



ETAT DE FRIBOURG
STAAT FREIBURG

Détermination de la production hydroélectrique future aux ouvrages de la Sarine

Note de Synthèse

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	2
2	OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	2
3	DONNEES DISPONIBLES.....	3
3.1	Mesures météorologiques	3
3.2	Données hydrologiques	5
4	METHODOLOGIE.....	7
4.1	Modélisation pluie-débit.....	7
4.2	Modélisation des bassins versants, centrales et réservoirs	9
4.3	Calage du modèle <i>Routing System</i>	10
4.3.1	Rossinière	10
4.3.2	Montsalvens.....	13
4.3.3	Lac de la Gruyère	15
4.3.4	Sarine à Fribourg.....	17
4.3.5	Schiffenen	18
4.3.6	La Singine à Thörishaus	19
4.4	Production des centrales	21
4.4.1	Modélisation de la centrale ScheM	21
4.4.2	Calage rendements globaux des centrales	22
4.5	Scénarios Climatiques	22
4.5.1	Trajectoires temporelles des scénarios CH2025.....	22
4.5.2	Resampling horaire des scénarios CH2025	24
4.5.3	Vérifications des scénarios CH2025 reconstruits	25
5	RESULTATS : PRODUCTION HYDROELECTRIQUE FUTURE.....	29
5.1	Format des résultats.....	29
5.2	Transcription en Global Warming Level « GWL ».....	30
5.3	Evolution des apports et du productible	31
5.3.1	Centrale de Montbovon	31
5.3.2	Centrale de Hauterive.....	33
5.3.3	Schiffenen	36
5.3.4	Singine	38
5.4	Synthèse du productible.....	40
6	CONCLUSION	42
7	REFERENCES	42
	ANNEXE A – FIGURES DES RESULTATS DE SIMULATION	44

1 Introduction

Motivations

Le canton de Fribourg souhaite évaluer l'évolution future de la production hydroélectrique sur la Sarine à l'horizon 2100, sur la base des scénarios climatiques CH2025. Le changement climatique va en effet affecter le régime hydrologique des cours d'eau et l'exploitation de cette ressource. Le projet d'aménagement Schiffenen-Morat (« ScheM ») motive également une meilleure compréhension des apports futurs. Enfin, le bassin versant de la Singine, qui ne dispose pas d'aménagement, fait également partie de cette étude en raison de son importance et de sa grande réactivité hydrologique.

Scénarios climatiques CH2025

Les scénarios climatiques CH2025 représentent une actualisation des connaissances scientifiques par rapport à CH2018. Ils traduisent notamment une augmentation prévue de la température locale plus marquée, pour un même niveau de réchauffement planétaire.

Contenu

Le bureau hydrique Ingénieurs a déjà effectué une étude des apports des différents aménagements de Groupe-e sur la Sarine, selon CH2018. Cette étude propose une actualisation des connaissances selon CH2025, un raffinement des outils utilisés et une estimation du productible, en sus des apports, y compris ScheM.

2 Objectifs de l'étude

Objectifs de l'étude

Les objectifs principaux de cette étude sont les suivants :

- Modélisation des apports des aménagements de Groupe-e (Montbovon-Rossinière, Lessoc, Broc-Montsalvens, Hauterive-Rossens, Oelberg-Maigrauge, Schiffenen et projet ScheM), de l'aménagement de GESA (Jogne – Charmey), ainsi que de la Singine.
- Reprise du modèle *Routing System* existant pour la prévision opérationnelle des apports et du productible. Adaptation et calage du modèle pour des simulations à long terme sur la période 2003-2025 (1990-2025 pour les glaciers de la Sarine). Modélisation simplifiée de la stratégie d'exploitation.
- Génération de 2 x 24 Scénarios climatiques (2015-2100) suivant les scénarios d'émissions RCP 4.5 et RCP 8.5.
- Evaluation du productible futur, et du régime hydrologique de la Sarine et de la Singine.

3 Données disponibles

Données nécessaires

La modélisation pluie-débit et l'estimation des apports futurs nécessitent plusieurs types de données. Les mesures météorologiques, notamment les précipitations et les températures, servent au forçage du modèle pluie-débit. Les mesures de débit, ou à défaut, les apports recalculés à partir des niveaux d'eau des débits turbinés/déversés sont utilisées pour le calage du modèle. Les estimations de volumes de glace permettent quant à elles d'initialiser et de calibrer la dynamique glaciaire du bassin versant. Enfin, les mesures de production sont nécessaires pour caler les coefficients énergétiques des centrales modélisées.

3.1 Mesures météorologiques

Bassins versants

Le modèle pluie-débit est appliqué sur le bassin versant de la Sarine jusqu'à Laupen (Fig. 1). Les rivières, réservoirs et centrales hydroélectriques modélisés sont également représentés.

Mesures Météo

Les mesures de précipitation et température aux stations météorologiques sont utilisées comme données de forçage du modèle pluie-débit pour la période de calage. Les stations MétéoSuisse utilisées pour les simulations sont listées dans le Tab. 1 et situées en Fig. 1.

Ce choix correspond aux stations les plus proches des bassins versants modélisés, pour lesquelles les scénarios climatiques CH2025 sont disponibles. Peu de stations sont disponibles au pas de temps horaire sur la période de calage (2003-2025, voire 1990-2025 pour les glaciers). Les stations seulement disponibles au pas de temps journalier sont désagrégées à l'aide de deux stations voisines disponibles au pas de temps horaire. Les intensités horaires de précipitation des stations voisines sont reprises et adaptées pour reproduire le cumul journalier de la station à désagréger.

Les données horaires de température de la station de Château-d'Oex présentant une discontinuité en 2003 (changement de l'emplacement de la station), les données journalières homogénéisées de MétéoSuisse ont été désagrégées pour obtenir une série temporelle horaire.

Bassins versants,
stations
MétéoSuisse et
aménagements
hydroélectriques

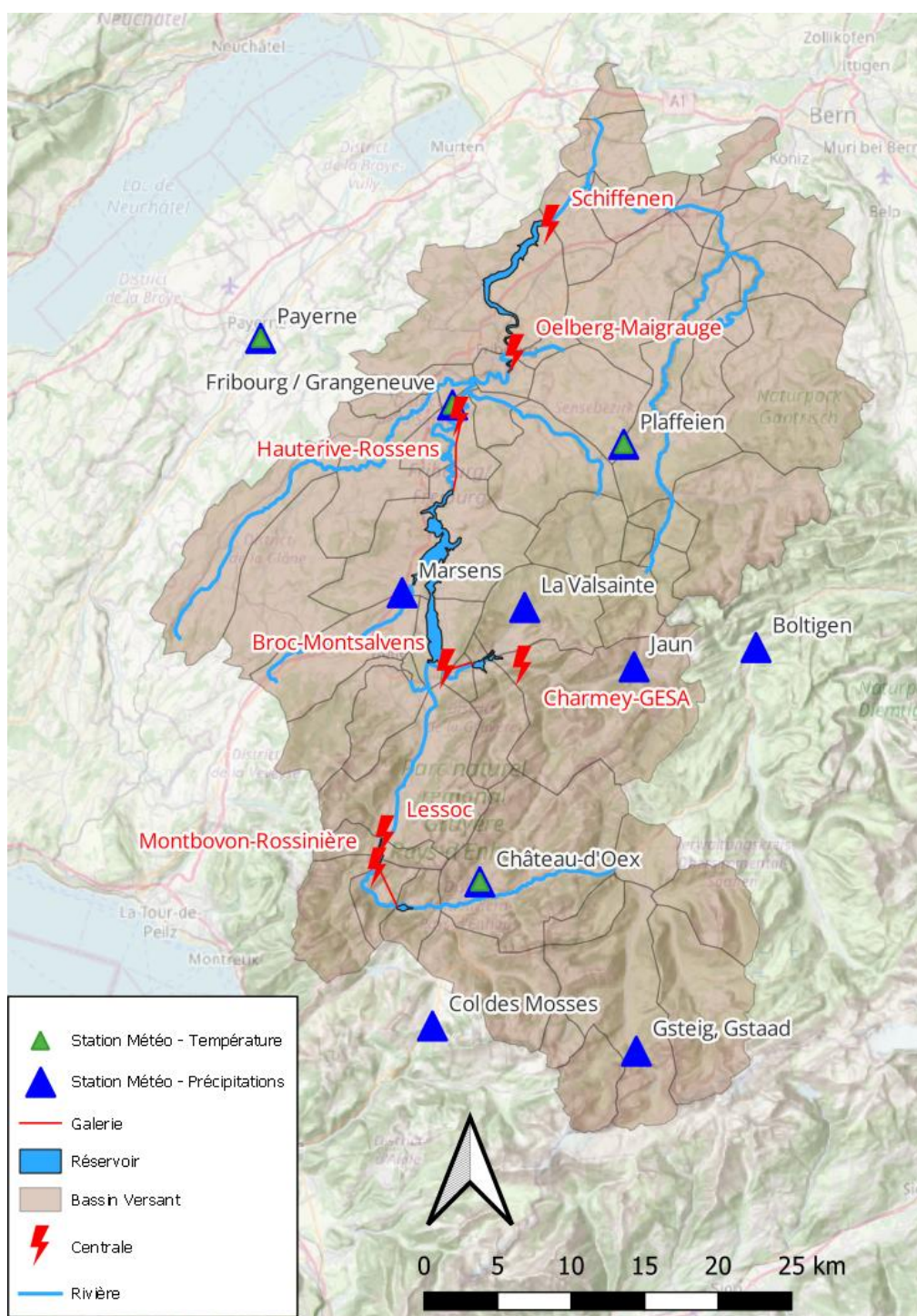


Fig. 1 : Bassins versants modélisés, aménagement hydro-électriques et stations de mesure.

Stations
MétéoSuisse

Tab. 1: Liste des stations MétéoSuisse utilisées pour les simulations.

Liste des stations	Température	Précipitations
Plaffeien	X	X
Marsens		X
Château-d'Oex	X	X
Fribourg / Grangeneuve	X	X
Gsteig, Gstaad		X
La Valsainte		X
Jaun		X
Col des Mosses		X
Boltigen		X
Payerne	X	X

3.2 Données hydrologiques

Mesures
hydrologiques

Les données hydrologiques et de production disponibles sur la zone d'étude sont listées au Tab. 2. Elles sont fournies par l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV), le canton de Fribourg, Groupe-e et GESA. Les données de volumes glaciaires sont issues de GLAMOS (GLAMOS, 2025).

Disponibilité des
mesures
hydrologiques

Tab. 2: Disponibilité des mesures hydrologiques.

Source	Stations	Variable	Début	Fin	Fréquence (s)
BAFU	Sarine - Broc- Château D'en Bas	Debit	1993	2025	3600
	Sarine - Fribourg	Debit	1993	2025	3600
	Sense - Thörishaus- Sensematt	Debit	1993	2025	3600
	Sionge - Vuippens- Château	Debit	2011	2025	3600
	Saane - Laupen	Debit	2011	2025	3600
Fribourg	Gérine - Marly	Debit	2014	2025	600
	Glâne - Matran	Debit	2015	2025	600
	Trême - Bulle	Debit	2015	2025	600
	Lac Noir - Schwarzsee	Debit	2015	2025	600
	Lac Noir - Schwarzsee	niveau	2015	2025	600
	Glâne - Romont	Debit	2020	2025	600
	Jogne - Charmey	Debit	2023	2025	600
Groupe E	Broc	Turbine	1993	2025	900
	Broc	Puissance	2009	2025	900
	Hauterive	Turbine	1993	2025	900
	Hauterive	Puissance	2013	2025	900
	Lessoc	Turbine	1993	2025	900
	Lessoc	Apports naturels_filtered	2008	2025	900
	Lessoc	Debit total_filtered	2021	2025	900
	Lessoc	Débit déversé	2003	2025	900
	Lessoc	Puissance	2009	2025	900
	Lessoc	Niveau du lac	1993	2025	900
	Maigrage	Débit de dotation	1993	2025	900
	Maigrage	Débit déversé	2003	2025	900
	Montbovon	Turbine	1993	2025	900
	Montbovon	Puissance	2009	2025	900
	Montsalvens	Apports naturels_filtered	2003	2025	900
	Montsalvens	Niveau du lac	1993	2025	900
	Montsalvens	Débit Déversé	2003	2025	900
	Oelberg	Turbine	1993	2025	900
	Oelberg	Puissance	2009	2025	900
	Rossens	Débit de dotation	1993	2025	900
	Rossens	Debit total_filtered	2021	2025	900
	Rossens	Apports naturels_filtered	2019	2025	900
	Rossens	Niveau du lac	1993	2025	900
	Rossens	Débit déversé	2003	2025	900
	Rossinière	Apports naturels_filtered	2003	2025	900
	Rossinière	Débit déversé	2003	2025	900
	Rossinière	Niveau du lac	1993	2025	900
	Schiffenen	Turbine	1993	2025	900
	Schiffenen	Débit déversé	2003	2025	900
	Schiffenen	Puissance	2013	2025	900
	Schiffenen	TurbineEtDotation	2010	2025	900
	Schiffenen	Debit total_filtered	2021	2025	900
	Schiffenen	Apports naturels_filtered	2019	2025	900
	Schiffenen	Niveau du lac	1993	2025	900
	Schiffenen	recalcul_2003_2025	2003	2025	3600
Gruyère Energie	GESA	débit turbiné	2024	2025	900
	GESA	puissance totale	2020	2025	900
	GESA	dotation	2020	2025	900

4 Méthodologie

Les projections d'apports sont réalisées à l'aide de simulations pluie-débit avec le modèle *Routing System*, forcé par les scénarios climatiques CH2025. Le modèle est d'abord calé sur la période 2015–2025 sur une dizaine de points d'apport pour lesquels des historiques de mesures sont disponibles.

Les rendements globaux des centrales, utilisés pour le calcul des productions, sont ajustés de manière à reproduire les coefficients énergétiques observés.

Les séries temporelles horaires de précipitations et de températures sont construites à partir des données brutes issues des scénarios CH2025, disponibles à un pas de temps journalier et pour différents niveaux de GWL.

4.1 Modélisation pluie-débit

Routing System

Développé initialement par l'EPFL en 1999, le modèle *Routing System* (RS) a ensuite été développé de manière intense par Hydrique Ingénieurs depuis 2007 (Fig. 2). Le modèle de simulation pluie-débit semi-distribué, en constante évolution, est au bénéfice de plus de 20 ans d'expérience dans la simulation des débits en milieu alpin.

La Fig. 2 et le Tab. 3 présentent le concept de la simulation pluie-débit et la modélisation des différents processus de production du débit par bande d'altitude. Chaque bande d'altitude est modélisée par un comportement non-glaciaire (gauche) et glaciaire (droite). Les principaux processus hydrologiques sont modélisés en détail : spatialisation de l'information météorologique (précipitation, température, rayonnement global) en intégrant les notions de correction spatiale et de gradient altimétrique ; évapotranspiration et interception ; fonte et constitution du stock de neige (y compris regel nocturne, saturation en eau de la neige) ; infiltration dans le sol, écoulement de subsurface, écoulement de profondeur ; ruissellement de surface ; fonte glaciaire, y compris dynamique glaciaire avec conservation du bilan de masse glaciaire.

Le modèle GSM-SOCONT (Schäfli, Hingray, Niggli, & Musy, 2005) constitue le point de départ de la modélisation. Les équations ont été depuis complétées par de nombreuses fonctionnalités supplémentaires permettant un meilleur ajustement du modèle de simulation (évolution saisonnière, interception des précipitations, effet de la forêt, différents gradients altimétriques, dynamique glaciaire, imperméabilisation du sol, etc...).

