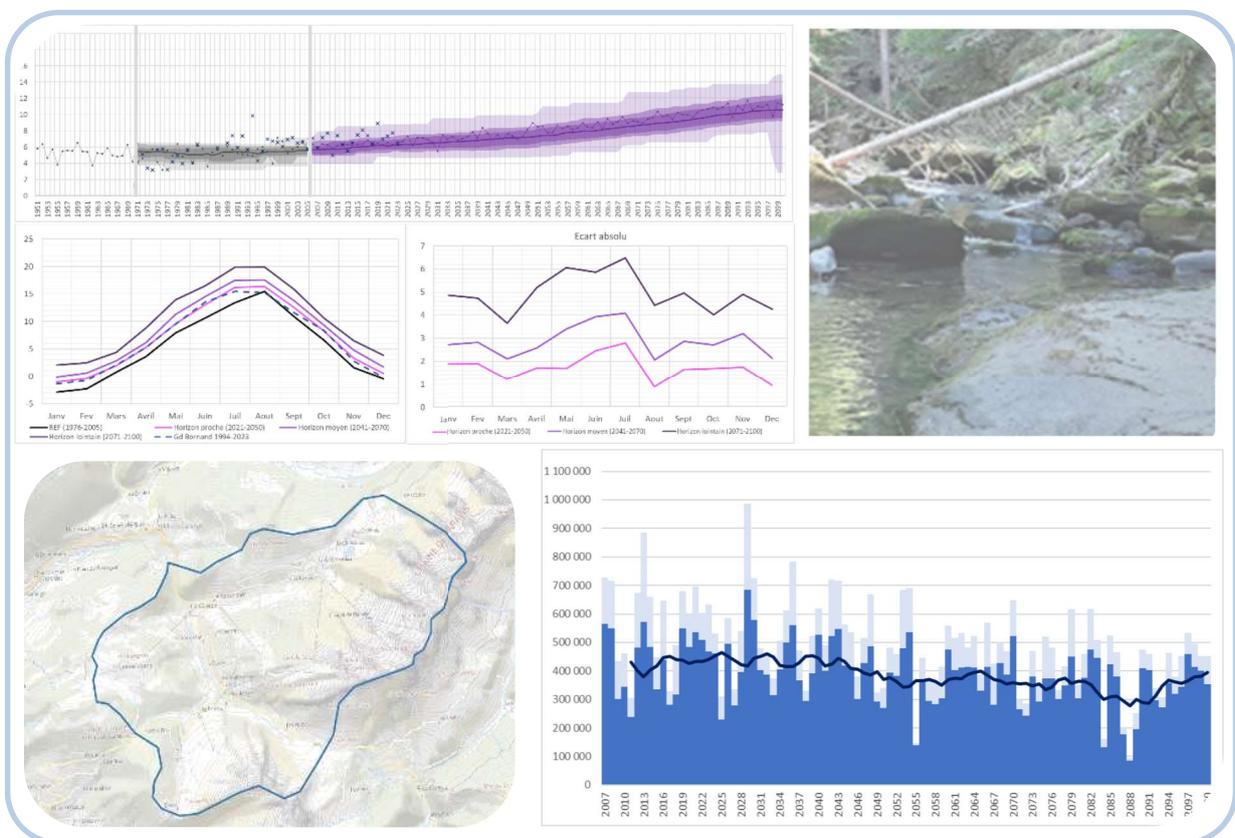


Note hydrologique

Etude de la ressource en eau à la Clusaz

Disponibilité pour la neige de culture



Rédacteur : Nicolas Romieux



=

Sommaire

1	Contexte.....	3
2	Principes de gestion	3
2.1.1	Alimentation en eau potable	3
2.1.2	Neige de culture	3
3	Description des entités et données disponibles	5
3.1	Captage de Gonière	5
3.2	Captage de la Patton.....	8
3.3	Débits du Nom	9
4	Méthodologie.....	11
5	Modélisation hydrologique.....	11
5.1	Description et principe des modèles	11
5.1.1	Modèle GR4J	11
5.1.2	Modèle Cemaneige	12
5.2	Données d'entrée.....	14
5.3	Calage des données du Nom	14
5.4	Calage des données de Gonière	16
5.5	Estimation des débits de la Patton	17
6	Evolution future de la ressource	18
6.1	Evolution climatique des variables descriptives de l'hydrologie	18
	Température moyenne (°C).....	19
	Température minimale (°C).....	20
	Température maximale (°C)	21
	Précipitations totales (mm).....	22
	Précipitations solides (mm)	23
	Evapotranspiration (mm).....	24
	Précipitations efficaces (mm).....	25
6.2	Conclusion sur l'évolution des variables climatiques	26
6.3	Extrapolation des modèles hydrologiques pour l'évolution future de la ressource ..	26
6.4	Résultats des modèles hydrologiques	27
6.4.1	Le Nom (l/s)	27
6.4.2	Captage de Gonière (m ³ /h).....	28
7	Analyse du besoin AEP actuel et futur.....	29
8	Estimation de la ressource disponible pour la neige	32
8.1.1	Débits disponibles pour la neige à Gonière (m ³ /h).....	33
8.1.2	Volumes disponibles pour la neige à Gonière (m ³).....	34
9	Conclusion	37

