

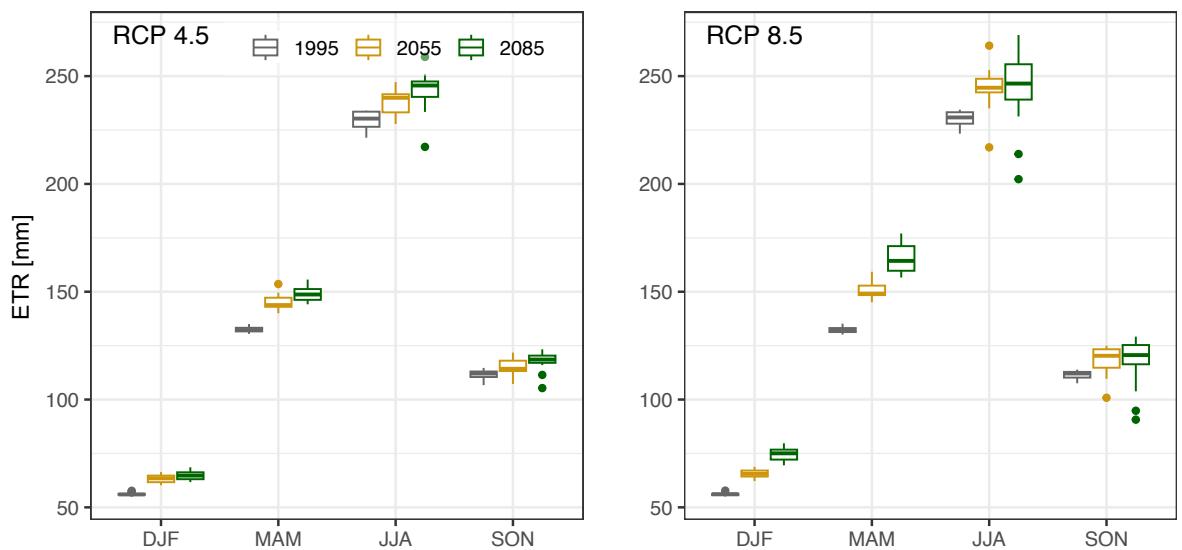


Fig. 3.56 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des sommes d'évapotranspiration saisonnières moyennes à long terme dans le bassin versant de la Sionge pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

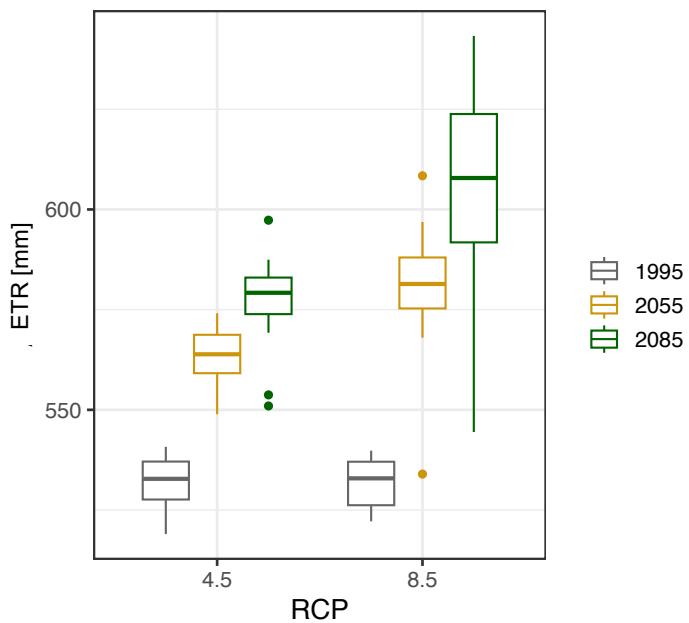


Fig. 3.57 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation de l'évapotranspiration annuelle moyenne à long terme dans le bassin versant de la Sionge pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de la neige

Comme l'indiquent les deux tableaux, la part de la neige dans le débit total se monte à environ 7,6 % au cours de la période de référence. Cette part est inférieure d'environ 5 % à celle observée pour la Singine, qui présente un régime nivo-pluvial typique (cf. chap. 3.4.5). Cela confirme que la Sionge se situe dans la zone de transition entre un régime nivo-pluvial et un régime de type pluvial supérieur. Comme le montrent les deux tableaux, la contribution de la fonte de la neige au débit total diminue dans le futur, tout particulièrement dans le futur lointain sous RCP 8.5. La fonte des neiges, qui ne joue déjà qu'un rôle secondaire dans le bilan hydrique, n'aura pratiquement plus aucune importance à l'avenir.

Tab. 3.4.40 : Rôle de la neige dans le bassin versant de la Sionge@Vuippens (SioVui). Part moyenne modélisée de la neige fraîche dans les précipitations et part moyenne modélisée de l'eau de fonte dans le débit total, calculées sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5. Les valeurs se réfèrent à une année civile.

| | Psol/Ptot ¹ | Qmelt/Qtot ² | |
|-----------|------------------------|-------------------------|---|
| 1981-2010 | 11.7 | 7.6 | % |
| 2040-2069 | 8.3 | 6.2 | % |
| 2070-2099 | 7.0 | 5.6 | % |

¹ Part de la neige dans les précipitations totales

² Part de la neige dans le débit total

Tab. 3.4.41 : Rôle de la neige dans le bassin versant de la Sionge@Vuippens (SioVui). Part moyenne modélisée de la neige fraîche dans les précipitations et part moyenne modélisée de l'eau de fonte dans le débit total, calculées sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5. Les valeurs se réfèrent à une année civile.

| | Psol/Ptot ¹ | Qmelt/Qtot ² | |
|-----------|------------------------|-------------------------|---|
| 1981-2010 | 12.2 | 7.5 | % |
| 2040-2069 | 7.3 | 5.3 | % |
| 2070-2099 | 3.7 | 3.3 | % |

¹ Part de la neige dans les précipitations totales

² Part de la neige dans le débit total

Considérations sur le bilan hydrique

Dans ce chapitre, nous examinons les changements des éléments du bilan hydrique dans leur interaction. Pour ce faire, les changements relatifs des précipitations (P), du débit (Q) et de l'évapotranspiration réelle (ET) indiqués dans les tableaux ci-dessus sont appliqués aux observations de la période de référence 1981-2010 (cf. tab. 3.4.32). L'objectif principal est de comprendre les changements du débit dans le contexte des changements des autres éléments du bilan hydrique. Dans cette optique, on considère que :

$$\Delta Q = \Delta P - \Delta ET - \Delta ER \quad (3.16)$$

Les signes doivent impérativement être pris en compte lors du calcul de cette équation. Ainsi, la relation suivante s'applique au débit annuel sous RCP 4.5 dans le futur moyen (vers 2055, cf. fig. 3.58.) :

$$-92 = -52 - 29 - 9 [mm] \quad (3.17)$$

L'équation démontre que le changement du débit annuel (-92 mm) est principalement dû à la diminution des précipitations annuelles (-52 mm) et à l'augmentation de l'évapotranspiration annuelle (29 mm). Dans le futur lointain sous RCP 4.5, et de manière générale sous RCP 8.5, l'augmentation de l'évapotranspiration est le principal moteur de la diminution du débit. En d'autres termes, même si les précipitations ne devaient pas diminuer à l'avenir, le débit continuerait à diminuer en raison du réchauffement climatique, qui entraîne des taux d'évapotranspiration élevés, et ce jusqu'à ce que l'évapotranspiration réelle soit limitée par le manque d'eau disponible dans le sol.

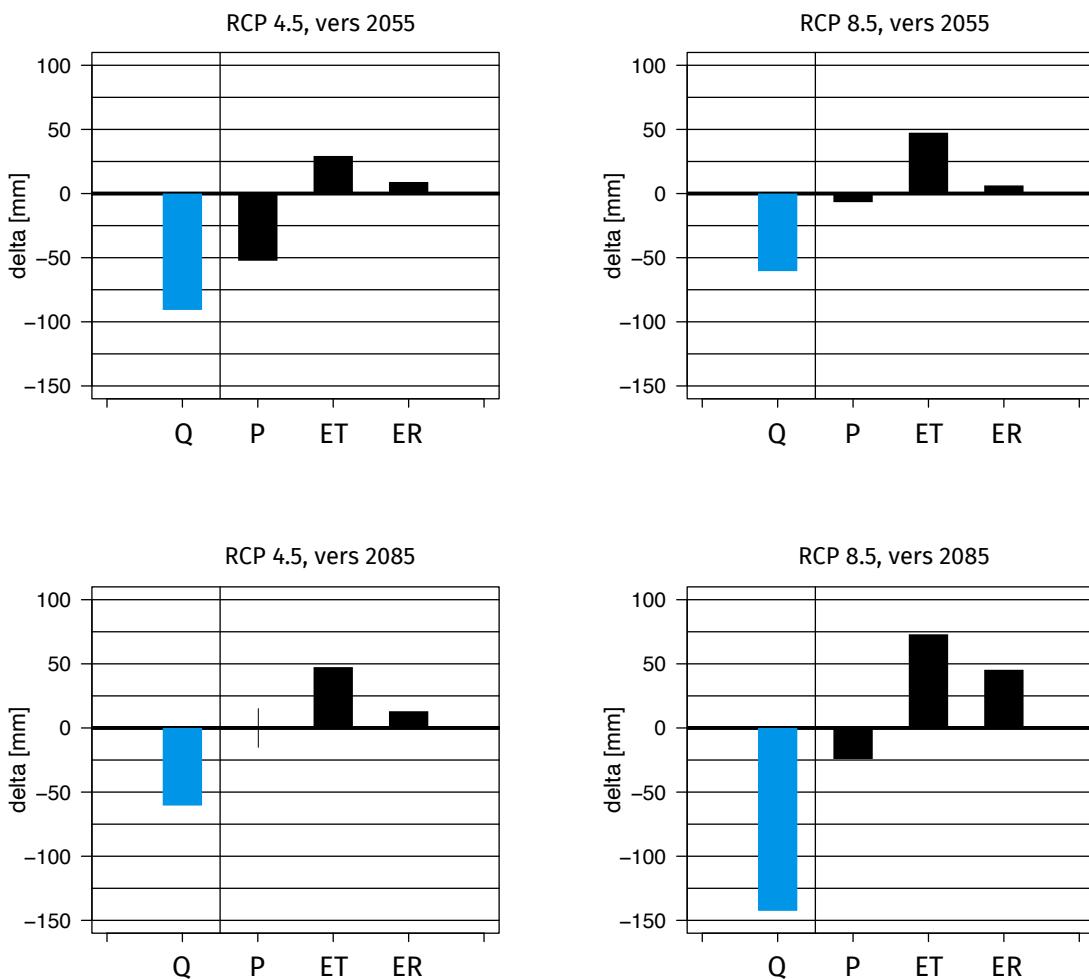


Fig. 3.58 : Comparaison des changements du bilan annuel dans le bassin versant de la Sionge@Vuippens. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

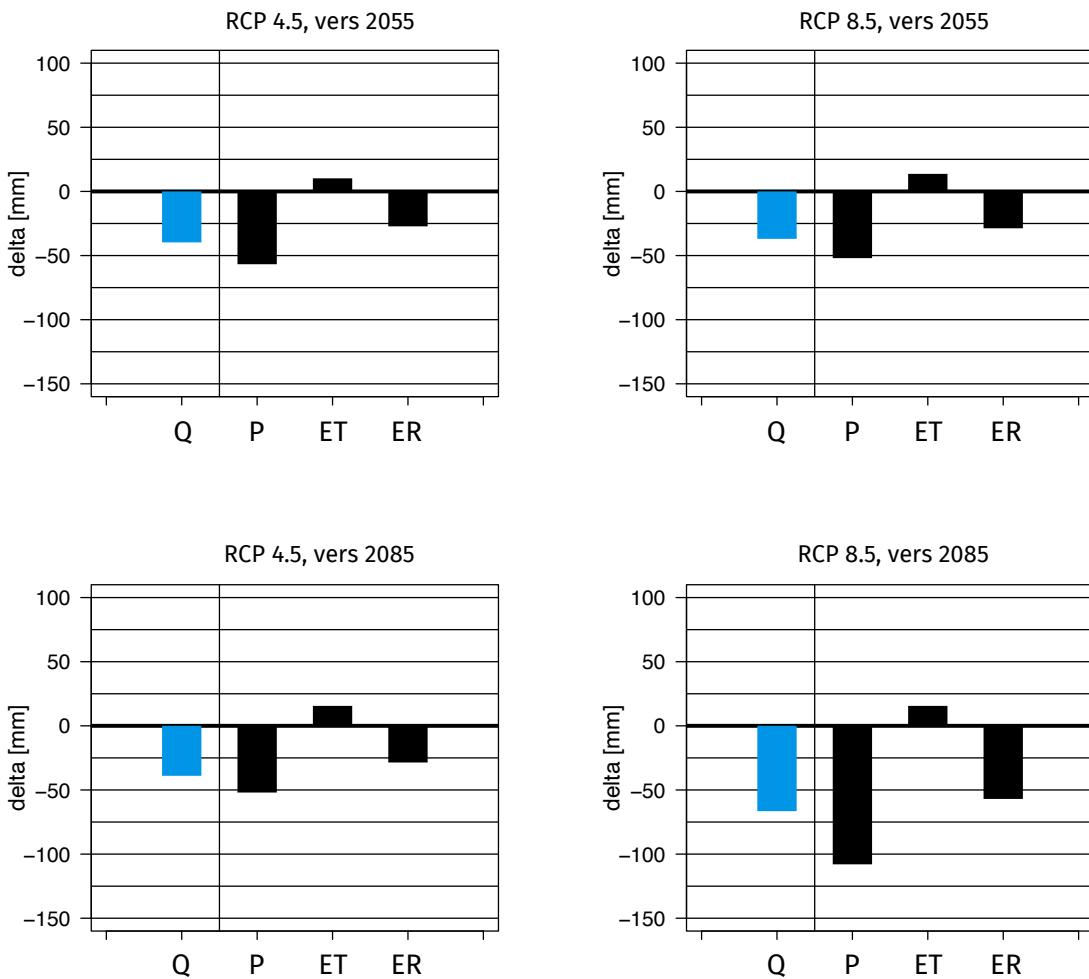


Fig. 3.59 : Comparaison des changements du bilan hydrique en été (JJA) dans le bassin versant de la Sionge@Vuippens. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

Les analyses des éléments du bilan hydrique laissent entrevoir des changements importants, notamment en hiver et en été. Examinons d'abord la situation en été au moyen de la même figure que pour le débit annuel (cf. fig. 3.59). Il convient ici de préciser que sur une base saisonnière, il n'est pas possible de supposer que l'élément de réservoir Δ_{Res} tend vers 0. L'élément de réservoir ne peut pas être quantifié et est donc inclus dans l'élément résiduel (ER), qui est par conséquent plus grand que dans le bilan annuel. La diminution des

précipitations est le facteur le plus important pour la diminution du débit estival; elle est toutefois quelque peu renforcée par l'évapotranspiration.

