

L'EFFET DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE REGIME HYDROLOGIQUE DU RHÔNE À GENÈVE

CLIMATE CHANGE IMPACT ASSESSEMENT OF THE HYDROLOGICAL REGIME OF THE RHÔNE IN GENEVA

CAMPAGNE 2021

PAR

Stanislas MICHEL, Frédéric SOULIGNAC

SECRÉTARIAT DE LA COMMISSION INTERNATIONALE POUR LA PROTECTION DES EAUX DU LÉMAN -
CHANGINS, CASE POSTALE 1080, CH - 1260 NYON 1

RÉSUMÉ

Le Léman est le plus grand plan d'eau d'Europe occidentale. Il a une superficie de 582 km² et stocke environ 89 km³ d'eau. Etant une ressource en eau potable autant qu'un espace récréatif avec de nombreuses villes sur ses rives, la gestion de son plan d'eau est également d'intérêt majeur pour les riverains, notamment au niveau de son exutoire à Genève. Ce rapport contribue à l'état des connaissances du bilan hydrique du Léman, et tente de combler les déficits de ce dernier en testant des hypothèses. En effet, les apports monitorés seuls ne suffisent pas à expliquer les exports (débit sortant à Genève) – il convient alors d'expliquer ce déficit. Ce rapport construit également la base d'une recherche concernant la santé future du lac dans le cadre de scénarios du changement climatique. Témoin d'un réchauffement de la surface de la terre et d'un notable déséquilibre de la variabilité des événements climatiques, la dynamique du lac est déjà changeante.

Le présent rapport s'organise à l'image un article scientifique – il expose d'abord l'état des connaissances, la méthodologie adoptée et les données utilisées avant de présenter les résultats et d'interpréter ces derniers sous la forme d'une discussion. Chaque section est rythmée temporellement par l'approche historique et future du bilan hydrique.

Concernant le bilan hydrique historique, il semblerait que l'approche adoptée permette d'expliquer le déficit présenté par les données à disposition : une interpolation des données existantes et une extrapolation des résultats observés sur les bassins versants monitorés ferment le bilan hydrique dans la gamme d'erreur calculée. Le Rhône débite en moyenne 260 m³/s par an en sortie de lac à Genève, quand il fournit environ 190 m³/s (environ 70% des apports) en entrée du lac à Porte-du-Scex. Les bassins versants intermédiaires représentent environ 25% des apports. L'évaporation et la précipitation sur le lac sont du même ordre de grandeur : environ 6% des apports et des exports.

Un déficit moyen de -2 m³/s par an est obtenu à la fermeture du bilan hydrique, avec des amplitudes de -20 à +20 m³/s. La marge d'erreur est estimée autour de 18 m³/s par an, soit 1 m à la surface du lac. Une approche plus complexe et précise pourrait être adoptée, mais ne serait pas cohérente au regard des incertitudes liées aux mesures et aux estimations.

Le bilan hydrique futur adopte une démarche exploratoire et de modélisation pour anticiper les effets du changement climatique sur la dynamique du lac sans préjuger de l'évolution des usages. En somme, cette investigation expose une diminution notable des apports en eau au Léman avec l'augmentation du forçage radiatif choisi. Les résultats exposent une diminution de 5 à 15% des apports en eau directs, et une augmentation jusqu'à 20% du processus d'évaporation sur le lac dans le pire des scénarios à l'horizon 2100.

Avec la réglementation du niveau du lac effectuée au barrage du Seujet à l'exutoire du Léman, le niveau du lac ne peut être maintenu en période estival pour le scénario le plus défavorable à la vie sur terre – les simulations montrent une baisse du niveau de plus de 25 cm pendant la période estivale à l'horizon 2100 pour le RCP8.5.

L'évolution du bilan hydrique sur plusieurs décennies a été étudiée sans prendre en compte l'évolution potentielle des usages dans le bassin versant en amont du lac (études menées notamment dans le canton du Valais).

ABSTRACT

Lake Geneva is the largest body of water in western Europe. It covers an area of 582 km² and stores approximately 89 km³ of water. Given that it is a source of drinkable water as well as a recreational space with a number of cities on its shores, management of this waterbody is also of major importance to local residents, notably at its outlet at Geneva. This report contributes to the state of knowledge of the water balance of Lake Geneva and attempts to fill in the gaps in this knowledge by testing certain hypotheses. Indeed, inflows monitored in isolation do not suffice to explain the exports (outflow at Geneva); this deficit must therefore be explained. This report also builds the basis of research on the future health of the lake within climate change scenarios. Subjected to warming of the earth's surface and a notable imbalance in the variability of climate events, the dynamics of the lake are already changing.

The present report is organized in the manner of a scientific article: it first exposes the current state of knowledge, the methodology adopted, and the data used before presenting the results and interpreting them in the discussion. Each section is temporally organized through its historic and future approaches to the water balance.

As regards the historical water balance, it would seem that the approach adopted can explain the deficit presented by the data available: interpolation of existing data and extrapolation of the results observed in the watershed monitored closes the water balance within the range of the error calculated. The Rhone flows a mean 260 m³/s per year at the lake's outlet at Geneva, while it provides roughly 190 m³/s (approximately 70% of the inputs) at the entrance of the lake at Porte-du-Scex. The intermediate watersheds account for roughly 25% of the inputs. Evaporation and precipitation on the lake are on the same order of magnitude: roughly 6% of the inputs and exports.

A mean deficit of -2 m³/s per year is obtained at the closing of the water balance, with amplitudes of -20 to +20 m³/s. The margin for error is estimated at around 18 m³/s per year, i.e., 1 m at the lake's surface. A more complex and precise approach could be adopted but would not be coherent in terms of the uncertainties related to measurements and estimations.

The future water balance will adopt an exploratory and modeling approach so as to anticipate the effects of climate change on the lake's dynamics without prejudging the evolution of uses. In sum, this investigation reveals a notable reduction in water inputs to Lake Geneva with an increase in the radiative forcing chosen. The results disclose a 5–15% decrease in direct water inputs and an increase, up to 20%, of evaporation processes on the lake in the worst case scenarios for 2100.

With the regulations on the lake's level executed at the Seujet dam at the outlet of Lake Geneva, the lake's level cannot be maintained during the summer season for scenarios that are the most unfavorable to life on earth: simulations show a more than 25-cm decline in the lake level during the summer period for 2100 for RCP8.5.

1. INTRODUCTION

Les principales conclusions des scénarios climatiques CH2018 font état en Suisse d'une baisse des quantités des précipitations, d'une augmentation de l'évaporation, d'une augmentation de la fréquence des fortes précipitations, ainsi que d'une baisse de la couverture neigeuse (CH2018 2018; CH2018 Project Team 2018). Sans une baisse importante des émissions mondiales de gaz à effet de serre, la quantité d'eau entrant au Léman est amenée à évoluer au cours du siècle, ce qui entraînera probablement des conséquences sur le fonctionnement du lac et impactera les services qu'il procure aux sociétés humaines (eau potable, pêche, pompe à chaleur, navigation, baignade...).

Le Léman est principalement alimenté par le Rhône, qui bénéficie d'un suivi depuis 1904 des débits à la station Porte-du-Scex. Avec le changement climatique, on s'attend à des débits plus abondants en hiver et moins abondants en été. En 2020, le débit du Rhône à la station Porte-du-Scex a dépassé la moyenne 1981-2010 de plus de 50% en janvier et de presque 30% en avril. Le régime hydrologique des autres affluents du Léman (affluents de plaine) est aussi susceptible d'évoluer et de modifier la quantité d'eau apportée au Léman.

Ce rapport s'inscrit dans une volonté de mieux connaître et anticiper l'évolution de l'hydrologie des affluents du Léman en lien avec le changement climatique. Aussi formule-t-il plusieurs intentions au regard de la démarche scientifique. La première était d'éclairer le fonctionnement et la dynamique historique du bilan hydrique du Léman; plusieurs études ont tenté de réaliser ce bilan, avec leurs propres limites, qui sont exposées dans la première partie de ce rapport. La seconde intention était de développer un modèle prospectif pour anticiper l'évolution de la variation du stock d'eau du Léman dans le cadre des régimes de changement climatique dont nous avons connaissance. Une connaissance précise du bilan hydrique du Léman fournit des informations importantes sur le fonctionnement de l'écosystème, le cycle des nutriments et le temps de séjour du lac. En outre, il permet de révéler

la dépendance du lac à l'égard de certains facteurs hydrologiques, ce qui permettra d'améliorer les pratiques de gestion des ressources en eau.

La première partie de ce rapport fera état des connaissances concernant le bilan hydrique du Léman, et dessinera le contour des limites identifiées dans les différentes études qui ont été revues. Elle permettra également au lecteur de se représenter la zone d'étude, les bassins versant majeurs et les cours d'eau principaux en jeu dans cette étude. Aussi, il s'agira de présenter les données à disposition qui permettent d'ancrer la méthodologie dans le réel – il s'agira de les cartographier et de les décrire statistiquement pour exposer leurs limites, qui serviront de base pour notre méthode. Deux jeux de données distincts ont été exploités dans cette étude : un premier pour réaliser un bilan hydrique historique, et un second pour explorer un potentiel bilan hydrique futur dans le cadre du changement climatique.

Une seconde partie exposera les méthodologies utilisées pour les deux bilans hydriques de cette étude. Il s'agit de faire transparaître les choix effectués compte tenu des limitations présentées par les jeux de données, justifiés sur la base de l'état des connaissances scientifiques.

Ensuite, les résultats seront présentés et brièvement commentés, avant de laisser la place à la discussion – cette partie permettra au lecteur de saisir les enjeux soulevés par les résultats au regard de la méthodologie proposée.

2. LE LAC ET SES AFFLUENTS

Dans ce rapport, la zone d'étude couvre une surface de 7420 km² s'étendant sur le territoire contribuant aux débits des rivières jusqu'à l'exutoire du Léman. L'altitude moyenne de ce bassin est de 1670 m, et représente un taux d'englacement de 10,6%.

Le Léman représente une surface de 582 km², et le débit moyen quittant le lac s'élève à 260 m³/s en moyenne. Il est alimenté par divers cours d'eau ayant des débits significatifs, et sont monitorés par les services compétents – le Rhône, la Veveyse et la Promenthouse côté suisse et la Dranse, le Foron et le Redon côté français. D'autres cours d'eau mineurs (débit <3 m³/s) alimentent également le Léman, certains étant monitorés, d'autres non ; la section suivante réalise une cartographie de l'état des connaissances du bassin versant lémanique.

On note également la présence de stations d'épuration sur le pourtour du lac. Certaines se déversent en amont des stations des cours d'eau, leur débit est donc compris dans la valeur fournie par la station de mesure. D'autres déversent leurs eaux en aval des stations de mesures.

Les précipitations observées dans la région Lémanique sont régulières toute l'année. Pour l'hiver, les précipitations sont dues au transport de l'humidité dans l'atmosphère. En été, on trouve principalement des orages localisés.

On distingue plusieurs régimes hydrologiques d'écoulement : le plus important pour le Rhône amont est influencé par la fonte des neiges et les processus glaciaires dans les régions de haute montagne. Les cours d'eau se situant en plaine et en moyenne montagne, qui représentent les bassins versants intermédiaires, sont majoritairement influencés par les précipitations et la fonte des neiges. On notera également l'importance majeure de la présence de barrages qui influencent les régimes d'écoulement, alors artificiels pour faire valoir le potentiel de production hydroélectrique des cours d'eau. En Valais, environ 55% des cours d'eau sont classés comme « naturels/semi-naturels », 18% comme « peu atteint » et 27% comme « très atteint », « artificiels » ou « mis sous terre ». Sur le Plateau, ces proportions sont de 39%, 23%, 38%, respectivement et dans le Jura, de 35%, 30% et 36. (CIPEL 2016)

« En plaine, le paysage est dominé par les terres agricoles, les pâturages, les zones urbaines, les parcelles de forêts de feuillus et les plans d'eau. À partir de l'étage montagnard, de 800 à 2200 m, les forêts mixtes et de conifères, les prairies, utilisés pour le pâturage du bétail durant l'été, ainsi que les landes deviennent prédominantes. Les espaces ouverts avec peu ou pas de végétation, de roches nues et les glaciers ne deviennent largement dominants qu'au-dessus de 2700 m d'altitude. » (CIPEL 2016)

2.1. ETAT DES CONNAISSANCES

Le bilan hydrique (ou bilan hydrologique) du Léman nécessite d'être connu pour mieux anticiper ses variations au regard de l'exploitation anthropique des eaux du lac. Plusieurs études ont tenté de produire un bilan hydrique avec les données à disposition.

Chronologiquement, Blavoux et al. (1962) proposent un bilan hydrique basé sur des méthodes simples permettant d'aborder le concept du bilan rapidement, sur l'année 1962. Il utilise des isohyètes pour intégrer les précipitations sur le lac, des formules représentatives de l'échelle de l'ensemble du territoire pour l'évaporation avec une granularité annuelle (formule de Rohwer) et un inventaire incomplet des débits alimentant le Léman. L'approche a le mérite de donner un ordre de grandeur des principaux éléments du bilan hydrique. Aussi, on pourrait noter que les instruments utilisés à la date de l'étude sont probablement une source d'erreur plus importante qu'aujourd'hui.

Le bilan proposé suggère une évaporation annuelle de 850 mm (15,7 m³/s), une précipitation de 1010 mm, des débits d'apports moyens basé sur des bassins versants globaux (bassin du Rhône – 182 m³/s, de la Venoge – 3,3 m³/s et des Dranses – 18,8 m³/s seulement), et un débit de sortie de 242 m³/s. Avec une interpolation non explicitée des débits sur différents bassins versants dans le document cité précédemment, il résulte du bilan un déficit d'apports de 11 m³/s. Les auteurs justifient ce déficit par les ruissellements en bordure de lac (ie. les précipitations qui ne rejoignent pas les cours d'eau, et ruissellent directement dans le Léman) ainsi que les apports sous lacustres. Le périmètre du lac est de 167 km, ce qui fait valoir un débit en l/s/km de berge de 66 l/s/km – on aurait alors 66 l/s/km de débit de ruissellement et d'eau de source. Les auteurs nuancent tout de même ce résultat en soulignant les erreurs de mesures et d'estimations notamment pour l'évaporation, ainsi que les méthodes d'interpolation (isohyètes). Compte tenu de la topographie et la géologie des berges, ce chiffre apparaît raisonnable avant une étude plus exhaustive sur le sujet.

La CIPEL, dans un rapport de synthèse de travaux (CIPEL 1984), propose un bilan hydrique plus exhaustif au regard des apports d'eau au Léman. Il présente un déficit de 7,3 m³/s par an en moyenne sur la période 1964-1980. Les apports jaugés et estimés s'élèvent à 223 m³/s. Les précipitations contribuent sur l'année à 19,7 m³/s en moyennant 4 stations de mesures autour du lac (Genève, Nyon, Morges, Thonon). L'évaporation annuelle estimée dans ce rapport est relativement faible : 11 m³/s (600 mm an⁻¹) – cela s'explique par l'utilisation d'une seule station de mesure, et par le choix d'une formule d'évaporation inadaptée aux eaux de surface (balance de Wild) – l'étude mentionnée précédemment obtient une valeur de 850 mm, quand l'atlas hydrologique de la Suisse, avec des méthodes plus complexes, présente une évaporation de la surface du lac de 950 mm an⁻¹. A noter que la variation de volume associée au niveau du lac est calculée du début à la fin de l'année.

Les auteurs justifient le déficit de ce bilan par la méconnaissance du débit de certains cours d'eau. Est également étudiée la corrélation entre précipitations et déficit : il en résulte une corrélation nette entre ce déficit et les précipitations (il en va de même pour les débits). Les auteurs émettent alors l'hypothèse que ce déficit s'explique soit par une surestimation des pertes à l'émissaire, qui croit avec les débits, soit par une sous-estimation des apports, qui croit avec les précipitations. Dans le second cas, cela peut être soit dû aux erreurs de mesures des débits, soit aux eaux de ruissellements qui sont ignorées. Il conviendra d'explorer davantage d'hypothèses pouvant expliquer ce déficit.