1 Contexte

Comme dans de nombreux territoires, la ressource en eau représente un enjeu fort à la Clusaz. Commune à grand attrait touristique de par son domaine skiable et son environnement exceptionnel, l'eau est indispensable à plusieurs usages comme l'alimentation en eau potable, le pastoralisme, la production de neige de culture... La commune de la Clusaz souhaite donc améliorer sa connaissance de la ressource en eau et connaître les volumes actuels et futurs disponibles pour l'exploitation du domaine skiable en particulier en ce qui concerne la ressource sollicitée pour la production de neige.

C'est dans ce contexte que la commune a missionné ABEST. La présente note a pour but d'étudier la ressource en eau sur le domaine de la Clusaz et d'en déduire les volumes disponibles pour la neige de culture selon les principes de prélèvements actuels. L'analyse est faite pour l'état actuel ainsi que pour un horizon futur moyen (1941-1970) en prenant en compte l'évolution de la ressource selon les prévisions climatologiques.

2 Principes de gestion

2.1.1 Alimentation en eau potable

La commune de la Clusaz possède différents captages pour l'alimentation en eau potable. Elle compte actuellement 7 ressources en service sur son territoire :

- La source de la Gonière ;
- La source des Aravis (2 captages) ;
- La source de Combe-Rouge ;
- La source du Var ;
- La source du Dard ;
- La source de l'Arpettaz ;
- Le forage de Fernuy ;

2.1.2 Neige de culture

La ressource en eau pour la neige de culture est actuellement alimentée par deux captages :