Ces observations sont confirmées par les figures 3.60 et 3.61 (cf. JJA), qui comparent les changements des précipitations (ΔP) aux changements du débit (ΔQ). On remarque la diminution plus importante du débit par rapport à celle des précipitations. Les valeurs médianes se trouvent en dessous de la bissectrice, ce qui met en évidence l'influence de l'augmentation de l'évapotranspiration réelle.

En hiver (DJF) par contre, les valeurs des deux scénarios d'émissions sont proches de la bissectrice. Cela signifie que les augmentations du débit sont étroitement liées aux augmentations des précipitations.

La dispersion des valeurs des différentes chaînes de modèles autour de la médiane montre avec quelle précision les différentes chaînes de modèles représentent la valeur médiane (cf. fig. 3.60 et 3.61). Prenons l'exemple de la modélisation sous RCP 4.5. En été, les chaînes de modèles concordent largement sur le signe des changements, mais résultent en des conclusions différentes quant à l'ampleur des changements. En hiver, la situation n'est pas aussi claire. Ainsi, certaines chaînes de modèles prévoient une augmentation des précipitations et du débit, d'autres une diminution. Néanmoins, la plupart des chaînes de modèles restent relativement proches des valeurs médianes. Cette dispersion des chaînes de modèles doit être prise en compte dans les réflexions sur l'incertitude de la modélisation. Dans le présent rapport, cette dispersion est représentée par les figures avec les boxplots.

Selon le diagramme de Budyko (en bas à gauche), le régime hydrique de la région PlaSud est limité énergétiquement en été au cours de la période de référence. Comme le suggèrent les médianes pour le futur moyen et lointain, cette limitation énergétique subsiste tout juste en moyenne dans le futur sous RCP 4.5. Pour certaines chaînes de modèles, on constate toutefois déjà une transition vers une limitation hydrique. Sous RCP 8.5, la situation est encore tout juste limitée énergétiquement dans l'avenir moyen, mais déjà nettement limitée hydrologiquement dans l'avenir lointain. Ceci est une indication claire que l'eau pourrait venir à manquer en été.

L'ordonnée du diagramme de Budyko décrit la part de l'évapotranspiration dans le total des précipitations. Pour la période de référence, cette part est légèrement supérieure à 60 %; l'évapotranspiration est donc la composante la plus importante du bilan hydrique. En d'autres termes, la majeure partie des précipitations s'évapore et de ce fait n'alimente pas le débit. Avec le réchauffement climatique, l'importance de l'évapotranspiration augmente encore.

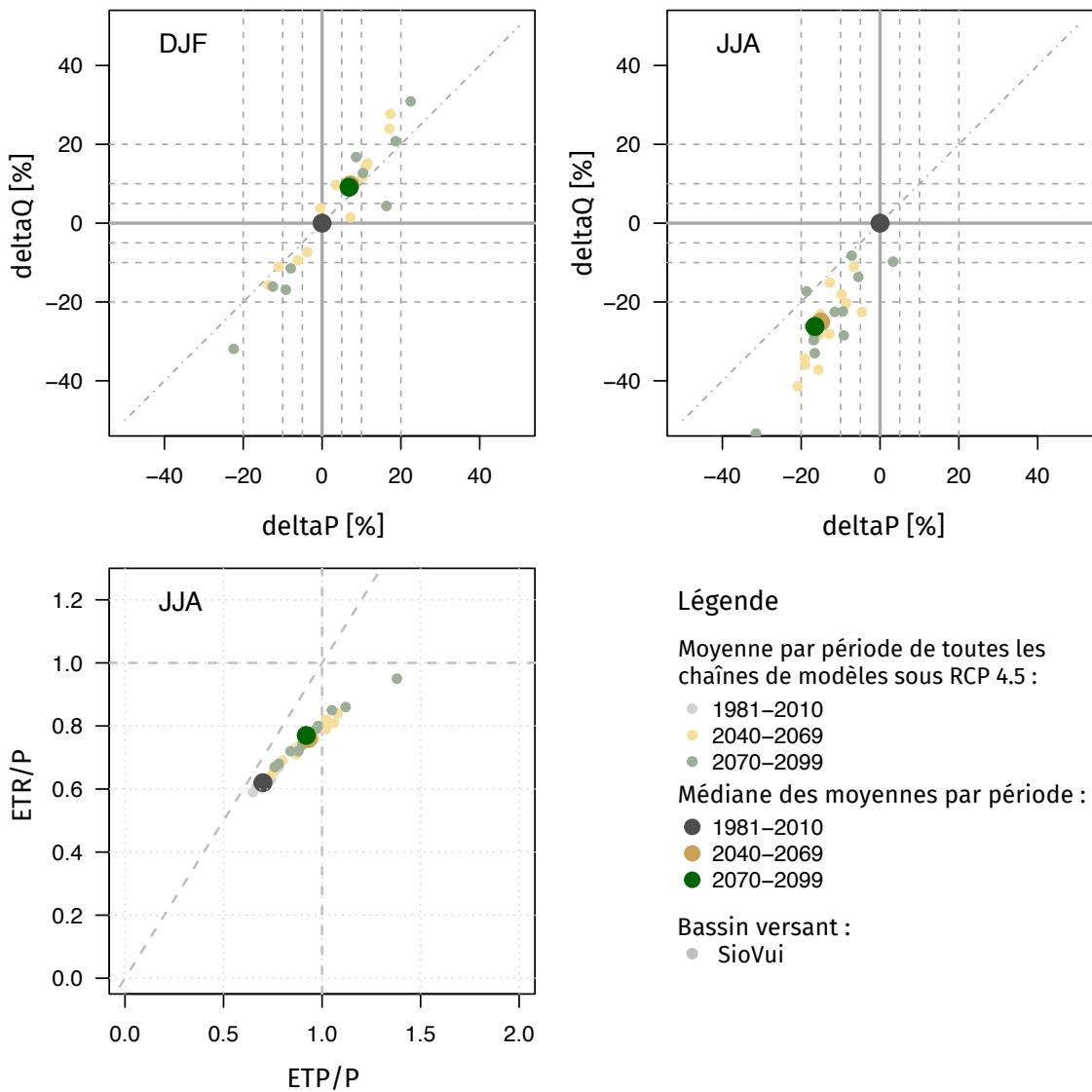


Fig. 3.60 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de la Sionge@Vuippens en hiver (DJF) et en été (JJA) sous RCP 4.5. Les deux diagrammes du haut montrent les changements relatifs des précipitations (deltaP) et du débit (deltaQ). Le diagramme de Budyko est présenté et décrit dans la partie Méthodologie. Les trois diagrammes montrent la dispersion des moyennes par période de toutes les chaînes de modèles utilisées, ainsi que la valeur médiane de ces moyennes par période.

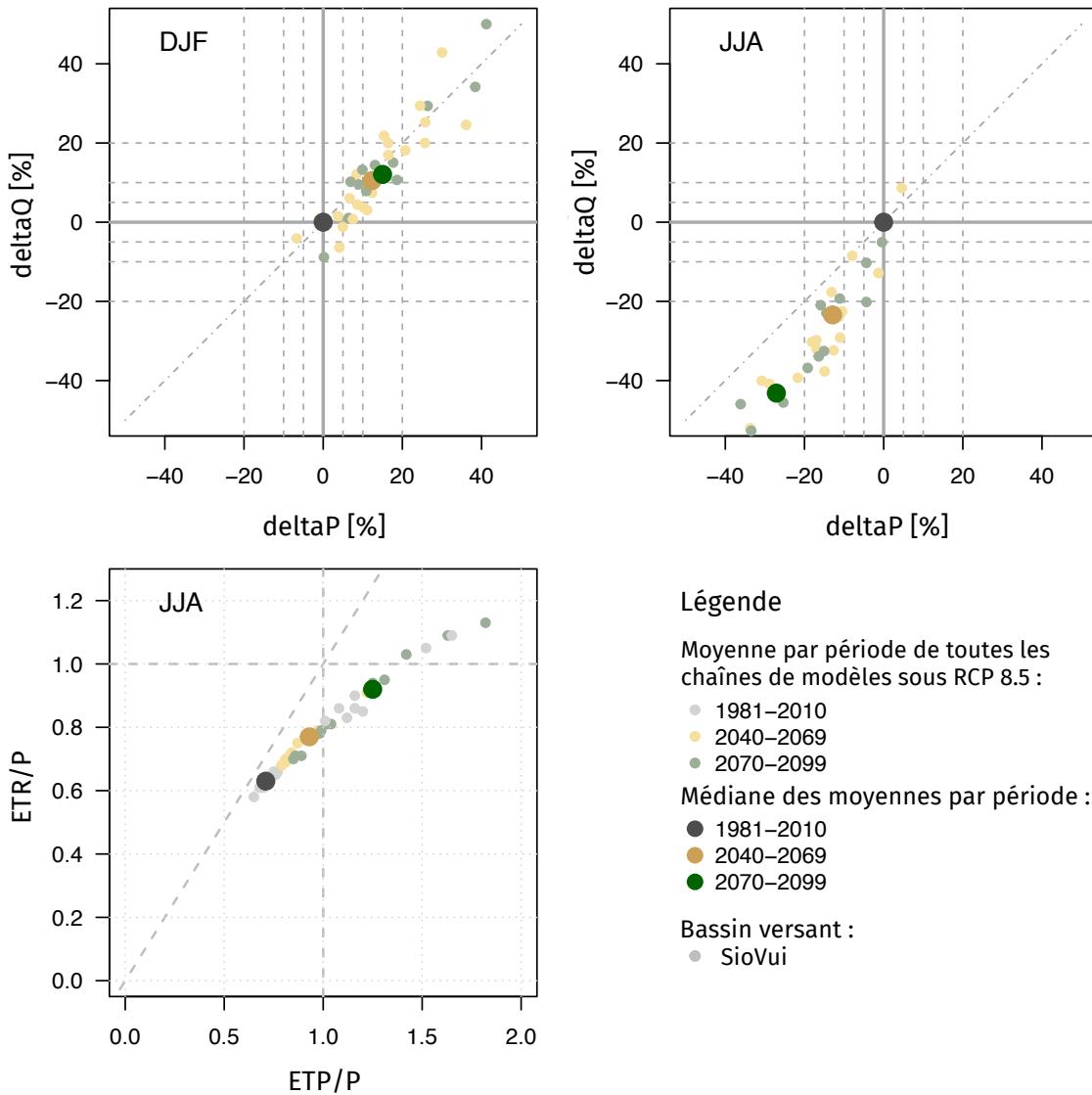


Fig. 3.61 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de la Sionge@Vuippens sous RCP 8.5

Changements futurs des plus faibles et plus importants débits journaliers

Il convient de préciser encore une fois que nous analysons ici de très petits et de très grands débits journaliers. Les très grands débits journaliers ne sont pas des crues ou des pics de crue au sens strict du terme. De telles crues se produisent à une échelle horaire et ne sauraient être saisies avec les valeurs journalières utilisées ici. En revanche, les plus petits débits sont bien saisis avec une résolution journalière, étant donné que les fluctuations dans le domaine des étiages sont très lentes. Les débits journaliers les plus faibles et les plus élevés sont décrits par ce que l'on appelle des quantiles (q). Le quantile du débit (Q_{q10}) par exemple,

indique le débit (Q) qui est atteint ou n'est pas dépassé en moyenne lors de 10 % des jours – soit 37 jours en une année.