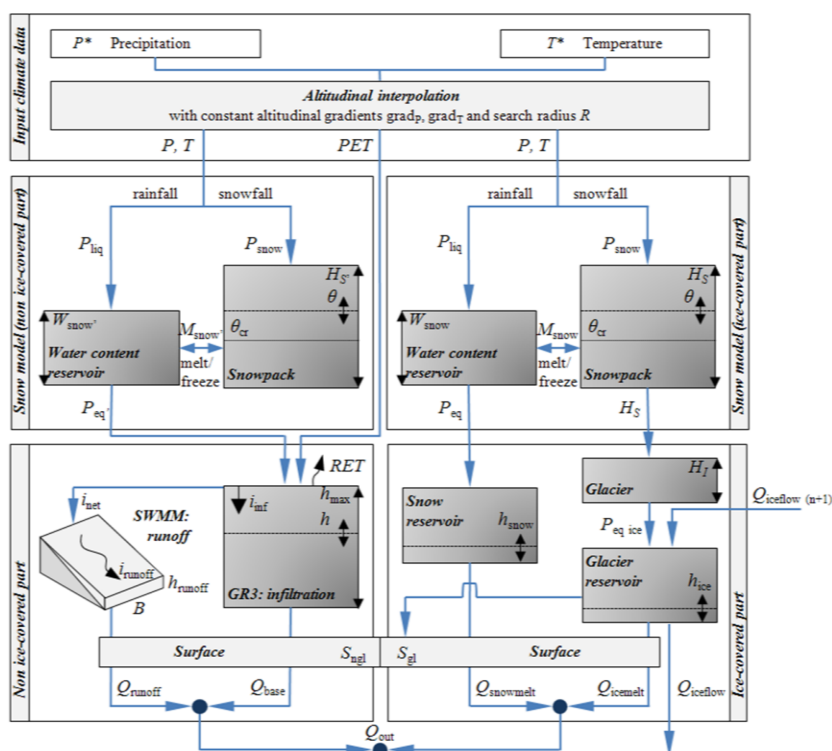


Fig. 2: Schéma des modèles de base pour la génération du débit (modèle GSM-SOCONT, Schäfli et al., 2005).

Tab. 3: Description du concept et des fonctions de base du modèle GSM-SOCONT tel qu'implémenté dans Routing System.

Modèle pluie-débit	
Structure du modèle	Modèle conceptuel semi-distribué BV découpé en bandes d'altitudes de 300m (GSM-SOCONT) Bande non-glaciaire : station virtuelle --> bande neige --> GR3+ --> SWMM Bande glaciaire : station virtuelle --> bande neige --> glacier Débit aval du bassin versant = somme des bandes (m^3/s)
Station Virtuelle (interpolation météo)	Output : Précipitation (mm/h), Température ($^{\circ}C$), (Rayonnement global W/m^2) Poids des stations de mesure : IDW = Inverse Square Distance Weighting Gradient altimétrique sec / humide (thermique) Gradient altimétrique de précipitation Correction additive (Temp) ou multiplicative (Prec) ETP selon méthode de Turc horaire : $ETP = f(T, RG)$
Bande Neige	Input : Précipitation (mm/h), Température ($^{\circ}C$), Rayonnement global (W/m^2) 2 réservoirs en interaction : neige solide / neige liquide Fonte / regel selon modèle degré-jour (horaire), seuil de saturation minimum Augmentation de la fonte en cas de pluie sur neige
GR3+	Input : i_{brut} (mm/h), ETP (mm/h) Réservoir-sol : 2 réservoirs. Bilan : $ETR = f(ETP)$; $i_{inf} = f(i_{in}, h/h_{max})$; $i_{net} = i_{tot} - i_{inf}$ Ecoulement sub-surface $Q \sim k \times (h/h_{max}^{ak})$ Transfert vers réservoir lent i_{Net} transféré vers SWMM
SWMM	Input : i_{Net} (mm/h) Onde cinématique sur plan incliné. $Q = f(J_o, K_s, L)$
Glacier	Input : T ($^{\circ}C$), RG (W/m^2), $i_{snowToIce}$ (mm/h), $i_{iceFromUpside}$ Conservation de la masse glaciaire Bande = parallélépipède rectangle, en mouvement vers l'aval à vitesse constante, connecté à la bande aval (transfert de masse) et à la bande non glaciaire (échange de surface) Bilan : $dV = + V_{snowToIce} - V_{iceToDown} - V_{iceMelt}$ fonte selon modèle degré-jour

4.2 Modélisation des bassins versants, centrales et réservoirs

Adaptation du
modèle de
prévisions
opérationnelles

Le modèle *Routing System* utilisé dans cette étude est similaire au modèle de la Sarine développé pour la prévision opérationnelle des apports aux centrales et aux prises. Les bassins versants y sont calés par zones, dont l'exutoire correspond à l'emplacement d'une station de mesure ou d'un aménagement permettant le recalcul des apports. Ces différentes zones sont illustrées à la Fig. 3.

Les modifications suivantes sont effectuées afin d'adapter le modèle à cette étude :

Modélisation du
turbinage

- L'optimisation du turbinage repose principalement sur des courbes de niveaux cibles des réservoirs. Elle prend également en compte le jour de la semaine et l'heure de la journée, afin de privilégier le turbinage durant les périodes de forte demande en électricité. Le turbinage est ainsi généralement réduit, voire évité, durant les week-ends.

Cette stratégie vise en parallèle à maintenir le niveau du réservoir aussi proche que possible d'un niveau cible, lequel vise la gestion saisonnière optimale de la retenue. La mesure effective de la production est, quant à elle, utilisée uniquement pour ajuster les rendements globaux des centrales en reproduisant les coefficients énergétiques observés.

Adaptation du
calage

- Un recalage des bassins versants contribuant aux apports des prises d'eau et des centrales est réalisé sur la base des seules stations météorologiques exploitables dans le cadre de cette étude (historique suffisant et disponibilité des scénarios CH2025).

Découpage des
bassins versants

- Certains bassins versants entre les aménagements sont redécoupés de manière à obtenir les apports intermédiaires pour chacun d'entre eux.

Volumes glaciaires

- Les volumes glaciaires sont mis à jour selon les dernières données GLAMOS disponibles.

Points de calage du
modèle *Routing*
System



Fig. 3 : Structure des différentes zones du modèle RS de la Sarine.

4.3 Calage du modèle *Routing System*

Calage 2015-2025

Le modèle est calé sur la base des mesures de débits horaires fournis par Groupe-e, GESA, l'OFEV et le Canton de Fribourg sur la période 2015-2025. Les différents sous-bassins versants sont calés par zone comme détaillé à la Fig. 3. Le calage du modèle est évalué ci-dessous sur la période 2004-2025, au niveau des principaux points d'apport du bassin versant de la Sarine.

4.3.1 Rossinière

Calage volume

glaciaire Rossinière

Rossinière est un bassin versant nival avec une faible composante glaciaire (65 l/s en moyenne pour un débit moyen de 5.4 m³/s soit environ 1% du débit total) sur la période 1990-2025. Un calage des volumes glaciaires a été effectué sur la période 1990-2025 en s'appuyant sur les données GLAMOS de 2015 et 2024 (Fig. 4). La fonte semble légèrement sous-estimée par le modèle mais il faut tenir compte du fait que tous les corps glaciaires ne sont pas pris en compte dans la mesure GLAMOS. En tout état de cause, les glaciers disparaîtront à l'horizon 2050-2060 et leur contribution au débit, maximale à l'heure actuelle, va diminuer progressivement.

Volume glaciaire

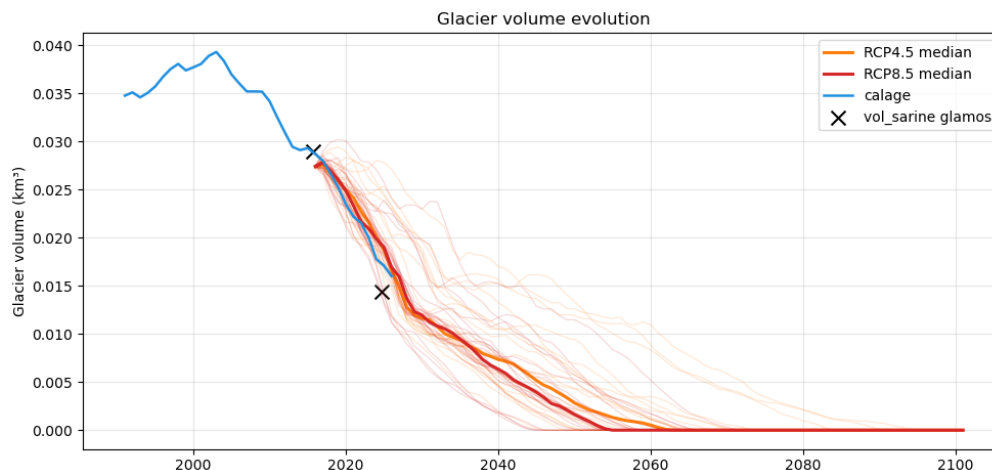


Fig. 4: Évolution du volume des glaciers dans le bassin versant de la Sarine sur la période 1990-2100.

Calage apports Rossinière

Le recalcul des apports à Rossinière fourni par Groupe-e est utilisé comme débit de référence pour le calage. La simulation reproduit bien la variation interannuelle des apports, même si ceux-ci sont surestimés sur la période 2003-2014 (Fig. 5). Cela s'explique par des apports surestimés sur la période automnale sur cette période, ce qu'on observe dans la multiannuelle (Fig. 6). Le calage du modèle, réalisé sur la période 2015-2025, présente un très bon accord avec les mesures et n'a donc pas été ajusté à la baisse pour reproduire le volume 2003-2015. Une analyse détaillée des données utilisées pour le recalcul des apports serait nécessaire avant de décider d'appliquer un ajustement à la baisse. Il faut noter encore que cette surestimation ne se retrouve pas sur les autres points de calage.

Les débits maximaux annuels sont également bien représentés par le modèle (Fig. 7). La crue de novembre 2023, liée à un épisode de pluie sur neige exceptionnel, est surestimée mais cet épisode difficile à modéliser est dans l'ensemble fidèlement représenté.

Apports annuels à
Rossinière

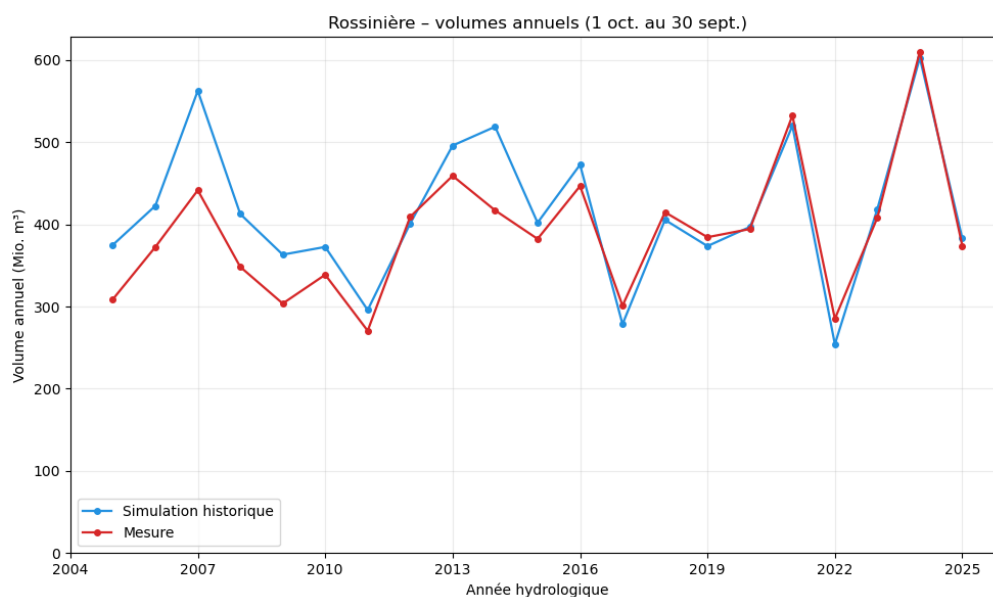


Fig. 5 : Volumes annuels mesurés et simulés à Rossinière pour la période 2004-2025.

Moyenne
multiannuelle des
débits journaliers à
Rossinière

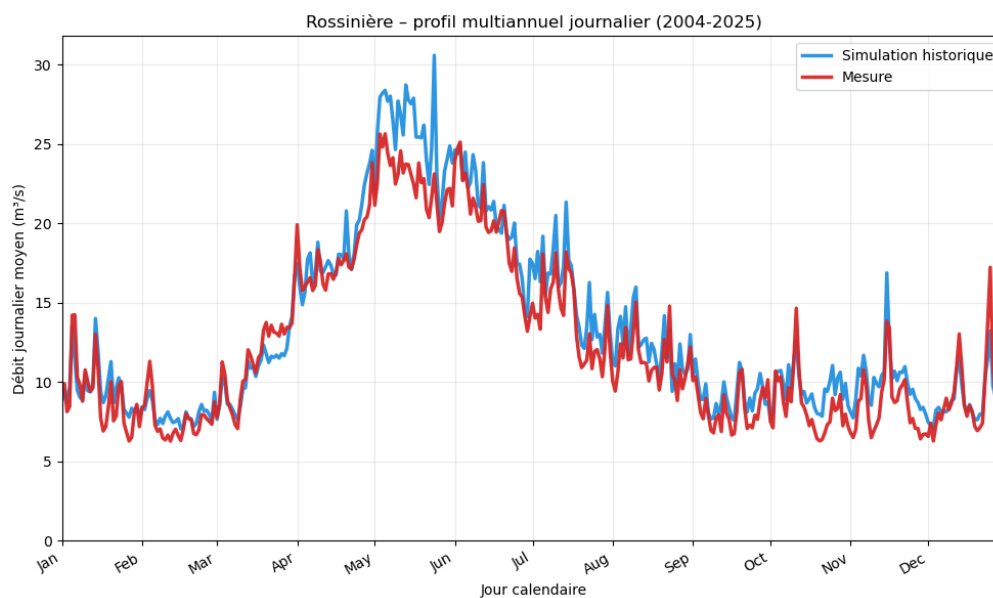


Fig. 6 : Moyenne multiannuelle des débits journaliers mesurés et simulés à Rossinière pour la période 2004-2025.

Débits horaires
maximaux annuels
à Rossinière

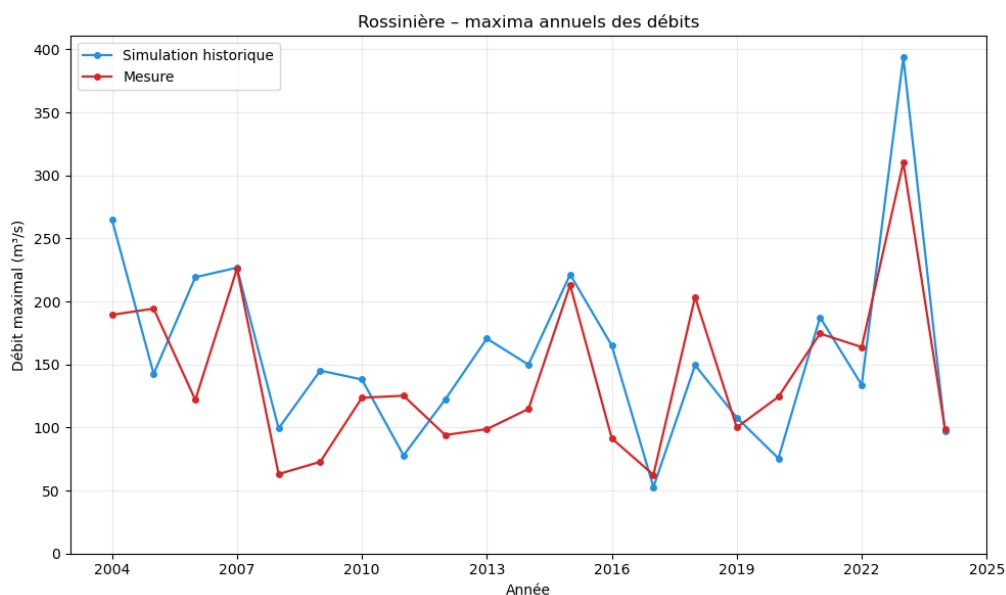


Fig. 7 : Débits horaires maximaux annuels mesurés et simulés à Rossinière.

4.3.2 Montsalvens

Calage apports
Montsalvens

Le recalcul des apports à Montsalvens fourni par Groupe-e est utilisé comme débit de référence pour le calage. Les volumes annuels depuis 2004 montrent un excellent accord avec les mesures (Fig. 8). La multiannuelle représente bien le pic de fonte printanier, mais semble avoir un démarrage de fonte un peu tardif (Fig. 9). Sur la période de calage (2015-2025) cependant, cela est moins marqué (moins de neige à basse altitude). Les maxima annuels sont fidèlement représentés avec, comme pour Rossinière, une surestimation du débit de pointe en 2023 (Fig. 10).