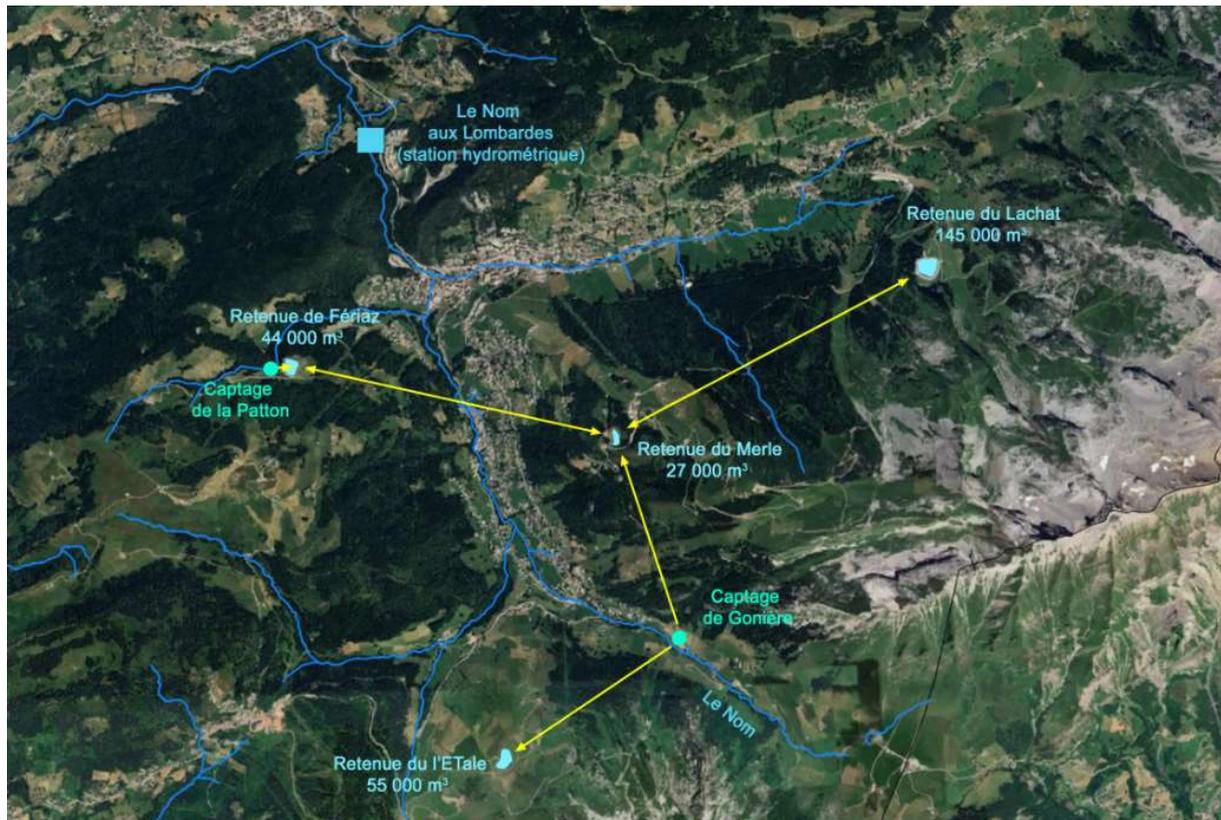
- Le captage de la Gonière
- Le captage de Patton

Le stockage d'eau pour la saison hivernale est assuré par les 4 retenues existantes du domaine skiable de La Clusaz. Elles ont un volume de rétention total de 271 000 m³. Elles sont interconnectées, l'organisation du réseau d'adduction permet ainsi d'optimiser le remplissage de chacune d'elle en fonction de la disponibilité de la ressource en eau.

Dénomination	Volume
Retenue de l'Etale	55 000 m ³
Retenue du Merle	27 000 m ³
Retenue du Lachat	145 000 m ³
Retenue de la Fériaz	44 000 m ³
Total	271 000 m³

A ce jour les conditions d'alimentation de ces retenues, réglementées par l'arrêté n°2012284-0006, sont les suivantes :

- Une prise d'eau sur le ruisseau de la Patton (qui alimente la retenue de Fériaz), au niveau des Corbassières, avec autorisation de prélèvement lorsque le débit du ruisseau est supérieur à 40 l/s ; débit prélevable autorisé 30 l/s (108 m³/h) ;
- Une prise d'eau par pompage sur le ruisseau des Prises (à construire), avec autorisation de prélèvement lorsque le débit du ruisseau est supérieur à 40 l/s ; débit autorisé 2*20 l/s (2*72 m³/h, 144 m³/h) ;
- Un pompage sur le trop plein du captage des sources de la Gonière et des Aravis ; débit autorisé 140 m³/h ;
- Le volume maximal annuel autorisé est de 405 000 m³ ;
- Les prélèvements peuvent être effectués toute l'année sous réserve de maintenir un débit minimum, résiduel du Nom, au lieu-dit les Lombardes, supérieur à 425 l/s. Pour être sûr d'avoir un débit suffisant aux Lombardes, c'est-à-dire 425 l/s, tout prélèvement d'eau, que cela soit grâce aux prises d'eau de la Patton, ou grâce au réseau d'eau potable, ne pourra se faire que si le débit du Nom avant prélèvement est de 520 l/s au pont des Lombardes ;
- L'alimentation en eau potable est prioritaire en tout temps.