Tab. 3.4.42 : Plus faibles et plus importants débits de la Sionge@Vuippens (SioVui). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|-------|---------------------|
| 1981-2010 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 4.9 | 7.3 | 13.7 | mm/d |
| 1981-2010 | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 2.6 | 3.8 | 7.2 | m ³ /s |
| 1981-2010 | 3.5 | 4.5 | 5.6 | 57.1 | 84.4 | 158.0 | l/s/km ² |
| 2040-2069 | -25.8 | -24.4 | -25.0 | -7.6 | -4.5 | 0.0 | % |
| 2070-2099 | -25.8 | -26.8 | -25.0 | -7.2 | -3.8 | -4.6 | % |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

Tab. 3.4.43 : Plus faibles et plus importants débits de la Sionge@Vuippens (SioVui). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|------|-------|---------------------|
| 1981-2010 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 5.0 | 7.3 | 13.9 | mm/d |
| 1981-2010 | 0.1 | 0.2 | 0.2 | 2.6 | 3.8 | 7.3 | m ³ /s |
| 1981-2010 | 3.4 | 4.5 | 5.6 | 57.3 | 84.3 | 160.8 | l/s/km ² |
| 2040-2069 | -27.1 | -27.0 | -27.1 | -4.1 | -2.6 | 0.7 | % |
| 2070-2099 | -50.0 | -53.4 | -51.1 | -10.7 | -6.2 | -4.2 | % |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ 20 [%]

La nette différence entre les changements - presque tous des diminutions - des plus faibles et des plus importants débits journaliers saute aux yeux lorsque l'on examine les deux tableaux : tous les plus faibles débits journaliers diminuent de façon très importante, avec des diminutions d'environ -27 % dans les deux périodes futures sous RCP 4.5 et des diminutions allant de -25 à -30 % dans le futur moyen et même au-delà de -50 % dans le futur lointain sous RCP 8.5. La situation d'étiage de la Sionge change donc considérablement!

Par contre, les diminutions des plus grands débits journaliers sont généralement faibles. Le plus important débit journalier Qq99 diminue moins que les autres plus importants débits journaliers.

3.4.5 Région Préalpes, Region Voralpen

Situation initiale

La région Préalpes (PreAlp) est représentée par le bassin versant de la Singine@Thörishaus, qui présente les caractéristiques suivantes :

- Superficie : 351 km²
- Altitudes :
 - Altitude minimale : 555 m
 - Altitude moyenne : 1070 m
 - Altitude maximale : 2184 m

La région Préalpes est la région du canton de Fribourg située aux plus hautes altitudes. L'utilisation du sol y est donc très différente. La part des terres arables, des espaces verts et des forêts s'élève à environ 30 % chacune.

Les valeurs hydrologiques sont généralement exprimées en millimètres. Pour le bassin versant de la Singine, cela implique que 1 mm \cong 351'000 m³.

Détermination du bilan hydrique

Selon les données de l'OFEV, la situation hydrogéologique du bassin versant de la Singine peut être évaluée comme suit¹⁶ : « Das Einzugsgebiet erstreckt sich von der Klippen-Decke bis zur mittelländischen Molasse, wobei der Gurnigel-Flysch und die subalpine Molasse durchflossen werden. In den teilweise leicht verkarsteten Gesteinen der Klippen-Decke ist die Wasserscheide lokal nicht mit Sicherheit festzulegen. Stellenweise ist im Kiesbett der Sense eine erhöhte Durchlässigkeit zu erwarten. Verluste sind auch via die Kiese möglich, die zwischen Plaffeien und Plasselb einen ehemaligen Senselauf in Richtung Saane auffüllen. Ausserhalb dieses Bereichs haben die Gesteine im Untergrund eine unterschiedliche, z.T. sehr geringe Durchlässigkeit. In Anbetracht der Ausdehnung des Einzugsgebietes spielen die hydrogeologischen Unsicherheiten keine bedeutende Rolle. »

Qu'implique donc cette caractérisation hydrogéologique pour le bilan hydrique annuel ? En ce qui concerne le caractère fermé du bilan hydrique, il est important d'indiquer que des pertes sont possibles et que de l'eau s'écoule hors du bassin versant par voie souterraine. Ceci est confirmé par les données présentées dans le tableau 3.4.44. Le bilan hydrique n'est que cohérent si l'on introduit un terme de débit souterrain :

¹⁶Schädler, B. und R. Bigler (1995) : Wasserhaushalt der hydrologischen Untersuchungsgebiete der Schweiz. Hydrologische Mitteilungen, Nr.21, Bern

$$P = Q_{\text{sup}} + Q_{\text{sout}} + ET \quad (3.18)$$

avec :

P : Précipitations

Q_{sup} : Débit superficiel

Q_{sout} : Débit souterrain

ET : Évapotranspiration

Comme en témoigne la valeur de 155 mm par année, le débit souterrain est considérable.

Tab. 3.4.44 : Comparaison des bilans hydriques annuels moyens observés et modélisés de la Singine. P : précipitations, Q_{sup} : débit superficiel, Q_{sout} : débit souterrain, ET : évapotranspiration, obs : observations. Précipitations déduites de RhiresD et débit déduit de mesures de l'OFEV, évapotranspiration reprise des données du modèle, Q_{sout} : calculé en tant qu'élément résiduel du bilan hydrique, mod : valeurs modélisées

| | Période | mm/a | | | | % | | | |
|-----|-----------|------|------------------|-------------------|-----|-----|------------------|-------------------|----|
| | | P | Q_{sup} | Q_{sout} | ET | P | Q_{sup} | Q_{sout} | ET |
| obs | 1981–2010 | 1455 | 794 | 155 | 506 | 100 | 55 | 11 | 34 |
| mod | 1981–2010 | 1474 | 828 | 151 | 506 | 100 | 56 | 10 | 34 |

Nous partons du principe que les fluctuations interannuelles de l'élément de réservoir ΔRes , qui correspond pour l'essentiel aux eaux souterraines dans le cas de la Singine, sont négligeables et ne doivent donc pas être prises en compte explicitement. Pour pouvoir effectuer les analyses de bilan, nous avons dû recourir à une valeur d'évapotranspiration modélisée. Une comparaison entre l'évapotranspiration annuelle de 506 mm calculée avec le modèle GR4J et la valeur de 511 mm issue de l'Atlas hydrologique (période 1973–1992) montre que cette valeur est très fiable.

La figure 3.62 illustre les caractéristiques saisonnières du bilan hydrique fondé sur les données d'observation : Avec une valeur d'environ 450 mm, les précipitations sont les plus importantes en été (JJA). Les précipitations printanières (MAM) et automnales (SON) sont inférieures d'environ 100 mm, tandis que les précipitations hivernales (DJF) se situent autour de 300 mm. En revanche, le débit le plus important est enregistré au printemps, ce qui reflète l'influence de la neige et de sa fonte dans ce bassin versant au régime nivo-pluvial¹⁷. Le débit estival moyen est relativement important avec une valeur de 200 mm. Enfin, le

¹⁷<https://atlashydrologique.ch/produits/version-imprimee/cours-d-eau-et-lacs/planche-5-2>

caractère saisonnier de l'évapotranspiration résultant du bilan radiatif se manifeste par de faibles valeurs pendant le semestre d'hiver et de grandes valeurs pendant le semestre d'été.

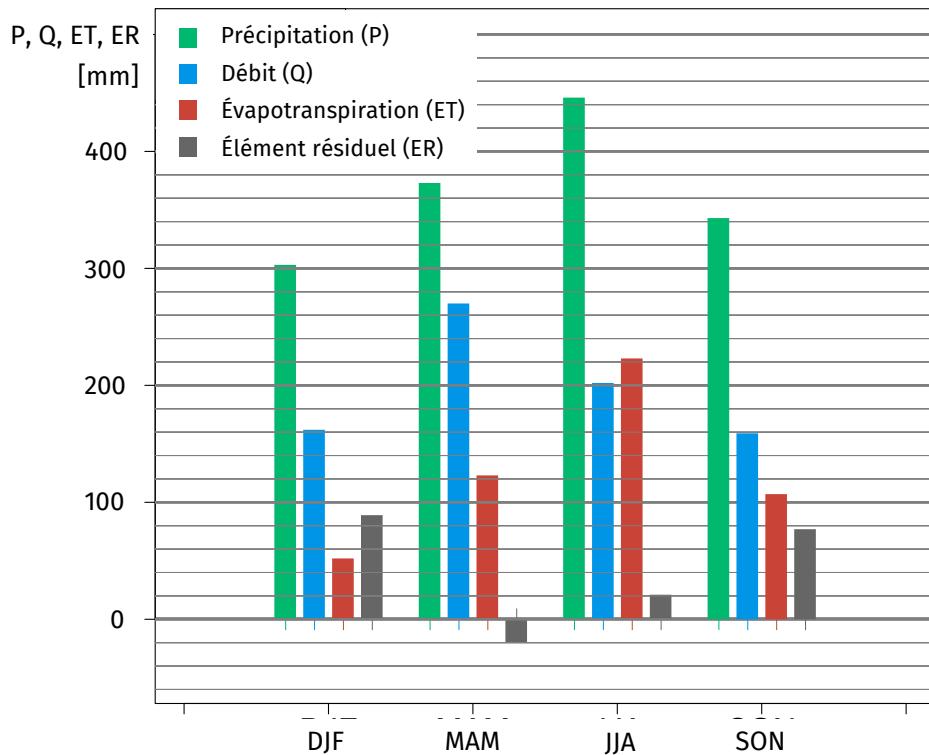


Fig. 3.62 : Bilan hydrique saisonnier moyen de la Singine pour la période 1981–2010 sur la base des données d'observation

Évaluation de la qualité des modélisations

Ci-dessous, la qualité du modèle GR4J est évaluée sous différents angles.

1. Le modèle reproduit très bien le bilan hydrique annuel observé dans son ensemble (cf. tab. 3.4.44).
2. Le tableau suivant présente la qualité avec laquelle GR4J reproduit les précipitations (P) et le débit superficiel (MQ) sur une base annuelle et saisonnière pour la période de référence 1981–2010. Une distinction est faite entre les deux scénarios d'émissions. Les précipitations sont toujours très bien reproduites. Il en va de même pour le débit annuel. En hiver (DJF) et au printemps (MAM), la qualité de la modélisation est bonne à très bonne pour le débit. Elle est suffisante pour les deux autres saisons.

Tab. 3.4.45 : Comparaison des valeurs saisonnières observées et modélisées des précipitations (P) et du débit moyen superficiel (MQ) de la Singine pour la période 1981–2010 et selon les deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

| | | RCP 4.5 | | RCP 8.5 | |
|-------|--------|---------|-----|---------|-----|
| | | P | MQ | P | MQ |
| Année | CH2018 | 1469 | 826 | 1472 | 828 |
| Année | OBS | 1466 | 794 | 1466 | 794 |
| Année | Δ mm | 3 | 32 | 6 | 34 |
| Année | Δ% | 0 | 4 | 0 | 4 |
| DJF | CH2018 | 303 | 167 | 304 | 170 |
| DJF | OBS | 303 | 162 | 303 | 162 |
| DJF | Δ mm | 0 | 5 | 1 | 8 |
| DJF | Δ% | 0 | 3 | 0 | 5 |
| MAM | CH2018 | 372 | 255 | 375 | 253 |
| MAM | OBS | 373 | 270 | 373 | 270 |
| MAM | Δ mm | -1 | -15 | 2 | -17 |
| MAM | Δ% | 0 | -6 | 0 | -6 |
| JJA | CH2018 | 454 | 230 | 453 | 231 |
| JJA | OBS | 446 | 202 | 446 | 202 |
| JJA | Δ mm | 8 | 28 | 7 | 29 |
| JJA | Δ% | 2 | 14 | 2 | 14 |
| SON | CH2018 | 339 | 177 | 342 | 178 |
| SON | OBS | 343 | 159 | 343 | 159 |
| SON | Δ mm | -4 | 18 | -1 | 19 |
| SON | Δ% | -1 | 11 | 0 | 12 |

3. Dans le cadre du projet CH2018, Muelchi et al. (2021)¹⁸ ont également réalisé des modélisations hydrologiques dans le contexte du réchauffement climatique pour certains bassins versants de Suisse. Les résultats de ces modélisations sont publiés dans l'atlas hydrologique¹⁹. Ils ont également utilisé comme données d'entrée les chaînes de modèles CH2018, qui ne sont toutefois pas tout à fait identiques à celles utilisées ici. De même, la période considérée pour le futur moyen n'est pas tout à fait identique : 2045–2074 chez Muelchi et al.; 2040–2069 pour l'étude fribourgeoise. Malgré ces réserves, la comparaison des deux modélisations est intéressante, car Muelchi et al. utilisent le modèle PREVAH²⁰, un modèle hydrologique plus complexe que GR4J.

¹⁸Muelchi, R., Rössler, O., Schwanbeck, J., Weingartner, R. und Martius, O. (2021). River runoff in Switzerland in a changing climate-runoff regime changes and their time of emergence. In : Hydrology and Earth System Sciences 25.6, p. 3071–3086. DOI : 10.5194/hess-25-3071-2021

¹⁹<https://hydromapscc.ch/>

²⁰Viviroli, D., Zappa, M., Gurtz, J. et Weingartner, R. (2009). An introduction to the hydrological modelling system PREVAH. In : Environmental Modelling and Software 24.10. DOI : 10.1016/j.envsoft.2009

La comparaison des modèles dans la fig. 3.63 montre que les résultats des deux modélisations indépendantes concordent très bien.