L'Atlas hydrologique de la Suisse (Weingartner 1986; Weingartner et al. 2010) propose un bilan hydrique similaire au deux précédents. Pour simuler l'évaporation, les auteurs utilisent un modèle d'évaporation TRAIN, qui intègre les connaissances touchant à l'évaporation et à des processus associés, acquises sur le terrain. Les données nécessaires aux calculs proviennent du réseau climatologique et pluviométrique de l'Institut suisse de météorologie. Pour l'interpolation régionale des données climatiques, sont utilisées une combinaison de régression avec l'altitude et de pondération selon l'éloignement. Le bilan présenté ici est considéré comme fermé, car il calcule l'évaporation en équilibrant le bilan hydrique ; les résultats sont présentés avec la nuance de l'erreur qui leur est associée : il existe une grande variabilité spatiale dans le bilan hydrique, associée notamment à l'échelle de l'étude (i.e. Bassins versants).

On peut donc conclure que sur l'ensemble des bilans hydriques effectués sur le Léman, les méthodes utilisées sont parfois contestables et peuvent faire l'objet d'améliorations. Aussi, les déficits d'apports en eau mis en évidence par ces études ne sont pas ou peu expliqués : il convient d'explorer les raisons qui peuvent faire valoir une explication de ce déficit. Enfin, ces études sont relativement empiriques, dans le sens où elles sont exclusivement historiques.

2.2. DONNÉES À DISPOSITION

2.2.1. DONNÉES HISTORIQUES 1981-2021

Données de précipitations

Les données de précipitations journalières sont extraites de la plateforme IDAWEB côté Suisse pour les stations de Genève, Changins, Pully et Vevey, et de l'INRAE pour la station de Thonon-les-Bains. Les outils de mesure présentent des erreurs lors des mesures à hauteur de 0,05 mm/h à +/-0,1 mm/h ou 1% si les précipitations dépassent 10 mm, comme mentionné dans la documentation des instruments. Il conviendra de faire propager cette erreur non pas à hauteur de la mesure de la précipitation annuelle, mais de chaque événement de précipitation. En moyenne cette erreur représente 12% des précipitations annuelles

Données d'évaporation

Les données permettant de calculer l'évaporation journalière sur le lac (cf. section méthodologie pour le détail du calcul) sont l'humidité relative, la température ambiante, la vitesse du vent, la pression atmosphérique et le rayonnement global. Ces données sont accessibles sur la plateforme IDAWEB de la confédération Suisse, et, côté français, sur la plateforme dédiée de l'INRAE de Thonon-les-Bains. Pour IDAWEB, les seules stations ayant à disposition ces données sur la période 1980-2021 sont celles de Genève, Changins, et Pully. La carte suivante permet de se rendre compte de l'étendue de la disponibilité des données.

Les outils de mesure présentent des erreurs lors des mesures à hauteur de $\pm 0,75$ hPa pour la pression atmosphérique, $\pm 0,1$ °C pour la température ambiante, $\pm 0,8\%$ pour l'humidité relative, ± 10 W m⁻² pour le rayonnement global, ± 2 m/s pour la vitesse du vent (cf. site Internet de MétéoSuisse³). En moyenne, cette erreur représente 15% des évaporations annuelles.

Données de débit

Les débits journaliers des cours d'eau sont d'une importance cruciale pour réaliser le bilan hydrique du lac. De nombreux cours d'eau sont suivis avec un pas de temps journalier. Il est à noter que toutes ces stations ne sont pas actives sur l'ensemble de la période d'étude. Elles sont donc notées en orange sur la carte ci-dessous (Fourrier et Karpushov 2020). Il conviendra donc d'interpoler certaines mesures pour les étendre sur l'ensemble de la période. Les outils de mesure présentent des erreurs lors des mesures à hauteur de 5-20%.

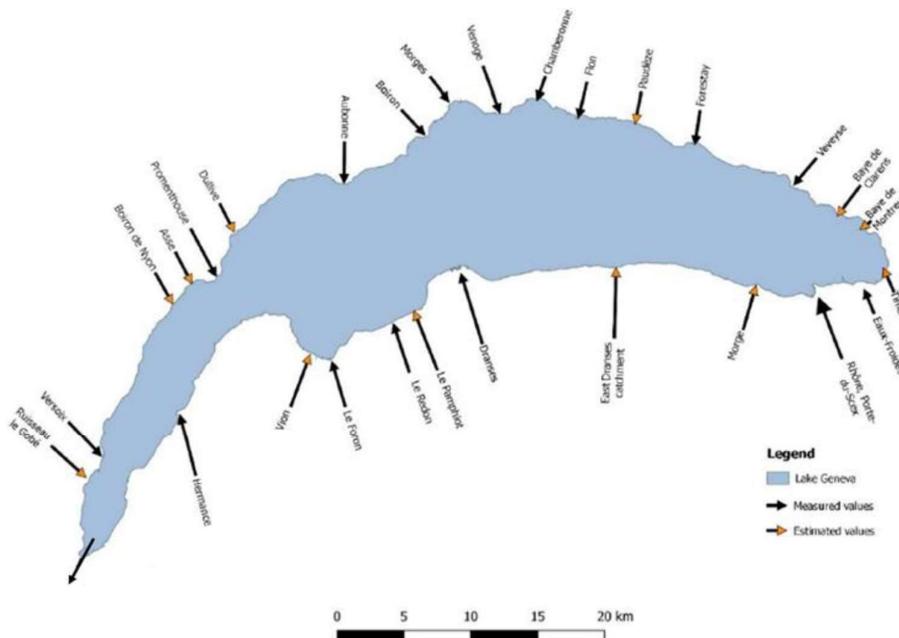


Figure 1 : Ensembles des cours d'eau monitorés et partiellement monitorés, se déversant directement dans le lac.
 Figure 1: All of the water bodies monitored and partially monitored flowing directly into the lake

³<https://www.meteosuisse.admin.ch/home/systemes-de-mesure-et-de-prevision/stations-au-sol/reseau-de-mesures-automatiques/instruments-de-mesure.html> (consulté le 12 juillet 2022, dernière modification le 1^{er} décembre 2014)

Niveau du lac : incertitudes et moyennes mobiles

Le niveau du lac est mesuré sur trois stations de mesure. Au regard des effets de seiches, la station la plus appropriée est celle de St-Prex. Elle fournit des données de mesures au pas de temps horaire sur la période donnée. L'aspect horaire à une importance particulière pour moyenniser quelques heures avant et après le temps de mesure souhaité pour s'affranchir des effets de seiches et vagues.

Pompage et STEP

Plusieurs STEPs rejettent leurs eaux en aval des stations de mesures. Il faut donc identifier ces STEPs et les ajouter aux entrants du bilan hydrique. De fait, la CIPEL dispose d'une base de données qui met évidence ces STEPs avec un suivi précis des rejets et leur évolution au cours du temps. De même, la CIPEL dispose aussi d'une base de données pour la production en eau potable issue du Léman.

Écoulements souterrains

Il n'existe pas, à ce jour, d'étude spécifique recensant les écoulements souterrains au niveau du Léman. Cependant, les couches géologiques en présence peuvent nous donner une indication concernant les porosités du milieu, et permettent d'estimer globalement le potentiel d'écoulement souterrain. Le sous-sol du lac est composé de moraine glaciaire. On peut alors estimer que cet apport est négligeable, et qu'il se compense : autant d'écoulement s'introduit dans le lac qu'il n'en sort. Une étude montre qu'un apport sous-lacustre de 0,01 m³/s existe, mais peut être négligé dans le cadre de cette étude compte tenu des ordres de grandeurs étudiés ici (Olive et al. 2003).

Données manquantes

Comme mentionné dans le paragraphe « Données de débits », certaines stations ne sont pas actives sur l'ensemble de la période. Il s'agit donc d'un frein à la mise en pratique du bilan hydrique. Aussi, on notera que l'ensemble des bassins versants ne sont pas monitorés. On estime la surface de bassin versants manquant à 719 km² (Breuillot et Locher 2022). Il conviendra alors de combler ce manque à l'aide d'estimations. La carte ci-dessous représente les surfaces non monitorées en orange. Les vertes sont celles qui sont monitorées, en violet celles pour qui une interpolation est nécessaire à cause d'interruptions de monitoring, et enfin en jaune les stations se situant suffisamment en amont de l'exutoire pour considérer cet écart comme une surface non monitorée.

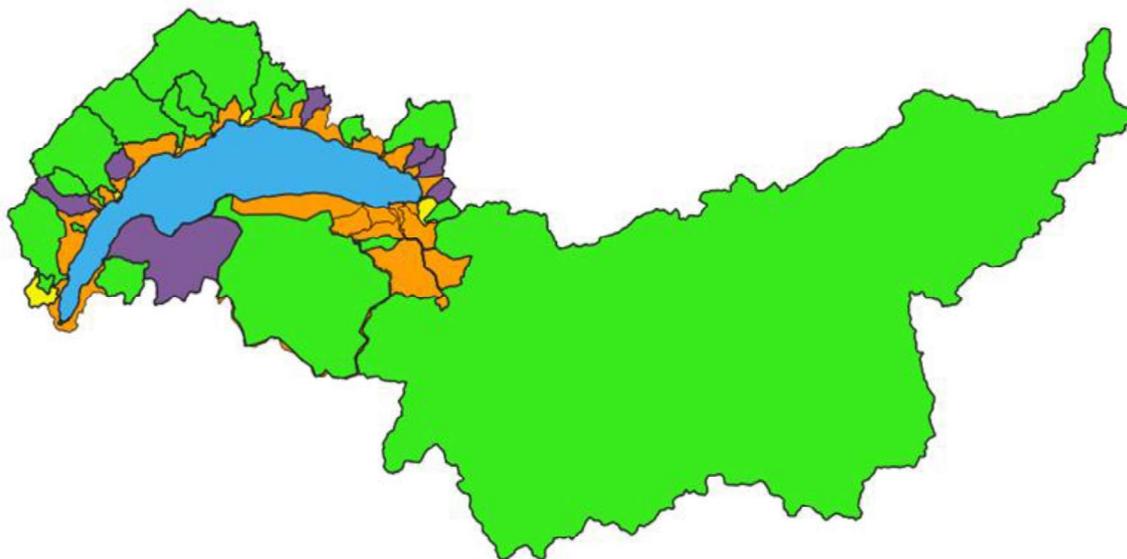


Figure 2 : Bassins versants de la zone d'étude

Figure 2: The study zone's watersheds

2.2.2. DONNÉES FUTURS

L'évolution du bilan hydrique sur plusieurs décennies a été étudiée sans prendre en compte l'évolution potentielle des usages dans le bassin versant en amont du lac (études menées notamment dans le canton du Valais).

Débits entrants

Les données futures sont fournies par les scénarios du GIEC, compte tenu des forçages radiatifs qu'il estime pertinent compte tenu des trajectoires que les activités anthropiques imposent à la planète – les Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6, 4.5 et 8.5. Ces derniers seront explicités dans la section suivante. Adapté pour la Suisse par le projet CH2018 de la confédération Suisse, le jeu de données contient des données de précipitations, et le nécessaire au calcul de l'évaporation (température, radiation, humidité relative, vitesse du vent), sur la période 1981-2100, avec un pas de temps journalier pour trois scénarios différents. Il existe différents modèles pour chaque forçage radiatif. Pour les débits, les projections hydrologiques sont basées sur une longue chaîne de différents modèles. Cette chaîne comprend les scénarios d'émissions, l'effet qui en résulte dans les modèles climatiques ainsi que les modèles hydrologiques. Chaque modèle de cette chaîne comporte des incertitudes. Celles-ci sont prises en considération dans la mesure où la modélisation hydrologique se fonde sur un grand nombre de modèles climatiques et sur trois scénarios d'émissions. Cependant, un seul modèle hydrologique a été utilisé et le recours à d'autres modèles hydrologiques aurait pu déboucher sur des résultats différents. Comme les simulations climatiques ne représentent que l'un des climats futurs possibles et que chaque modèle possède une structure légèrement différente, il faut se rappeler que les diverses simulations ne constituent qu'une seule possibilité parmi beaucoup d'autres (Zappa et al. 2019).

Nous avons donc à disposition une multitude de scénarios de débits, de précipitations et de données météo pour chaque forçage radiatif. Une valeur médiane de tous ces scénarios a été choisie par souci de représentativité pour l'étude des débits à échelle globale, pour étudier les grandes tendances des débits. Il est à noter que ces données sont issues d'une modélisation, et ne relèvent donc pas d'une prédiction. Cependant, cette modélisation est statistiquement significative au regard du forçage radiatif imposé au système.

Précipitations

Dans l'espace géographique, les stations proposées par le projet CH2018 sont : Changins, Clarens, Genève, Morges, Pully, Riex et Vevey. Il s'agira donc d'interpoler ces données pour obtenir une hauteur d'eau moyenne sur la surface du lac, à l'aide d'une pondération Inverse Distance Weighting (IDW). On notera tout de même qu'aucune station n'est disponible côté français. Il existe cependant un programme de recherche en cours côté Français qui doit utiliser des projections du même type ; il conviendrait, en temps venu, de comparer les résultats obtenus avec ceux déployés en France.

Evaporation

Dans l'espace géographique, les stations proposées par le projet CH2018 sont : Changins, Genève et Pully. Il s'agira donc d'interpoler ces données pour obtenir une hauteur d'eau moyenne sur la surface du lac à l'aide d'une pondération IDW. On notera tout de même qu'aucune station n'est disponible côté français. Il existe cependant un programme de recherche en cours côté Français qui doit utiliser des projections du même type ; il conviendrait, en temps venu, de comparer les résultats obtenus avec ceux déployés en France.

Données manquantes

Le jeu de données fourni par la confédération est incomplet dans la mesure où il ne fournit pas le débit de sortie du Léman à Genève à la Halle de l'Ile. Aussi, il ne prend pas en compte les effets démographiques qui peuvent exercer une influence sur la restitution des exploitations hydroélectriques de la vallée du Rhône, les consommations en eau et la hausse des restitutions des STEPs. Cependant, il nous donne une idée précise de l'impact du climat changeant sur le régime hydrologique des cours d'eau, et de fait, la dynamique du bilan hydrique, dans un scénario démographique et de consommation d'énergie « business as usual ». Aussi, on peut noter que du fait de l'absence de débit de sortie, le lancement d'un bilan hydrique sera forcément fermé, puisqu'il s'agit de déterminer le dernier terme de l'équation à l'aide des données à disposition, en équilibrant le bilan hydrique.

Régimes de régulation du Léman

Pour pallier le déficit de données à la sortie du Léman, on utilisera le domaine de régulation du lac actuel par les SIG pour forcer un niveau minimum et maximum du niveau du Léman. On utilisera également la courbe de tarage actuelle pour déterminer le débit maximum exploitable au niveau du barrage du Seujet. La Figure 3 présente le domaine de régulation du Léman par les services industriels de Genève. En abscisse sont présentés les mois, et en ordonnée l'altitude du plan d'eau. En bleu, on trouve la gamme dans laquelle doit se trouver le niveau du plan d'eau au cours du temps. En rouge, il s'agit du minimum exclusivement dédié aux années bissextiles. On voit alors que le niveau autorisé évolue au cours du temps : il s'abaisse pour les mois de mars et avril avant de retrouver un niveau plus élevé le reste de l'année. On notera également qu'il existe un débit de restitution minimum que le barrage doit remettre en aval : 50 m³/s entre juillet et septembre, et 100 m³/s entre octobre et juin.