Carte de localisation des retenues et captages pour la neige de culture

3 Description des entités et données disponibles

Le but de l'étude est de quantifier les volumes disponibles aux captages de la Gonière et de la Patton. Le pompage sur le ruisseau des Prises n'étant pas construit, cette ressource n'est pas considérée.

3.1 Captage de Gonière

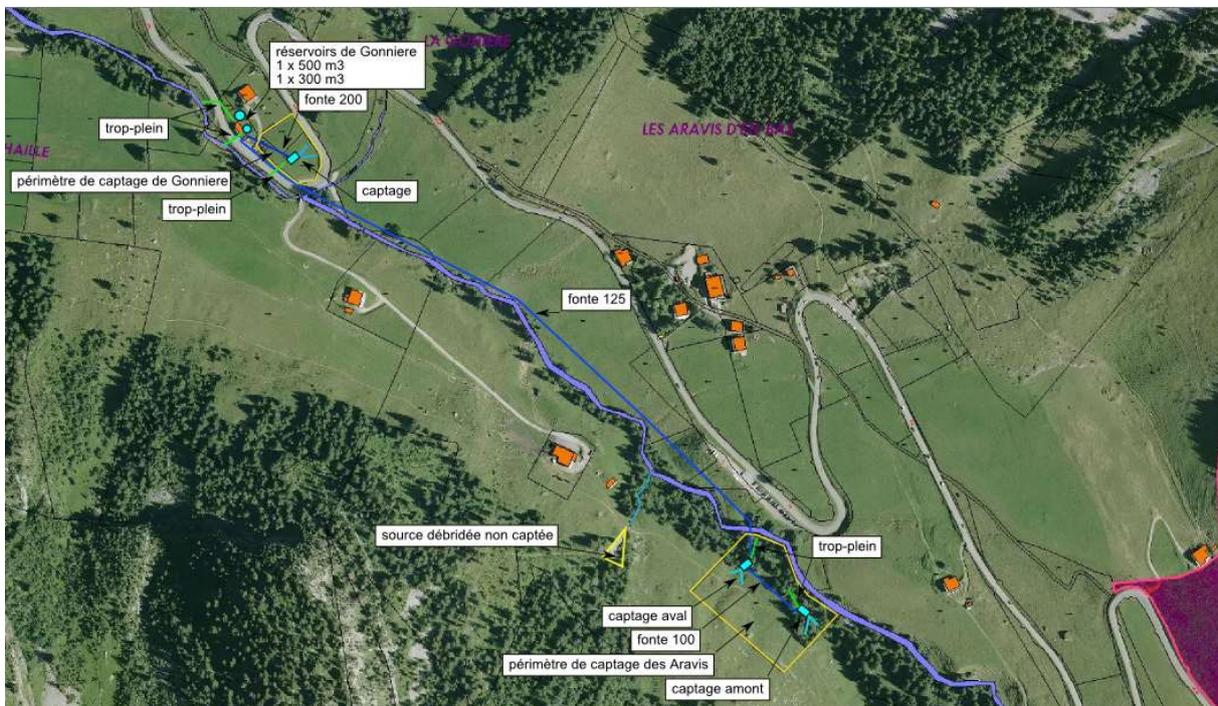
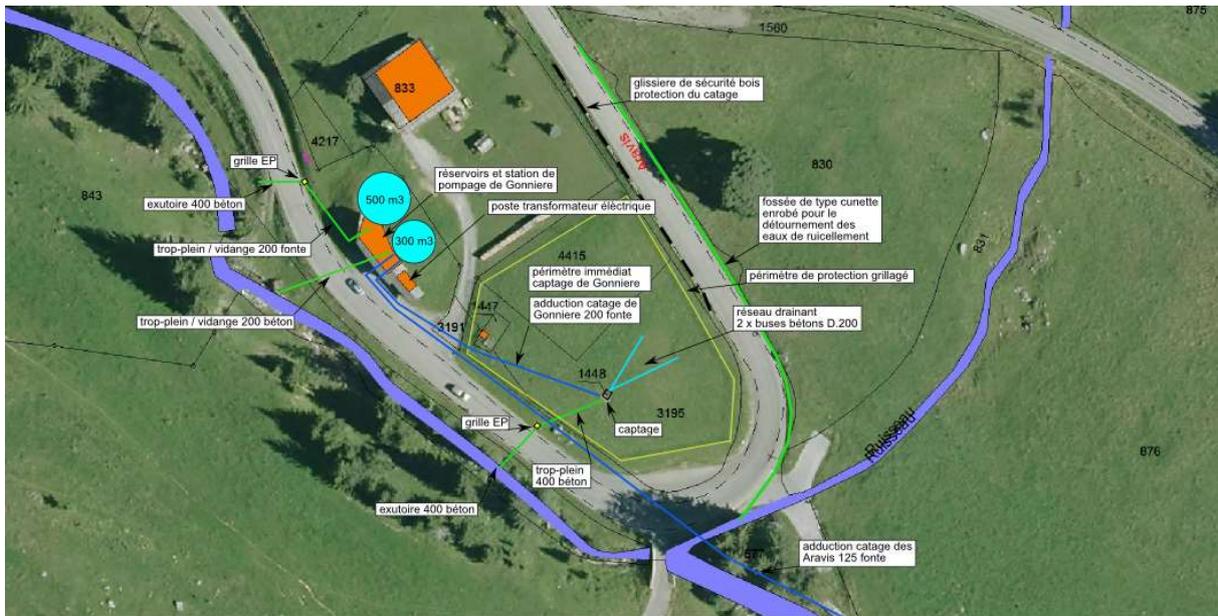
Le captage de Gonière réunit les eaux provenant de la source de la Gonière et des deux sources des Aravis. Ce captage assure une importante part de l'alimentation en eau potable et une grande majorité de l'eau pour la neige.