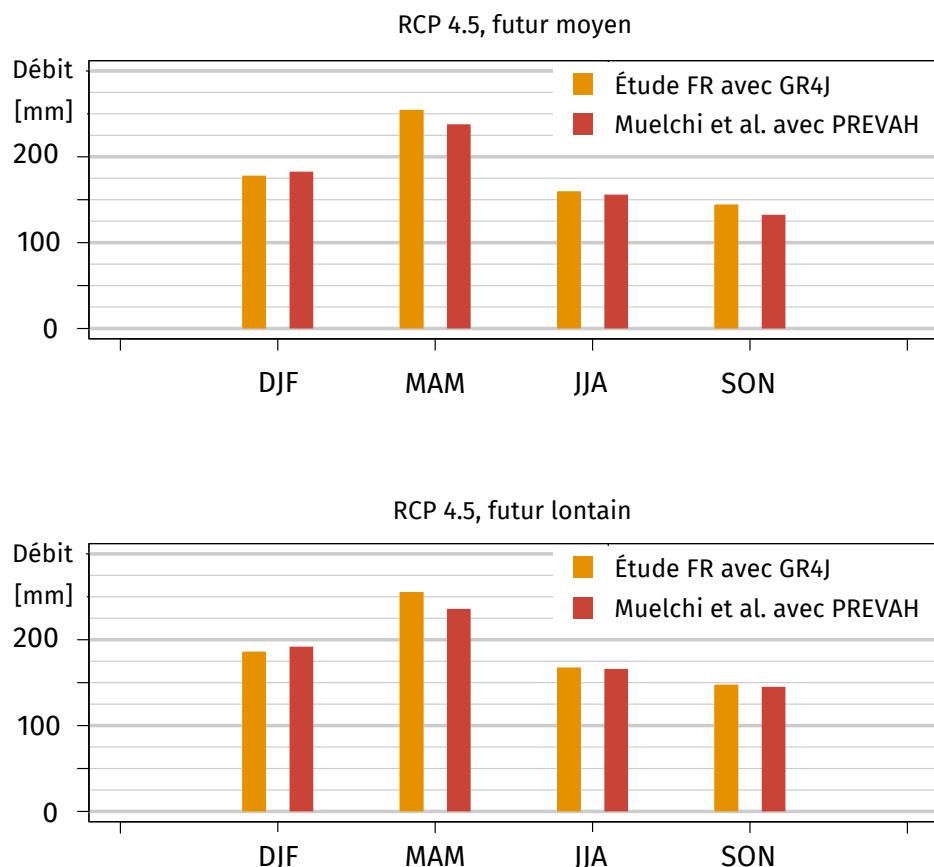


Fig. 3.63 : Comparaison des débits saisonniers moyens de la Singine modélisés à l'aide de différents modèles et sur la base de données d'entrée similaire sous RCP 4.5

Conclusion : Dans l'ensemble, les différentes étapes de validation démontrent la capacité du modèle GR4J à reproduire les conditions hydrologiques de la Singine, de sorte que les résultats puissent être utilisés pour l'analyse des changements futurs.

Changements des précipitations moyennes

Les tableaux 3.4.46 et 3.4.47 décrivent les changements relatifs des précipitations moyennes, tandis que les deux figures 3.64 et 3.65 montrent d'une part les changements absolus et indiquent d'autre part la dispersion des chaînes de modèles et donc les incertitudes des modélisations. Les changements des précipitations annuelles sont tous inférieurs à $\pm 5\%$, ce qui signifie que les précipitations annuelles moyennes ne changent

pratiquement pas dans le futur. En raison des grandes valeurs initiales, les faibles changements relatifs signifient toutefois d'importants changements absolus.

D'un point de vue saisonnier, les précipitations augmentent en hiver et au printemps. Ces augmentations se renforcent vers la fin du siècle. En été, les précipitations diminuent systématiquement. Sous RCP 4.5, les changements entre le futur moyen et le futur lointain sont faibles. Sous RCP 8.5 en revanche, les diminutions sont importantes, avec une grande différence entre le futur moyen et le futur lointain. Enfin, les changements observés en automne offrent un tableau peu différencié.

Tab. 3.4.46 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de la Singine@Thörishaus. Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1467.3 | 304.8 | 372.3 | 453.5 | 343.1 | mm |
| 2040-2069 | -3.2 | 4.8 | 2.2 | -11.9 | -2.1 | % |
| 2070-2099 | 0.2 | 8.1 | 4.9 | -9.7 | 1.3 | % |

Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▢ 5 ▣ 10 □ 20 ▢ [%]

Tab. 3.4.47 : Précipitations annuelles et saisonnières moyennes de la Singine@Thörishaus. Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|-----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 1471.0 | 303.9 | 375.0 | 452.6 | 341.3 | mm |
| 2040-2069 | 0.5 | 11.1 | 6.8 | -7.5 | 1.6 | % |
| 2070-2099 | -2.0 | 12.0 | 7.3 | -24.4 | -6.1 | % |

Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▢ 5 ▣ 10 □ 20 ▢ [%]

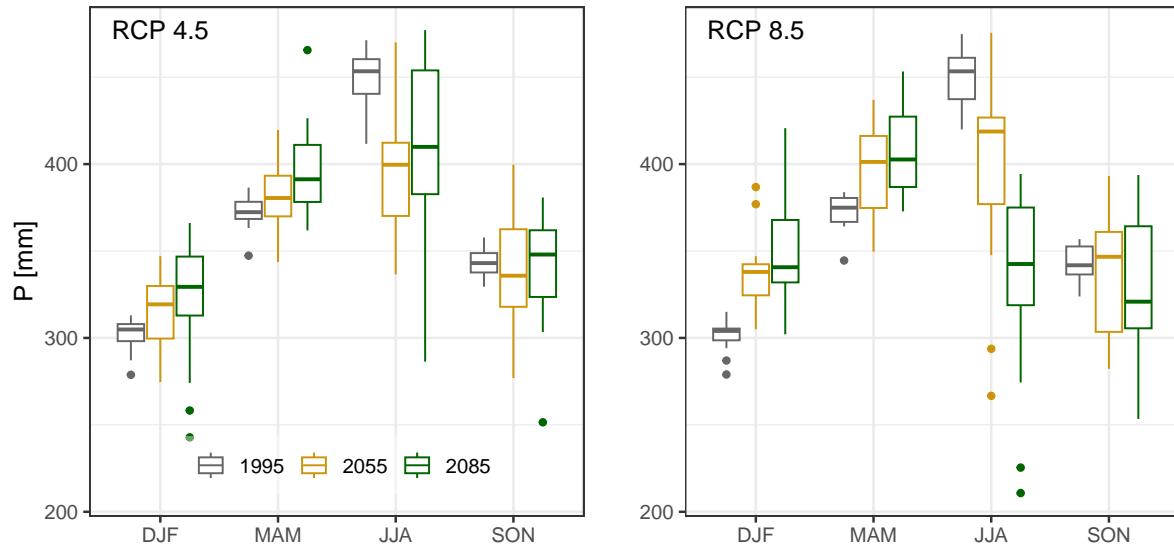


Fig. 3.64 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des sommes de précipitations saisonnières moyennes à long terme dans le bassin versant de la Singe pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

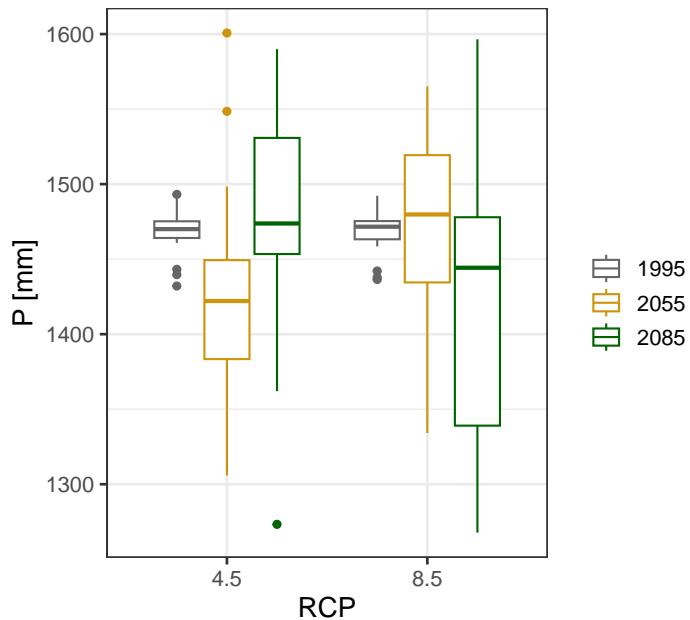


Fig. 3.65 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des précipitations annuelles moyennes à long terme dans le bassin versant de la Singine pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements des débits moyens

La région PreAlp est caractérisée par d'importants changements de débit suivant un schéma bien défini (cf. tab. 3.4.48 et tab. 3.4.49 ainsi que fig. 3.66 et fig. 3.67).

Les débits saisonniers moyens diminuent pour toutes les saisons, sauf pour l'hiver. Ces baisses saisonnières ont pour conséquence une diminution du débit annuel moyen de l'ordre de -5 à -15 %. Dans le futur lointain, le débit annuel diminue significativement plus sous RCP 8.5 que sous RCP 4.5. Une diminution relative d'environ -15 % correspond à une diminution absolue d'environ 120 mm.

On notera l'évolution contrastée des débits moyens en hiver et en été : en hiver, les débits augmentent de jusqu'à 20 %, les différences entre les deux scénarios d'émissions étant relativement faibles. En été, la diminution du débit dépasse les -20 % sous RCP 4.5 et atteint même près de -40 % sous RCP 8.5. On constate des diminutions en automne également. Sous RCP 4.5, elles sont plus prononcées entre la période de référence et le futur moyen, sous RCP 8.5, elles s'accentuent entre le futur moyen et le futur lointain.

Tab. 3.4.48 : Débits annuels et saisonniers moyens de la Singine@Thörishaus. Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 824.9 | 167.0 | 255.5 | 229.9 | 177.0 | mm |
| 2040-2069 | -8.8 | 9.8 | -5.7 | -21.0 | -9.3 | % |
| 2070-2099 | -5.8 | 14.8 | -5.4 | -17.1 | -7.2 | % |
| Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▲ 5 ▴ 10 ▢ 20 ▤ [%] | | | | | | |

Tab. 3.4.49 : Débits annuels et saisonniers moyens de la Singine@Thörishaus. Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 828.5 | 169.7 | 252.8 | 230.9 | 177.9 | mm |
| 2040-2069 | -6.6 | 18.8 | -2.2 | -20.6 | -15.4 | % |
| 2070-2099 | -15.4 | 13.4 | -6.1 | -38.7 | -35.9 | % |
| Légende : ■ -20 □ -10 ▨ -5 ▲ 5 ▴ 10 ▢ 20 ▤ [%] | | | | | | |

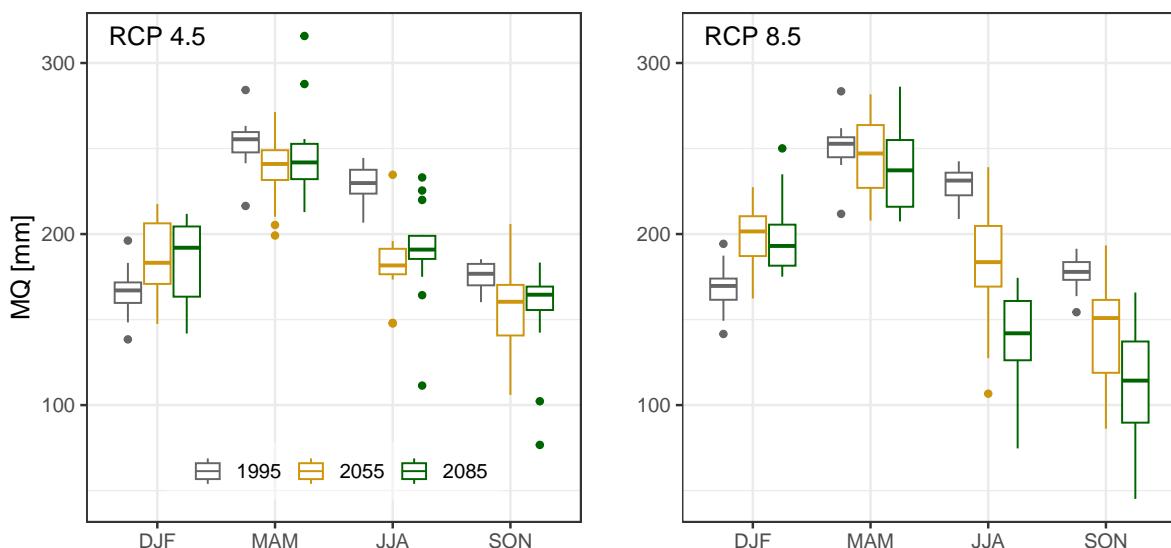


Fig. 3.66 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits saisonniers moyens à long terme de la Singine pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

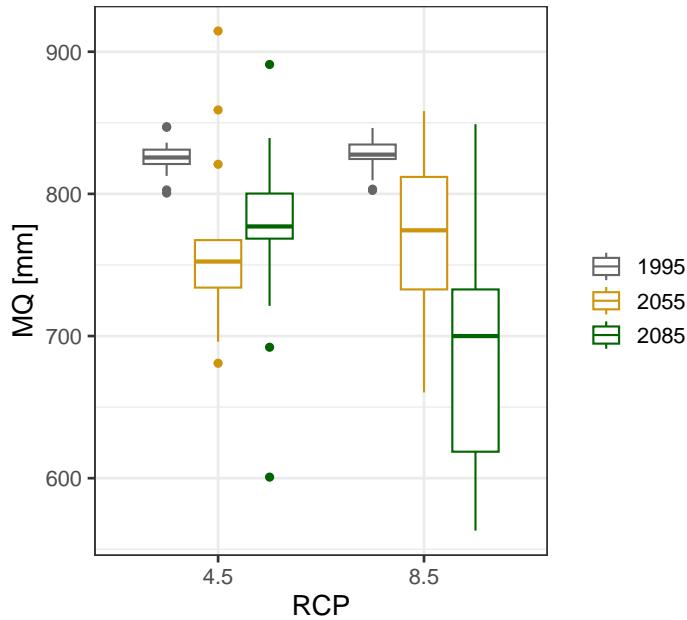


Fig. 3.67 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des débits annuels moyens à long terme de la Singine pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

La figure 3.68 visualise d'une part les écarts entre les valeurs médianes et positionne d'autre part les valeurs médianes futures dans la zone de dispersion des valeurs des années individuelles de la période de référence 1981–2010. En hiver (DJF), les médianes futures se situent au-dessus de la boîte, ce qui signifie que les valeurs annuelles de la période de référence sont majoritairement inférieures aux valeurs des médianes futures. Au printemps (MAM), les changements absolu sont faibles. En été (JJA), les médianes futures sont inférieures à au moins 75 % des valeurs des années individuelles de la période de référence.