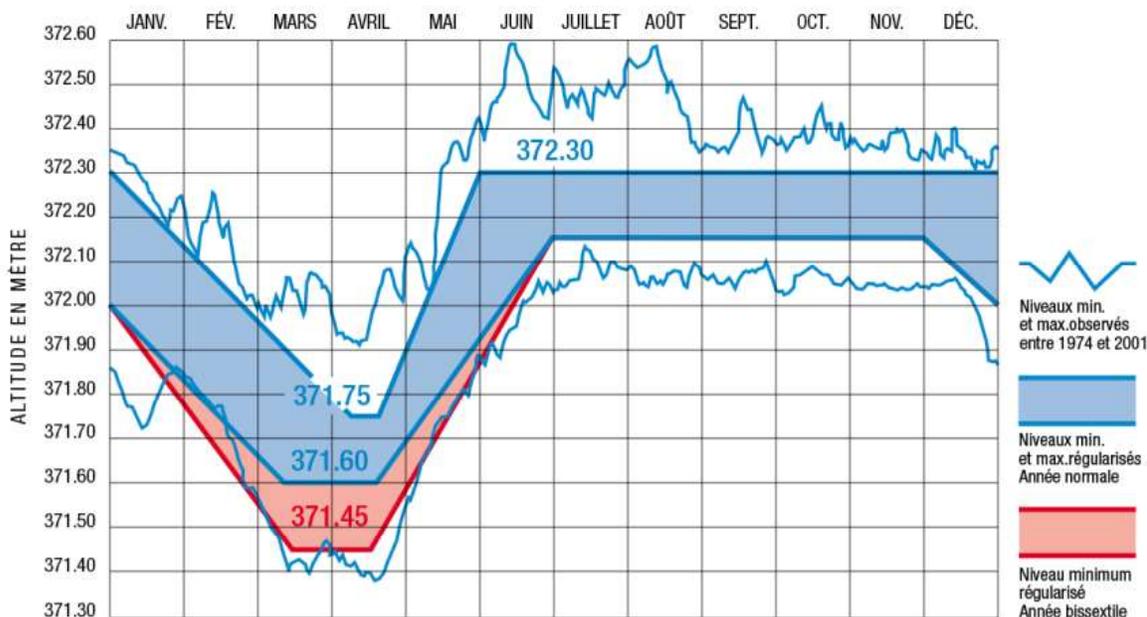


Figure 3 : Niveau du Léman exploité par le barrage du Seujet

Figure 3: Level of Lake Geneva utilized by Seujet dam

3. METHODOLOGIE ET PROBLÉMATISATION

Mieux connaître et anticiper l'évolution de l'hydrologie des affluents du lac en lien avec le changement climatique nécessite de diviser cette étude en deux temps. Une première partie s'intéressera d'abord aux enjeux historiques du bilan hydrique sur la période 1981-2021 : que savons-nous du passé du lac en matière d'apports en eau ? Les données à disposition sont-elles suffisantes pour décrire le fonctionnement du lac et son comportement ? Les erreurs de mesures, les données manquantes et les incertitudes mettent à l'épreuve la méthodologie utilisée et nécessitent un éclairage pour réaliser au mieux un bilan hydrique consistant, avec la nuance que requiert une analyse basée sur des hypothèses.

La seconde partie est quant à elle davantage exploratoire : loin de s'inscrire dans une démarche investigatrice et orientée solution vis-à-vis de données manquantes, elle explore néanmoins le fonctionnement futur du lac dans le cadre de scénarios climatiques définis par le GIEC, avec un jeu de données complet sur la période 1981-2100. Il s'agira alors de mettre en évidence les éventuelles inconsistances de gestion et d'exploitation anthropique du lac actuel au regard des différents scénarios climatiques.

3.1. BILAN HYDRIQUE HISTORIQUE

La section précédente expose l'état des connaissances du bilan hydrique du Léman. On y retrouve des ébauches de bilan, qui montrent leurs limites d'un point de vue théorique, et également sur le plan des hypothèses sensées expliquer la non-fermeture du bilan hydrique. Elle recense également les données à disposition (débits, précipitations, évaporation, données manquantes, bassins versants...) sur la période d'intérêt (1981-2021). Le bilan hydrique proposé ici est inspiré des études recensées dans la section précédente. L'approche du bilan hydrique générale :

$$Q_{in} - Q_{out} = \pm \Delta S$$

Pour un volume de contrôle S donné (à savoir le Léman dans ce cas-ci), on définit la variation du stock de ce volume ΔS par le différentiel entre les entrants (Q_{in} , apports, précipitations...) et les sortants (Q_{out} , exutoire, évaporation...). En précisant les termes, on obtient :

$$Q_{PdS} + Q_{BVint} + P + Q_{GWin} + Q_{STEP} = Q_{GE} + Q_{pompage} + E + Q_{GWout} \pm \Delta S$$

Avec :

Q_{PdS}	Le volume des apports du Rhône à Porte-du-Scex
Q_{BVint}	Le volume des apports des bassins intermédiaires
P	Apports dus aux précipitations sur la surface du lac
Q_{GWin}	Les écoulements souterrains entrants
Q_{STEP}	Rejets des stations d'épuration
Q_{GE}	Le volume de sortie du lac à Genève
$Q_{pompage}$	Eau pompée du lac aux fins de production d'eau potable
E	Les pertes dues à l'évaporation à la surface du plan d'eau
Q_{GWout}	Les écoulements souterrains sortants
ΔS	La variation de volume du lac lors d'une période de calcul

Les termes supplémentaires tels que le pompage ou l'écoulement sont effectivement minimes comparés aux apports du Rhône, mais il conviendra de donner une estimation de ces volumes, et de les inclure dans le bilan pour approcher au mieux l'égalisation des termes.

Certaines STEP rejettent directement dans les cours d'eau, ce volume est alors comptabilisé dans les affluents à la station de mesure. Il convient d'utiliser seulement les stations d'épurations qui rejettent leurs eaux directement dans le lac.

Par souci de simplicité, les termes de l'équation seront regroupés dans $Q_{in} - Q_{out}$ dans la suite de ce rapport.

Les termes de l'équation présentée précédemment sont donc tous connus : l'ensemble des entrants et des sortants ont été collectés à travers diverses bases de données, et certains vont être estimés et/ou interpolés. La variation du stock est, quant à elle, toujours observée. Il s'agit, entre deux pas de temps, de la différence observée du niveau du lac, rapporté à un débit sur le pas de temps choisi.

Il s'agira de comparer les deux termes suivants (à noter qu'ici, les termes sont présentés en m³/s – qui permet de mieux visualiser les grandeurs en comparaison avec des volumes) :

$$\Delta S_{\text{observé}} = \frac{\Delta h \times A_{\text{lac}}}{\Delta t}$$

$$\Delta S_{\text{calculé}} = Q_{\text{in}} - Q_{\text{out}}$$

Avec $\Delta S_{\text{observé}}$ la variation du volume du lac calculée à partir de différence de hauteur Δh observée pendant le pas de temps Δt , et A_{lac} la surface du lac.

Il s'agira ensuite de proposer des hypothèses et modèles pour faire égaliser ces deux termes. En effet, le $\Delta S_{\text{calculé}}$ sera souvent inférieur au $\Delta S_{\text{observé}}$ car l'ensemble des stations de débits monitorés ne représentent pas la totalité des apports au Léman. Il s'agira donc, d'interpoler, estimer les débits aux stations manquantes pour faire approcher le $\Delta S_{\text{observé}}$ du $\Delta S_{\text{calculé}}$. Ces méthodes d'estimation et d'interpolation sont expliquées dans la section qui suit.

Il est également nécessaire de préciser que le pas de temps choisi pour chaque bilan hydrique a une importance significative. Ici, l'étude s'est portée sur un maillage fin, à savoir un pas de temps journalier. Cependant, par souci de clarté et de concision, les résultats sont présentés avec un pas de temps annuel – cela permet de mieux saisir les variations globales du bilan hydrique. Aussi, il est à noter qu'avec un pas de temps journalier, le bilan hydrique présente souvent des inconsistances, et des asynchronicités, par exemple à cause d'un phénomène de seiche, qui fausse le niveau du lac, et ne correspond pas au différentiel entre apports et exports d'eau. Tout de même, un bilan hydrique journalier permet de vérifier que les apports sont consistants avec les exports, et d'apprécier la synchronicité du niveau du lac en réponse au différentiel d'apports. Un pas de temps annuel permet de s'affranchir de cela, en s'assurant de moyenniser le niveau du lac sur une période de durée supérieure à un phénomène de seiche.

Aussi, on notera l'effet de laminage du lac : la présence de surfaces d'eau libre telles que le lac joue un rôle important du fait de sa capacité de stockage temporaire d'un certain volume d'eau. Ce stockage temporaire a ainsi pour effet de laminier les crues, c'est à dire de réduire le débit de pointe de la crue : lorsque le débit est important à Porte-du-Scex, il n'est pas nécessaire de débiter au même taux à Genève car le lac lamine la crue. Localement, on observe alors un débit entrant supérieur au sortant, avec un niveau de lac qui augmente, parfois avec un delta de temps suffisamment grand pour provoquer une asynchronicité au pas de temps journalier.

3.1.1. ENTRANTS

Précipitations directes

Afin de résoudre le bilan de masse, il est nécessaire de fournir une estimation correcte des précipitations directes sur le Léman. Comme il existe un réseau de pluviomètres autour de la région du lac, la tâche principale ici est d'interpoler avec fiabilité les différentes mesures de précipitations afin qu'elles soient représentatives de la hauteur d'eau sur le lac.

Afin d'interpoler les données, une interpolation IDW a été utilisée. L'IDW est un interpolateur exact, ce qui signifie que les valeurs d'évaporation maximale et minimale se produisent au point d'échantillonnage. Il suppose que les valeurs mesurées les plus proches du lieu de prédiction ont plus d'influence sur la valeur prédite que celles qui sont plus éloignées.

Débits monitorés

Pour réaliser le bilan hydrique, nous avons d'abord sélectionné la principale station de mesure du débit et du niveau d'eau (gérée par l'Office fédéral de l'environnement : OFEV), les données des "Veilles Hydrologiques" du canton de Vaud et de Genève ont été ajoutées, et également les données de débit côté Français venant de la DREAL et de l'INRAE. Pour les données de la Dranse, les débits sont monitorés sur certaines périodes à un niveau hebdomadaire: les données ont été interpolées à l'aide d'une interpolation cubique par morceaux avec préservation de la forme pour obtenir un débit journalier.

Pour étendre les données manquantes de certaines stations sur un intervalle de temps (souvent, les stations apparaissent dans les années 1990 : 15 stations manquantes en 1981, contre 2 en 2017), on utilise les données validées, et les données de précipitations les plus proches de la station de mesure pour quantifier les coefficients de corrélation entre débit et précipitation.

Il s'agit alors d'appliquer une régression linéaire sur l'ensemble de la période de disponibilité des données sur le cours d'eau à l'étude. On notera que le coefficient de corrélation doit être suffisamment significatif ($r > 0,8$) pour ne pas faire d'erreur trop importantes lors de la reconstitution du débit. Une relation linéaire peut alors être dérivée et utilisée pour estimer les mesures manquantes pour chaque station incomplète.

Le débit reconstitué s'écrit : $Q_i = Q_0 + corr_{globale}(Q, P) * P_i$, pour chaque évènement de précipitation. Les jours de précipitation nulle, on a un débit moyen calculé sur la base de l'ensemble des débits se produisant sans précipitations.

Cependant, pour les rivières qui ne présentent pas une corrélation significative ($r < 0,8$), une deuxième approche consiste à calculer le débit journalier moyen pour une année moyenne typique pour chacune de ces rivières, puis à utiliser ces résultats pour remplacer les données de l'année manquante. Cela permet d'étendre les mesures à l'ensemble de la période. Enfin, les données manquantes journalières isolées sont reconstruites en utilisant une interpolation cubique par morceaux préservant la forme naturelle de la variation d'un débit.

Débits non-monitorés – approche par bassins versants

A l'image d'un coefficient de ruissellement, on associe le débit spécifique à la précipitation avec une combinaison linéaire.

$$Q = C_r \times i \times A$$

Avec C_r le coefficient de ruissellement (rapport entre les précipitations et le débit observé), i l'intensité de précipitation et A la surface du bassin versant.

Un modèle a été construit sur la base des caractéristiques du bassin versant pour estimer le débit provenant des bassins versants où il n'y a pas de station de mesure. Pour obtenir ces débits, là où il n'y a pas de station de mesure, un débit spécifique doit être estimé. Tout d'abord, le débit spécifique des cours d'eau avec station de mesure est calculé selon $q_i = \frac{Q_i}{A_i}$, avec le débit moyen Q_i et la surface du bassin versant A_i .

Ensuite, pour chaque bassin versant inconnu, le débit spécifique Q_j est calculé avec une combinaison linéaire du débit spécifique du débit connu :

$$Q_j = A_j \times \sum q_i \times \lambda_{ij}$$

Où chaque poids λ_{ij} est calculé avec les coordonnées de la sortie du ruisseau pour laquelle il existe des mesures de débit (x_i, y_i) et les coordonnées de la sortie du ruisseau sans aucune mesure (x_j, y_j) avec un schéma de pondération qui permet de considérer que les cours d'eau qui sont dans le voisinage présentent un comportement de décharge similaire. Il s'agit d'une méthode basée sur deux hypothèses : (a) deux bassins versants ont le même débit spécifique s'ils présentent des caractéristiques similaires : aire, précipitation moyenne, land cover..., et (b) il existe une relation linéaire entre les précipitations et le débit spécifique. Les données concernant les bassins versants sont trop peu exhaustives pour effectuer une telle pondération qui soit efficace, et consistantes sur l'ensemble de la zone d'étude (il existe de grandes disparités de l'information géographique entre la France et la Suisse). On se contentera d'un simple schéma de proximité, avec un débit spécifique choisi par proximité directe ; ce choix est cohérent dans la mesure où les régimes d'écoulements sont similaires sur les bassins versants manquants. On obtient alors un débit spécifique dépendant de l'intensité de précipitation de la période d'étude, à multiplier pour la surface de bassin versant manquant (719 km²) pour obtenir le débit associé à ces bassins versants non-monitorés.

3.1.2. SORTANTS

Evaporation des eaux des surfaces

Un autre phénomène qui doit être pris en compte est l'influence de l'évaporation sur le bilan de masse. L'objectif ici a été de tester différentes méthodes théoriques de calcul de l'évaporation et de comparer celle qui correspond le mieux à l'estimation réelle de l'évaporation. Compte tenu des résultats déjà obtenus par (Weingartner, et al., 2010), la méthode la plus appropriée sera celle de Penman. Une note produite par Météo-Suisse fait état de la performance de cette méthode. Il sera également nécessaire d'interpoler les valeurs obtenues, à l'aide de l'interpolateur exact IDW.

L'évaporation est le processus par lequel l'eau passe de sa phase liquide à la phase vapeur. Ce processus peut se produire à partir de masses d'eau, de sols saturés ou de surfaces non saturées.

Pour estimer l'évaporation, il existe différentes méthodes pour évaluer le taux d'évaporation qui sont soit directes, soit indirectes (méthodes faisant appel au bilan d'énergie, d'eau ou au transfert de masse), soit elles utilisent des formules empiriques. La plupart des formules empiriques reposent sur des relations entre l'évaporation à un endroit donné et les facteurs atmosphériques responsables de celle-ci.

La formule de Primault (pour un réservoir) : cette relation n'est utilisée qu'en Suisse.

$$E = \frac{103 - H_r}{100} \times (N + 2 \times n_j)$$

Avec :

E	Evaporation physique d'un grand réservoir [mm]
H_r	Humidité relative [%]
N	Durée d'insolation effective pendant la période de calcul [h]
n_j	Nombre total de jour de la période considérée

La formule de Rohwer :

$$E = 0,484 \times (1 + 0,6 \times u) \times (e_s - e_a)$$

Où :

E	Pouvoir évaporant de l'air [mm]
u	Vitesse du vent [m/s]
e_s	Pression de vapeur saturant [kPa]
e_a	Pression de vapeur actuelle de l'air [kPa]

La formule de Penman :

$$E = \frac{R_n \times \Delta}{\lambda \times (\Delta + \lambda)} + \frac{6430000 \times E_a \times \gamma}{\lambda \times (\Delta + \lambda)}$$

Où :

E	Evaporation physique d'un grand réservoir [mm]
γ	Constante psychrométrique [kPa/°C]
P	Pression atmosphérique [kPa]
c_p	Chaleur spécifique à pression constante = $1.013 \cdot 10^{-3}$ MJ/kg/°C
Δ	Pente de la courbe de tension maximum de vapeur d'eau saturant l'air en fonction de la température,
λ	Chaleur latente de vaporisation = 2.45 MJ/kg à 20 °C
ϵ	Rapport poids moléculaire vapeur/air sec = 0.622
E_a	Pouvoir évaporant de l'air approché par la formule de Rohwer [mm]
E_c	Evaporation mesurée sur bac Colorado [mm]

Cette dernière formule est une des plus rigoureuses, à condition d'introduire la valeur correcte de tous les paramètres ; ce qui n'est pas forcément évident. Surtout, elle est la seule à pouvoir prendre effectivement en compte la spécificité d'une nappe d'eau libre. Le nombre d'albedo étant spécifiquement lié à la surface d'étude, la formule de Penman est adaptée à notre étude contrairement aux autres qui n'incluent pas le nombre d'albedo.

Débits

Le débit sortant d'étude sera celui du barrage du Seujet, débit calculé par l'OFEV. Calculé car il est issu des mesures de la station se situant en aval à Chancy, et prend en compte le surplus de l'Arve.

$$Q_{Seujet} = 0.97 \times Q_{Chancy} - Q_{Arve}$$

3.1.3. ERREURS DE MESURE ET CALCULS

Dans cette section, nous allons identifier et quantifier différentes sources d'incertitude, à savoir celle liée aux mesures de débits. Pour les incertitudes des estimations, les résultats présentés par les modèles utilisés ont été comparés avec des études de référence – les résultats sont satisfaisants. Ensuite, les incertitudes sur les mesures ont été déterminées. Nous avons d'abord trouvé quel type de pluviomètres était utilisé par les stations météorologique - l'incertitude liée à une mesure sera déduite de quelques fiches techniques. Il en est de même pour l'évaporation et les stations de débit.