Apports annuels à
Montsalvens

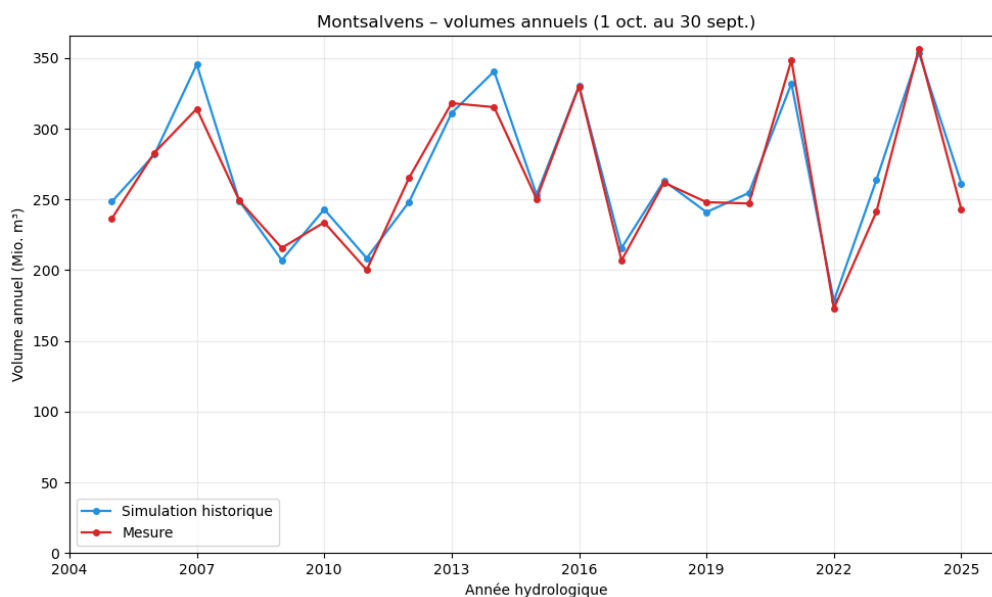


Fig. 8: Volumes annuels mesurés et simulés à Montsalvens pour la période 2004-2025.

Moyenne
multiannuelle des
débits journaliers à
Montsalvens

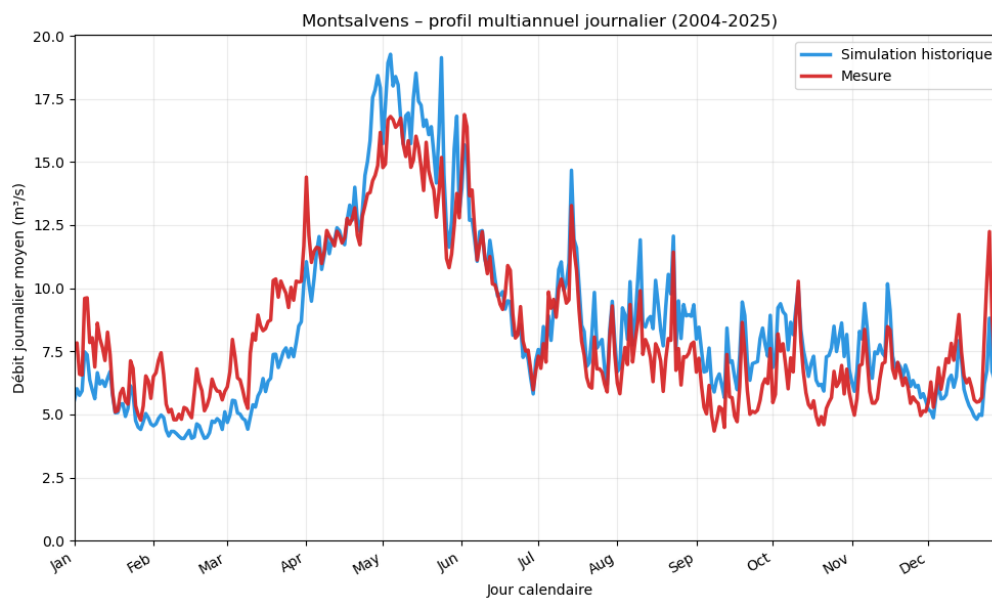


Fig. 9: Moyenne multiannuelle des débits journaliers mesurés et simulés à Montsalvens pour la période 2004-2025.

Débits horaires
maximaux annuels
à Montsalvens

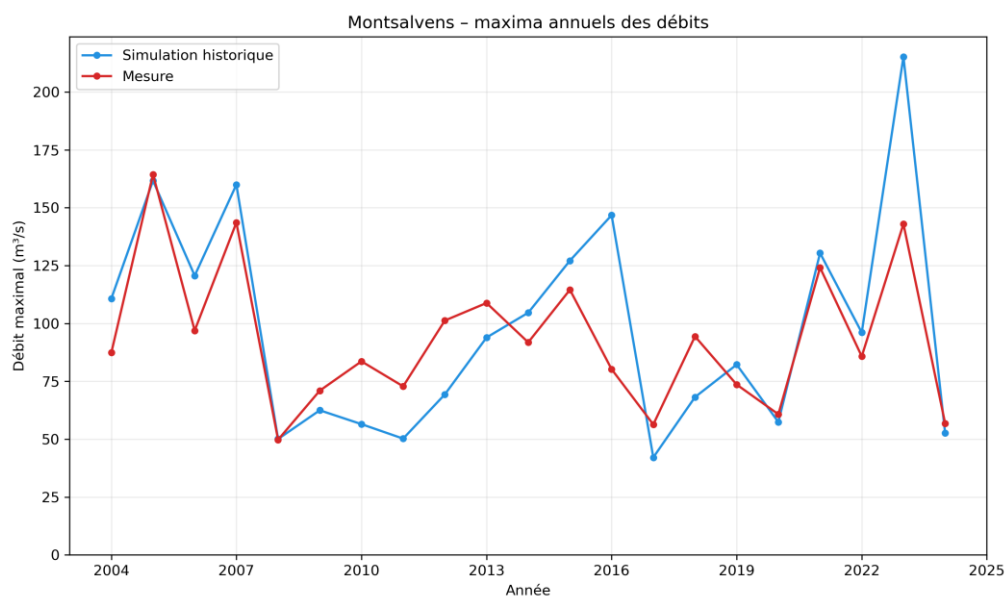


Fig. 10 : Débits horaires maximaux annuels mesurés et simulés à Montsalvens.

4.3.3 Lac de la Gruyère

Calage des apports
du Lac de la
Gruyère

Le calage des apports intermédiaires du Lac de la Gruyère est effectué sur le recalcul (Groupe-e) du débit total entrant. Les contributions de la Sionge et de la Trême sont calées sur les mesures de l'OFEV et du Canton de Fribourg respectivement. La variation interannuelle (Fig. 11) et la moyenne multiannuelle (Fig. 12) des apports sont fidèlement reproduites.

Apports annuels au
lac de la Gruyère

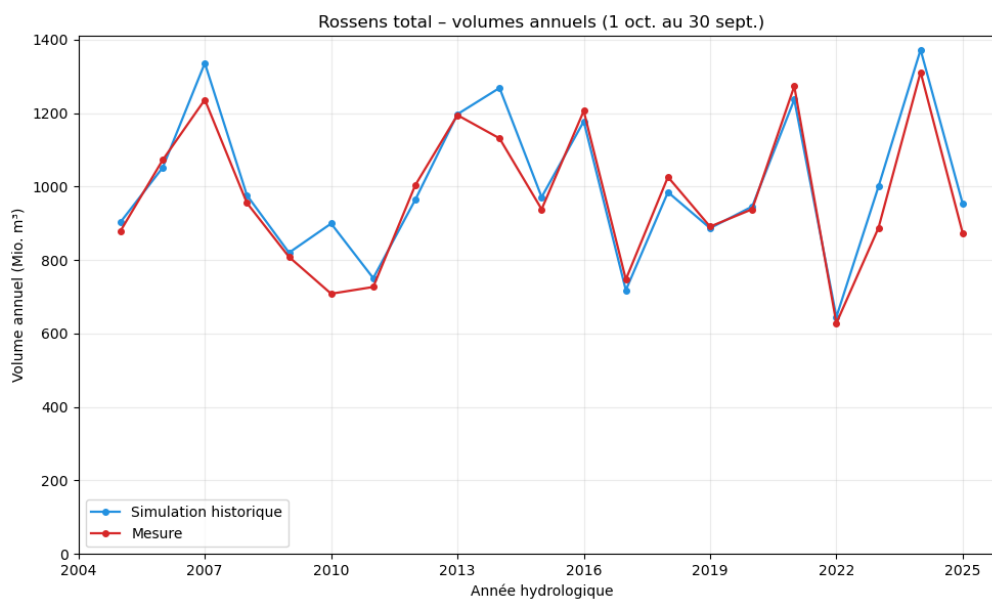


Fig. 11 : Volumes annuels mesurés et simulés à Rossens pour la période 2004-2025.

Moyenne
multiannuelle des
débits journaliers
au Lac de la
Gruyère

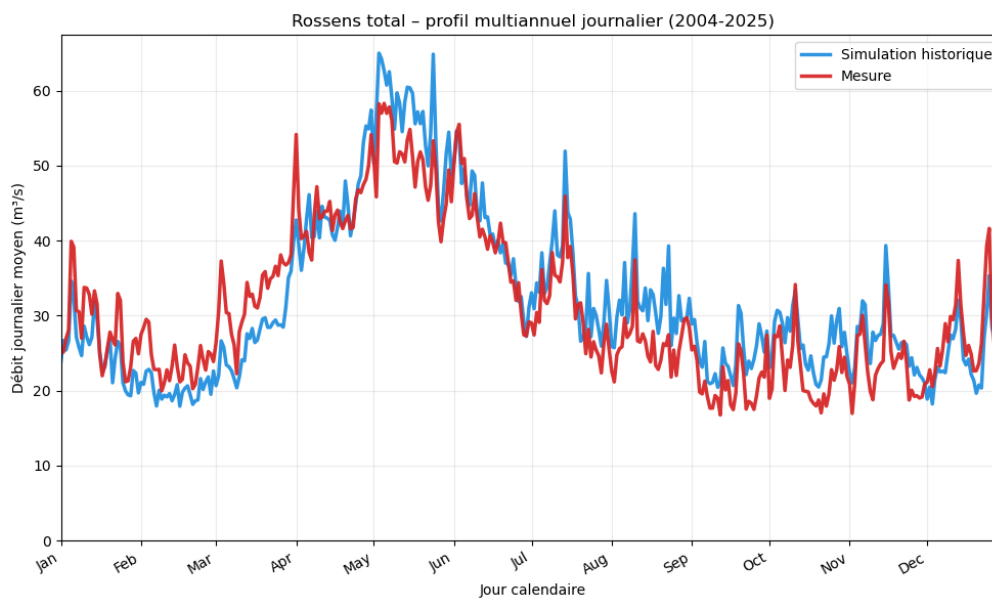


Fig. 12 : Moyenne multiannuelle des débits journaliers mesurés et simulés à Rossens pour la période 2004-2025.

4.3.4 Sarine à Fribourg

Calage des apports
de la Sarine à
Fribourg

Le calage des apports intermédiaires entre le lac de la Gruyère et Fribourg est effectué sur le débit total de la Sarine à Fribourg (mesure de l'OFEV). Ces apports intermédiaires incluent la Glâne et la Gérine qui sont calées séparément sur des mesures du Canton de Fribourg (Gérine à Marly et Glâne à Matran). Le débit est significativement influencé par le turbinage des centrales de Hauterive et d'Oelberg (en cascade). Le calage se focalise donc sur les volumes totaux annuels et la multiannuelle (gestion du Lac de la Gruyère). Les volumes totaux sont bien représentés (Fig. 13), ainsi que l'influence du barrage de Rossens sur la multiannuelle (vidange hivernale du lac « aplatisant » la courbe des débits en aval) (Fig. 14).

Apports annuels de
la Sarine à Fribourg

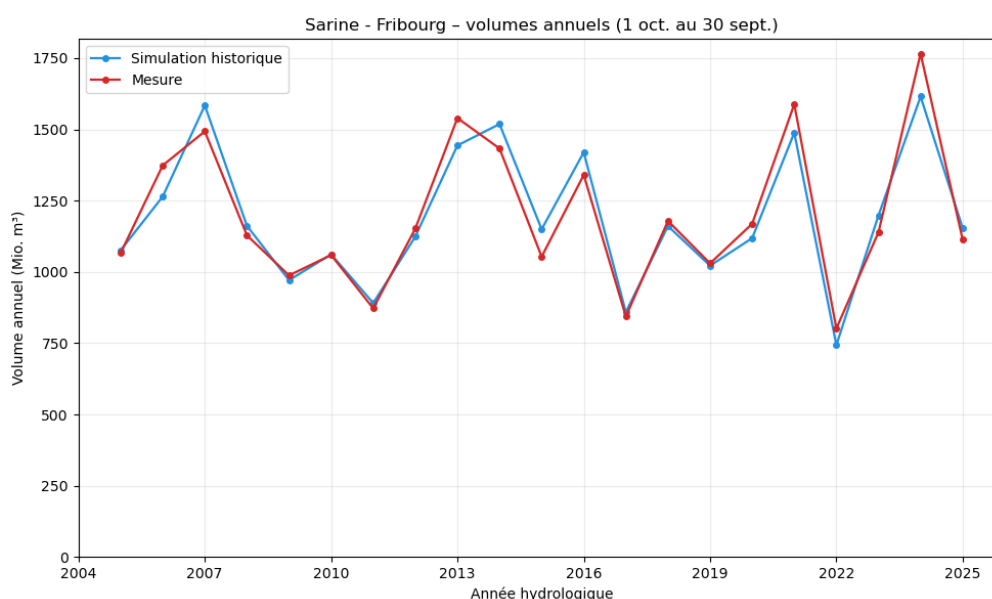


Fig. 13 : Volumes annuels mesurés et simulés de la Sarine à Fribourg pour la période 2004-2025.

Moyenne
multiannuelle des
débits journaliers
de la Sarine à
Fribourg

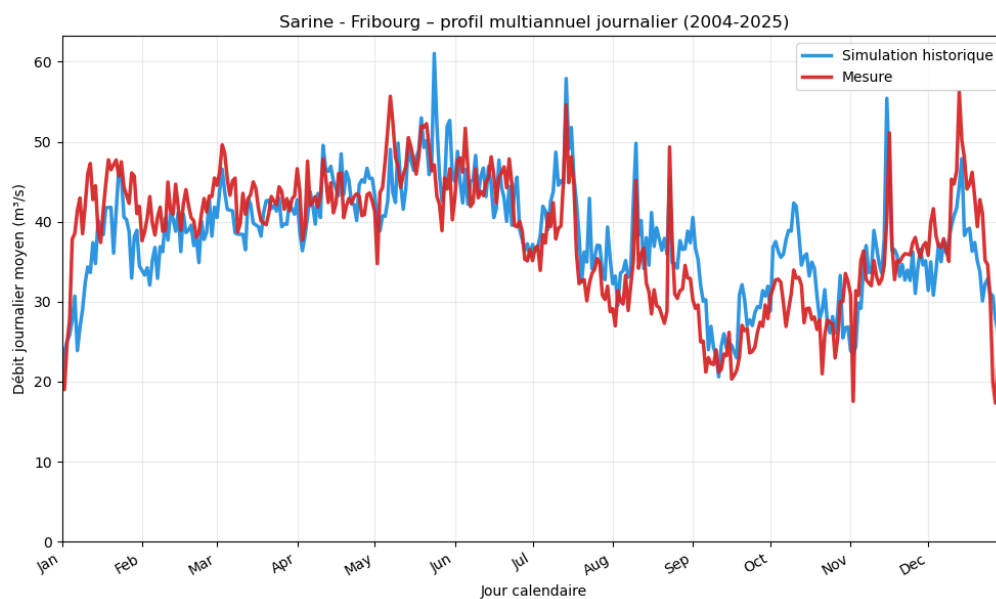


Fig. 14 : Moyenne multiannuelle des débits journaliers mesurés et simulés de la Sarine à Fribourg pour la période 2004-2025.