Les volumes transitant par le captage de la Gonière sont mesurés depuis 2007 par O des Aravis qui gère la distribution de l'eau potable.

L'ensemble de l'eau des sources ne transite pas forcément par le captage car la capacité des réseaux est atteinte en période de hautes eaux, l'eau en surplus s'écoule alors en trop plein à l'aval des différentes sources. Le débit seuil pour lequel la ressource est ainsi écrêtée est de l'ordre de 260 à 300 m³/h.

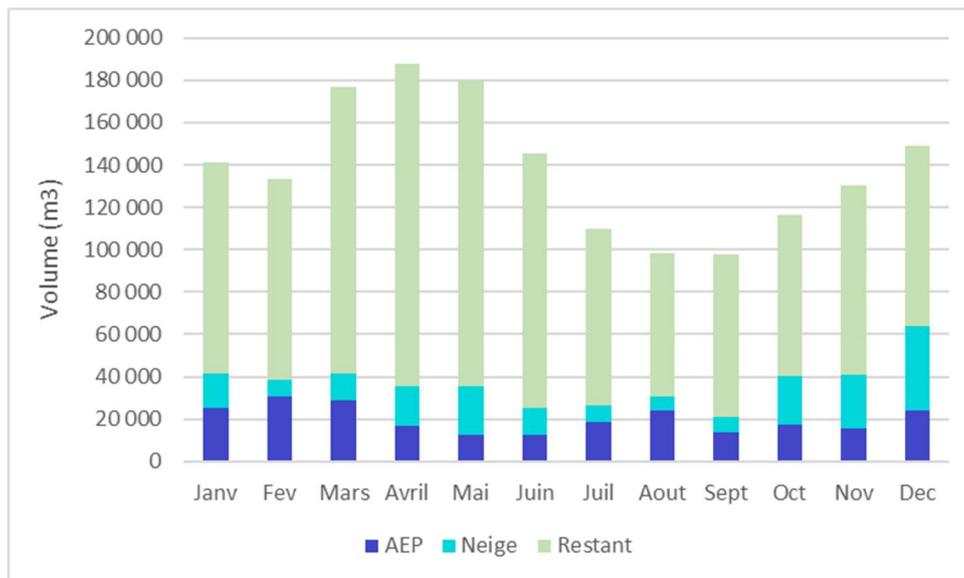
Précisons que la source dispose d'une courbe de tarage caractéristique d'un aquifère karstique, présentant un débit élevé en périodes pluvieuse et post-pluvieuse immédiate suivies d'une décrue relativement rapide. En effet il ne présente aucune corrélation entre le débit du Nom aux lombardes et celui mesuré au droit de ces sources, cela a d'ailleurs été établi dans les études menées dans le cadre du schéma directeur du petit cycle de l'eau.