Sur la rive suisse du Léman, nous avons considéré que les mesures étaient fiables car le nombre de données manquantes était faible, et elles ont été vérifiées par les offices de mesure cantonaux et fédéraux (OFEV, VHV et VHG). L'erreur associée aux mesures de débit dépend de la taille des cours d'eau. Les trois principales stations de

mesure entretenues par l'OFEV (sur le Rhône et l'Arve) ont les plus faibles incertitudes (5%) alors que les petits cours d'eau comme l'Hermance ou le Boiron ont des incertitudes de 20%. Par exemple, pour la Chambronne (erreur de mesure de 8%), la station de mesure est équipée d'une caméra et d'un capteur à ultrasons, les turbulences générées à la station de mesure entraînent des incertitudes de ± 1 cm pour les hauteurs d'eau inférieures à 30 cm et de ± 5 cm pour les hauteurs d'eau supérieures à 50 cm (Fourrier et Karpushov 2020).

3.2. BILAN HYDRIQUE FUTUR MODÉLISÉ

Anticiper les conséquences des changements climatiques sur l'hydrologie et la gestion des eaux sur le Léman à partir de scénarios portant sur les futures émissions mondiales de gaz à effet de serre est complexe. Pour ce faire, une multitude de modèles, d'étapes de traitement et d'hypothèses sont nécessaires. Le projet de la confédération suisse HydroCH2018 a produit ces scénarios hydriques à partir des différents scénarios climatiques produits par le GIEC. Il s'agit de récupérer les scénarios d'émissions, produire des simulations climatiques, réduire l'échelle statistique, et enfin paramétrer et calibrer les modèles hydrologiques pour produire des données de débits. Les modèles ne représentent que des conditions imitées du réel : il s'agit d'une représentation simplifiée donc les résultats de modélisation sont inévitablement entachés d'incertitudes.

Les scénarios climatiques ont été tirés des modèles Hydro CH2018 disponibles au niveau de plus de 300 stations météorologiques situées sur le territoire suisse (CH2018, 2018). Le scénario RCP2.6 correspond à l'adoption de mesures drastiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement à moins de 2 °C. Le scénario RCP8.5 correspond quant à lui au scénario sans mesure de protection. Le RCP4.5 est décrit par le GIEC comme un scénario intermédiaire. Les émissions dans le RCP4.5 atteignent un pic autour de 2040, puis diminuent. C'est le scénario de base le plus probable (pas de politiques climatiques) compte tenu du caractère épuisable des combustibles non renouvelables.

Les trois scénarios sont nommés d'après la gamme de forçage radiatif ainsi obtenue pour l'année 2100 : le scénario RCP2.6 correspond à un forçage de $+2,6 \text{ W m}^{-2}$, le scénario RCP4.5 à $+4,5 \text{ W m}^{-2}$, et de même pour le scénario RCP8.5. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe, si bien que les RCP2.6 représente un réchauffement inférieur à 2 °C, le RCP4.5 d'environ 2,5 °C, et le RCP8.5 environ à 4,5 °C.

Ces scénarios se traduisent en données journalières disponibles pour les variables principales (précipitation, températures de l'air minimale et maximale, radiations solaires, humidité relative et vitesse de vent). Ces données n'étant pas disponibles pour le territoire français, la météorologie des sous-bassins français a été définie selon la station météorologique suisse la plus proche.

Au total, 93 bassins versants (stations OFEV) ont été calibrés et validés avec le modèle PREVAH-UniBE. Ils couvrent divers régimes d'écoulement (pluvial, nival, glaciaire, subalpin) et surfaces (de 10 à 1700 km²). Pour chaque bassin versant, des séries journalières de débit ont été générées pour différents scénarios d'émissions (RCP2.6, RCP 4.5, RCP 8.5). Les débits quotidiens obtenus ont été analysés pour divers indicateurs à un niveau d'eau moyen, en situation de crue et en situation d'étiage. Comme les nouveaux scénarios climatiques sont disponibles en continu sur 120 ans, il est possible pour la première fois de déterminer le moment où surviennent les changements de débit significatifs.

L'exploitation des données CH2018 a permis de déterminer les précipitations et évaporations directes sur le lac à l'image de la section précédente.

Les débits d'entrées sont tous mis à disposition par le projet HydroCH2018. Seuls les débits de sorties ne sont pas disponibles. Il s'agit alors de déterminer, ce débit de sortie et le niveau du lac associé en fermant le bilan hydrique :

$$Q_{in} - Q_{out} = (h_{i+1} - h_i) \times A_{lac} / (24 \times 3600)$$

$$h_{i+1} = (h_i + Q_{in} - Q_{out}(h_i)) \times (24 \times 3600) / A_{lac}$$

Avec h le niveau du plan d'eau du lac en m, Q_{in} l'ensemble des entrants (débits du Rhône, apports par précipitation, bassins versants du lac...), Q_{out} le débit sortant et l'évaporation. A_{lac} est la surface du lac.

Le niveau du plan d'eau au pas de temps $i+1$, dépend du niveau au pas de temps i , en y ajoutant le bilan hydrique $Q_{in} - Q_{out}$. Le Q_{out} , est déterminé par les régimes d'exploitation du lac connu, dont le débit maximum dépend du niveau du plan d'eau et du débit de l'Arve (on choisit un débit moyen de l'Arve). Le débit minimum est déterminé par la saison. Pour les débits intermédiaires, on utilise une fonction objective qui maintient le niveau du lac au milieu de la gamme de régulation du niveau, de telle sorte que lorsque le niveau est sous la moyenne du min et du max autorisé, le débit de restitution est à l'œuvre, et quand le niveau moyen est dépassé, on augmente graduellement le débit vers le débit de capacité, fonction du niveau du plan d'eau. Pour apprécier les résultats, on observera la réponse du plan d'eau en fonction de la variabilité des apports due aux différents scénarios climatiques.

4. RÉSULTATS

4.1. BILAN HYDRIQUE HISTORIQUE

4.1.1. PRÉCIPITATIONS

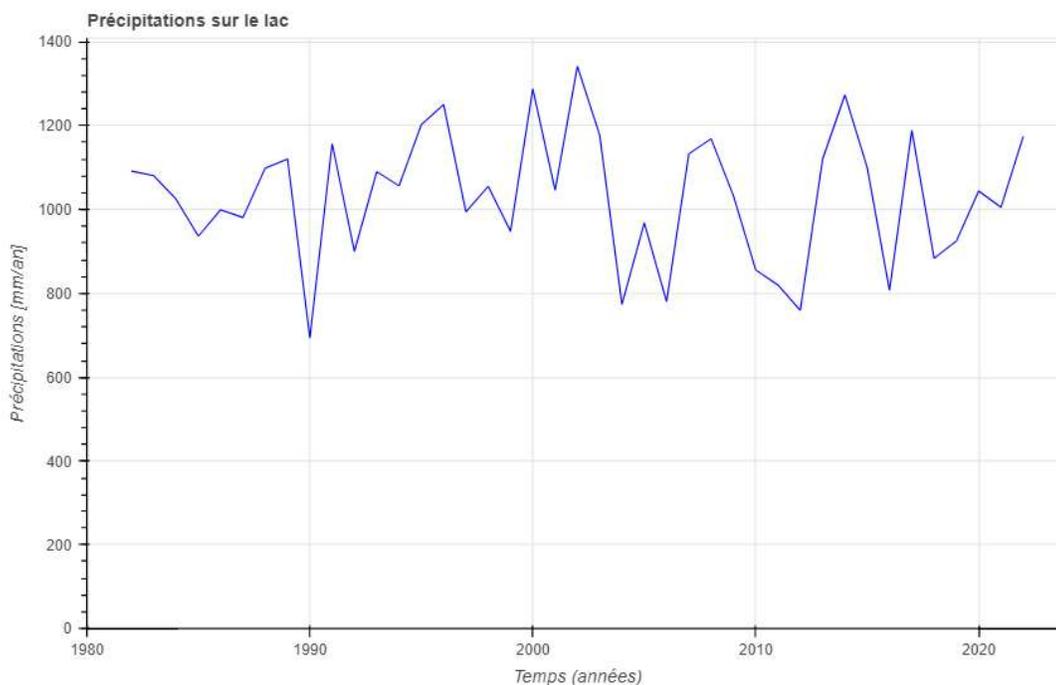


Figure 4 : Précipitation annuelles sur la période 1981-2021, interpolées avec la méthode IDW sur 5 stations météorologiques.

Figure 4: Annual precipitations for 1981–2021, interpolated using the IDW method on five weather stations

De 1981 à 2021, la moyenne annuelle des précipitations sont interpolées à partir des stations de Genève, Changins, Pully, Montreux, Thonon et Vevey et s'élèvent à 1032 mm, avec une déviation standard de 155 mm. La Figure 4 représentant les précipitations moyennes annuelles sur le lac montre une relative stabilité autour de la moyenne avec une variance qui semble également stable.

En termes de variabilité spatiale, les précipitations varient entre 900 mm à Genève et 1300 mm à Montreux. Celles issues de l'atlas hydrologique de la suisse sont de 980 mm an⁻¹. Avec les erreurs de mesures, on estime une erreur d'environ 12% qui se propage. On a alors un intervalle de confiance de ± 120 mm par an sur les précipitations (≈ 2 m³/s).

La saisonnalité des précipitations (Figure 5) est relativement marquée, avec une augmentation des précipitations de février à juin, un maximum en juillet, avant de décroître vers un plateau et un nouveau maximum en octobre, pour enfin décroître jusqu'à la fin de l'année.

Un test de stationnarité (Figure 6) montre que la série est stationnaire sur cette période, avec quelques oscillations (qui représentent l'effet de variance) autour de la droite de référence. Il subsiste tout de même un phénomène d'abaissement de la moyenne des précipitations annuelles sur la période 2005-2011, qui se traduit par un passage des précipitations cumulées au-dessus de la courbe théorique des précipitations, avant de retrouver des valeurs annuelles moyennes.

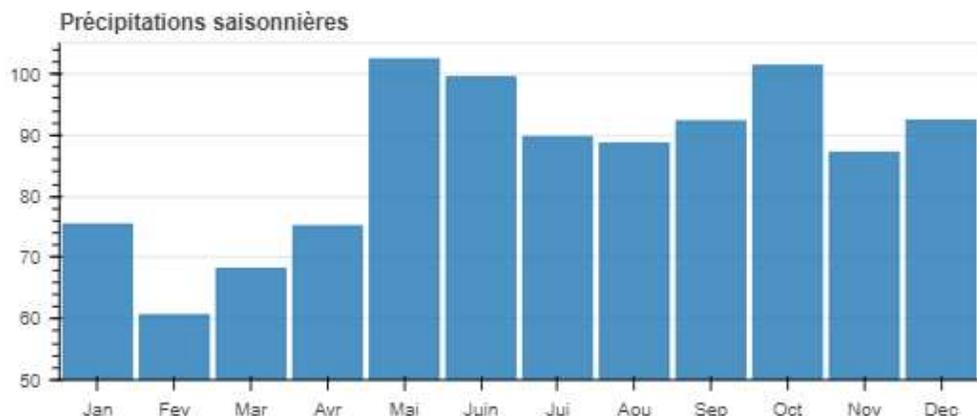


Figure 5 : Histogramme des précipitations mensuelles sur la période 1981-2021

Figure 5: Histogram of monthly precipitations for 1981–2021

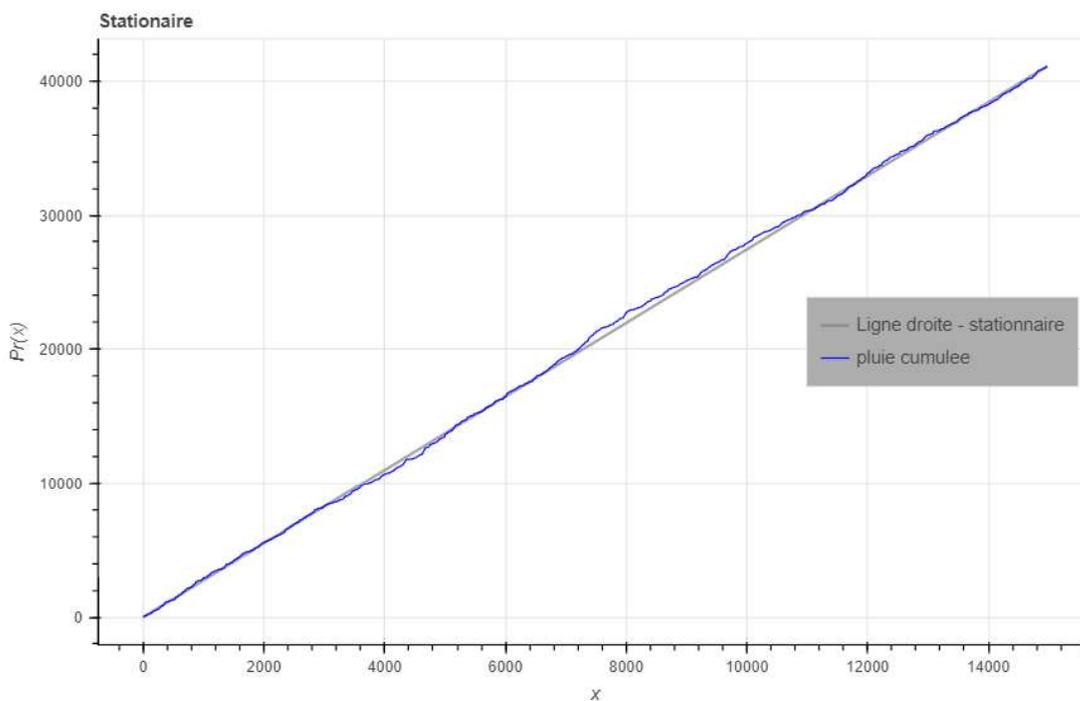


Figure 6 : Test de stationnarité pour les précipitations sur la période 1981-2021. L’axe des abscisses représente les jours de la période d’étude, et l’axe des ordonnées les précipitations cumulées. La droite en gris passe par le 0 et la somme des précipitations de la série. La courbe bleue représente les précipitations cumulées.

Figure 6: Stationarity test for precipitations in 1981–2021. The x-axis represents the days of the study period, the y-axis cumulated precipitations. The grey line goes through 0 and the sum of the precipitations of the series. The blue curve represents cumulated precipitations

4.1.2. EVAPORATION

L’évaporation moyenne annuelle sur la période d’étude s’élève à 961 mm an⁻¹, quand l’atlas hydrologique de la suisse propose des résultats autour de 950 mm an⁻¹. On note également sur la Figure 7 une augmentation progressive des évaporations annuelles, qui témoigne d’un réchauffement global de la surface de la terre : l’évaporation est influencée par la température, l’humidité relative et également le rayonnement global ; de fait, l’évaporation s’en retrouve impactée avec une hausse de sa valeur annuelle. L’erreur associée aux mesures et sa propagation s’élèvent à environ 15% de la valeur de l’évaporation, soit 140 mm an⁻¹ (≈2,5 m³/s).