4.3.5 Schiffenen

Calage des apports
de Schiffenen

Le calage des apports intermédiaires entre la Sarine à Fribourg et Schiffenen se fait sur la base du recalcul des apports totaux de Schiffenen (Groupe-e). Les apports intermédiaires étant faibles, la multiannuelle est très similaire à celle de la Sarine à Fribourg (Fig. 15).

Moyenne
multiannuelle des
débits journaliers à
Schiffenen

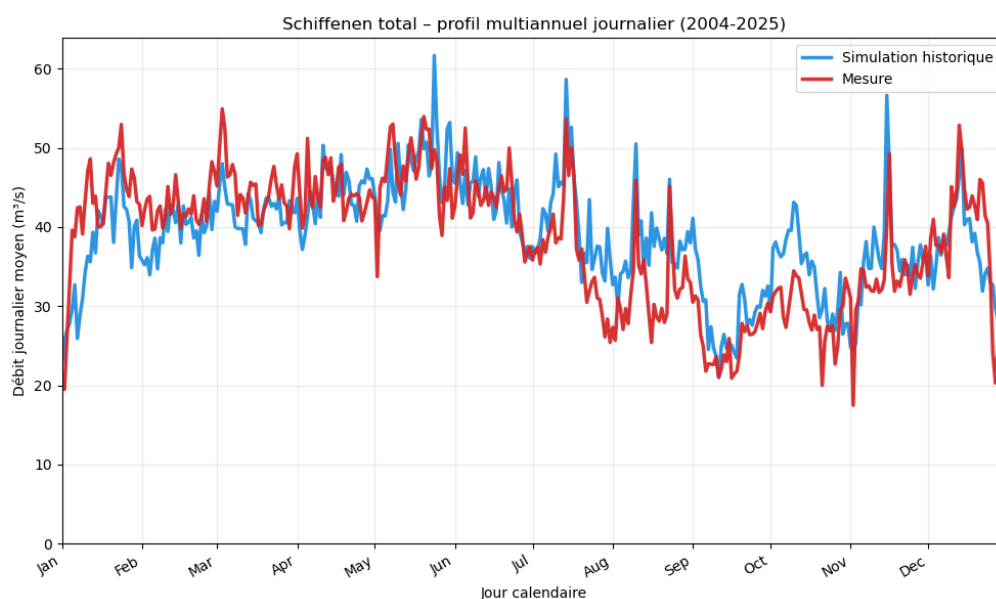


Fig. 15 : Moyenne multiannuelle des débits journaliers mesurés et simulés à Schiffenen pour la période 2004-2025.

4.3.6 La Singine à Thörishaus

Calage des apports
de la Singine

La Singine à Thörishaus est un bassin versant pluvio-nival très réactif, sans aménagements. La composante nivale est calée sur la mesure des apports au Lac Noir (mesure du Canton de Fribourg). La partie nivale la plus importante provient de la Kalte Sense qui n'est pas jaugée. Le calage de l'ensemble se fait donc sur la mesure de l'OFEV de la Singine à Thörishaus. Les apports annuels sont globalement bien représentés (Fig. 16), avec toutefois une sous-estimation de 2008 à 2015. Les débits multiannuels (Fig. 17) montrent également un très bon accord si ce n'est une sous-estimation de la fonte en début d'hiver (neige à moyenne altitude). Cela pourrait être cohérent avec une sous-estimation de la neige à moyenne altitude en amont du bassin. Il est cependant difficile d'améliorer le calage, en raison de l'absence de mesures couvrant la période 2004-2015 au lac Noir ou sur la Kalte Sense.

Apports annuels de
la Singine

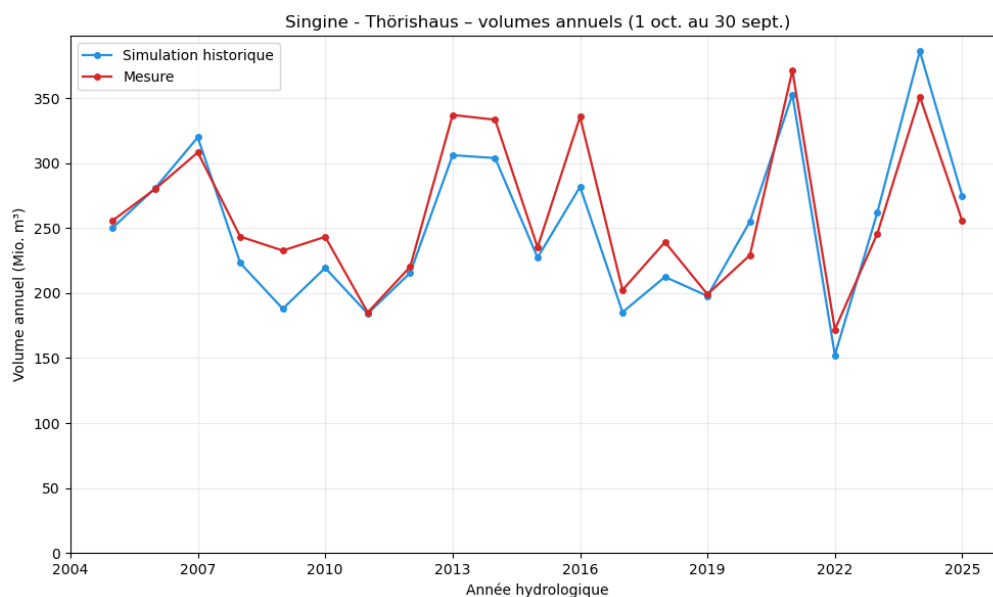


Fig. 16 : Volumes annuels mesurés et simulés de la Singine à Thörishaus pour la période 2004-2025.

Moyenne
multiannuelle des
débits journaliers
de la Singine

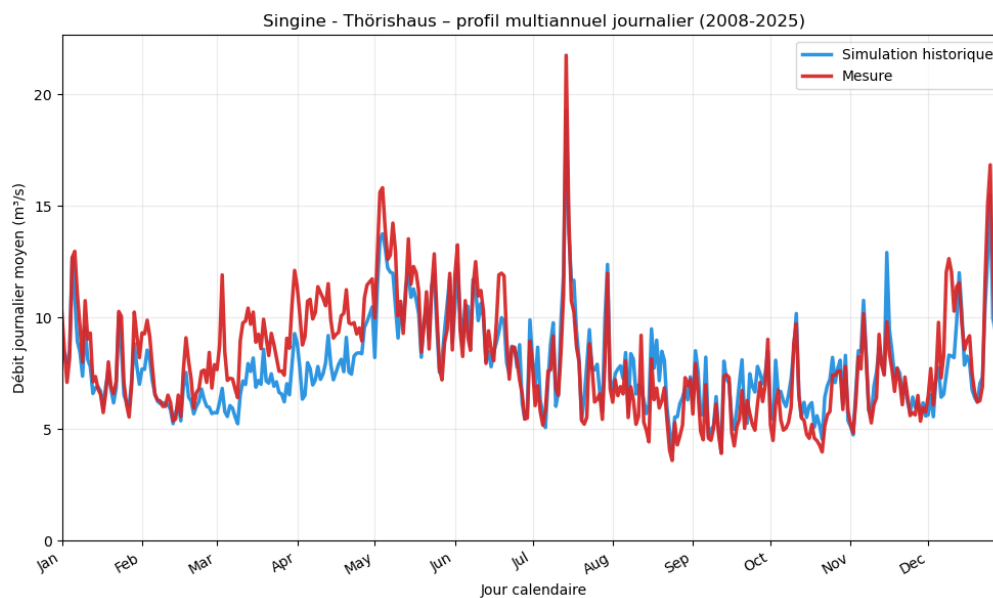


Fig. 17 : Moyenne multiannuelle des débits journaliers mesurés et simulés de la Singine pour la période 2004-2025.

4.4 Production des centrales

Modélisation de la production des centrales

La production des centrales du bassin versant de la Sarine est dépendante d'une bonne modélisation des apports et des niveaux des réservoirs. Lorsque les données disponibles le permettent, le rendement des centrales est calé sur la base des mesures de production. Cet ajustement vise notamment à reproduire en simulation le coefficient énergétique (kWh/m^3), calculé à partir des mesures d'apports et de production. A posteriori, ces coefficients de rendement peuvent être adaptés en fonction de l'usage.

Les rendements des centrales sont calés de manière à reproduire le coefficient énergétique mesuré, indépendamment des conditions d'exploitation des centrales. Les indisponibilités de groupe, par exemple, ne sont pas modélisées. Au Tab. 4, certaines différences peuvent donc apparaître entre les débits turbinés et la production simulés et mesurés. Elles sont généralement liées à des indisponibilités de production, tandis que les coefficients énergétiques sont correctement reproduits.

4.4.1 Modélisation de la centrale ScheM

ScheM = 118 m^3/s et conservation d'un groupe à Schiffenen

L'aménagement de Schiffenen-Morat (ScheM), turbinera directement les eaux de Schiffenen dans le lac de Morat, ce qui augmentera grandement la production (plus grande hauteur de chute). La situation avec ScheM est modélisée avec un groupe de 118 m^3/s (modélisation identique aux autres centrales) et la conservation d'un groupe actuel de 90 m^3/s à Schiffenen qui ne s'activera qu'en cas d'apports très élevés ou pour anticiper des débordements.

Cette modélisation simplifiée permet de reproduire de manière satisfaisante les productions annuelles de ScheM obtenues avec la modélisation détaillée réalisée dans l'étude Hydrique (2024).

Règlement de crue

L'exploitation de la centrale de ScheM est soumise à un règlement de crue visant à protéger le lac de Morat. Ce règlement prévoit l'arrêt de la centrale lorsque certaines cotes seuils des lacs de Morat et de Bienne sont dépassées. Dans le cadre de cette étude, ce règlement ne peut toutefois pas être simulé explicitement. L'Aar n'étant pas modélisée, les niveaux du lac de Bienne nécessaires à l'application du règlement ne sont pas disponibles. Afin de tenir compte de cette contrainte d'exploitation, une correction de 16 GWh/an doit donc être retranchée à la production cumulée de ScheM et Schiffenen. Cette valeur correspond à la perte annuelle moyenne de production simulée sur la période 1990–2023 dans l'étude Hydrique (2024). Les valeurs présentées dans ce rapport correspondent à une exploitation sans application du règlement de crue.

Compensations BKW

Les compensations énergétiques dues à BKW en conséquence de la réduction des apports de la Sarine dans l'Aar ne sont pas prises en compte dans cette modélisation.

4.4.2 Calage rendements globaux des centrales

Tab. 4: Récapitulatif des Débits, productions et rendements des différentes centrales.

Centrale	Période	Débit moyen [m³/s] Mesure	Débit moyen [m³/s] Simulation	Production moyenne [GWh/an] Mesure	Production moyenne [GWh/an] Simulation	Coefficient Énergétique [m³/kWh] Mesure	Coefficient Énergétique [m³/kWh] Simulation
Schiffenen ¹	10.2015 – 10.2025	37.7	37.7	125.2	123.5	9.5	9.6
Schiffenen_ScheM ^{2,3}	10.2015 – 10.2025	–	38.0	–	266.1	–	4.5
Hauterive	10.2015 – 10.2025	27.4	27.9	205.6	197.4	4.2	4.5
Montbovon	10.2015 – 10.2025	11.2	12.2	72.6	79.1	4.9	4.9
Oelberg	10.2015 – 10.2025	32.0	32.5	45.6	46.4	22.1	22.1
Lessoc	10.2015 – 10.2025	14.2	14.6	21.0	21.5	21.4	21.3
Broc	10.2015 – 10.2025	7.4	7.8	58.8	61.2	4.0	4.0
GESA	11.2024 – 10.2025	4.1	4.4	13.5	14.3	9.6	9.6
Dotation Montsalvens	10.2015 – 10.2025	–	0.5	–	1.4	–	11.1
Dotation Montbovon	10.2015 – 10.2025	–	0.4	–	0.4	–	30.0
Dotation Rossens	10.2015 – 10.2025	–	2.9	–	12.2	–	7.4
Dotation Maigrauge	10.2015 – 10.2025	–	4.0	–	4.1	–	30.6

¹ : Comprend la dotation.

² : Comprend la dotation et le groupe de 90 m³/s conservé.

³ : Correction règlement de crue de 16 GWh/an non retranchée.

4.5 Scénarios Climatiques

4.5.1 Trajectoires temporelles des scénarios CH2025

CH2025 : Les scénarios CH2025 (MeteoSwiss and ETH Zurich, 2025) représentent une actualisation par réchauffement plus marqué que MétéoSuisse des projections climatiques par rapport à CH2018 (National Center for Climate Services, 2018). Ces scénarios sont à jour avec l'état actuel des connaissances sur l'évolution du climat en Europe. Cette révision suppose notamment une sensibilité accrue de la Suisse au réchauffement global (réchauffement plus marqué pour un même niveau de réchauffement global), en particulier l'été (Fig. 18). Le réchauffement pourrait ainsi être supérieur de 0.25 à 0.4°C par rapport à CH2018 pour des niveaux de réchauffement globaux de 2 à 3°C.

Comparaison du
réchauffement en
Suisse entre
CH2018 et
CH2025

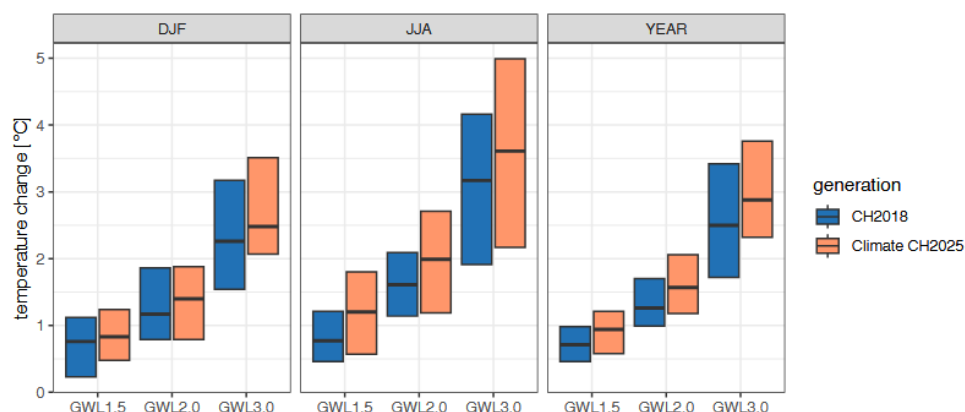


Figure 2.19: **Stronger temperature signals in *Climate* CH2025 than in CH2018.** Changes in winter, summer, and yearly Swiss mean temperature with respect to 1991–2020 for *Climate* CH2025 (orange) and CH2018 (RCP8.5 only, blue) for different GWLs. Shown is the median and the 5th to 95th quantile model range.

Fig. 18 : Ecart à la température en Suisse par rapport à la période 1991-2020 pour différents niveaux de réchauffement global selon les scénarios CH2018 et CH2025 (MeteoSwiss and ETH Zurich, 2025).

Scénarios CH2025
exprimés en GWL
sans chronologie

Les 24 scénarios climatiques CH2025 sont fournis aux stations MétéoSuisse en fonction de niveaux de réchauffement globaux (Global Warming Level, GWL) et ne sont donc pas directement associés à une chronologie. Ils sont également disponibles sur la période de référence 1991-2020. Pour chaque modèle de climat, et chaque GWL, CH2025 fournit 30 ans de simulations climatiques, centrées sur une période pour laquelle le niveau de réchauffement du GWL est atteint, mais non positionnées dans le temps. Afin de construire des séries temporelles continues d'apports jusqu'en 2100, il est nécessaire de reconstituer l'évolution temporelle des scénarios d'émissions (RCP) à partir de ces scénarios-GWL.

Construction de
séries temporelles
CH2025

Les projections du GIEC (2021) fournissent les trajectoires médianes de réchauffement global associées à chaque scénario RCP. La reconstitution se base sur une interpolation linéaire des différents scénarios-GWL suivant ces trajectoires (Fig. 19).