On constate par ailleurs la diminution extrême du débit en été et en automne dans le futur lointain sous RCP 8.5. Les valeurs annuelles individuelles seront dispersées autour de ces très petits débits médians. Il faut donc s'attendre à de faibles débits pour certaines années.

Au cours de la période de référence, les débits saisonniers moyens les plus faibles sont enregistrés aussi bien en hiver qu'en automne. Avec le réchauffement climatique, le minimum saisonnier interviendra en automne.

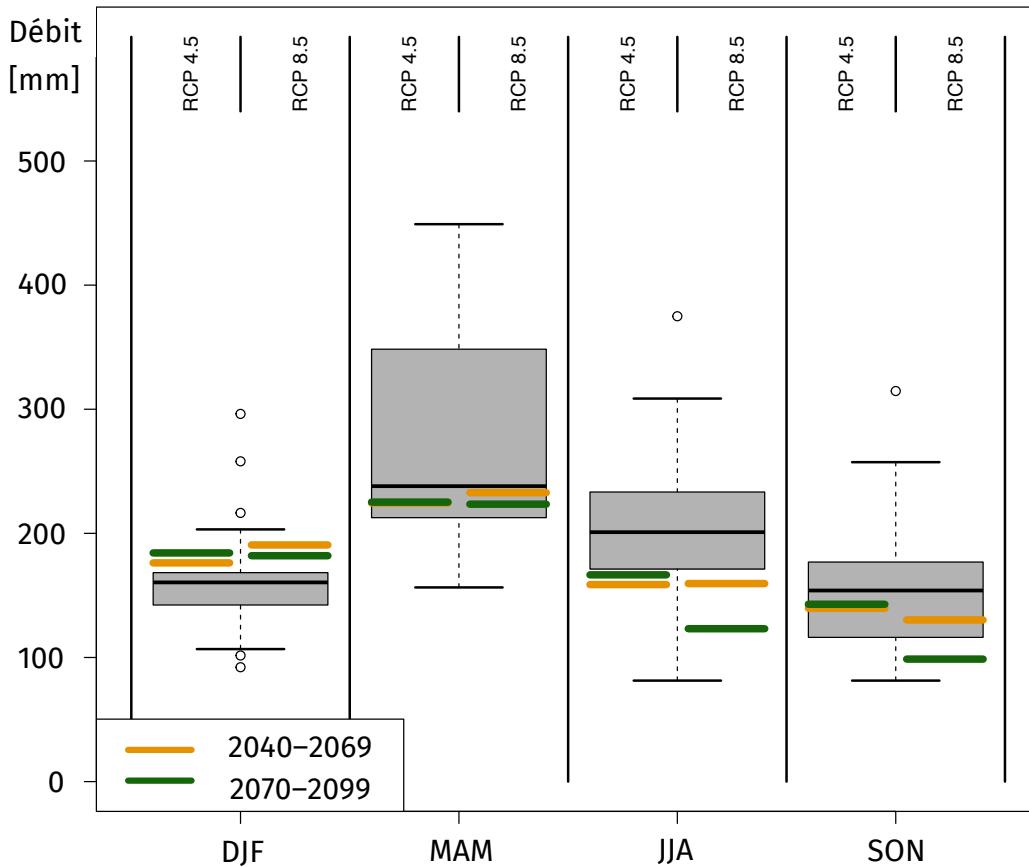


Fig. 3.68 : Distribution des débits saisonniers de la Singine pour la période 1981–2010, déduits des observations de l’OFEV, comparés aux débits moyens du futur moyen et du futur lointain pour les deux scénarios d’émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de l’évapotranspiration réelle moyenne

L’évapotranspiration réelle présente une forte saisonnalité avec de faibles valeurs en hiver, des valeurs élevées au printemps et en automne et des valeurs très élevées en été (cf. fig. 3.62). Sous l’effet du réchauffement climatique, l’évapotranspiration annuelle moyenne augmente de 8 à 12 % sous RCP 4.5 et de 13 à 22 % sous RCP 8.5, ce qui représente une augmentation pouvant dépasser les 100 mm par an (tab. 3.4.50 et 3.4.51). D’un point de vue saisonnier, l’évapotranspiration moyenne augmente de 7 à 16 % sous RCP 4.5 et de 11 à 33 % sous RCP 8.5. Comme les valeurs saisonnières initiales sont petites en hiver et grandes à très grandes le reste de l’année, les augmentations relatives similaires conduisent à des augmentations absolues très différentes selon les saisons (cf. fig. 3.69).

Tab. 3.4.50 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de la Singine@Thörishaus (SenTho) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|--|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 507.3 | 52.0 | 121.4 | 222.7 | 107.7 | mm |
| 2040-2069 | 8.6 | 14.0 | 9.8 | 8.2 | 6.8 | % |
| 2070-2099 | 11.5 | 15.8 | 12.8 | 10.7 | 10.2 | % |
| Légende : ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

Tab. 3.4.51 : Évapotranspiration réelle dans le bassin versant de la Singine@Thörishaus (SenTho) et changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| Période | Année | DJF | MAM | JJA | SON | Unité |
|--|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| 1981-2010 | 507.3 | 52.0 | 121.4 | 222.7 | 106.8 | mm |
| 2040-2069 | 12.9 | 17.5 | 13.5 | 12.7 | 11.1 | % |
| 2070-2099 | 21.6 | 33.3 | 25.6 | 21.3 | 17.9 | % |
| Légende : ■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%] | | | | | | |

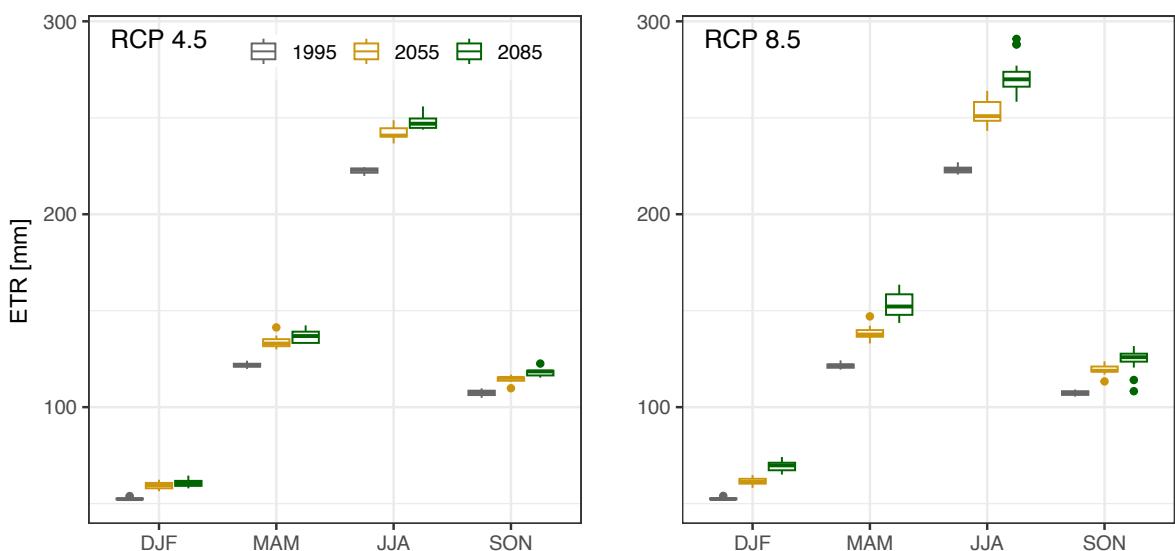


Fig. 3.69 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation des sommes d'évapotranspiration saisonnières moyennes à long terme dans le bassin versant de la Singine pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

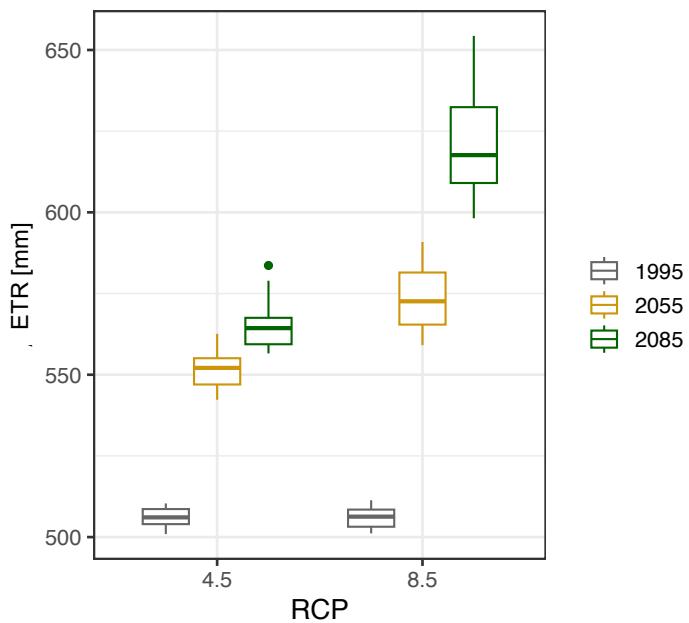


Fig. 3.70 : Dispersion des valeurs moyennes des chaînes de modèles utilisées pour la modélisation de l'évapotranspiration annuelle moyenne à long terme dans le bassin versant de la Singine pour la période de référence 1981–2010, le futur moyen et le futur lointain sur la base des deux scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5

Changements de la neige

Comme le soulignent les valeurs des deux tableaux 3.4.52 et 3.4.53, la neige joue un rôle important dans le régime d'écoulement nivo-pluvial de la Singine. Durant la période de référence 1981–2010, la fonte des neiges contribue en moyenne à hauteur d'environ 13 % au débit total. D'ici la fin du siècle, cette part se réduit à 10 % sous RCP 4.5 et à 8,2 % sous RCP 8.5. La fonte des neiges continuera donc à jouer un rôle de soutien dans le régime hydrique de la Singine. Néanmoins, le recul de sa contribution entraînera probablement une diminution des débits moyens au printemps (MAM).

Tab. 3.4.52 : Rôle de la neige dans le bassin versant de la Singine@Thörishaus (SenTho). Part moyenne modélisée de la neige fraîche dans les précipitations et part moyenne modélisée de l'eau de fonte dans le débit total, calculées sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5. Les valeurs se réfèrent à une année civile.

| | Psol/Ptot ¹ | Qmelt/Qtot ² | |
|-----------|------------------------|-------------------------|---|
| 1981-2010 | 15.9 | 12.5 | % |
| 2040-2069 | 12.0 | 11.5 | % |
| 2070-2099 | 10.4 | 10.0 | % |

¹ Part de la neige dans les précipitations totales

² Part de la neige dans le débit total

Tab. 3.4.53 : Rôle de la neige dans le bassin versant de la Singine@Thörishaus (SenTho). Part moyenne modélisée de la neige fraîche dans les précipitations et part moyenne modélisée de l'eau de fonte dans le débit total, calculées sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5. Les valeurs se réfèrent à une année civile.

| | Psol/Ptot ¹ | Qmelt/Qtot ² | |
|-----------|------------------------|-------------------------|---|
| 1981-2010 | 15.9 | 12.8 | % |
| 2040-2069 | 10.9 | 10.3 | % |
| 2070-2099 | 6.7 | 8.2 | % |

¹ Part de la neige dans les précipitations totales

² Part de la neige dans le débit total

Considérations sur le bilan hydrique

Dans ce chapitre, nous examinons les changements des éléments du bilan hydrique dans leur interaction. Pour ce faire, les changements relatifs des précipitations (P), du débit (Q) et de l'évapotranspiration réelle (ET) indiqués dans les tableaux ci-dessus sont appliqués aux observations de la période de référence 1981-2010 (cf. tab. 3.4.44). L'objectif principal est de comprendre les changements du débit dans le contexte des changements des autres éléments du bilan hydrique. Dans cette optique, on considère que :

$$\Delta Q = \Delta P - \Delta ET - \Delta ER \quad (3.19)$$

Les signes doivent impérativement être pris en compte lors du calcul de cette équation. Ainsi, la relation suivante s'applique au débit annuel sous RCP 4.5 dans le futur moyen (vers 2055, cf. fig. 3.71.) :

$$-61 = -41 - 43 - (-23) [mm] \quad (3.20)$$

L'équation démontre que la variation du débit annuel (-61 mm) est due à parts égales aux variations des précipitations annuelles (-41 mm) et de l'évapotranspiration annuelle (43 mm). Comme le montre la figure 3.71, il s'agit là toutefois d'une exception. Dans le futur lointain sous RCP 4.5 et en général sous RCP 8.5, l'augmentation de l'évapotranspiration est le principal moteur de la diminution du débit. En d'autres termes, même si les précipitations ne diminuent pas dans le futur, le débit continuera à diminuer en raison du réchauffement climatique, qui entraîne des taux d'évapotranspiration élevés. Ce phénomène se poursuivra jusqu'à ce que l'évapotranspiration réelle soit limitée par le manque d'eau disponible dans le sol.