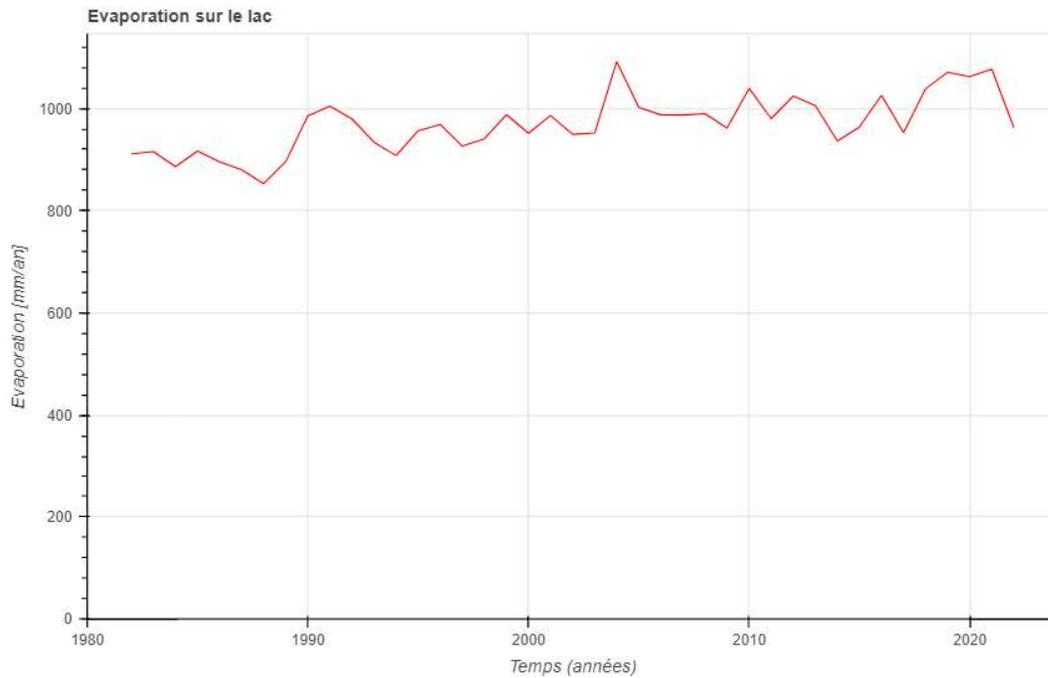


Figure 7 : Evaporation annuelle sur la période 1981-2021, interpolé avec la méthode IDW sur 4 stations.
 Figure 7: Annual evaporation for the 1981–2021 period, interpolated with the IDW method on four stations

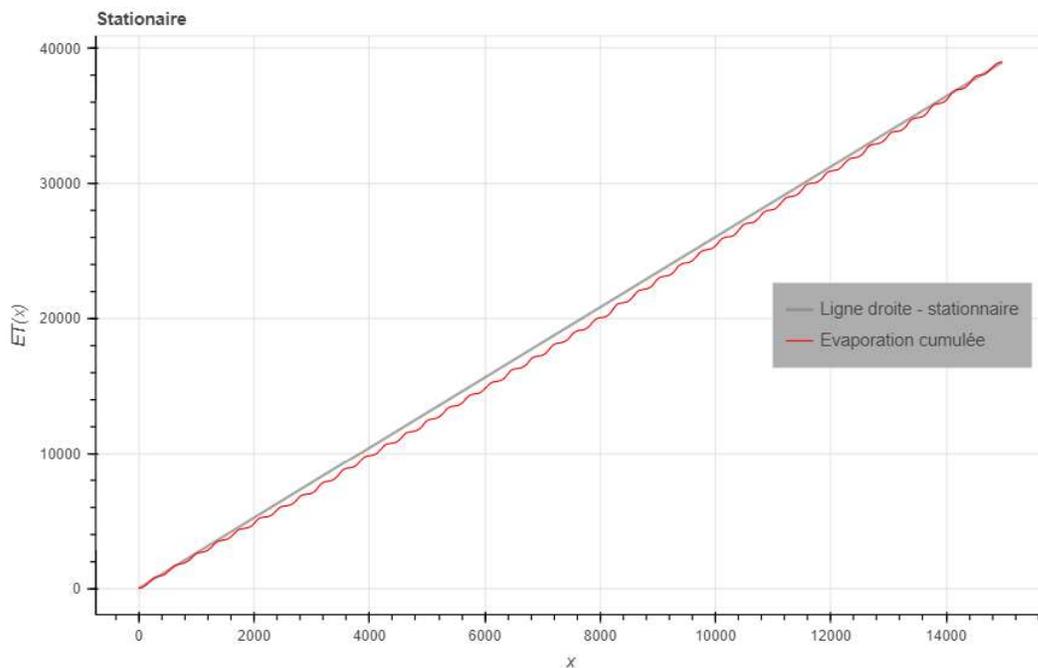


Figure 8 : Test de stationnarité pour les évaporations sur la période 1981-2021. L'axe des abscisses représente les jours de la période d'étude, et l'axe des ordonnées les précipitations cumulées. La droite en gris passe par le 0 et la somme des évaporations journalières de la série. La courbe rouge représente les évaporations cumulées.

Figure 8: Stationarity test for evaporations in 1981–2021. The x-axis represents the days of the study period, the y-axis cumulated precipitations. The grey line goes through 0 and the sum of the evaporations of the series. The red curve represents cumulated evaporations.

Le test de stationnarité de l'évaporation indique une non-stationnarité de la moyenne du phénomène d'évaporation. En effet, la courbe d'évaporation cumulée passe en dessous de la courbe théorique qui passe par le zéro et la somme des évaporations. Ce passage en dessous signifie que le phénomène d'évaporation est en constante croissance au cours du temps. On a des évaporations, sur les premières années, qui sont inférieures aux évaporations des dernières années de la série : la courbe de évaporations cumulées doit donc d'abord s'infléchir en dessous de la courbe théorique pour ensuite croître et décrire le phénomène d'augmentation des évaporations. On ne note pas de variation dans la variance : on observe toujours le caractère saisonnier des évaporations, avec des oscillations annuelles.

4.1.3. APPORTS ET AFFLUENTS

La Figure 9 présente les apports et exports moyens annuels en m^3/s de cours d'eau. En rouge, le débit sortant mesuré à la Halle de l'île. En bleu, le débit du Rhône à Porte-du-Scex. En gris, il s'agit des affluents alimentant le Léman, sur la base des données brutes récoltées. Il faut donc mentionner que cette courbe ne prend pas en compte les bassins versants non monitorés, et les données manquantes sur les stations de mesures ne sont pas corrigées. En vert, on trouve les affluents monitorés, avec une correction pour les données manquantes et un modèle pour les bassins versants non monitorés, d'où la valeur de débits supérieure à la courbe grise.

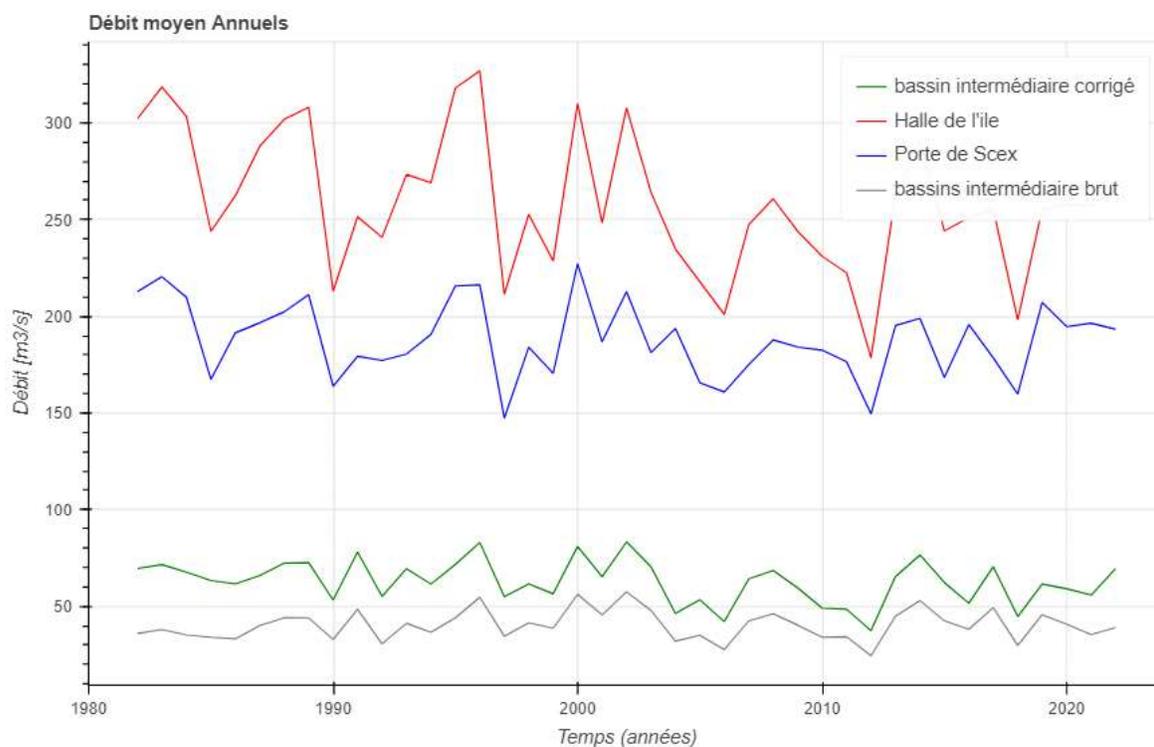


Figure 9 : Débits moyen annuels des apports et des exports au Léman

Figure 9: Mean annual rates for inflows and exports at Lake Geneva

Sur le début de la période, beaucoup de stations ne sont pas encore actives : l'écart entre les affluents mineurs bruts et corrigés est donc élevé. Cet écart tend à se restreindre dans la mesure ou de moins de moins de stations de mesures sont manquantes. L'écart restant s'explique par le modèle qui estime les débits associés aux bassins versants non monitorés.

On note tout de même une tendance à la baisse du débit de sortie à Halle de l'île, qu'on retrouve également à Porte-du-Scex de manière moins marquée. On observe également une tendance similaire sur les affluents dits mineurs, mais qui reste à nuancer dans la mesure ou une partie de ces affluents sont modélisés. Au regard de l'erreur associée aux stations de mesures, compte tenu des données récoltées, on obtient une erreur de $\pm 14 m^3/s$ sur une année.

4.1.4. FERMETURE DU BILAN HYDRIQUE

Pour étudier la fermeture du bilan hydrique, on compare le $\Delta S_{\text{observé}}$ avec $\Delta S_{\text{calculé}}$. La différence de ces deux termes, ramenée en débit m^3/s sur un pas de temps annuel, nous indique le déficit, ou le surplus, nécessaire à la fermeture du bilan hydrique. On notera que pour que le bilan hydrique soit fermé, la différence des deux termes évoqués précédemment doit être égale à zéro. Pour donner un ordre de grandeur, un résiduel de $-20 \text{ m}^3/\text{s}$ sur une année représente un manque de 1m d'eau sur le lac après une année, ce qui est significatif.

La Figure 10 représente le résiduel du bilan hydrique avec un pas de temps annuel, sous la forme de débit moyen annuel. La courbe grise représente le bilan hydrique brut, c'est-à-dire sans correction de données ni estimations. On comprend alors que les données de débit disponibles associées aux précipitations et aux évaporations ne suffisent pas à expliquer les variations du niveau du lac observé. En effet, le débit résiduel est constamment négatif, ce qui signifie que le différentiel des débits entrant/sortants est inférieur à la variation de volume observé via les stations de mesures. On note tout de même pour le bilan hydrique brut que ce résiduel s'approche du zéro avec les années, ceci s'explique par l'apparition de stations de mesures au cours du temps, donc d'apports supplémentaires au bilan hydrique permettant de s'approcher de la fermeture. Le bilan hydrique corrigé présente une moyenne plus stable autour du zéro (une moyenne de débit résiduel annuel de $-2 \text{ m}^3/\text{s}$ ce qui équivaut à 10cm d'eau par an). On voit que la forme de la courbe est sensiblement identique à celle du bilan hydrique brut, mais ajustée autour du zéro grâce aux interpolations et modélisations de débits manquants.

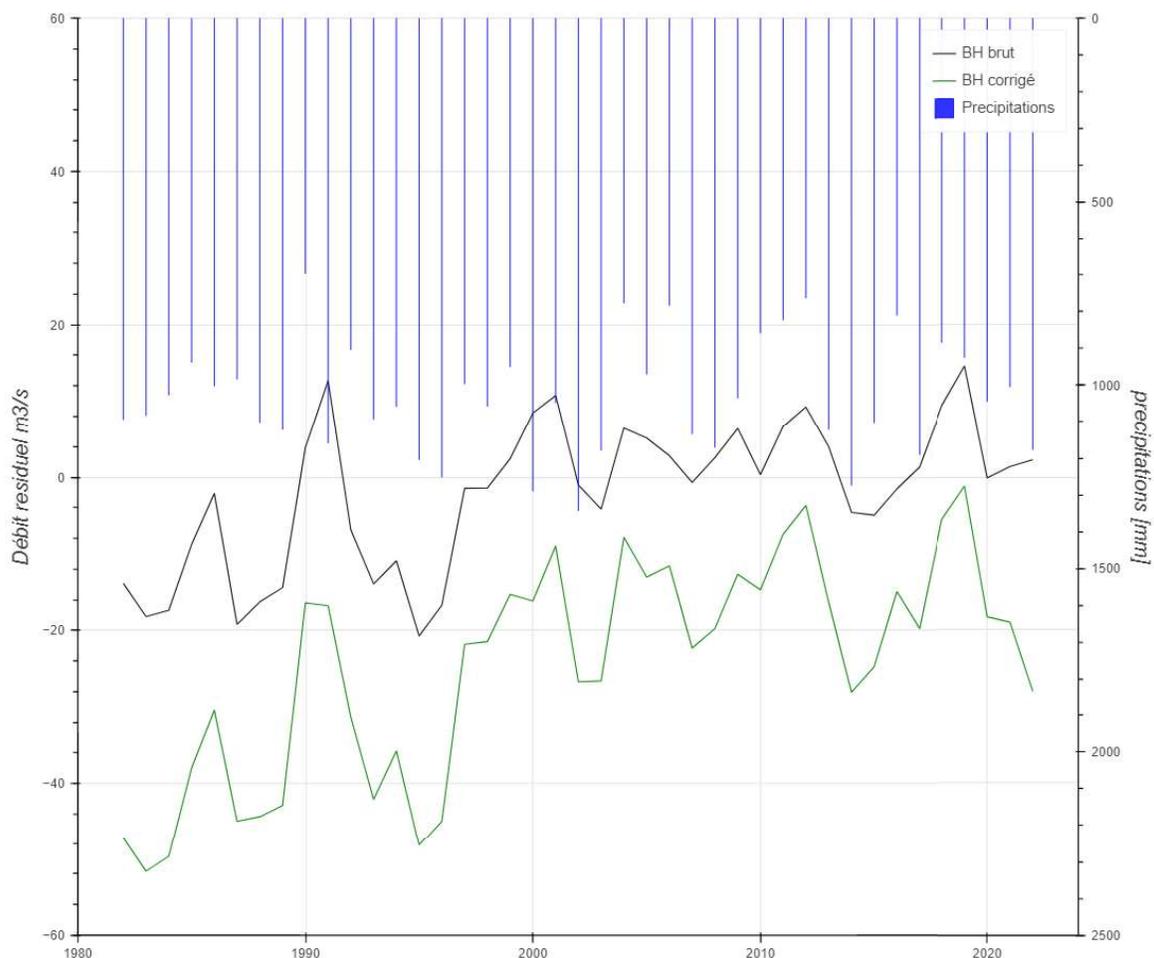


Figure 10 : Débit résiduel du bilan hydrique brut et corrigé sur la période 1981-2021, avec les précipitations annuelles.

Figure 10: Residual flow of the raw and corrected water balances for 1981–2021, with annual precipitations

Cependant, on observe des valeurs de débit résiduel brut supérieures à 0, par exemple en 1990-91, 1999-2000-2001, etc. Cela signifie que le $\Delta S_{\text{calculé}}$ est supérieur au $\Delta S_{\text{observé}}$, et donc qu'il y a des cas de surestimation des apports dans le bilan hydrique. Ceci fera l'objet de la discussion dans la section suivante.

On note également une corrélation apparente entre le débit résiduel et les précipitations, notamment pour le bilan hydrique brut, qui articule les deux arguments principaux de la méthodologie utilisée. Aussi, on note que l'ensemble des années pour lesquelles le nombre de stations de monitoring est manquant, ce débit résiduel est supérieur à la moyenne observée dans la pseudo régression linéaire de la figure 11.