À titre d'exemple, la trajectoire médiane du scénario RCP4.5 atteint un réchauffement global de 1,5°C vers 2030, 2,0°C vers 2050, puis atteint progressivement un réchauffement de 3°C à l'horizon 2120. La série temporelle associée est ainsi construite à partir du scénario GWL 1,5°C pour la période centrée sur 2030 (2015–2044), puis interpolée vers le scénario GWL 2,0°C jusqu'à 2050, etc.

Trajectoire RCP8.5
limitée à un GWL
de 3°C

Il convient de noter que la reconstitution du scénario RCP8.5 est limitée par les données disponibles dans CH2025, qui ne fournit des projections que jusqu'à un réchauffement global de 3 °C. Au-delà de ce seuil, qui pourrait être dépassé dès 2060 selon ce scénario, la trajectoire reconstruite est donc maintenue à 3°C, ce qui conduit à un plafonnement des conditions climatiques projetées en fin de siècle.

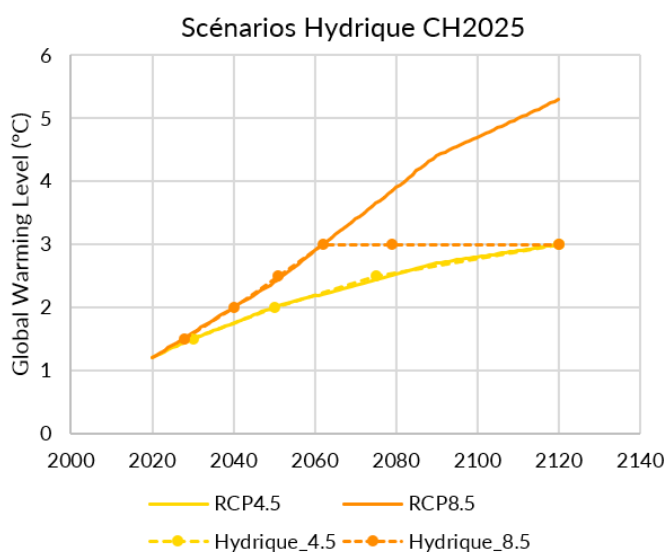


Fig. 19: Reconstitution des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 à partir des données par GWL. Les traits pleins correspondent à la médiane des scénarios du GIEC. Les traitillés correspondent à l'interpolation effectuée dans cette étude.

4.5.2 Resampling horaire des scénarios CH2025

Scénarios horaires
nécessaires pour la
simulation

Les scénarios disponibles sur la plateforme CH2025 ne peuvent pas être utilisés tels quels. En effet, ces scénarios ne sont disponibles qu'à résolution journalière, tandis qu'une résolution horaire est nécessaire pour reproduire les précipitations orageuses, les cycles de fonte de neige ainsi que les cycles de production. La construction de scénarios météorologiques futurs au pas de temps horaires d'après CH2025 est basée sur la méthode des "Delta Change".

Resampling avec la
méthode « Delta
Change »

La méthode "Delta Change" (Bosshard, Kotlarski, & Schär, 2015) permet de reconstruire des séries horaires cohérentes à partir des scénarios climatiques journaliers et de séries d'observations horaires passées.

Cette méthode fonctionne en deux étapes, appliquées à chaque variable (précipitation et température) et chacun des 24 modèles de climat pour toutes les stations simultanément.

1. Calcul de deltas quotidiens entre 2015 et 2100

Calcul des
coefficients

Tout d'abord, les GWL nécessaires pour reconstituer la courbe de réchauffement sont positionnés dans le temps selon la Fig. 19. Sur cette période de 30 ans, on calcule des « coefficients deltas » des précipitations et températures par rapport à la période de référence :

- Les moyennes mensuelles sont réalisées pour chaque période (p. ex. la moyenne des précipitations au mois de janvier entre 2045 et 2074) ainsi que sur la période de référence (1991-2020).
- On calcule un écart « delta » (multiplicatif pour les précipitations, additif pour les températures) entre les moyennes du scénario et de la période de référence.

- On obtient ainsi des coefficients mensuels, représentant l'évolution moyenne des précipitations et de la température. Ces coefficients mensuels sont ensuite lissés avec une résolution journalière selon une interpolation polynomiale. Cette étape permet d'éviter les sauts entre le dernier jour d'un mois et le premier du mois suivant.
- Ces coefficients deltas journaliers sont enfin interpolés entre les différentes « fenêtres » sur lesquelles sont positionnés les GWL pour obtenir une série temporelle continue de deltas journaliers de 2015 à 2100. Par exemple, pour le RCP4.5, si le GWL 1.5 positionné en 2030 a un coefficient de +0.7°C et le GWL 2.0 positionné en 2050 a un coefficient de +1.3°C, on affectera une valeur de +1°C au 1^{er} janvier 2040 (exactement entre les deux).

2. Reconstitution de scénarios horaires entre 2015 et 2100

Générateur
stochastique

Une fois les coefficients delta déterminés, un scénario climatique est généré par blocs de 10 jours consécutifs selon la procédure suivante :

- Sélection de la première date d'un bloc, par exemple 15 juin 2032.
- Tirage aléatoire d'une année de la période de référence 1991 – 2020. Exemple : 1998.
- Tirage aléatoire d'un bloc de 10j situé à +/- 10j du 15 juin 1998.
- Extraction des observations météo (de toutes les stations considérées) sur cette période.
- Application des deltas journaliers du bloc futur considéré (15-24 juin 2032) à ces observations

Scénarios horaires
plausibles avec
tendance et la
variabilité de
CH2025

Cette méthode permet de construire des simulations horaires plausibles car basées sur des séquences observées, tout en préservant la tendance et la variabilité météorologique présentes dans les scénarios climatiques. En revanche, la séquence « exacte » correspondant au scénario climatique est perdue. Des vérifications sont effectuées pour s'assurer de la qualité des scénarios générés, sont présentées ci-après.

4.5.3 Vérifications des scénarios CH2025 reconstruits

Précipitations des
scénarios CH2025
journaliers
cohérentes avec
les observations
1991-2020

On vérifie tout d'abord les propriétés des scénarios CH2025 « bruts » (journaliers) en termes de cumuls annuels de précipitations et de variabilité interannuelle. Les cumuls et la variabilité pour la station de Château d'Oex (Fig. 20 et Fig. 21) montrent que les scénarios CH2025 journaliers reproduisent très bien les caractéristiques des précipitations sur la période passée, avec éventuellement une légère surestimation de la variabilité interannuelle (Fig. 21) et du nombre de jours de pluie (non montré).

Cumuls annuels de
précipitation des
scénarios CH2025
journaliers à
Château-d'Oex

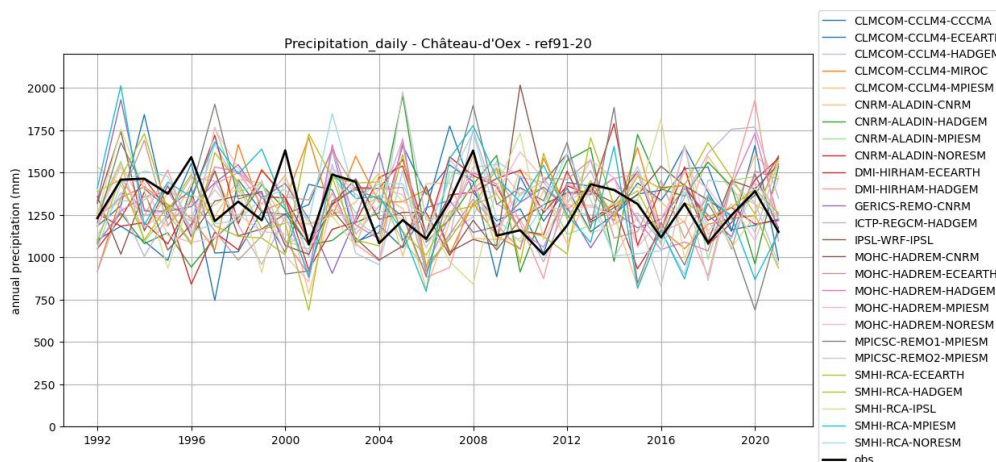


Fig. 20 : Cumuls annuels de précipitations à Château d'Oex selon les scénarios CH2025 et les observations (noir) sur la période de référence (1991-2020).

Variabilité
interannuelle des
cumuls de
précipitation des
scénarios CH2025
journaliers à
Château-d'Oex

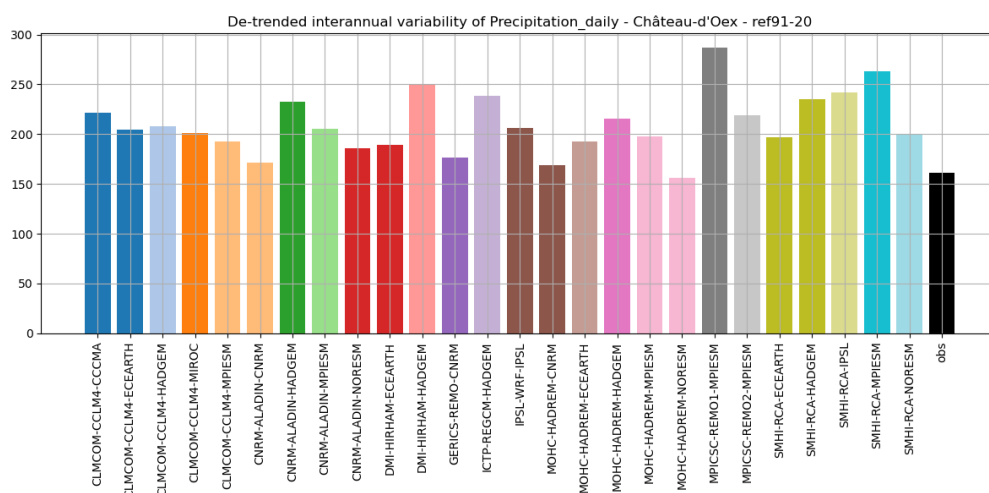


Fig. 21: Variabilité interannuelle (mm) des cumuls de précipitations selon les scénarios CH2025 et les observations (noir) sur la période de référence (1991-2020).

Cumuls et
variabilité
interannuelles
conservés dans les
scénarios
désagrégés

La Fig. 22 compare les cumuls annuels de précipitation d'un scénario CH2025 journalier et de sa version désagrégée au pas de temps horaire. La comparaison montre que la méthode de désagrégation permet de conserver les propriétés statistiques (cumuls annuels et écart-type) avec une grande fiabilité. Le nombre de jours de pluie par an (non-montré) est également correctement conservé.

Le Tab. 5 résume cette vérification pour l'ensemble des scénarios CH2025 désagregés.

Comparaison des
cumuls annuels
d'un scénarios
CH2025 journalier
avec sa version
désagrégée horaire

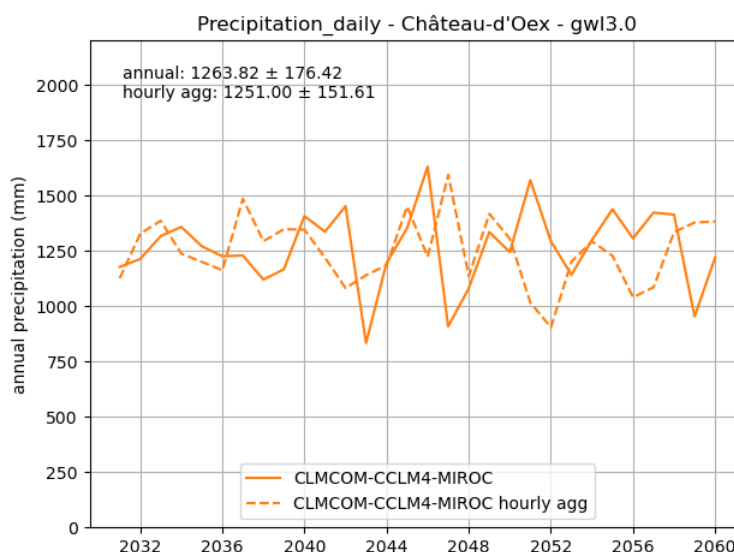


Fig. 22: Cumuls annuels de précipitations à Château d'Oex selon le modèle CLMCOM-CCLM4-MIROC, scénario brut CH2025 (trait plein) et désagrégé au pas de temps horaire (traitillé). Les dates sont purement indicatives.

Tab. 5 : Cumuls annuels moyens et variabilité interannuelle (écart-type) selon les différents scénarios CH2025 pour le GWL 3.0 à Château d'Oex.

Scénarios CH2025	Moyenne annuelle scénarios journaliers (mm)	Moyenne annuelle scénarios horaires (mm)	Variabilité interannuelle scénarios journaliers (mm)	Variabilité interannuelle scénarios horaires (mm)
CLMCOM-CCLM4-CCCMA	1096	1093	230	164
CLMCOM-CCLM4-ECEARTH	1299	1289	209	182
CLMCOM-CCLM4-HADGEM	1230	1267	285	176
CLMCOM-CCLM4-MIROC	1264	1251	176	152
CNRM-ALADIN-CNRM	1333	1307	201	205
CNRM-ALADIN-HADGEM	1485	1494	293	206
CNRM-ALADIN-MPIESM	1388	1424	282	201
CNRM-ALADIN-NORESM	1300	1280	175	211
DMI-HIRHAM-ECEARTH	1268	1207	287	152
DMI-HIRHAM-HADGEM	1107	1040	256	148
GERICS-REMO-CNRM	1276	1323	175	173
ICTP-REGCM-HADGEM	1351	1340	288	183
IPSL-WRF-IPSL	1665	1710	261	250
MOHC-HADREM-CNRM	1312	1312	172	142
MOHC-HADREM-ECEARTH	1227	1284	230	168
MOHC-HADREM-HADGEM	1228	1255	234	201
MOHC-HADREM-MPIESM	1461	1439	231	208
MOHC-HADREM-NORESM	1333	1319	179	183
MPICSC-REMO2-MPIESM	1241	1201	208	198
SMHI-RCA-ECEARTH	1190	1142	224	154
SMHI-RCA-HADGEM	1259	1201	285	178
SMHI-RCA-IPSL	1163	1187	250	201
SMHI-RCA-MPIESM	1327	1343	278	181
SMHI-RCA-NORESM	1280	1275	168	143

Finalement, le Tab. 6 compare les moyennes et variabilités interannuelles des températures des scénarios CH2025 journaliers et désagregés à Château d'Oex pour un GWL de 3.0 degrés. La moyenne est bien reproduite, tandis que la variabilité interannuelle semble parfois sous-estimée. Cela peut être marginalement dû à l'interpolation des deltas quotidiens (cf. Sec. 4.5.2, « 1. Calcul de deltas quotidiens entre 2015 et 2100 », dernier point). Cependant, cela peut compenser une légère surestimation de la variabilité interannuelle par les scénarios CH2025 sur la période de référence (0.60 contre 0.52 pour les observations).

Tab. 6 : Températures annuelles moyennes et variabilité interannuelle (écart-type) selon les différents scénarios CH2025 pour le GWL 3.0 à Château d'Oex.