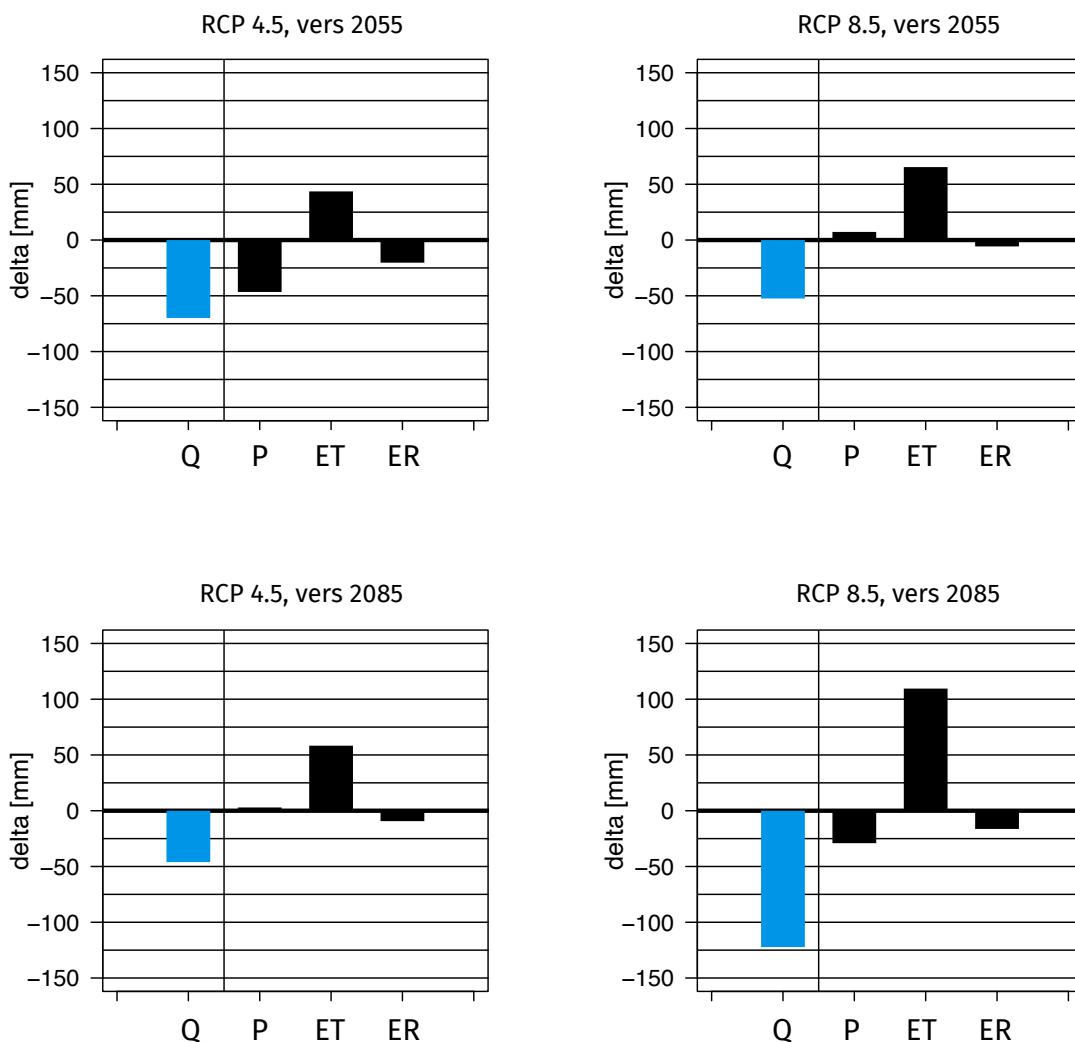


Fig. 3.71 : Comparaison des changements du bilan annuel dans le bassin versant de la Singine@Thörishaus. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

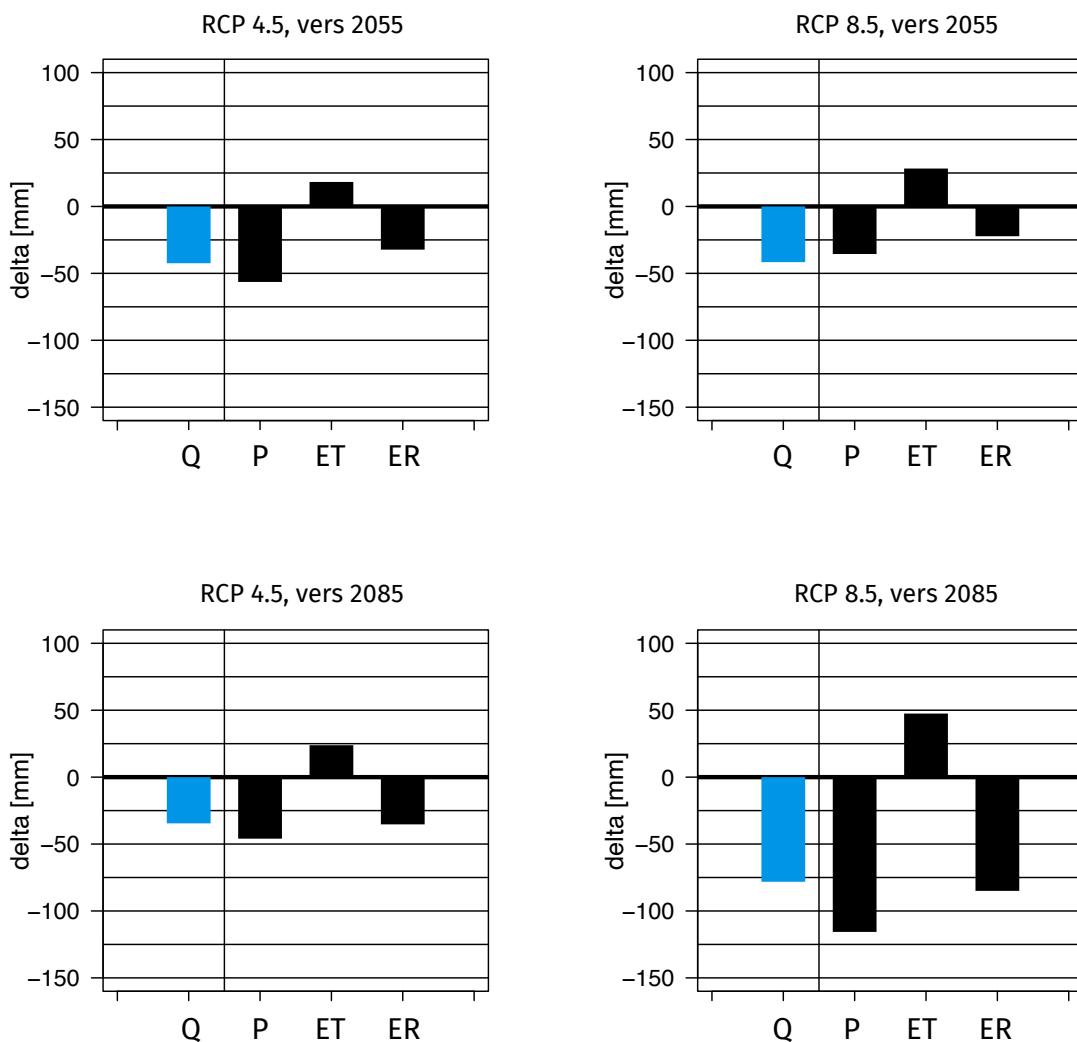


Fig. 3.72 : Comparaison des changements du bilan hydrique en été (JJA) dans le bassin versant de la Sингine@Thörishaus. Les colonnes indiquent l'ampleur et le signe des changements (augmentations ou diminutions) en mm/an. La figure décrit également la contribution des changements des précipitations (P), de l'évapotranspiration (ET) ainsi que de l'élément résiduel (ER) aux changements du débit (Q, colonne bleue). Le bilan est décrit par l'équation suivante : $dQ = dP - dET - dER$ (d : changement en mm).

Les analyses des éléments du bilan hydrique permettent de mettre en évidence des changements importants, principalement en hiver et en été. Examinons d'abord la situation en été à l'aide du même diagramme que pour le débit annuel (cf. fig. 3.72). Il convient de préciser ici que sur une base saisonnière, il n'est pas possible de supposer que l'élément de réservoir Δ_{Res} tend vers 0. L'élément de réservoir ne peut pas être quantifié et est donc inclus dans l'élément résiduel (ER), qui est par conséquent beaucoup plus important

que dans le bilan annuel. La diminution des précipitations est le facteur le plus important pour la diminution du débit estival; elle est toutefois considérablement renforcée par l'évapotranspiration, notamment dans le futur lointain sous RCP 8.5. Ces observations sont confirmées par les figures 3.73 et 3.74 (cf. JJA), qui comparent les changements des précipitations (ΔP) aux changements du débit (ΔQ). On remarque la diminution plus importante du débit par rapport à celle des précipitations. Les valeurs médianes se trouvent en dessous de la bissectrice, ce qui met en évidence l'influence de l'augmentation de l'évapotranspiration réelle.

En hiver (DJF) également, l'augmentation du débit est contrôlée de manière plus ou moins prononcée par les précipitations. Sous RCP 4.5, l'augmentation du débit est plus importante que l'augmentation des précipitations aussi bien dans le futur moyen que dans le futur lointain. Sous RCP 8.5, cela ne vaut que pour le futur moyen. Il est difficile d'en expliquer la cause de manière définitive. Le coefficient de débit, qui décrit la part des précipitations dans le débit, pourrait jouer un rôle. Pour la période de référence, il prend les valeurs suivantes :

Année : 0.33

DJF : 0.51

MAM : 0.42

JJA : 0.19

SON : 0.26

En raison de la saturation des sols, le coefficient de débit est plus important en hiver (DJF). Par conséquent, une quantité plus importante d'eau contribue au débit pour un même apport en précipitations que pendant les autres saisons, ce qui entraîne une amplification accrue du débit par rapport à l'augmentation des précipitations. Dans le futur lointain sous RCP 8.5, l'évapotranspiration accrue annule plus ou moins cet effet, de sorte que la médiane se situe alors sur la bissectrice.

La dispersion des valeurs des différentes chaînes de modèles autour de la médiane montre avec quelle précision les différentes chaînes de modèles représentent la valeur médiane (Abb. 3.73 et 3.74) . Prenons l'exemple de la modélisation sous RCP 4.5. En été, les chaînes de modèles concordent largement sur le signe des changements, mais résultent en des conclusions différentes quant à l'ampleur des changements. En hiver, la situation n'est pas aussi claire. Ainsi, certaines chaînes de modèles prévoient une augmentation des précipitations et du débit, d'autres une diminution. Néanmoins, la plupart des chaînes de modèles restent relativement proches des valeurs médianes. Cette dispersion des chaînes de modèles doit être prise en compte dans les réflexions sur l'incertitude de la modélisation. Elle est également représentée par les boxplots des différents éléments du bilan hydrique (cf. p. ex. fig. 3.67).

Selon le diagramme de Budyko (en bas à gauche), le régime hydrique de la région PreAlp est limité énergétiquement en été durant la période de référence. Cette limitation énergétique persistera dans le futur,

indépendamment du scénario d'émissions. Malgré les diminutions de débit constatées, il ne devrait donc pas y avoir de problèmes majeurs de pénurie d'eau en été au cours d'une année moyenne.

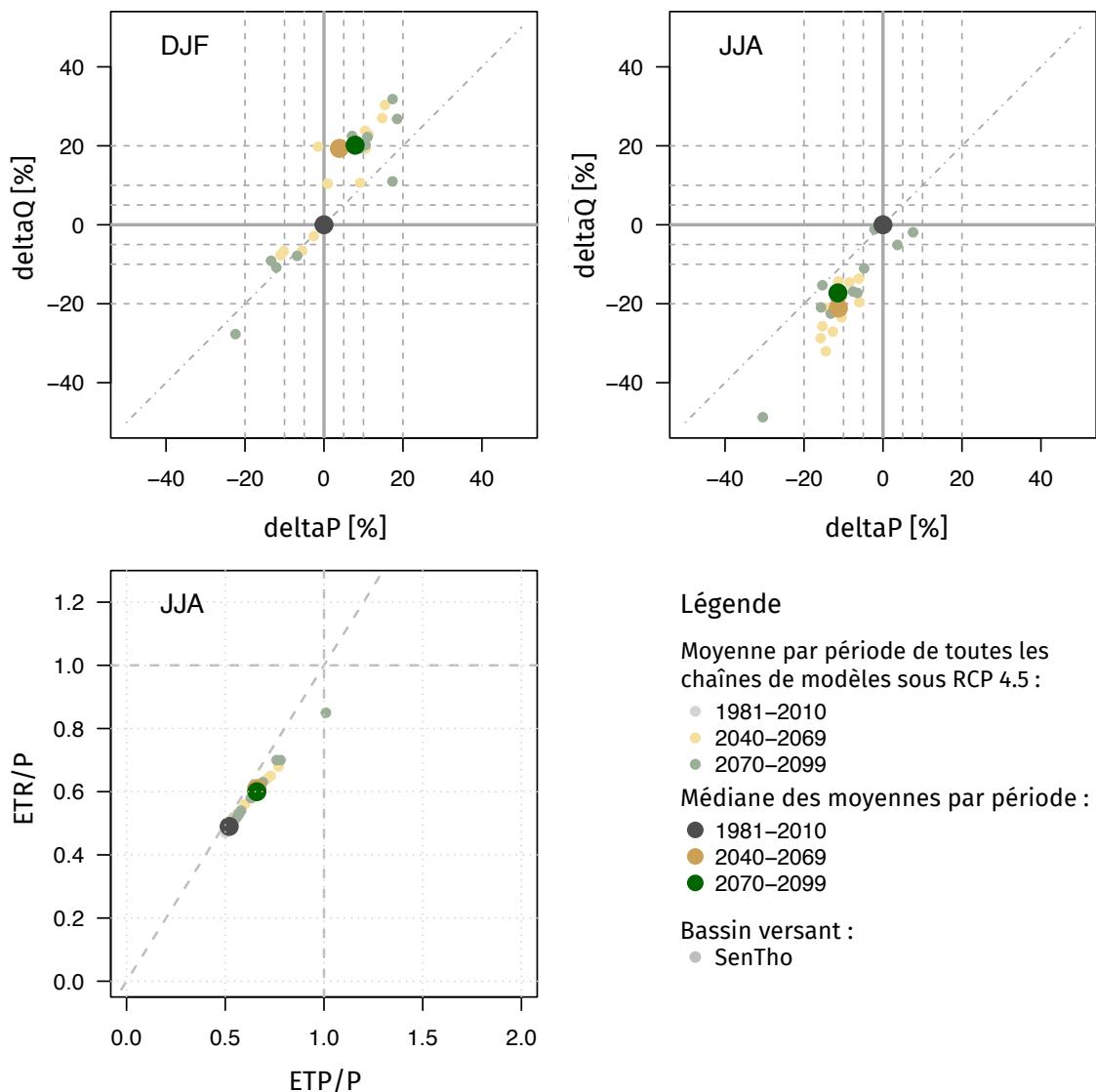


Fig. 3.73 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de la Singine@Thörishaus en hiver (DJF) et en été (JJA) sous RCP 4.5. Les deux diagrammes du haut montrent les changements relatifs des précipitations (deltaP) et du débit (deltaQ). Le diagramme de Budyko est présenté et décrit dans la partie Méthodologie. Les trois diagrammes montrent la dispersion des moyennes par période de toutes les chaînes de modèles utilisées, ainsi que la valeur médiane de ces moyennes par période.