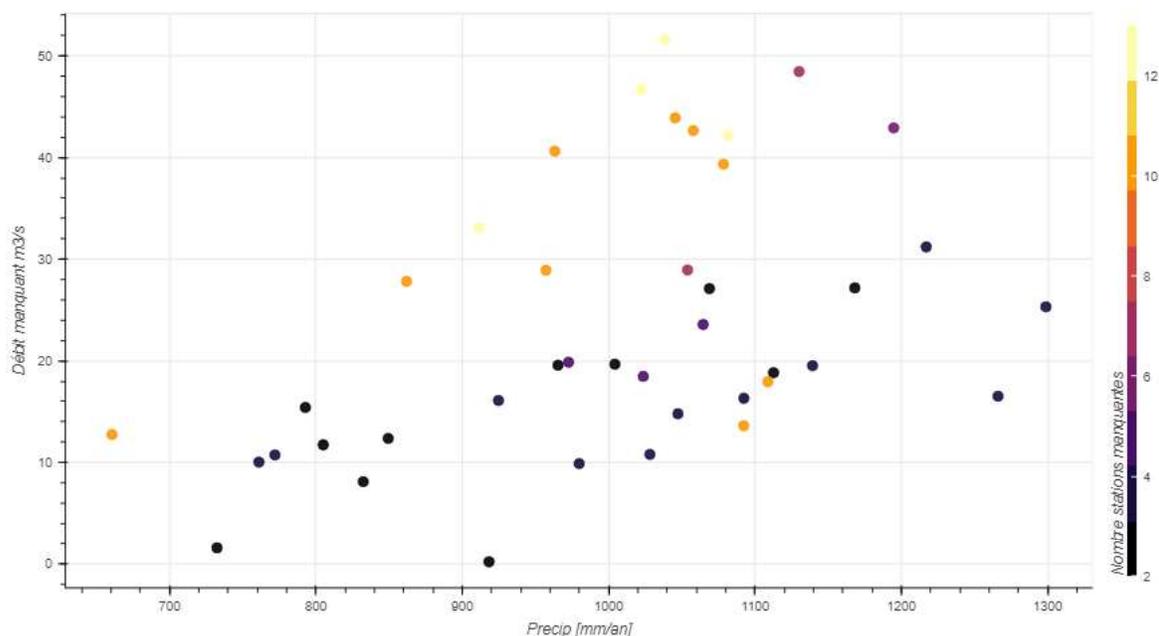


Figure 11 : Débit résiduel du bilan hydrique brut en fonction des précipitations annuelles, corrélé avec le nombre de stations manquante pour le dit bilan hydrique.

Figure 11: Residual flow of the raw water balance as a function of annual precipitations, correlated with the number of stations missing for the said water balance

Il en va de même pour le bilan hydrique corrigé : on observe que lorsque le débit résiduel est positif, les précipitations annuelles sont faibles. La réciproque est vraie : les fortes précipitations annuelles sont associées à des débits résiduels négatifs élevés. On peut donc estimer que l'évènement de précipitation a une influence sur les estimations effectuées, et également sur les mesures.

4.2. BILAN HYDRIQUE FUTUR

Pour rappel, les scénarios climatiques ont été tirés des modèles Hydro CH2018 disponibles au niveau de plus de 300 stations météorologiques situées sur le territoire suisse (CH2018, 2018). Le scénario RCP2.6 correspond à réchauffement à moins de 2 °C. Le RCP4.5 est le scénario intermédiaire, le plus probable compte tenu du caractère épuisable des combustibles non renouvelables. Le scénarios RCP8.5 correspond au scénario sans mesure de protection.

4.2.1. PRÉCIPITATIONS

Les scénarios climatiques CH2018 projettent d'ici la fin du siècle, pour la Suisse et pour un scénario de forte augmentation des émissions, une réduction du nombre de jours pluvieux en été associée à une tendance à l'allongement des périodes sèches. On observe un changement de moyenne, ainsi qu'un changement de variance marqué pour les scénarios les plus défavorables (Figure 12, Tableau 1).

On observe une légère tendance à la baisse des quantités de précipitation pour les scénarios les plus défavorables. On note également une plus grande variabilité interannuelle de précipitations, qui se traduit également dans les précipitations journalières, avec des évènements extrêmes plus fréquents, induisant davantage de variabilité aux séries temporelles.

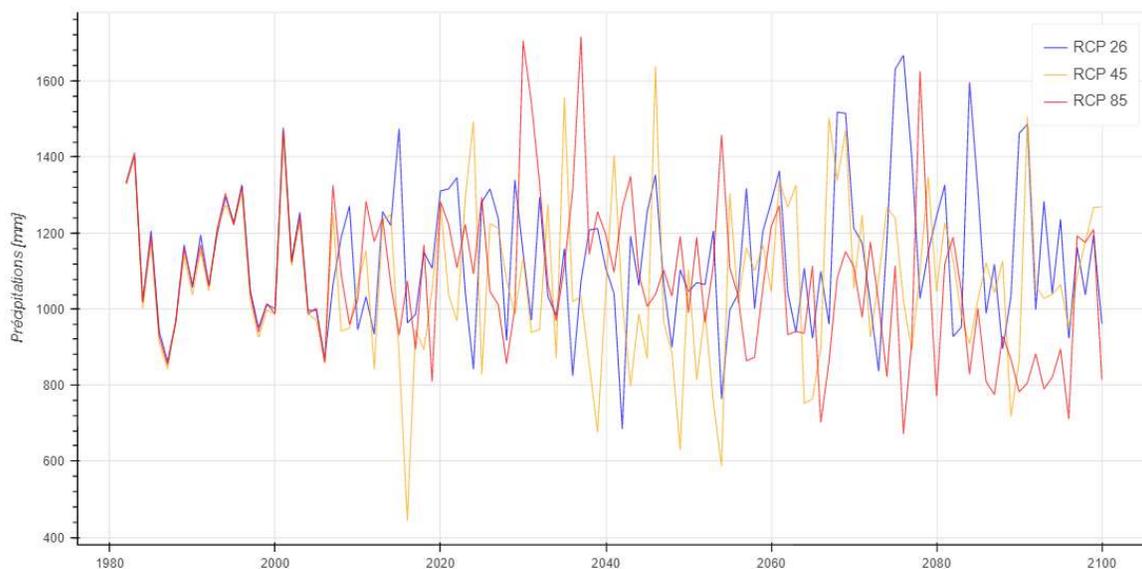


Figure 12 : Projection des précipitations annuelles en mm an⁻¹ selon les différents scénarios de forçage radiatifs.

Figure 12: Projection of annual precipitations in mm year⁻¹ according to the different radiative forcing scenarios

Tableau 1 : Statistiques annuelles associées aux précipitations projetées selon les différents scénarios.

Table 1: Annual statistics associated with projected precipitations according to the different scenarios

Période	Précipitations [mm]	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
1981-2099	Moyenne	1136	1075	1087

4.2.2. EVAPORATION

L'augmentation de l'évaporation liée à la hausse de température due aux forçages radiatifs est nettement visible (Figure 13, Tableau 2). Le scénario RCP2.6 témoigne d'une relative stabilité de la moyenne et de la variance de l'évaporation, qui reste relativement proche de la valeur calculée pour le bilan hydrique historique. Cependant, les deux autres scénarios, avec davantage de forçage radiatif, présentent des valeurs d'évaporation en nette hausse : pour le scénario RCP8.5, on observe une hausse de plus de 20% de l'évaporation annuelle. Ceci peut avoir un impact considérable sur le bilan hydrique lors d'évènements annuels d'évaporation de 1300 mm et plus.

Tableau 2 : Statistiques annuelles des évaporations selon les périodes et les forçages radiatifs.

Table 2: Annual statistics of evaporations according to periods and radiative forcings

Période	Evaporation [mm]	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
1981-2020	Moyenne	974	987	984
	Déviation standard	44	58	56
2020-2060	Moyenne	1004	1032	1045
	Déviation standard	46	63	69
2060-2100	Moyenne	1003	1047	1151
	Déviation standard	58	61	71

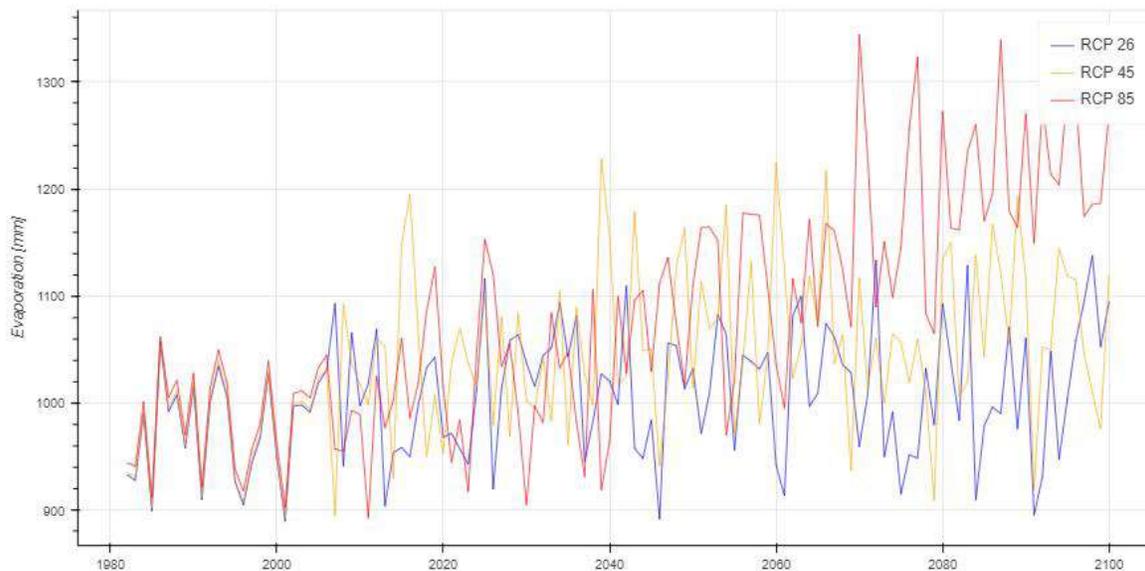


Figure 13 : Projection des évaporations annuelles en mm an⁻¹ selon les différents scénarios de forçage radiatifs.

Figure 13: Projection of annual evaporations in mm year⁻¹ according to the different radiative forcing scenarios.

4.2.3. APPORTS AU LAC

Les apports du lac ont été modélisés via l'ensemble de tous les bassins versants du Léman, à l'exception du Rhône (Figure 14, Tableau 3). Pour les différents scénarios climatiques, on observe une légère tendance à la baisse au cours du temps, qui est relativement plus marquée pour les années proches de 2100 pour le RCP8.5, baisse qui s'élève à environ 10% du débit proposé initialement.

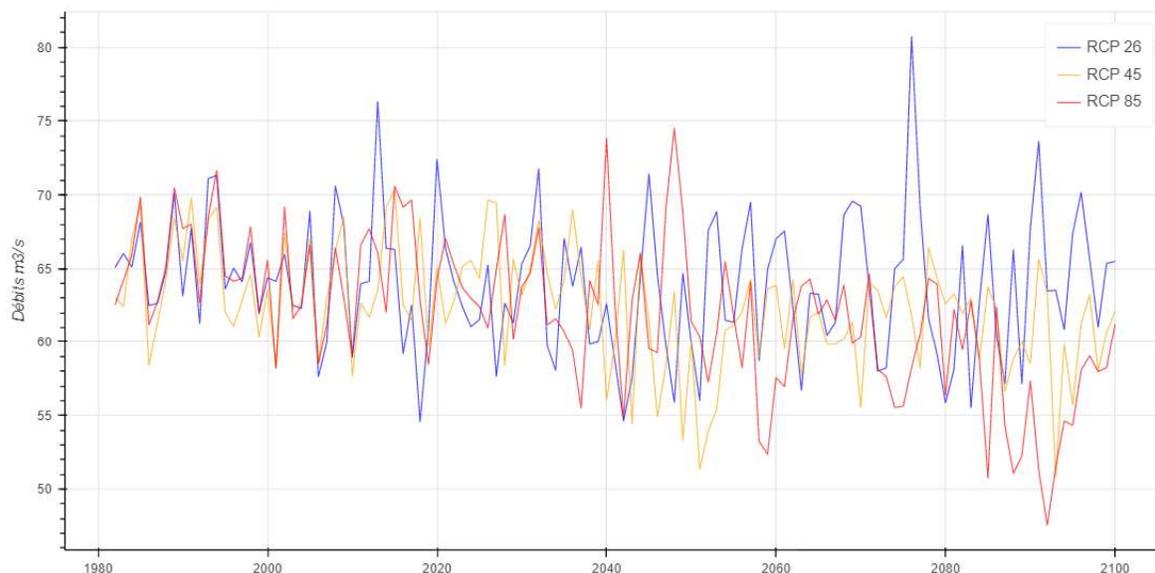


Figure 14 : Projection des débits annuels moyens des apports au lac sans le Rhône à Porte-du-Scex selon les différents scénarios climatiques.

Figure 14: Projection of mean annual rates for inflows to the lake without the Rhone River at Porte-du-Scex according to the different climate scenarios.

Tableau 3 : Statistiques annuelles des évaporations selon les périodes et les forçages radiatifs.

Table 3: Annual statistics of evaporations according to periods and radiative forcings.

Période	Débits [m ³ /s]	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
1981-2020	Moyenne	64,9	64,2	64,9
	Déviations standard	4,2	3,5	3,59
2020-2060	Moyenne	63	61,9	60,3
	Déviations standard	4,2	4,5	4,3
2060-2100	Moyenne	62,1	60,7	59
	Déviations standard	5,8	2,65	3,09

La Figure 15 permet d’entrevoir l’évolution du débit du Rhône qui alimente le lac au cours du temps, selon les 3 scénarios climatiques. Force est de constater une nette baisse du débit au cours du temps, quel que soit le scénario (Tableau 4). Le scénario RCP2.6 témoigne d’un débit inférieur de 10 m³/s sur la période 2060-2100 comparé à 1981-2021. Le scénario RCP8.5 est beaucoup plus drastique, avec une année à seulement 125 m³/s en moyenne comparé à un maximum annuel de 210 m³/s.

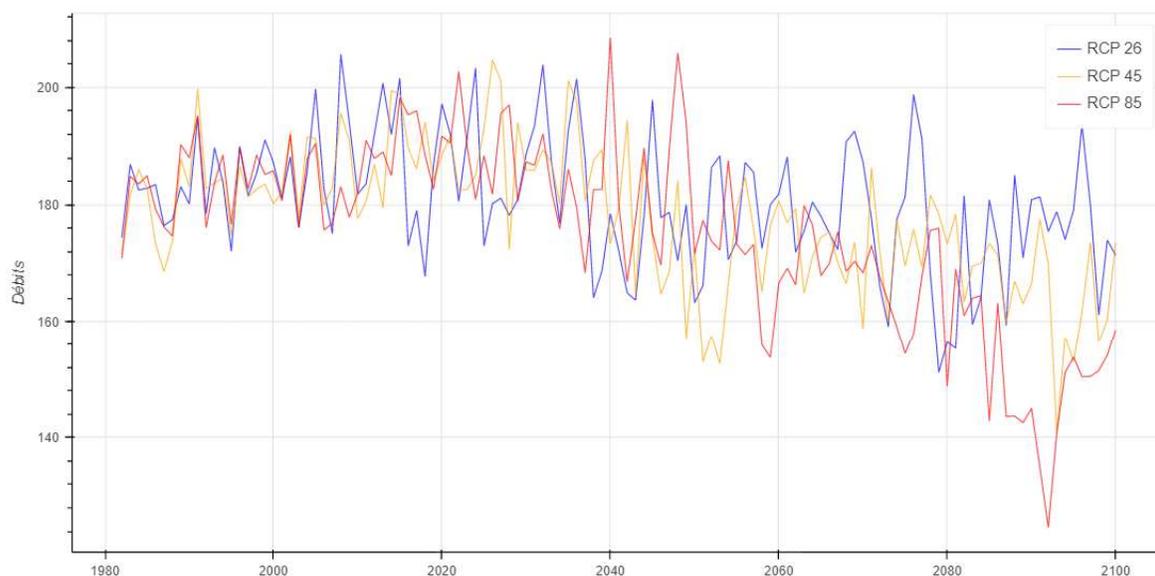


Figure 15 : Projection des débits annuels moyens des apports au lac du Rhône à Porte-du-Scex selon les différents scénarios climatiques.

Figure 15: Projection of mean annual rates for inflows to the lake from the Rhone River at Porte-du-Scex according to the different climate scenarios.

Tableau 4 : Statistiques annuelles des débits contribuant au Léman du Rhône à Porte-du-Scex.

Table 4: Annual statistics of flows contributing to Lake Geneva from the Rhone River at Porte-du-Scex.

Période	Débits [m3/s]	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
1981-2020	Moyenne	185,4	184,7	185
	Déviations standard	8,6	7,4	6,63
2020-2060	Moyenne	181	180	180
	Déviations standard	10,2	13,9	12,5
2060-2100	Moyenne	175	169	159
	Déviations standard	11,3	8,8	12,9

La variabilité au cours des années permet d’avoir une compréhension globale de la baisse des apports du Rhône au Léman. Une approche par saisonnalité permet aussi d’entrevoir la variabilité de l’apport au cours d’une année type.

Les Figure 16 et 17 qui suivent porte une attention particulière à la variabilité mensuelle des débits du Rhône.