Les cartes suivantes présentent l'implantation des sources, réservoirs et réseau d'adduction de Gonière.

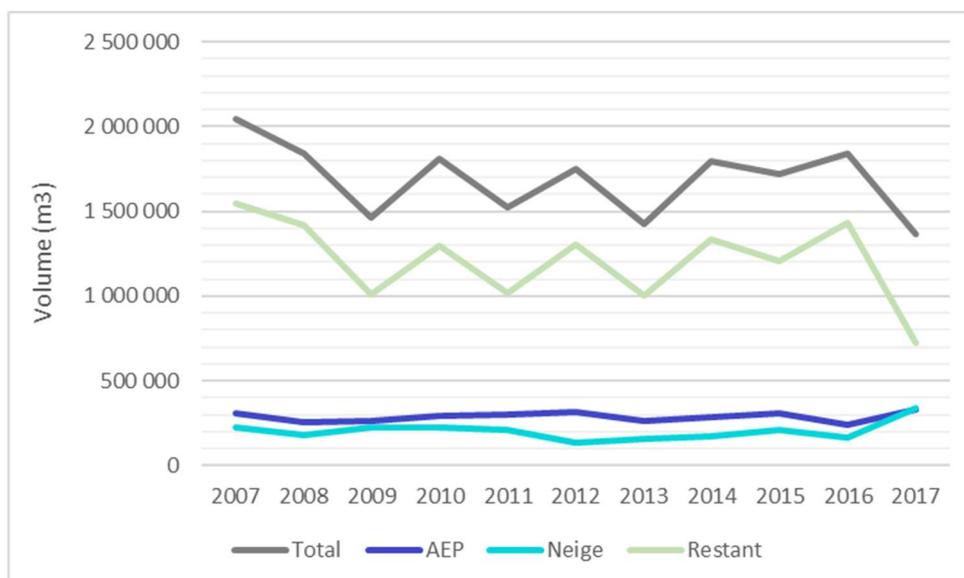


Cartes d'implantation des captages et sources de la Gonière

Les graphiques suivants montrent la répartition moyenne des eaux disponibles de janvier 2007 à août 2024.



Volumes mensuels moyens au captage de Gonière (2007-2024)



Volumes annuels au captage de Gonière (2007-2024)