Scénarios CH2025	Moyenne scénarios journaliers (°C)	Moyenne scénarios horaires (°C)	Variabilité scénarios journaliers (°C)	Variabilité scénarios horaires (°C)
CLMCOM-CCLM4-CCCMA	8.4	8.3	0.8	0.6
CLMCOM-CCLM4-ECEARTH	8.1	8.1	0.7	0.7
CLMCOM-CCLM4-HADGEM	8.3	8.4	0.7	0.6
CLMCOM-CCLM4-MIROC	8.9	9.1	0.6	0.6
CNRM-ALADIN-CNRM	7.9	7.9	0.6	0.5
CNRM-ALADIN-HADGEM	8.6	8.6	0.8	0.6
CNRM-ALADIN-MPIESM	8.4	8.5	0.9	0.8
CNRM-ALADIN-NORES	8.5	8.3	0.7	0.6
DMI-HIRHAM-ECEARTH	8.2	8.2	0.7	0.7
DMI-HIRHAM-HADGEM	8.0	8.1	0.6	0.5
GERICS-REMO-CNRM	8.2	8.2	0.8	0.5
ICTP-REGCM-HADGEM	8.1	8.1	0.6	0.6
IPSL-WRF-IPSL	8.1	8.3	1.1	0.8
MOHC-HADREM-CNRM	8.0	8.1	0.7	0.6
MOHC-HADREM-ECEARTH	8.6	8.6	0.7	0.7
MOHC-HADREM-HADGEM	8.1	8.2	0.8	0.8
MOHC-HADREM-MPIESM	8.7	8.8	0.8	0.6
MOHC-HADREM-NORES	8.2	8.3	0.8	0.8
MPICSC-REMO2-MPIESM	8.4	8.7	0.7	0.7
SMHI-RCA-ECEARTH	8.5	8.7	1.0	0.8
SMHI-RCA-HADGEM	8.9	8.7	0.8	0.7
SMHI-RCA-IPSL	9.1	9.2	0.9	0.9
SMHI-RCA-MPIESM	8.4	8.3	0.8	0.8
SMHI-RCA-NORES	8.4	8.3	0.8	0.7

5 Résultats : production hydroélectrique future

Trajectoires d'émission de CO₂ : RCP4.5 et RCP8.5	Deux scénarios de réchauffement planétaire sont étudiés : RCP4.5, scénario intermédiaire dans lequel les émissions atteignent un pic autour du milieu du siècle avant de diminuer, conduisant à un réchauffement global de l'ordre de +2,5 à +3 °C à la fin du siècle ; et RCP8.5, scénario de très fortes émissions supposant une poursuite importante du recours aux énergies fossiles, qui conduit à environ +4,5 °C en 2100. Ce dernier scénario apparaît aujourd'hui peu probable comme trajectoire centrale, bien qu'il reste utilisé pour étudier les risques climatiques élevés.
Une trajectoire intermédiaire SSP2-4.5 est considérée comme plus probable	Dans les travaux récents du GIEC, ces scénarios RCP sont désormais complétés par les SSP (« Shared Socioeconomic Pathways »), qui décrivent différentes trajectoires d'évolution de la société et de l'économie. SSP2, dit « Middle of the Road », correspond à un monde où les tendances socio-économiques actuelles se poursuivent globalement, avec des progrès modérés en matière de développement et de transition énergétique. SSP5, dit « Fossil-fueled Development », décrit au contraire un monde caractérisé par une forte croissance économique, une consommation énergétique élevée et un recours important aux combustibles fossiles. SSP2-4.5 constitue ainsi une trajectoire intermédiaire proche de RCP4.5, tandis que SSP5-8.5 représente une trajectoire de très fortes émissions comparable à RCP8.5.
Simulations RCP8.5 limitées à l'horizon 2070	Les scénarios CH2025 ne permettent pas d'explorer des hausses de températures globales au-delà de +3°C. Les scénarios RCP4.5 seront donc analysés jusqu'à 2100, tandis que l'analyse des RCP8.5 s'arrêtera en 2070.

5.1 Format des résultats

Export des résultats	Les résultats des simulations climatiques (débits et production) sont fournis pour les 24 scénarios climatiques suivant les deux trajectoires RCP4.5 et RCP8.5 au pas de temps horaire, de 2015 à 2100. Nous rappelons qu'après 2070, les résultats des simulations RCP8.5 s'éloignent de la trajectoire du GIEC (Sec. 4.5.1 et Fig. 19), ceux-ci sont donc fournis uniquement à titre indicatif ou pour pouvoir « rebasculer » en format « Global Warming Level », voir section ci-dessous. La simulation de référence est également fournie sur la période 1991-2025. Les Tab. 7 et Tab. 8 présentent les différents points de simulation disponibles, incluant notamment les apports intermédiaires entre les différents ouvrages.
---------------------------------	--

Tab. 7 : Liste des points d'export pour les cours d'eau et apports intermédiaires. Q simulé est le débit simulé en m³/s.

Point d'export	Description	Variable
Cours d'eau, Apports intermédiaires		
Apports Lac Noir		Q simulé
Gérine - Marly		Q simulé
Glâne - Matran		Q simulé
Jogne - Charmey		Q simulé
Lessoc Apports Tot		Q simulé
Lessoc intermediaire	Intermédiaire entre Rossinière et Lessoc.	Q simulé
Maigrauge intermediaire	Intermédiaire entre le barrage de Rossens et celui de la Maigrauge.	Q simulé
Maigrauge tot		Q simulé
Montsalvens		Q simulé
Montsalvens intermediaire	Intermédiaire entre GESA et Montsalvens.	Q simulé
Rossens intermediaire	Intermédiaire entre le barrage de Lessoc, le barrage de Montsalvens et le barrage de Rossens.	Q simulé
Rossens tot		Q simulé
Rossiniere		Q simulé
Saane - Laupen		Q simulé
Sarine - Broc- Chateau D'en Bas		Q simulé
Sarine - Fribourg		Q simulé
Sarine jonction Aare		Q simulé
Schiffenen intermediaire	Intermédiaire entre le barrage de la Maigrauge et le barrage de Schiffenen.	Q simulé
Schiffenen tot		Q simulé
Sense - thorishaus		Q simulé
Sionge	à Vuippens - Château.	Q simulé
Taverna - Flamatt		Q simulé
Trême - Bulle		Q simulé

Tab. 8 : Liste des points d'export pour les centrales et les dotations turbinées. Q est le débit turbiné simulé en m³/s, Puissance la puissance turbinée simulée en MW.

Point d'export	Description	Variables
Centrales		
Broc		Q, Puissance
Dotation Maigrauge		Q, Puissance
Dotation Montbovon		Q, Puissance
Dotation Montsalvens		Q, Puissance
Dotation Rossens		Q, Puissance
Dotation Schiffenen		Q, Puissance
Dotation Schiffenen_ScheM		Q, Puissance
GESA		Q, Puissance
Hauterive		Q, Puissance
Lessoc		Q, Puissance
Montbovon		Q, Puissance
Oelberg		Q, Puissance
Schiffenen		Q, Puissance
Schiffenen_ScheM		Q, Puissance
Schiffenen_ScheM DEV	Turbine de la variante Schiffenen_ScheM en cas de déversement.	Q, Puissance

5.2 Transcription en Global Warming Level « GWL »

GWL vs. série
temporelle

Pour rappel (Sec. 4.5.1), les scénarios climatiques CH2025 sont 30 ans de simulations, non horodatées, dont la température moyenne correspond à un niveau de réchauffement planétaire donné, le GWL. En concertation avec M. Eric Rast (Canton de Fribourg), nous avons choisi de fournir les scénarios en séries temporelles continues de 2015 à 2100 et non pas par GWL, (ce qui

implique une interpolation des scénarios fournis par CH2025). C'est la seule solution pour modéliser la disparition des stocks glaciaires - certes relativement négligeables.

Transformer les
séries temporelles
en GWL

Il est cependant possible de reconstituer les projections hydrologiques de cette étude en « scénarios par GWL ». Pour cela, il suffit de se baser sur l'extrapolation effectuée en Fig. 19 et résumée dans le Tab. 9 qui se lit comme suit. Par exemple, le RCP4.5 atteint un GWL de 1.5 en 2030. Cela veut dire que selon ce scénario, la température globale moyenne sur les 30 années 2015-2044 (centrées en 2030) sera de +1.5°C par rapport à la période préindustrielle. On peut donc extraire ces années de nos résultats si on s'intéresse à un scénario « GWL1.5 ». De la même manière, on aura deux options pour extraire le GWL2.0 : soit 2035-2064 (RCP4.5) soit 2025-2054 (RCP8.5). La différence entre ces deux « extractions » résidera dans la tendance climatique. La Fig. 19 montre en effet que la tendance (température) est nettement plus forte (réchauffement plus rapide) dans le RCP8.5 que dans le RCP4.5. Ce choix est laissé à la discrétion de l'utilisateur.

Tab. 9 : Années pour lesquelles les scénarios RCP atteignent les différents GWL.

Année	RCP4.5	RCP8.5
2030	GWL1.5	
2040		GWL2.0
2050	GWL2.0	
2051		GWL2.5
2062		GWL3.0
2075	GWL2.5	
2079		GWL3.0

5.3 Evolution des apports et du productible

Présentation des
points clés,
ensemble des
résultats en annexe

Cette partie présente les éléments principaux de l'évolution du productible et des apports selon les simulations. Les ouvrages de la Sarine sont parcourus d'amont en aval, en se focalisant sur les changements clés en termes de cumuls annuels et de saisonnalité.

Une analyse des apports de la Singine est également proposée. En outre, l'évolution des débits classés est présentée sur quelques bassins versants clés.

L'ensemble des graphiques (production et apports) de tous les ouvrages est disponible en Annexe A – Figures des résultats de simulation.

5.3.1 Centrale de Montbovon

Montbovon :
légère diminution
du productible
annuel

En moyenne, le productible simulé à la centrale de Montbovon est en légère baisse d'ici à 2100 (Fig. 23). Cette baisse cache un changement assez notable de la saisonnalité de la production (Fig. 24, Fig. 25). La hausse de la limite de l'enneigement combinée avec la hausse des températures induit une fonte plus précoce et plus lente de l'enneigement (Musselman, 2017). En effet, en raison de la hausse de la limite d'enneigement, la surface enneigée est plus réduite au moment où l'énergie disponible pour la fonte est maximale.

Changements
estivaux et
hivernaux

En outre, l'étiage estival est plus marqué, car il y aura moins de précipitations, et davantage d'évapotranspiration l'été (MeteoSwiss and ETH Zurich, 2025). En hiver, en revanche, les débits augmentent sensiblement, car les précipitations augmentent légèrement, et se feront davantage sous forme de pluie.

Comparaison
RCP4.5-RCP8.5

Les scénarios RCP 4.5 et 8.5 donnent sensiblement la même évolution des productions annuelles moyennes (Fig. 23). Le changement dans la saisonnalité des débits est simplement plus précoce selon le RCP8.5. Avec ce scénario, la saisonnalité de 2045-2070 est à peu près équivalente à celle du RCP4.5 en 2070-2100, soit env. 25 ans plus tard.

Montbovon :
production
annuelle RCP4.5 et
RCP8.5

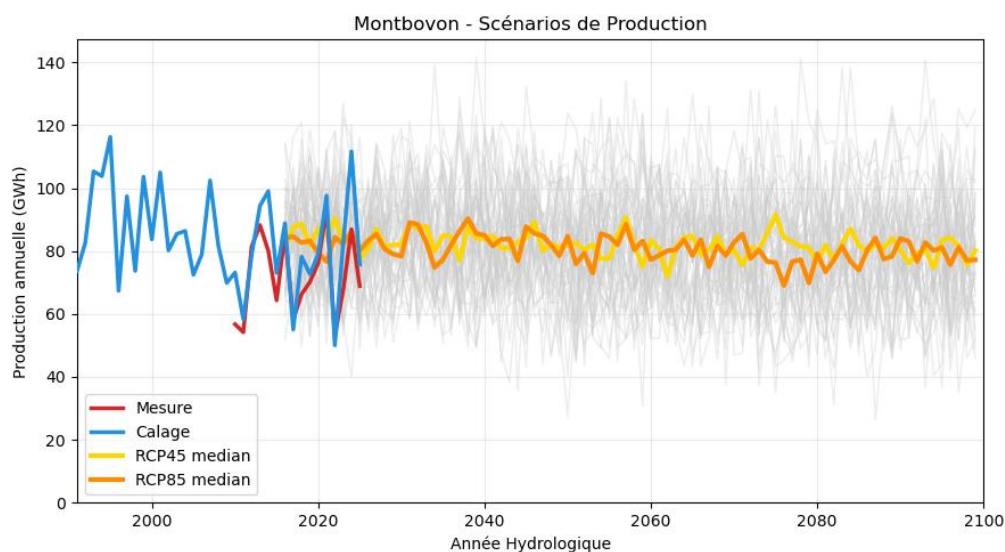


Fig. 23: Scénarios d'évolution du productible annuel à Montbovon. Pour le RCP8.5, les données sont uniquement à titre indicatif après 2070.

Montbovon :
moyenne
multiannuelle
puissance
journalière RCP4.5

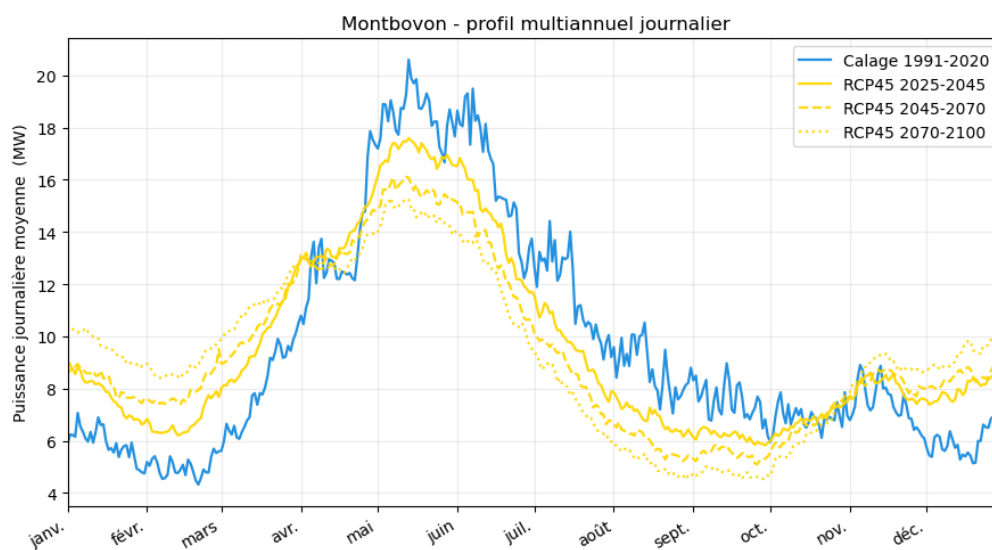


Fig. 24 : Moyenne multiannuelle du productible à Montbovon selon le scénario RCP4.5.

Montbovon :
moyenne
multiannuelle
puissance
journalière RCP8.5

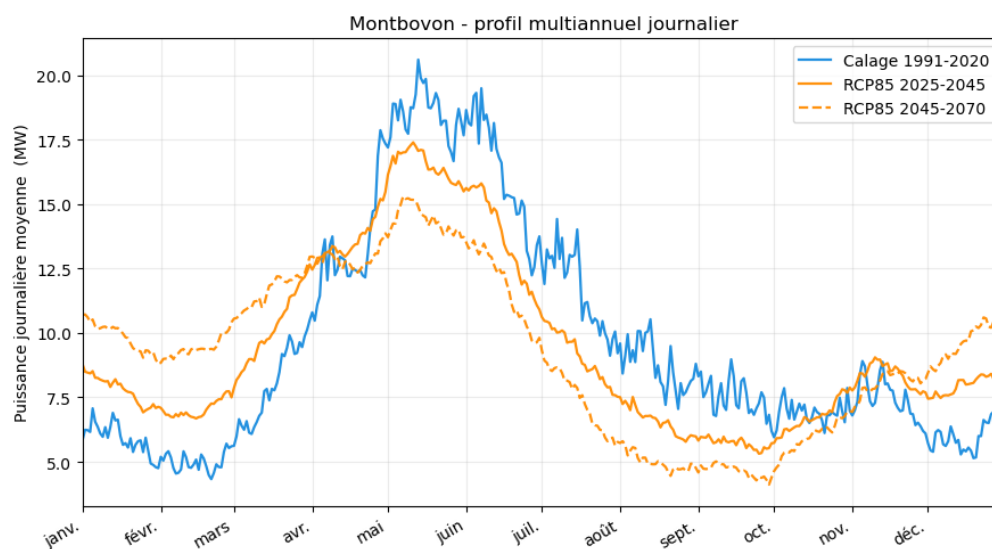


Fig. 25 : Moyenne multiannuelle du productible à Montbovon selon les scénarios RCP8.5.

5.3.2 Centrale de Hauterive

Hauterive : légère
diminution du
productible annuel

Comme pour Montbovon, le productible de la centrale de Hauterive montre une légère baisse (Fig. 26). La multiannuelle du productible selon le RCP4.5 montre un changement sensible (Fig. 27). La production est « aplatie » de novembre à juin, avec un pic se déplaçant vers février. A

l'horizon 2070-2100, le « creux » de production se produirait en août-septembre et non plus l'hiver.