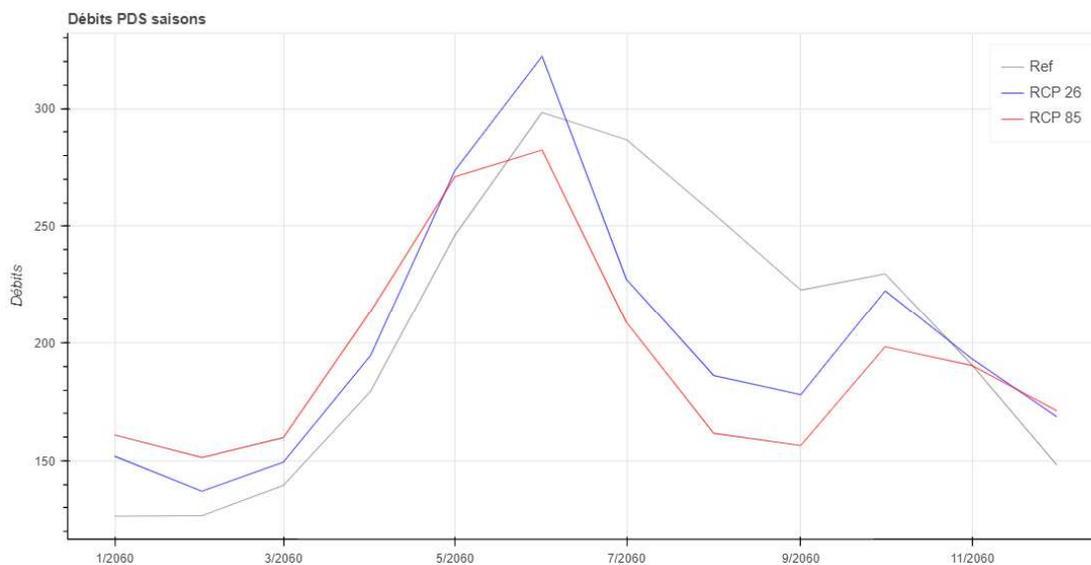


Figure 16 : Variabilité saisonnière des apports au Léman en fonction des scénarios 26 et 85, moyennés autour de l’année 2060 (2045-2075).

Figure 16: Seasonal variability of inflows to Lake Geneva according to scenarios 26 and 85, averaged around the year 2060 (2045–2075).

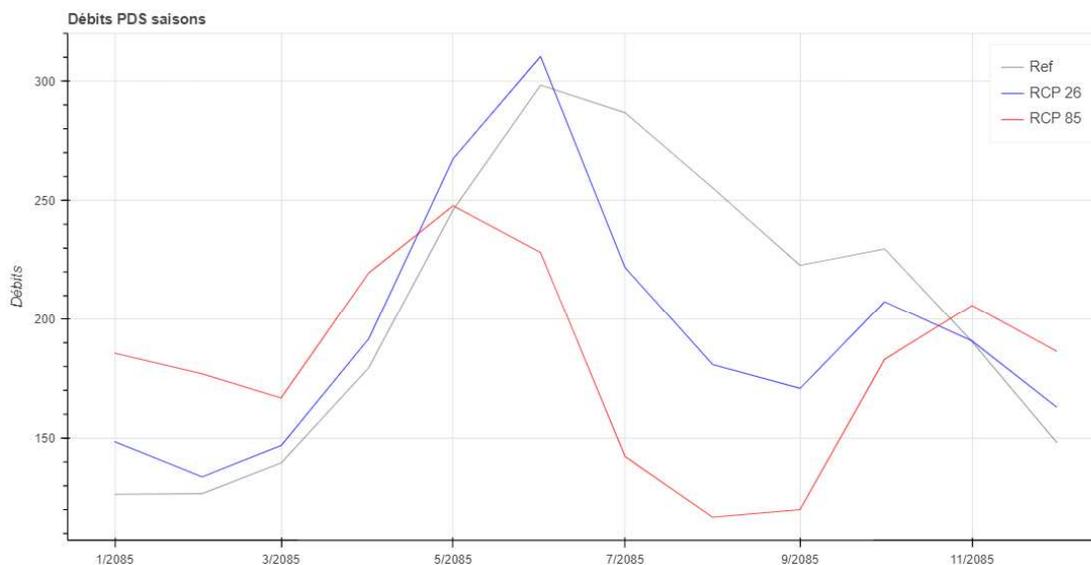


Figure 17 : Variabilité saisonnière des apports au Léman en fonction des scénarios 26 et 85, moyennés autour de l'année 2085 (2075-2100).

Figure 17: Seasonal variability of inflows to Lake Geneva according to scenarios 26 and 85, averaged around the year 2085 (2075–2100).

Entre les figures 16 et 17, on observe que la variabilité d'apports au cours du temps est critique. La courbe du scénario RCP8.5 est beaucoup plus lissée avec un pic moins prononcé en fin d'hiver (les glaciers produisant moins de ruissellement), et un "étiage" d'été beaucoup plus prononcé, qui marque significativement le niveau d'eau modélisé du lac dans la section suivante. La baisse globale des apports du Rhône est d'autant plus prononcée lors de certaines périodes de l'année. Ces figures témoignent également de la baisse générale des apports du Rhône : l'aire sous la courbe est d'autant plus faible que le scénario est critique.

4.2.4. FORÇAGE DU SCÉNARIO AU SEUJET

La figure 18 présente le niveau du lac modélisé en fonction des scénarios climatiques, sur les années 2085-2089. On trouvera d'autres figures de ce type en annexe. On y voit le niveau du lac en fonction du temps, avec en gris les niveaux de régulation à respecter. Compte tenu du manque d'eau saisonnier mis en évidence dans la section précédente, on observe des sorties de niveau d'exploitation très marqués pour les scénarios RCP8.5 pendant les étés: le niveau d'eau ne parvient pas à être maintenu en raison des faibles apports du Rhône et des bassins versants du lac, et l'obligation de restituer un débit minimum au Rhône en aval du lac. Sur le reste de la période, les 3 scénarios de débits et précipitations suffisent à maintenir le niveau du lac dans les cotes acceptées selon les réglementations du Seujet. C'est autour des années 2050 que les sorties de cotes augmentent en fréquence pour les scénarios RCP4.5 et 85. Ici, le bilan hydrique étant fermé en égalisant les termes de l'équation (en définissant le débit de sortie par rapport à l'égalisation du bilan), le débit de sortie doit diminuer au même titre que la modélisation des apports – c'est-à-dire autour de 10% dans le pire des scénarios. Cependant, pour le RCP8.5, à l'horizon 2100, la réglementation du niveau du lac impose un débit de sortie faible, car le niveau passe en dessous de la côte minimale : ceci impacte nettement le débit de sortie annuel.

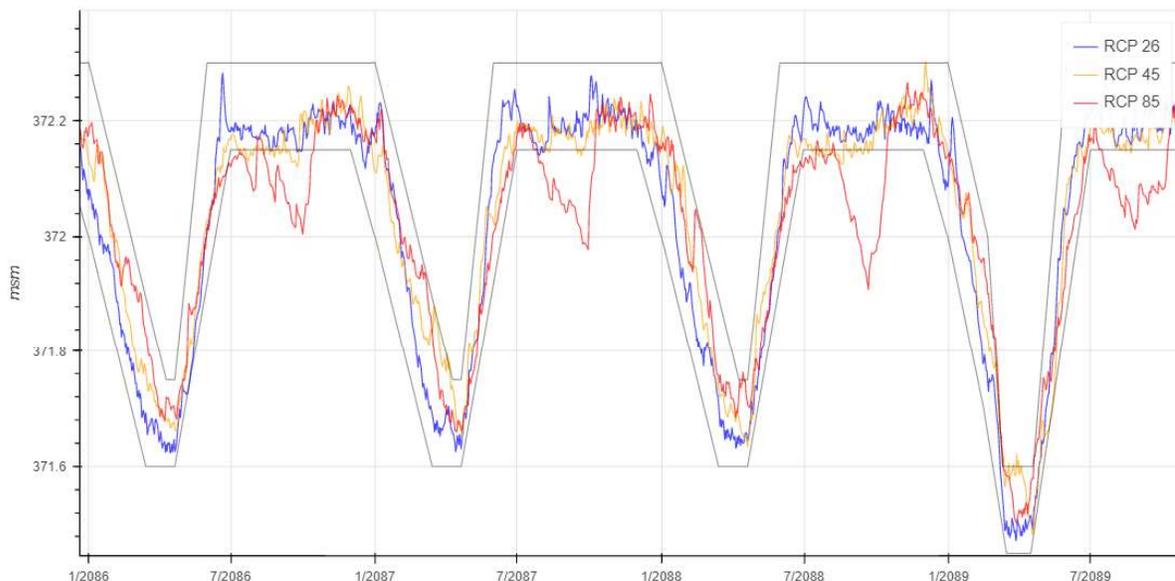


Figure 18 : Forçage du niveau du lac avec les consignes d’exploitation du Seujet à Genève, en fonction des différents scénarios climatiques.

Figure 18: Forcing the lake level with operation instructions from Seujet dam at Geneva, as a function of different climate scenarios.

Le Tableau 5 ci-dessous expose le nombre de jours pendant lesquels le niveau du lac sort des normes imposées par les règles d’exploitation du niveau du lac. Sans surprise, plus le scénario est défavorable, plus le nombre de jours est élevé. C’est qu’il est difficile de maintenir le niveau avec des normes d’exploitation qui datent d’un régime hydrologique obsolète comparé aux prédictions proposées par HydroCH2018.

Tableau 5 : Statistiques globales des sorties de niveaux modélisés par rapport au règlement du lac.

Table 5: Overall statistics of outflow levels modeled in relation to the lake’s regulations.

Nombres de jours	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Au-dessus du niveau maximum	111	396	449
Au-dessous du niveau minimum	447	1183	1817

5. RÉSULTATS

5.1. BILAN HYDRIQUE HISTORIQUE

Les différentes étapes pour s’approcher au mieux de la fermeture du bilan hydrique illustrent différentes hypothèses qui expliquent cette non-fermeture de bilan qui diminue au fil de l’étude.

En première instance, le bilan hydrique avec seulement des données empiriques ne se ferme pas à hauteur de 50 m³/s pour les premières années, et à hauteur de 20 m³/s sur les années les plus proches de 2021. Il en résulte un écart d’un à plusieurs mètres d’eau par an avec les données à disposition. On note tout de même que les variations de ce déficit sont corrélées avec les précipitations : les années de fortes précipitations, le déficit est d’autant plus élevé. Ceci se comprend simplement par le fait que les bassins versants non-monitorés apportent davantage d’eau les années de fortes précipitations, expliquant le déficit du bilan hydrique en hausse.

On note également qu’au cours du temps, le déficit du bilan hydrique brut diminue : certaines stations de mesures n’ayant pas de données sur l’entièreté de la période, ce déficit du bilan qui diminue au fil des années s’explique simplement par le fait que les stations de mesures apparaissent au cours du temps, passant de 15 stations manquantes en 1981 à seulement 2 en 2018 (dû à des interruptions d’exploitation).

Pour pallier ce manque, une interpolation des données existantes sur la période manquante a été réalisée avec une corrélation linéaire avec les précipitations. Avec cette interpolation, on remarque que le déficit du bilan hydrique s'homogénéise à travers les années. Le reste du déficit s'explique également via les bassins versants non-monitored, sur l'ensemble de la période. De fait, cet ajout d'apports permet de se rapprocher de la fermeture annuellement, avec un déficit moyen de $-2 \text{ m}^3/\text{s}$, et des amplitudes de déficit de -20 à $+20 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le débit ajusté des apports calculés (interpolation des données manquantes et modélisation du débit des bassins versants) est conforté d'un part par le fait que le bilan hydrique se ferme dans la gamme d'erreur estimée ($\pm 18 \text{ m}^3/\text{s}$), et d'autre part parce que le débit modélisé dans les scénarios climatiques témoigne d'un ordre de grandeur similaire sur la même période ($65 \text{ m}^3/\text{s}$).

Les oscillations autour de la fermeture s'expliquent via les erreurs d'estimations et des mesures des différentes instrumentations qui s'élèvent en moyenne à $18 \text{ m}^3/\text{s}$. En effet, les erreurs de mesures aux stations comme Porte de Scex ou la Dranse peuvent influencer fortement le bilan dans un sens ou l'autre. Au vu de ces résultats, il semblerait que la méthode utilisée pour approcher la fermeture du bilan hydrique soit appropriée, compte tenu de l'erreur estimée. Il apparaît alors difficile et non pertinent de complexifier les méthodes pour ajuster les inconnues au vu de l'erreur des instrumentations. Cela étant, la méthodologie proposée peut faire l'objet d'une reproduction pour étudier plus spécifiquement certaines années dont les mesures ne sont pas satisfaisantes au regard du delta de stock du lac observé.

Aussi, la co-occurrence d'un fort déficit positif du bilan hydrique avec de faibles précipitations nécessite une clarification, et de même pour la réciproque. De fait, plus les précipitations sont importantes, plus on sous-estime les apports, et inversement, plus les précipitations sont faibles, plus on surestime les apports. Cela peut être dû à notre estimation par corrélation : le coefficient de corrélation donne une idée fidèle du comportement moyen du bassin versant en relation avec les précipitations, mais ne décrit pas exactement le réel. Aussi, on notera que plus les débits sont élevés, plus l'erreur associée à la mesure de débit sera élevée.

En étudiant de manière journalière le bilan hydrique, on observe parfois une asynchronicité des événements : les débits entrants importants apparaissent à la sortie avec un delta de temps ; plusieurs phénomènes peuvent expliquer cela. Nous avons comparé le temps de réponse des débits de sortie lorsqu'il y a de forts débits entrants dans le lac. Nous supposons que le temps de réponse dépend de l'échelle de temps de l'événement pluvieux et de son intensité : plus il est intense, plus l'asynchronicité est marquée.

En dernière analyse, il faut aussi évoquer la prise en compte de la variation de température du lac et son influence dans le bilan hydrique. Il existe un phénomène de dilatation thermique du volume de l'eau en lien avec la variation de la température de ce dernier. Les deux variations de stock à l'étude dans cette section (dS observé et dS calculé) ne prennent pas en compte ce paramètre de la même manière. Dans le dS observé se trouve à la fois une variation de volume due à un différentiel apport/export et la variation globale de la température du lac. Dans le dS calculé, sont pris en compte le différentiel apport/export, et la variation de température de l'eau des apports seulement.

Pour mieux se rendre compte de l'impossibilité potentielle de comparer ces deux termes sans prendre en compte le phénomène de dilatation thermique, on peut imaginer une année complète lors de laquelle les exports sont exactement identiques aux apports, ce qui implique un dS calculé égal à zéro.

De son côté, le lac, au cours de l'année, témoigne d'une hausse de température de $1 \text{ }^\circ\text{C}$, donc le dS observé sera positif due à la dilatation, bien que les exports soient équivalents aux apports. On voit bien ici la nécessité de prendre en compte cet effet de température pour comparer ces deux variations de stockage, et améliorer la fermeture du bilan hydrique. Cela étant, une rapide analyse des variations de températures annuelles permet de quantifier l'effet de cette dilatation thermique effective sur le lac : sur la période 1971-2021 : on observe un différentiel de température annuelle moyen de $0,8 \text{ }^\circ\text{C}$, avec une moyenne absolue de $0,19 \text{ }^\circ\text{C}$. Compte tenu du coefficient de dilatation thermique de l'eau, ceci correspond à une moyenne de variation de niveau $dH = 0,64 \text{ cm}$, et un maximum de $2,63 \text{ cm}$. Au regard des ordres de grandeur de la non-fermeture du bilan hydrique étudié, et des erreurs commises, cette variation de niveau associée à la température peut donc être négligée. Tout de même, cette variation de niveau convertie en équivalent apport/export sur une année correspond à une moyenne de $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$ et un maximum de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

5.2. BILAN HYDRIQUE FUTUR

Les précipitations du bilan hydrique du futur sont sans appel : la moyenne a tendance à diminuer, et la variabilité augmente. Ceci corrobore tout à fait les études sur le sujet : avec le changement climatique, il faut s'attendre à moins de pluie sur l'année, et une répartition beaucoup moins homogène dans le temps avec davantage d'événements extrêmes.

L'évaporation va également dans le sens des études sur le sujet : avec les scénarios les plus défavorables pour le climat, les fortes chaleurs induisent davantage d'évaporation directe du lac.

Les apports en eau via les affluents du Léman sont également fortement impactés par les scénarios du changement climatique : non seulement la quantité d'eau apportée diminue avec les scénarios ayant les plus forts forçages radiatifs, mais en plus la variabilité des apports sera bouleversée : on assistera à davantage d'apports en eau en hiver et moins en été. Cette co-occurrence de changement de débit, c'est-à-dire la diminution globale d'apport sur l'année et l'augmentation de sa variabilité saisonnière, aura un impact majeur sur l'évolution du niveau du lac au regard de l'exploitation qu'on lui connaît.