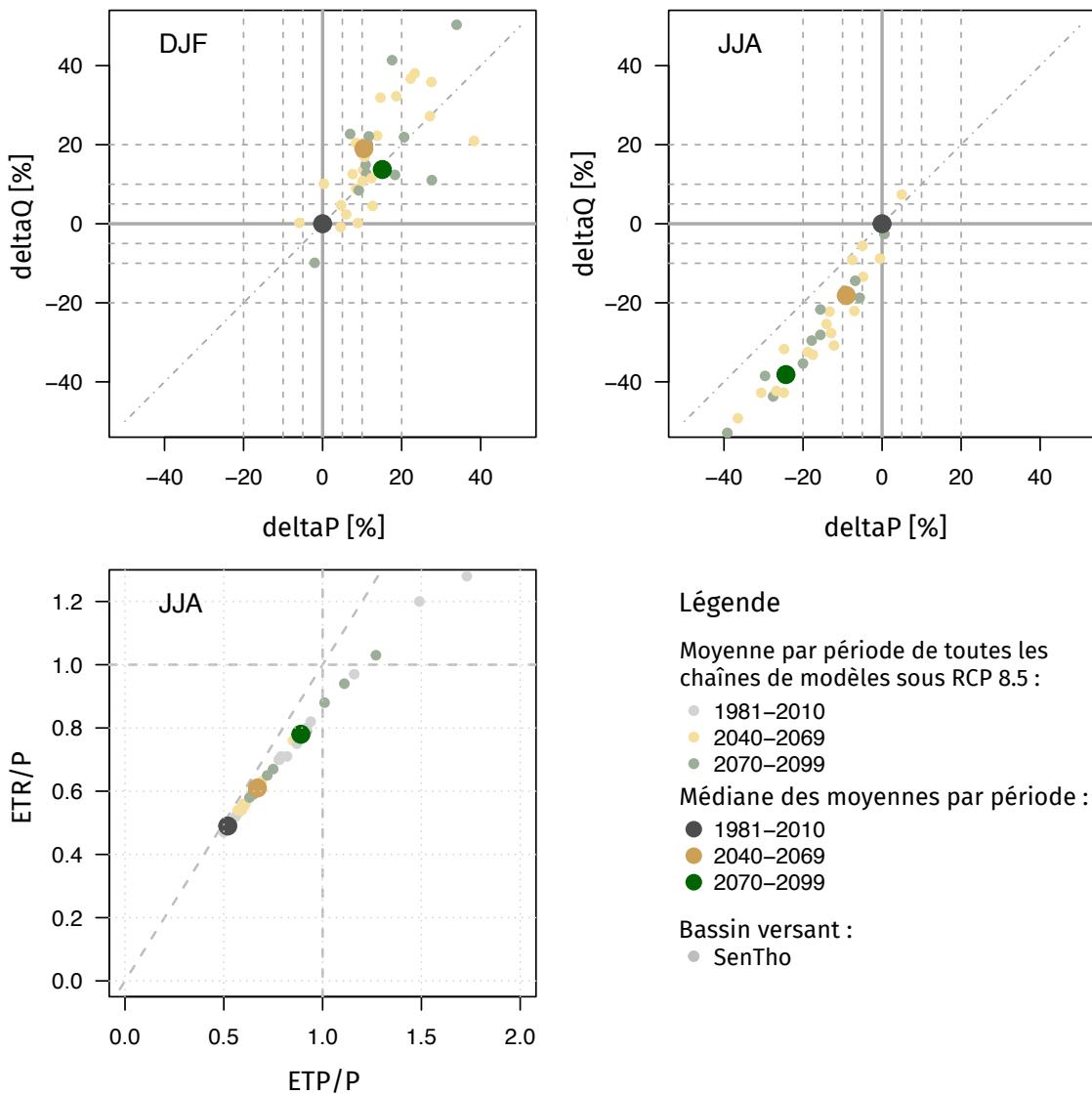


Fig. 3.74 : Diagrammes illustrant le bilan hydrique dans le bassin versant de la Singine@Thörishaus sous RCP 8.5

Changements futurs des plus faibles et plus importants débits journaliers

Il convient de préciser encore une fois que nous analysons ici de très petits et de très grands débits journaliers. Les très grands débits journaliers ne sont pas des crues ou des pics de crue au sens strict du terme. De telles crues se produisent à une échelle horaire et ne sauraient être saisies avec les valeurs journalières utilisées ici. En revanche, les plus petits débits sont bien saisis avec une résolution journalière, étant donné que les fluctuations dans le domaine des étiages sont très lentes. Les débits journaliers les plus faibles et les

plus élevés sont décrits par ce que l'on appelle des quantiles (q). Le quantile du débit (Q_{q10}) par exemple, indique le débit (Q) qui est atteint ou n'est pas dépassé en moyenne lors de 10 % des jours – soit 37 jours en une année.

Tab. 3.4.54 : Plus faibles et plus importants débits de la Singine@Thörishaus (SenTho). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 4.5

| | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|-------|---------------------|
| 1981-2010 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 4.7 | 6.7 | 12.2 | mm/d |
| 1981-2010 | 1.7 | 2.1 | 2.6 | 19.0 | 27.3 | 49.9 | m ³ /s |
| 1981-2010 | 4.9 | 6.0 | 7.3 | 54.0 | 77.4 | 141.8 | l/s/km ² |
| 2040-2069 | -17.1 | -15.1 | -12.7 | -9.4 | -8.7 | -2.4 | % |
| 2070-2099 | -19.0 | -13.2 | -11.1 | -5.3 | -5.6 | 0.4 | % |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Tab. 3.4.55 : Plus faibles et plus importants débits de la Singine@Thörishaus (SenTho). Changements relatifs sur la base des scénarios climatiques CH2018 sous RCP 8.5

| | Qq01 | Qq05 | Qq10 | Qq90 | Qq95 | Qq99 | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|
| 1981-2010 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 4.7 | 6.7 | 12.4 | mm/d |
| 1981-2010 | 1.7 | 2.1 | 2.5 | 19.1 | 27.2 | 50.4 | m ³ /s |
| 1981-2010 | 4.9 | 6.0 | 7.2 | 54.3 | 77.3 | 143.1 | l/s/km ² |
| 2040-2069 | -22.8 | -15.9 | -13.3 | -6.1 | -5.1 | -3.9 | % |
| 2070-2099 | -46.0 | -39.2 | -34.4 | -15.4 | -12.4 | -8.4 | % |

■ -20 ■ -10 ■ -5 ■ 5 ■ 10 ■ 20 ■ [%]

Les plus faibles débits journaliers (Q_{q01} à Q_{q10}) diminuent tous, dans une mesure importante sous RCP 4.5 et très importante pour la plupart sous RCP 8.5, avec des baisses allant jusqu'à -46 %. La diminution du plus petit débit journalier (Q_{q01}) est nettement plus importante que celle des débits Q_{q05} et Q_{q10} . Avec les changements climatiques, les faibles débits deviennent donc de plus en plus faibles.

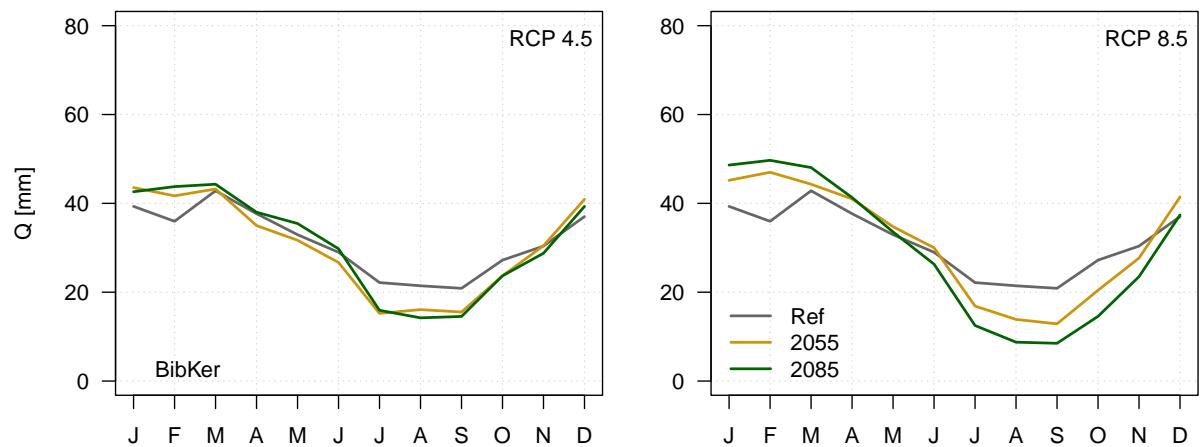
Même les débits journaliers les plus importants diminuent dans la région PreAlp. Ces diminutions sont d'une ampleur faible à moyenne sous RCP 4.5 et d'une ampleur faible à importante sous RCP 8.5.

3.5 Changements du régime d'écoulement

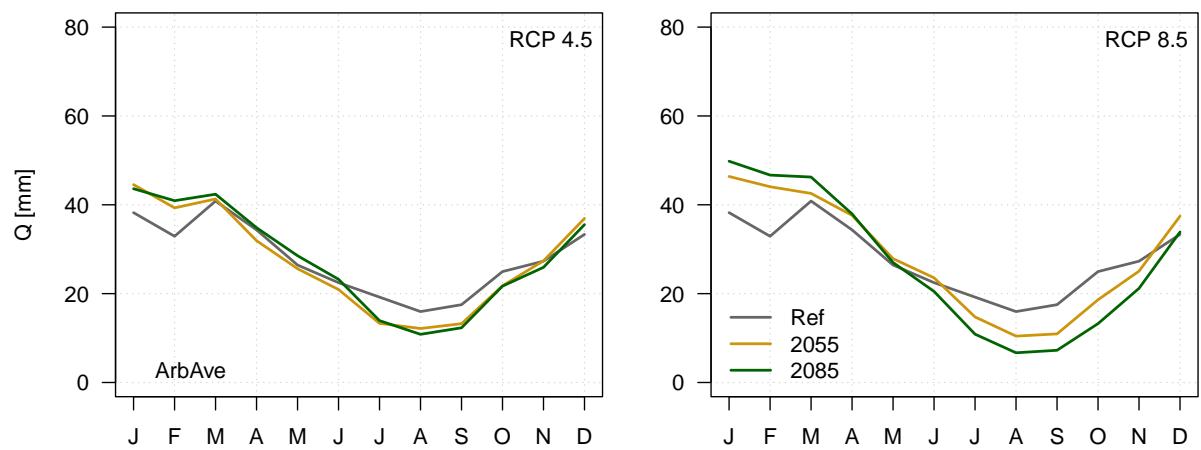
Jusqu'à présent, nous nous sommes limités à des résolutions annuelles et saisonnières pour les analyses du régime hydrique. Ce choix répondait avant tout à un souci de clarté et de praticabilité. Il aurait cependant tout à fait été possible d'étendre les analyses à une échelle mensuelle, les données nécessaires étant disponibles. Ceci aurait toutefois entraîné une forte augmentation de la complexité des analyses au détriment de leur lisibilité. En conclusion du rapport, les graphiques suivants consacrés aux régimes d'écoulement doivent permettre de donner un aperçu de la dimension mensuelle.