Niveau cible actuel
non adapté à
l'évolution de la
saisonnalité des
apports

Il faut cependant noter que la saisonnalité de cette courbe de production est fortement affectée par le « niveau cible » du lac de la Gruyère établi sur 2015-2025 (Fig. 28). A l'avenir, la fonte du manteau neigeux étant plus précoce, la vidange du lac pourrait avoir lieu plus tôt. La baisse de production en août-septembre peut s'expliquer par la nécessité de maintenir le débit réservé et/ou un niveau du lac élevé à cette période en dépit d'apports plus faibles.

La Fig. 28 montre ce comportement pour le scénario CLMCOM-CCLM4-CCCMA (trajectoire RCP4.5). On y observe une occurrence régulière de débordements modélisés (niveau du lac atteignant le niveau « maximal »), notamment en janvier, mai-juin et novembre. On observe également que certaines années, le niveau cible ne peut pas être maintenu en août-septembre (niveau sensiblement en-dessous du niveau cible) car la dotation doit être maintenue.

La valorisation
énergétique des
apports demandera
une gestion plus
flexible où les
prévisions
hydrologiques
opérationnelles
gagneront encore
en importance

La gestion future du lac de la Gruyère devrait faire l'objet d'une analyse approfondie, mais plusieurs évolutions peuvent déjà être identifiées. Actuellement, la gestion saisonnière du lac repose notamment sur une vidange hivernale, destinée à créer suffisamment de volume pour accueillir les apports importants liés à la fonte nivale du printemps. Cette stratégie est adaptée à un régime hydrologique relativement régulier d'une année à l'autre, dans lequel une part importante des précipitations hivernales est temporairement stockée sous forme de neige avant d'être restituée au printemps. Avec le changement climatique, cette logique devrait devenir moins robuste: une part croissante des précipitations hivernales tombera directement sous forme de pluie et la fonte du manteau neigeux interviendra plus tôt. Les apports importants pourront donc survenir plus tôt dans l'année, mais aussi avec un timing potentiellement plus variable d'une année à l'autre selon les épisodes de pluie, les températures et l'état du manteau neigeux. La gestion devra ainsi probablement gagner en flexibilité, car une courbe saisonnière fixe fondée sur le régime historique pourrait conduire certaines années à disposer trop tardivement du volume de stockage nécessaire.

Les projections montrent des apports estivaux plus faibles et des étiages plus marqués, notamment en août et septembre. Une stratégie conservant le fonctionnement actuel pourrait donc conduire à des situations où le niveau cible ne peut plus être maintenu pour assurer les débits de dotation. Il en résulte une perte de chute et donc de production. La gestion du lac devra probablement être repensée pour tenir compte à la fois d'apports hiverno-printaniers plus précoces et moins prévisibles dans leur calendrier, et d'une période déficitaire davantage concentrée en fin d'été. Il convient toutefois de souligner que ces réflexions découlent ici uniquement de la valorisation énergétique des apports et de leur saisonnalité. Elles ne prennent pas en compte les autres contraintes ou objectifs de gestion du lac.

Hauterive :
production
annuelle RCP4.5 et
RCP8.5

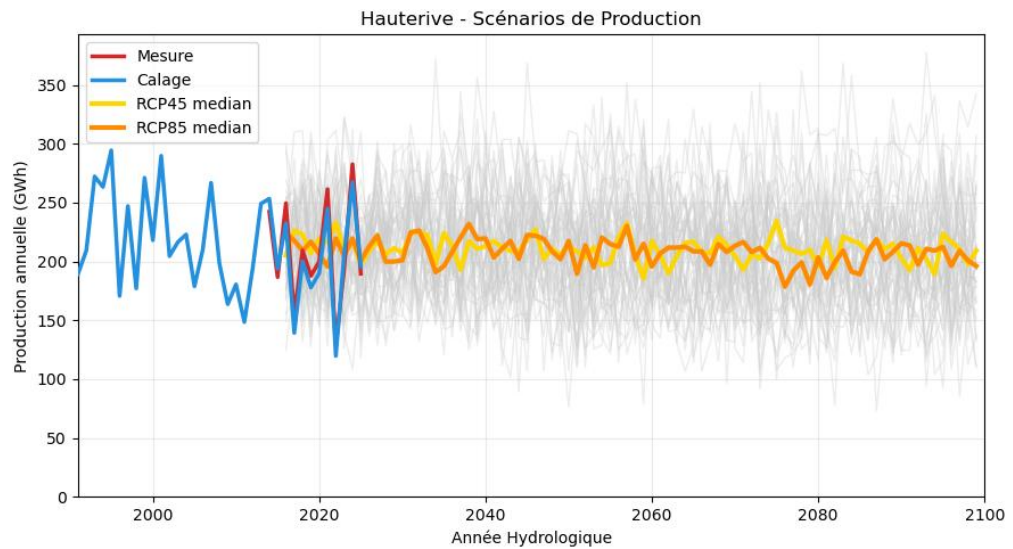


Fig. 26 : Scénarios d'évolution du productible annuel à Hauterive. Pour le RCP8.5, les données sont uniquement à titre indicatif après 2070.

Hauterive :
moyenne
multiannuelle
puissance
journalière RCP4.5

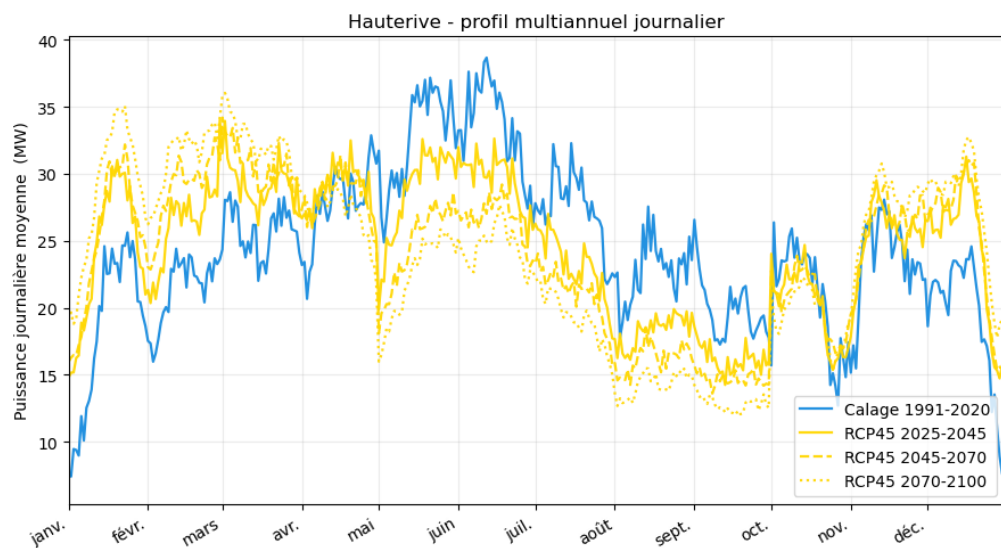


Fig. 27 : Moyenne multiannuelle du productible à Hauterive selon les scénarios RCP4.5.

Lac de la Gruyère :
évolution annuelle
du niveau de la
retenue selon un
scénario RCP4.5

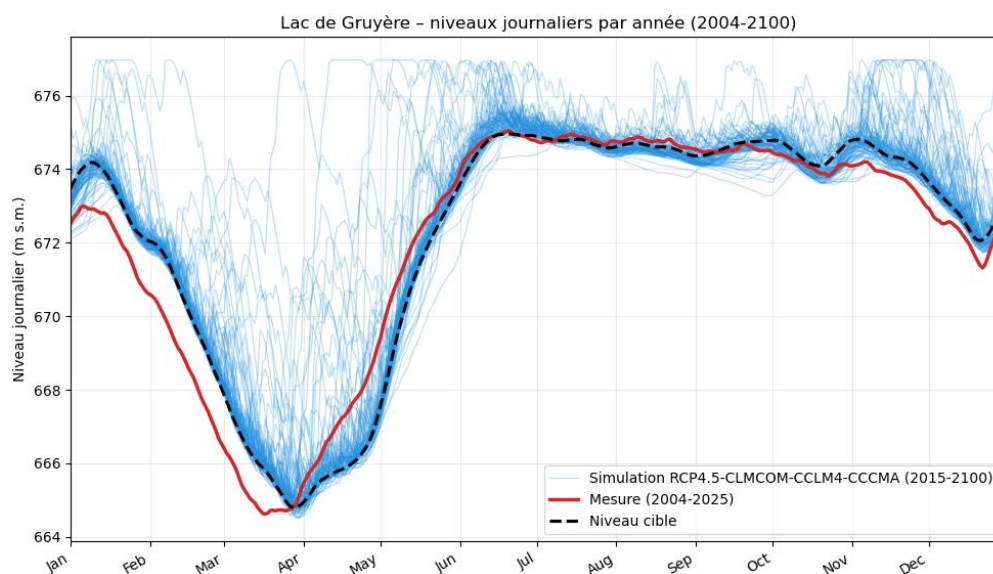


Fig. 28 : Courbe multi-annuelle du niveau du lac de la Gruyère pour le modèle CLMCOM-CCLM4-CCCMA (trajectoire RCP4.5) entre 2015 et 2100. La mesure (rouge) est moyennée sur 2004-2025. Les différentes années de simulation sont représentées en bleu, la courbe cible en trait-tillé noir.

5.3.3 Schiffenen

Schiffenen /
ScheM : légère
diminution du
productible annuel

L'ouvrage actuel de Schiffenen ainsi que la variante Schiffenen-Morat (ScheM) sont modélisés. Le productible suit exactement la même tendance dans les deux cas. En effet, seuls des débordements du barrage pourraient expliquer une différence, mais ceux-ci sont similaires dans les deux cas. On ne présente ainsi que les projections pour l'ouvrage actuel (Fig. 29). La saisonnalité de la production est conditionnée par celle de Rossens (tel que mis en évidence sur la période historique) et suit la même tendance (Fig. 30). En effet, les apports intermédiaires entre le barrage de la Gruyère et celui de Schiffenen ne représentent qu'une faible partie du débit total. Ceux-ci connaîtront une baisse de l'ordre de 4% d'ici la fin du siècle (Fig. 31).

Schiffenen :
production
annuelle RCP4.5 et
RCP8.5

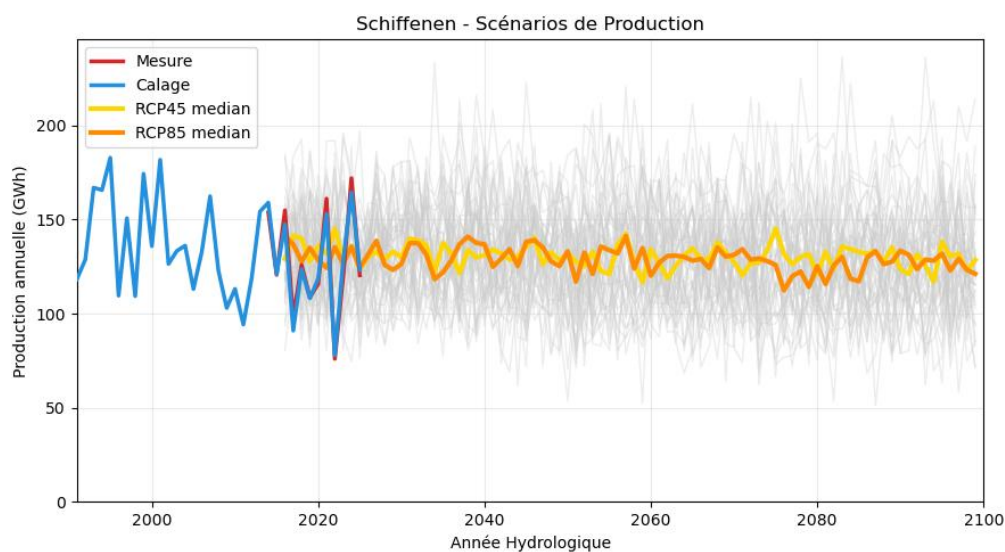


Fig. 29 : Scénarios d'évolution du productible annuel à Schiffenen. Pour le RCP8.5, les données sont uniquement à titre indicatif après 2070.

Schiffenen :
moyenne
multiannuelle
puissance
journalière RCP4.5

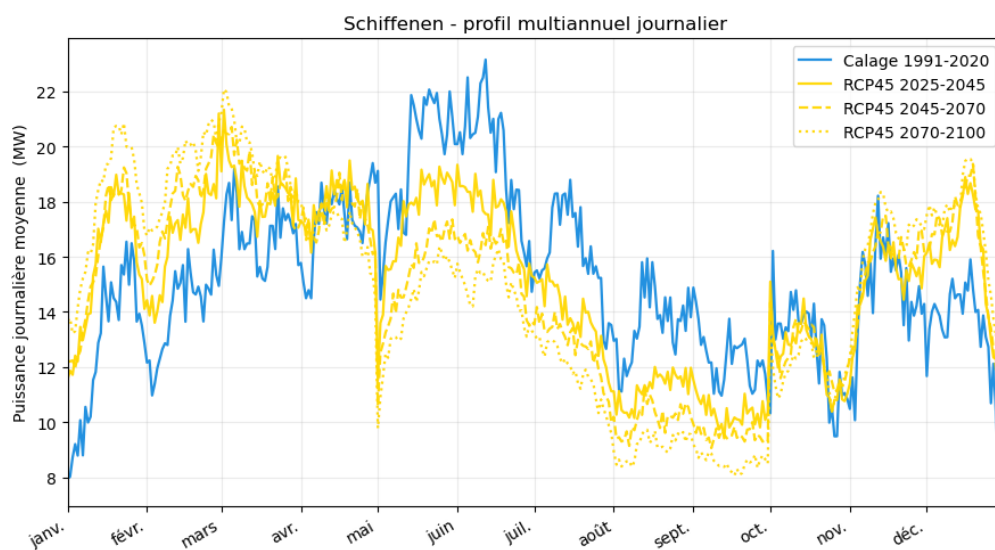


Fig. 30 : Moyenne multiannuelle du productible à Schiffenen selon les scénarios RCP4.5.

Apports
intermédiaires
Rossens -
Schiffenen

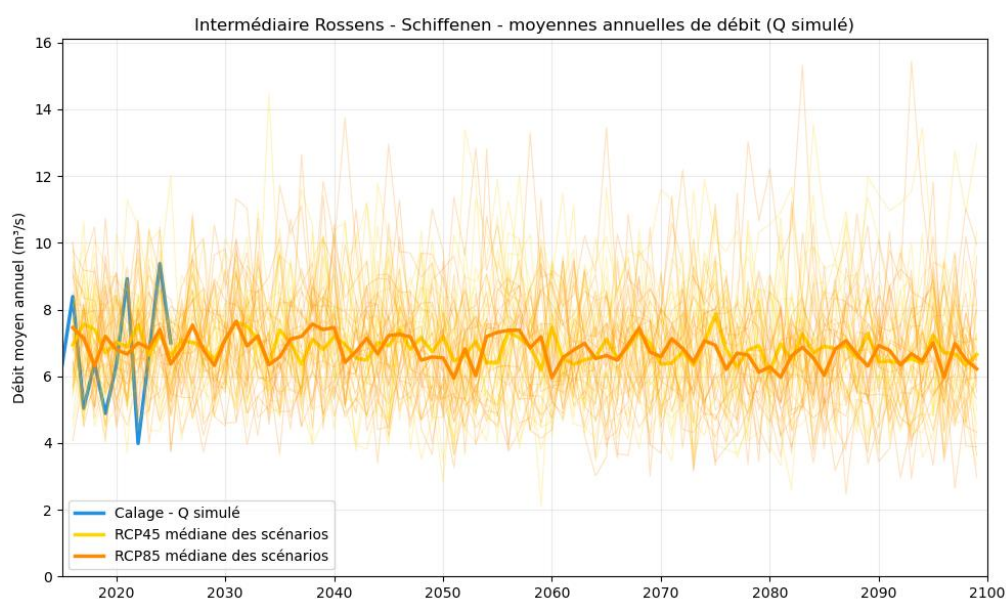


Fig. 31 : Scénario d'évolution des apports intermédiaires entre les ouvrages de Rossens et de Schiffenen.