Concernant le Rhône le scénario RCP2.6 témoigne d'un débit inférieur de 10 m³/s sur la période 2060-2100 comparé à 1981-2021. Le scénario RCP8.5 est beaucoup plus impactant, avec une année à seulement 125 m³/s en moyenne comparé à un maximum annuel de 210 m³/s. L'imprévisibilité des débits annuels associés aux scénarios climatiques qui ont tendance à exacerber les variances observées ont un impact majeur sur la quantité d'eau apportée au lac, ce qui nuira à l'exploitation du lac telle qu'on la connaît. En effet, les projections de niveau du lac dans le cadre de l'exploitation du Seujet montrent que pour le scénario RCP8.5, la forte baisse d'apports en été fait chuter le niveau du lac hors des cotes d'exploitation, aussi par le fait qu'un débit de restitution obligatoire est appliqué.

Cela étant, l'algorithme utilisé n'anticipe ni les crues ni les sécheresses annoncées, ni ce que feraient les SIG en cas d'annonce météo de ce type. Ces résultats sont donc à être nuancer dans la mesure où l'exploitation simulée n'est fidèle que dans les chiffres, mais pas dans l'anticipation qu'on pourrait observer dans le réel. Toujours est-il que les baisses d'apports en eau restent significative et mettent à l'épreuve le maintien du niveau du plan d'eau du lac.

6. CONCLUSION

Cette étude avait pour but de mieux connaître et d'anticiper l'évolution de l'hydrologie des affluents du Léman en lien avec le changement climatique. Dans un premier temps, elle a été l'occasion de faire le point sur ce qui était connu en termes d'hydrologie sur la zone Lémanique. Force est de constater que relativement peu d'études existent au sujet précis du bilan hydrique du réservoir du Léman. Cependant, une littérature scientifique solide existe à propos des sujets connexes au bilan hydrique qui permettent de le réaliser avec des solides bases scientifiques.

Le bilan historique réalisé dans cette étude a permis de revenir sur plusieurs méthodes permettant d'estimer les précipitations directes au lac, tout comme l'évaporation du plan d'eau. La formule de Penman appliquée aux nappes libres combinée à une méthode d'interpolation simple a permis d'approcher les valeurs proposées par l'atlas hydrologique de la Suisse, et de même pour les précipitations sur le lac. On observe une stationnarité des événements de précipitations, quand les évaporations sont en hausse de 6% sur la période 1981-2021.

Concernant les apports au Léman, les cours d'eau, dont on a les données de mesures exposent une baisse des apports également autour de 6%.

Les bases de données étant incomplètes en raison de l'apparition de stations de mesures au cours du temps, et certains bassins versants n'étant pas monitorés, des méthodes d'estimation et d'interpolation ont été mises en place pour approcher au mieux la fermeture du bilan hydrique (i.e. les apports et les exports se compensent). Il a été possible de reconstituer l'ensemble des apports au Léman, et d'approcher une valeur moyenne de -2m³/s de déficit du bilan hydrique. Ce déficit oscille entre -20 et 20 m³/s, ce qui reste dans la gamme d'erreur calculée. On note une co-occurrence des déficits élevés avec des années de précipitations extrêmes : cela s'explique certainement par une sous-estimation des débits les années humides, et une surestimation des débits les années sèches.

La méthode utilisée s'avère simple et relativement rapide à mettre en place ; une complexification de la méthode s'avèrerait inutile compte tenu de l'erreur calculée.

Le bilan hydrique prospectif à l'horizon 2100 avec la mise en place de scénarios climatiques à la surface du Léman a permis de modéliser le niveau du Léman avec la réglementation du niveau au Seujet telle qu'on la connaît aujourd'hui.

Les modèles hydrologiques du projet HydroCH2018 exposent une nette baisse globale des apports en eau au Léman ; plus le scénario climatique est sévère (i.e. forçage radiatif élevé), plus les baisses d'apports en eau seront marquées. Les évaporations se verront également augmenter, en raison d'hivers plus doux, et d'étés rudes. En plus d'une nette baisse d'apports observables, la saisonnalité des apports se verra également impactée. Les crues de printemps auront lieu plus tôt dans l'année, et seront moins intenses, et les étiages de fin d'été auront lieu plus tôt, et seront encore plus marqués.

La modélisation du niveau du lac avec les réglementations du Seujet et les débits futurs montre qu'il sera difficile de maintenir le niveau du lac dans les cotes réglementaires, compte tenu des baisses d'apports. Les modèles exposent des sorties des cotes réglementaires beaucoup plus fréquentes à mesure de l'avancée dans le temps, et de la sévérité des scénarios.

Pour le scénario le plus défavorable, on note une baisse de plus de 20cm du niveau de l'eau par rapport au minimum acceptable.

L'hydrologie des apports au Léman est changeante, et le sera d'autant plus avec le temps, et la sévérité des scénarios climatiques auxquels les activités anthropiques exposent la planète. La réglementation du Seujet est adaptée à l'hydrologie du Léman à l'époque de la signature de cette réglementation. Les scénarios les plus critiques exposent qu'il ne sera pas possible de maintenir le niveau du lac avec la réglementation actuelle – il faudra donc réinventer la gestion du niveau du lac

Au-delà de la gestion du niveau du lac, les scénarios climatiques les plus critiques avertissent de sécheresses plus intenses en été mettant au défi la résilience de l'agriculture Suisse. Une démographie changeante, et une consommation plus importante d'eau due aux besoins de l'industrie mettra au défi notre capacité à prendre en compte la réalité de la futur baisse des apports en eau du Léman, et de sa régulation telle qu'on la connaît.

BIBLIOGRAPHIE

- Blavoux, B, B. Dussart, H. Maneglier, et Cl. Salvetti. 1962. La région du Léman au point de vue hydrométéorologique. Le Globe. Revue genevoise de géographie 102: 49-68; doi:[10.3406/globe.1962.3490](https://doi.org/10.3406/globe.1962.3490)
- Breuillot, M.-C., et J. Locher. 2022. Le bilan hydrologique du Léman et son évolution probable. Design Project EPFL.
- CIPEL. 1984. Synthèse des travaux de la Commission internationale pour la protection de eaux du Léman contre la pollution. <https://www.cipel.org/wp-content/uploads/catalogue/rapport-scientifique-synthese-1957-1982-incomplet.pdf>
- CH2018. 2018. CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, ISBN: 978-3-9525031-4-0
- CH2018 Project Team. 2018. CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland. National Centre for Climate Services. doi:[10.18751/Climate/Scenarios/CH2018/1.0](https://doi.org/10.18751/Climate/Scenarios/CH2018/1.0)
- Fourrier, A, E. Karpushov. 2020. Apports au Léman par précipitations directes. Design Project EPFL.
- Olive, P, J. Boulègue, et A. Ferhi. 2003. Eclogae Geologicae Helvetiae 96. doi:[10.5169/seals-169046](https://doi.org/10.5169/seals-169046)
- Weingartner, R. 1986. Konzept eines «Hydrologischen Atlas der Schweiz». Publikation Gewässerkunde 67, Bern.
- Weingartner, R, et M. Spreafico. 2010. Atlas hydrologique de la Suisse (HADES). Office fédérale de l'environnement. Bern.
- Zappa, M, F. Lustenberger, R. Weingartner, A. Bühlmann, R. Mülchi. 2019. Débits des grands bassins versants. Scénarios hydrologiques (Hydro-CH2018). Texte expliquant ©Atlas hydrologique de la Suisse, Berne 2022 – 2.

ANNEXES

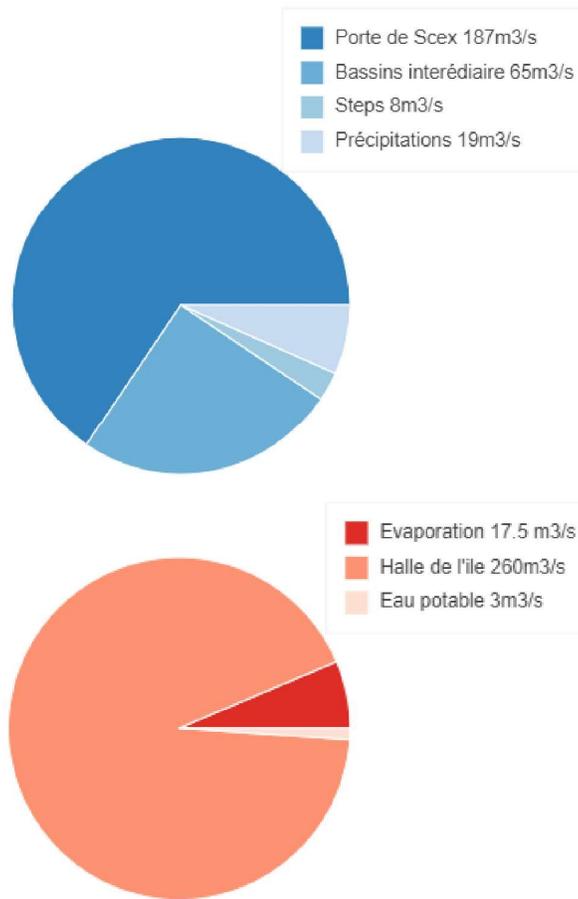
ANNEXE 1 : Tableau de données utilisée pour l'étude du bilan hydrique proposé par la CIPEL en 1980.

ANNEX 1: Table of the data used for the water balance study proposed by the CIPEL in 1980.

Nom	Station	Surface (km ²)	Débit (m ³ /s)	Année ref
RHONE	Porte de Scex	5220	178	1935-1980
GRAND CANAL	-	-	2,22	1963-1980
EAU FROIDE	-	19,4	1,43	1964-1980
BAY MONREUX	Montreux	13,8	0,42	1933-1972
MALADAIRE	-	2,3	0,05	1963-1975
VEVEYSE	Vevey	64,1	3	1963-1980
LE FORESTAY	-	35,2	0,36	1963-1980
LUTRIVE	-	6,3	0,15	1963-1980
PAUDÈZE	-	16,3	0,23	1963-1980
CHAMBERONNE	-	40,2	0,71	1963-1980
VENOGE	-	235,5	5,06	1963-1980
MORGES	-	32,6	0,46	1963-1980
AUBONNE	-	92	6,6	1963-1980
DULLIVE	-	16,9	0,40	1970-1980
PROMENTHOUSE	-	101,6	2,15	1963-1980
NANT DE PRY	-	-	0,14	1970
BRASSU	-	-	0,20	1968-1971
DOYE	-	4,9	0,10	1963-1975
TORRY	-	3,3	0,045	1963-1969
VERSOIX	-	86,2	3,5	1964-19880
VENGERON	-	19	0,22	1964-1980
TOVÉ	-	-	-	1964-1980
LUGRIN	-	-	0,06	1964-1980
DRANSE	-	535,6	18,8	1964-1980
HERMANCE	-	44,5	0,38	1964-1980
NANT AISY	-	5	0,10	1964-1980
STOCKALPER	-	35	5,56	
REDON	-	-	0,443	
FORON		60	0,833	

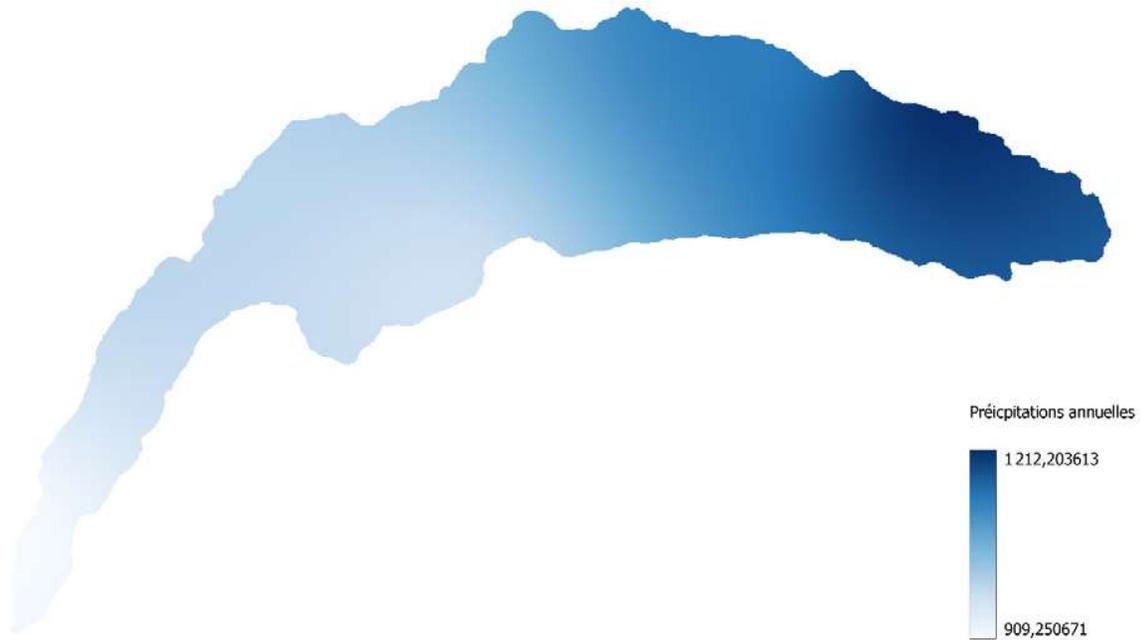
ANNEXE 2 : Digrammes des apports et exports sur la période 1981-2021.

ANNEX 2: Digrams of inflows and exports for the 1981–2021 period.



ANNEXE 3 : Interpolation des valeurs de précipitations avec la méthode Inverse distance weighting.

ANNEX 3: Interpolation of precipitation values with the inverse distance weighting method.



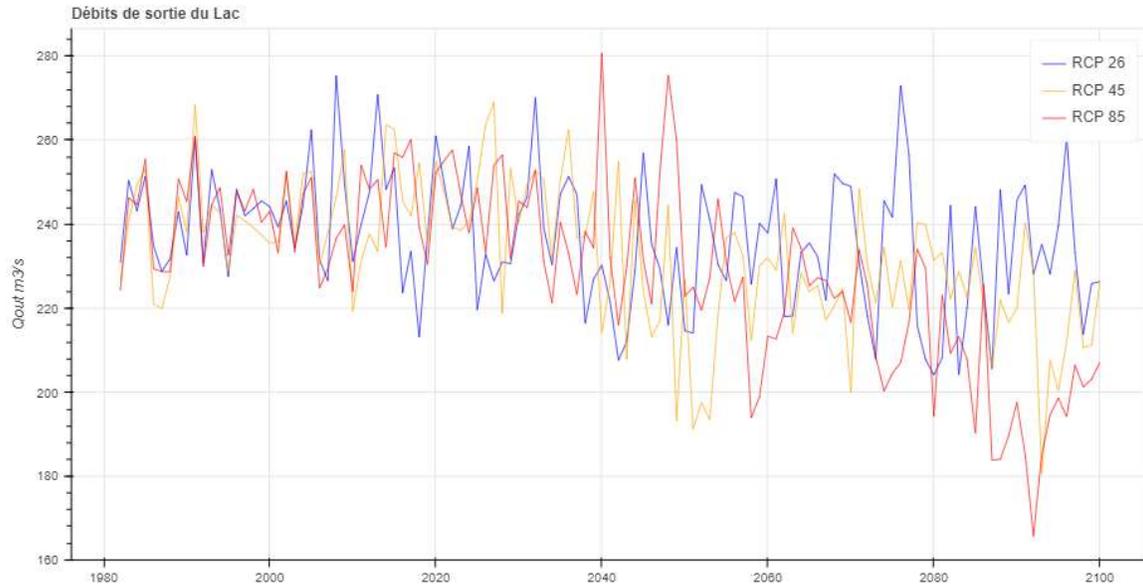
ANNEXE 4 : Interpolation des valeurs d'évaporation avec la méthode Inverse distance weighting.

ANNEX 4: Interpolation of evaporation values with the inverse distance weighting method.



ANNEXE 5 : Modélisation des débits de sortie à Halle de l'île pour les 3 scénarios RCP.

ANNEX 5: Modeling of output flows at Halle de l'île for the three RCP scenarios.



ANNEXE 6 : Modélisation du niveau du lac pour les périodes 2035 et 2065 pour les 3 scénarios climatiques.

ANNEX 6: Modeling of the lake level for 2035 and 2065 for the three climate scenarios.