Les régimes d'écoulement montrent les variations saisonnières moyennes du débit sur la base de valeurs mensuelles. En comparant les régimes d'écoulement de la période de référence 1981–2010 à ceux des périodes futures, tout en distinguant les scénarios d'émissions, il est possible de saisir en un clin d'œil les aspects déterminants de ces changements. Les graphiques suivants illustrent notamment l'ampleur de l'augmentation des débits hivernaux et de la diminution des débits estivaux. Les régimes d'écoulement ont été déduits en superposant les changements en pourcentage modélisés aux données d'observation de la période de référence resp. de la période de mesure. Ainsi, une relation directe est établie entre les régimes d'écoulement observés et les régimes futurs.

a)



b)



c)

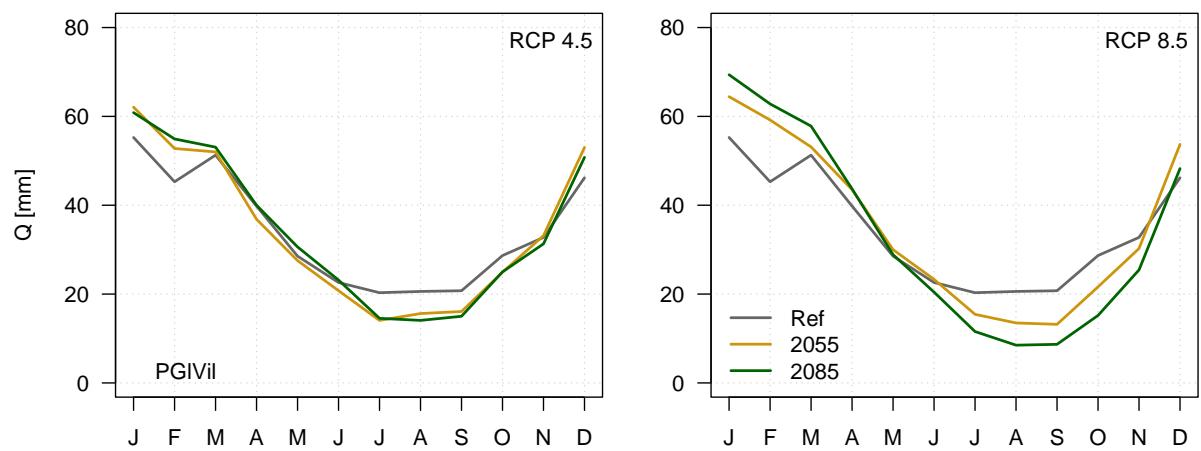
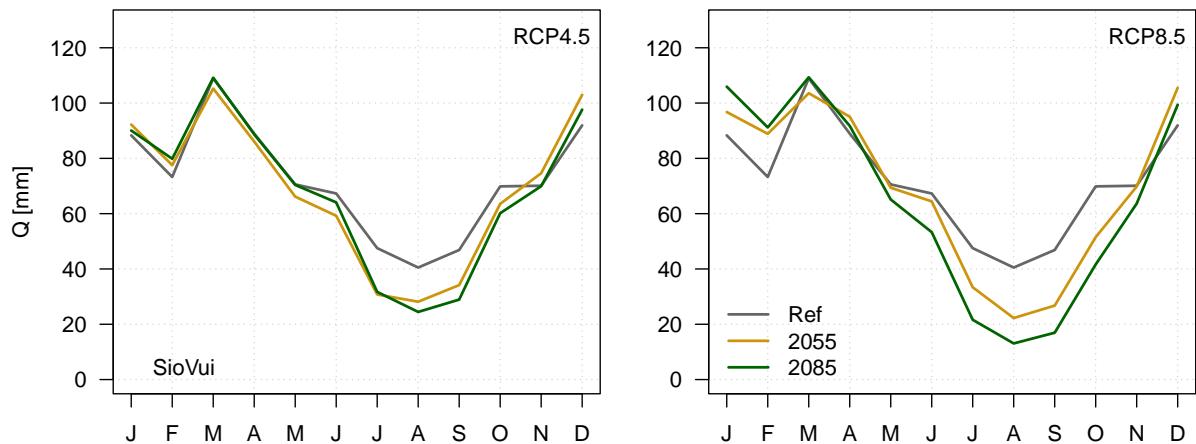


Fig. 3.75 : Régimes d'écoulement vers 1995, 2055 et 2085

a)



b)

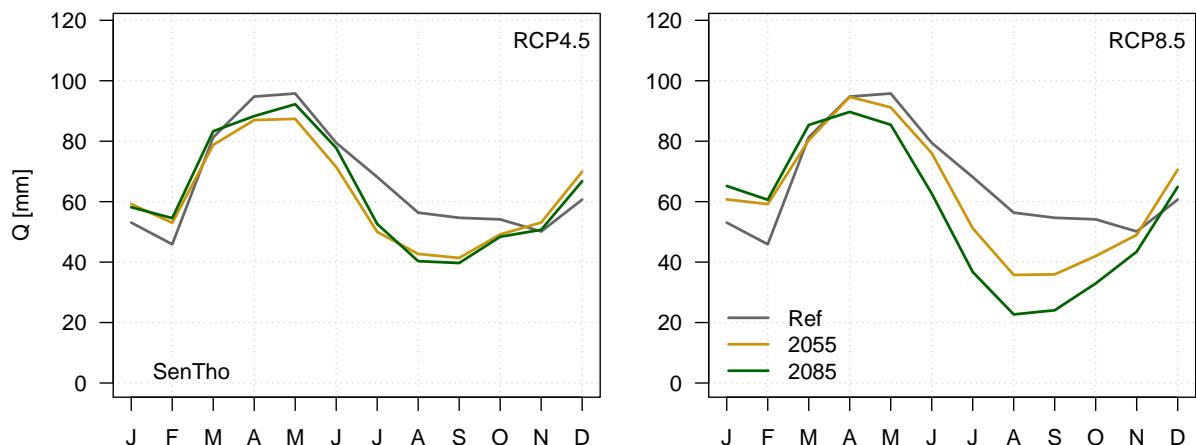


Fig. 3.76 : Régimes d'écoulement vers 1995, 2055 et 2085

3.6 Conclusions

Des conclusions courtes et concises ont été formulées sur la base des enseignements tirés des analyses. Elles permettent d'une part de tenir compte des différentes dimensions des changements et d'autre part de démontrer leur validité spatiale. Conformément à la démarche adoptée dans l'ensemble du rapport, les conclusions sont articulées en fonction des périodes futures (futur moyen et futur lointain) et des deux scénarios d'émissions. Les conclusions reposent sur les constats établis dans les bassins versants représentatifs.

Pour une meilleure compréhension des tableaux suivants, les bassins versants représentatifs et la région correspondante sont rappelés ci-dessous :

| | |
|--|----------------------------------|
| Bibere@Kerzers (BibKer) : | Région des 3 Lacs - Grand Marais |
| Petite Glâne@Villars-le-Grand (PGlVil) : | Basse Broye |
| Arbogne@Avenches (ArbAve) : | Plateau Nord |
| Sionge@Vuippens (SioVui) : | Plateau Sud |
| Singine@Thörishaus (SenTho) : | Préalpes |

Tab. 3.6.1 : Résumé – Régime hydrique, RCP 4.5. Une case colorée en vert signifie que la conclusion est valable pour le bassin versant.

Régime hydrique (RCP 4.5)

| | BibKer | PGIVil | ArbAve | SioVui | SenTho | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Les précipitations annuelles moyennes ne changent guère (changements inférieurs à 5%) | | | | | | 2040 - 2069 |
| | | | | | | 2070 - 2099 |
| Le débit annuel moyen diminue | | | | | | 2040 - 2069 |
| | | | | | | 2070 - 2099 |
| Le débit annuel moyen diminue fortement (diminutions ≤-10%) | | | | | | 2040 - 2069 |
| | | | | | | 2070 - 2099 |
| L'augmentation de l'évapotranspiration réelle annuelle moyenne est le moteur principal de la diminution du débit annuel moyen (cf. analyses spécifiques) | | | | | | 2040 - 2069 |
| | | | | | | 2070 - 2099 |

Tab. 3.6.2 : Résumé – Régime hydrique, RCP 8.5. Une case colorée en vert signifie que la conclusion est valable pour le bassin versant.

Régime hydrique (RCP 8.5)

| | BibKer | PGIVil | ArbAve | SioVui | SenTho | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Les précipitations annuelles moyennes ne changent guère (changements inférieurs à 5%) | Vert | Blanc | Vert | Vert | Vert | 2040 - 2069 |
| | Vert | Vert | Vert | Vert | Vert | 2070 - 2099 |
| Le débit annuel moyen diminue | Vert | Blanc | Vert | Vert | Vert | 2040 - 2069 |
| | Vert | Vert | Vert | Vert | Vert | 2070 - 2099 |
| Le débit annuel moyen diminue fortement (diminutions ≤-10%) | Blanc | Blanc | Blanc | Blanc | Blanc | 2040 - 2069 |
| | Vert | Vert | Vert | Vert | Vert | 2070 - 2099 |
| L'augmentation de l'évapotranspiration réelle annuelle moyenne est la principale responsable de la diminution du débit annuel moyen (cf. analyses spécifiques) | Vert | Blanc | Vert | Vert | Vert | 2040 - 2069 |
| | Vert | Vert | Vert | Vert | Vert | 2070 - 2099 |

Tab. 3.6.3 : Résumé – Débits moyens en été et en hiver, RCP 4.5. Une case colorée en vert signifie que la conclusion est valable pour le bassin versant.

Débits moyens en hiver et en été (RCP 4.5)

| | BibKer | PGIVil | ArbAve | SioVui | SenTho | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| L'augmentation des débits moyens hivernaux par rapport à la période de référence 1981-2010 est importante (la valeur médiane d'une période future se situe au-dessus de l'intervalle de variation restreint (écart interquartile) des années individuelles de la période de référence) | white | green | green | green | green | 2040 - 2069 |
| | white | green | green | green | green | 2070 - 2099 |
| La diminution des débits moyens estivaux par rapport à la période de référence 1981-2010 est très importante (la valeur médiane d'une période future se situe en dessous de l'intervalle de variation restreint (écart interquartile) des années individuelles de la période de référence) | green | green | green | green | green | 2040 - 2069 |
| | green | green | green | green | green | 2070 - 2099 |
| La sécheresse estivale constitue déjà un problème au cours d'une année moyenne de la période de référence 1981-2010 (le diagramme de Budyko indique une limitation hydrique) | green | green | white | white | white | |
| La sécheresse estivale constitue un problème dans le futur (le diagramme de Budyko indique une limitation hydrique pour une année moyenne) | green | green | green | white | white | 2040 - 2069 |
| | green | white | green | white | white | 2070 - 2099 |
| La diminution des débits moyens en été est largement déterminée par la diminution des précipitations moyennes en été (cf. analyses spécifiques) | green | white | green | green | green | 2040 - 2069 |
| | white | white | green | green | green | 2070 - 2099 |

Tab. 3.6.4 : Résumé – Débits moyens en été et en hiver, RCP 8.5 Une case colorée en vert signifie que la conclusion est valable pour le bassin versant.

Débits moyens en hiver et en été (RCP 8.5)

| | BibKer | PGIVil | ArbAve | SioVui | SenTho | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| L'augmentation des débits moyens hivernaux par rapport à la période de référence 1981-2010 est importante (la valeur médiane d'une période future se situe au-dessus de l'intervalle de variation restreint (écart interquartile) des années individuelles de la période de référence) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | 2040 - 2069 |
| | | ■ | | ■ | ■ | 2070 - 2099 |
| La diminution des débits moyens estivaux par rapport à la période de référence 1981-2010 est très importante (la valeur médiane d'une période future se situe en dessous de l'intervalle de variation restreint (écart interquartile) des années individuelles de la période de référence) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | 2040 - 2069 |
| | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | 2070 - 2099 |
| La sécheresse estivale constitue déjà un problème au cours d'une année moyenne de la période de référence 1981-2010 (le diagramme de Budyko indique une limitation hydrique) | ■ | ■ | | | | |
| La sécheresse estivale constitue un problème dans le futur (le diagramme de Budyko indique une limitation hydrique pour une année moyenne) | ■ | ■ | ■ | | | 2040 - 2069 |
| | ■ | ■ | ■ | ■ | | 2070 - 2099 |
| La diminution des débits moyens en été est largement déterminée par la diminution des précipitations moyennes en été (cf. analyses spécifiques) | | | | ■ | | 2040 - 2069 |
| | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | 2070 - 2099 |

Tab. 3.6.5 : Résumé – Plus faibles et plus importants débits journaliers, RCP 4.5. Une case colorée en vert signifie que la conclusion est valable pour le bassin versant.

Plus faibles et plus importants débits journaliers (RCP 4.5)

| | BibKer | PGIVil | ArbAve | SioVui | SenTho | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Les plus faibles débits journaliers diminuent tous de manière importante (diminution ≤ -10%) | █ | █ | █ | █ | █ | 2040 - 2069 |
| | █ | █ | █ | █ | █ | 2070 - 2099 |
| Les plus importants débits journaliers diminuent tous | | | █ | █ | █ | 2040 - 2069 |
| | | | | █ | █ | 2070 - 2099 |

Tab. 3.6.6 : Résumé – Plus faibles et plus importants débits journaliers, RCP 8.5. Une case colorée en vert signifie que la conclusion est valable pour le bassin versant.

Plus faibles et plus importants débits journaliers (RCP 8.5)

| | BibKer | PGIVil | ArbAve | SioVui | SenTho | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|
| Les plus faibles débits journaliers diminuent tous de manière importante (diminution ≤ -10%) | █ | █ | █ | █ | █ | 2040 - 2069 |
| | █ | █ | █ | █ | █ | 2070 - 2099 |
| Les plus importants débits journaliers diminuent tous | | | | █ | █ | 2040 - 2069 |
| | | | | █ | █ | 2070 - 2099 |