5.3.4 Singine

Singine: diminution
des apports et des
débits d'étiage

Le débit annuel moyen de la Singine à Thörishaus est amené à diminuer, comme simulé sur la période de référence (Fig. 32). D'un point de vue statistique, on observe peu d'évolution des débits classés (Fig. 33). En revanche, les débits minimaux moyens sur 7 jours diminueront sensiblement par rapport à la simulation sur la période de référence selon les scénarios RCP (Fig. 34). Les scénarios semblent montrer également une baisse de variabilité des débits minimaux sur 7 jours (boîtes à moustaches plus resserrées) mais ceci est probablement un artefact statistique. En effet, la mesure et la simulation de référence sont déterministes (une seule réalisation), alors que ces projections sont ensemblistes (24 simulations). L'aggrégation de cet ensemble « réduit » donc la variabilité. Ces résultats semblent cohérents avec l'étude Hydro CH2018 (Federal Office for the Environment (BAFU), 2021).

Singine : apports
annuels

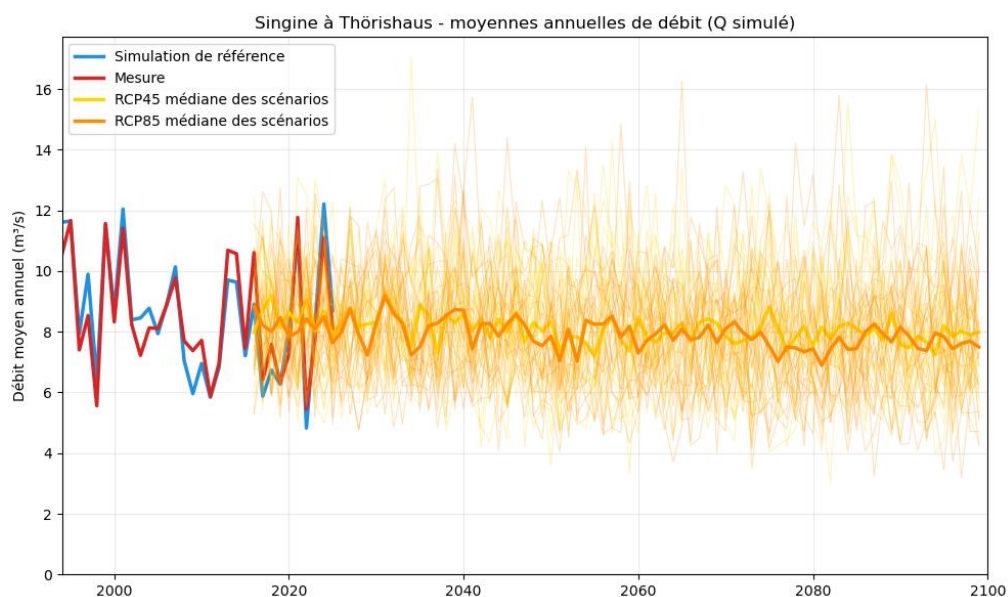


Fig. 32 : Scénario d'évolution du débit annuel moyen de la Singine à Thörishaus. Pour le RCP8.5, les données sont uniquement à titre indicatif après 2070.

Singine : débits
classés

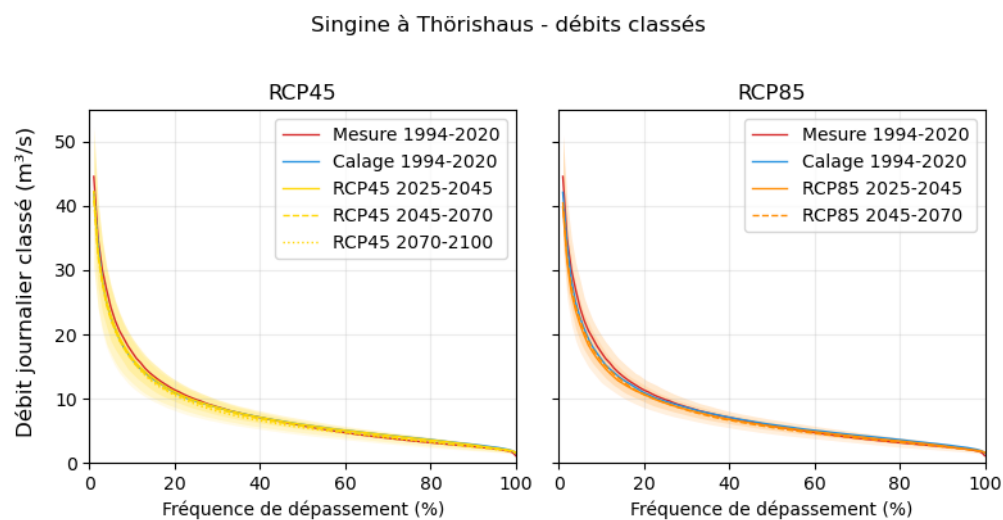


Fig. 33 : Courbes des débits moyens journaliers classés de la Singine à Thörishaus, pour la mesure, la simulation de référence (calage), et les RCP 45 (gauche) et RCP 85 (droite) à diverses échéances.

Singine : débits
minimaux sur 7
jours

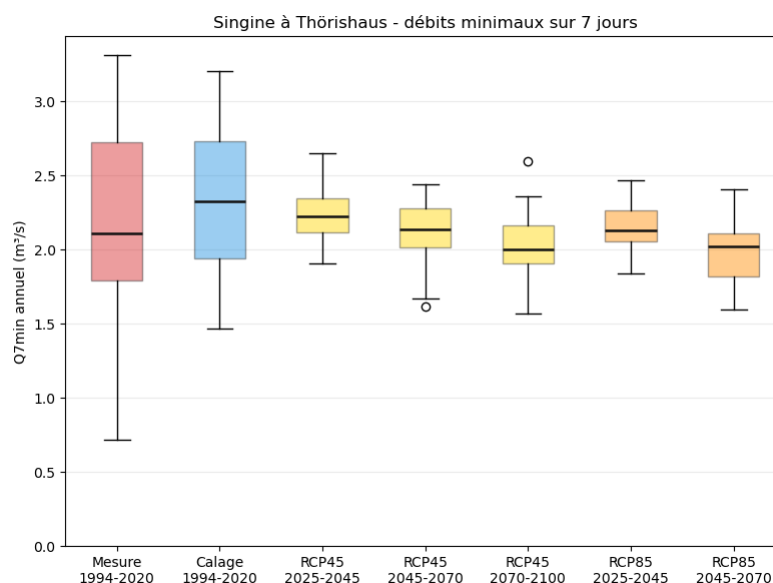


Fig. 34 : Evolution du minimum du débit moyen sur 7 jours selon la mesure, la simulation de référence (calage) et les scénarios RCP à différents horizons.

5.4 Synthèse du productible

La Fig. 35 présente l'évolution du productible sur les différentes centrales par rapport à la période historique. Ce graphique synthétise les résultats présentés dans la section précédente, avec globalement une légère baisse de la production totale. La baisse de la production plus marquée pour Schiffenen_ScheM que pour Schiffenen s'explique sans doute par la nécessité de maintenir le débit de dotation, turbiné dans la Sarine et non pas dans le lac de Morat (et donc avec une hauteur de chute plus faible). Le même phénomène se produit pour Rossens entre la centrale d'Hauterive et la dotation. Les données sont également synthétisées au Tab. 10. La légère augmentation potentielle pour GESA s'explique par le changement de régime hydrologique avec moins de fonte printanière et plus de débit hivernal. A l'heure actuelle, le débit est supérieur à la capacité de production au printemps, et en-dessous en hiver. Le volume « transféré » du printemps vers l'hiver pourrait donc à l'avenir être valorisé.

Évolution du
productible de
toutes les centrales

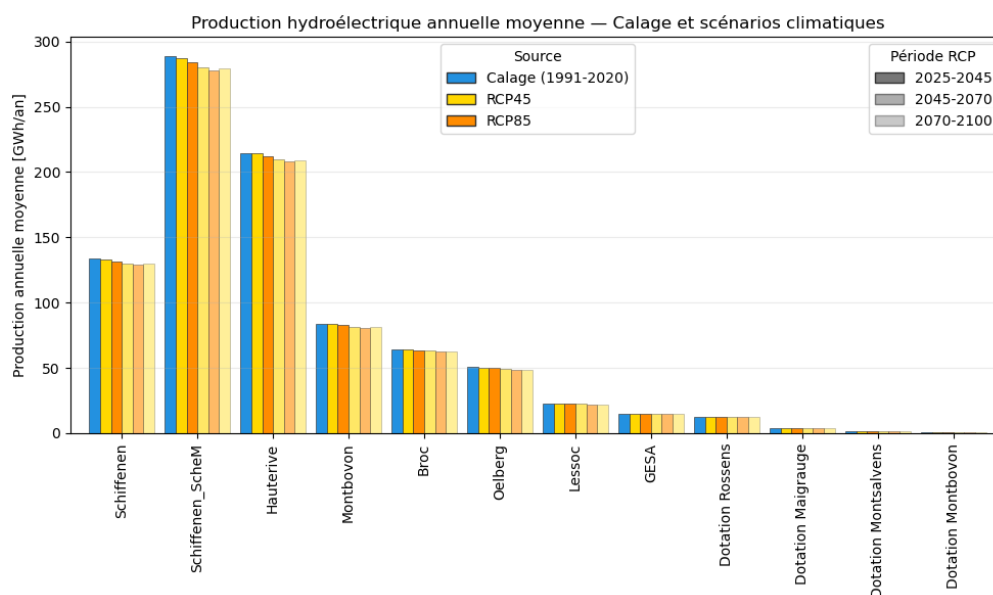


Fig. 35: Evolution du productible annuel moyen pour les différentes centrales.

Tab. 10 : Synthèse de l'évolution du productible sur les différentes centrales.

Centrale	Calage (1991-2020) [GWh/an]	RCP45 (2025-2045) [GWh/an]	RCP45 (2045-2070) [GWh/an]	RCP45 (2070-2100) [GWh/an]	RCP85 (2025-2045) [GWh/an]	RCP85 (2045-2070) [GWh/an]
Schiffenen ¹	133.5	133.1 (-0.3%)	130.2 (-2.5%)	129.7 (-2.8%)	131.7 (-1.3%)	129.2 (-3.2%)
Schiffenen_ScheM ^{2,3}	288.9	287.1 (-0.6%)	280.3 (-3.0%)	279.1 (-3.4%)	283.8 (-1.8%)	277.9 (-3.8%)
Hauterive	214.1	214.7 (+0.3%)	209.7 (-2.1%)	209.0 (-2.4%)	212.0 (-1.0%)	208.1 (-2.8%)
Montbovon	84.0	84.0 (-0.1%)	81.7 (-2.8%)	81.4 (-3.2%)	82.9 (-1.4%)	80.9 (-3.8%)
Broc	63.8	64.0 (+0.4%)	63.0 (-1.3%)	62.7 (-1.7%)	63.5 (-0.5%)	62.5 (-2.0%)
Oelberg	50.5	50.3 (-0.5%)	49.1 (-2.9%)	48.8 (-3.5%)	49.7 (-1.7%)	48.6 (-3.9%)
Groupe E Lessoc	22.9	22.8 (-0.0%)	22.3 (-2.6%)	22.1 (-3.2%)	22.6 (-1.3%)	22.0 (-3.7%)
Dotation Rossens	12.2	12.2 (+0.0%)	12.2 (+0.0%)	12.2 (+0.1%)	12.2 (-0.0%)	12.2 (+0.1%)
Dotation Maigrage	4.1	4.1 (-0.1%)	4.1 (-0.1%)	4.1 (-0.2%)	4.1 (-0.1%)	4.1 (-0.2%)
Dotation Montsalvens	1.4	1.4 (+0.0%)	1.4 (-0.0%)	1.4 (-0.0%)	1.4 (+0.0%)	1.4 (-0.0%)
Dotation Montbovon	0.4	0.4 (-0.0%)	0.4 (-0.0%)	0.4 (-0.1%)	0.4 (-0.0%)	0.4 (-0.0%)
Total actuel	586.9	587.1 (+0.0%)	574.0 (-2.2%)	571.9 (-2.6%)	580.4 (-1.1%)	569.4 (-3.0%)
Total variante ScheM ³	742.4	741.1 (-0.2%)	724.1 (-2.5%)	721.3 (-2.8%)	732.4 (-1.3%)	718.1 (-3.3%)
GESA GESA	14.4	14.8 (+2.4%)	14.6 (+1.5%)	14.7 (+1.8%)	14.7 (+1.7%)	14.6 (+1.5%)

¹ : Comprend la dotation.

² : Comprend la dotation et le groupe de 90 m³/s conservé.

³ : Correction règlement de crue de 16 GWh/an non retranchée.

6 Conclusion

Modèle calé sur les mesures de la période 2015-2025	Cette étude réalise des projections climatiques de la production hydroélectrique de la cascade de la Sarine à l'horizon 2100 selon les scénarios climatiques CH2025. La Singine est également modélisée. Les simulations sont réalisées avec le modèle pluie-débit <i>Routing System</i> . Le modèle est calé de manière indépendante par bassin versant sur la période 2015-2025. Les projections, initialisées sur la simulation de calage, sont calculées sur la période 2015-2100.
Trajectoires RCP4.5 et RCP8.5	Les projections des apports futurs et du productible sont réalisées selon 24 modèles climatiques suivant les trajectoires des RCP 4.5 et RCP 8.5.
Saisonnalité et variation interannuelle des apports fidèlement calées	Le modèle reproduit fidèlement les volumes, les variations interannuelles et la saisonnalité des apports. La gestion des barrages et de la production est modélisée d'une manière simplifiée et permet de bien reproduire le productible annuel et sa saisonnalité, en suivant le comportement « typique » de la production sur la période récente. Il est cependant difficile de jauger comment la gestion de la production elle-même évoluera dans le futur.
Légère baisse des apports et du productible	Globalement, les apports et le productible annuels devraient légèrement baisser ou rester au niveau actuel. Si les précipitations vont légèrement augmenter, l'évapotranspiration augmentera également sous l'effet de la hausse des températures. La combinaison de ces deux effets explique le résultat obtenu.
Modification de la saisonnalité des apports	L'augmentation des températures entraînera une modification de la saisonnalité des apports. Dans les projections, on observe une augmentation des précipitations sous forme de pluie en hiver, ainsi qu'une fonte plus précoce du manteau neigeux au printemps, ce qui impactera probablement la gestion du niveau du lac de la Gruyère.
	Les incertitudes sur les projections des apports futurs sont élevées. La principale source d'incertitudes est l'évolution de la quantité future de précipitation et la trajectoire de l'évolution climatique.

7 References

- Bosshard, T., Kotlarski, S., & Schär, C. (2015). Local scenarios at daily resolution for emission scenarios A2 and RCP3PD. *CH2011 Extension Series No. 1*.
- Federal Office for the Environment (BAFU). (2021). *Effects of climate change on Swiss water bodies: Hydrology, water ecology and water management*. Bern: Federal Office for the Environment (BAFU). Récupéré sur <https://www.bafu.admin.ch/uw-2101-e>
- GLAMOS. (2025). *Swiss Glacier Volume Change, release 2025*. Glacier Monitoring Switzerland.
- Hydrique. (2024). *M23_053 ScheM - Optimisation de la production*.
- MeteoSwiss and ETH Zurich. (2025). *Climate CH2025 - Scientific Report*. Zurich.

Musselman, K. N. (2017). Slower snowmelt in a warmer world. *Nature Climate Change*, 7, 214-219. doi:10.1038/nclimate3225

National Center for Climate Services. (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland*. Technical Report, Zurich.

Schäfli, B., Hingray, B., Niggli, M., & Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2, 73-117.

Cette étude a été réalisée par Dr Bertrand Cluzet Ing. Dipl. SUPAERO, Ingénieur de projet, Sylvain Clément Ing. Env. Dipl. EPFL, Chef de projet, et supervisée par Dr Frédéric Jordan Ing. Civ. Dipl. EPFL, Directeur.

Fait au Mont-sur-Lausanne, le 18 août 2026

Hydrique ingénieurs HJ Sàrl

Dr Frédéric Jordan



Dr Philippe Heller



Annexe A – Figures des résultats de simulation

Cette annexe est fournie dans un document séparé.

M25_090_01_v01_Annexe A_Projections des apports futurs Sarine.pdf