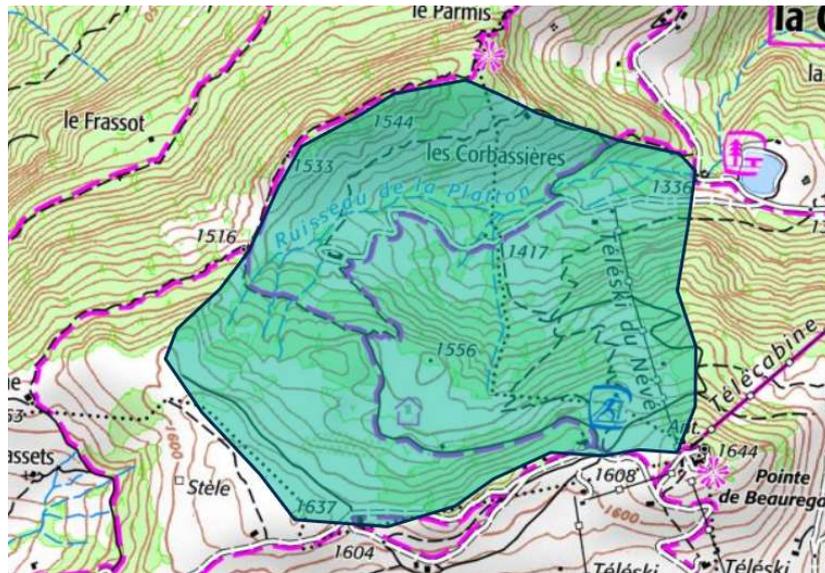
La part prélevée représente en moyenne 30% de l'eau disponible au captage (13% neige, 17% AEP). Les prélèvements sont plus forts en hiver en raison d'une plus grande fréquentation. L'évolution des prélèvements durant les 15 dernières années est relativement stable pour l'AEP et un peu plus variable pour la neige ; de l'ordre de 500 000 m³ en moyenne pour les 2 usages cumulés.

Les prélèvements pour le remplissage des retenues se font toute l'année avec des prélèvements plus importants en avril et mai pendant la fonte et en automne et début d'hiver pour le réassort et la première campagne de production. En été les prélèvements pour la neige sont moindres en raison de l'impossibilité légale de prélever quand le Nom passe sous le seuil de 520 l/s.

3.2 Captage de la Patton

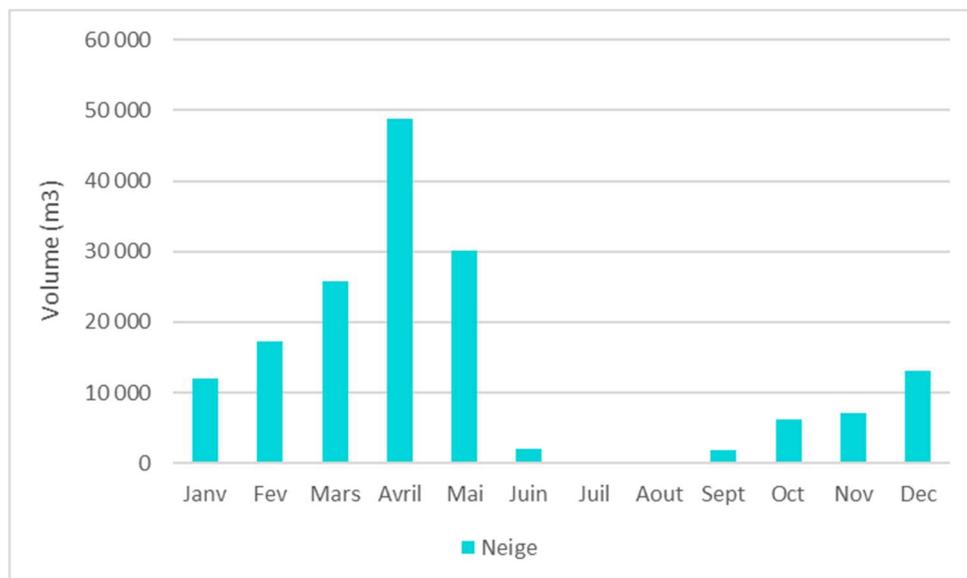
La Patton est un ruisseau qui rejoint le Nom au niveau village de la Clusaz. Une prise d'eau permet d'alimenter la retenue de Fériaz en gravitaire. Seuls les volumes prélevés ont été mesurés et déclarés à la DDT 74.

Au droit de la prise d'eau le ruisseau de la Patton draine un bassin versant topographique de 1 km².



Bassin versant du ruisseau de la Patton au droit de la prise d'eau

Nous disposons des volumes annuels déclarés depuis 2011 et des volumes journaliers mesurés depuis 2016.



Volumes mensuels moyens prélevés à Patton (01/2016-08/2024)



Volumes annuels prélevés à Patton (2016-2023)

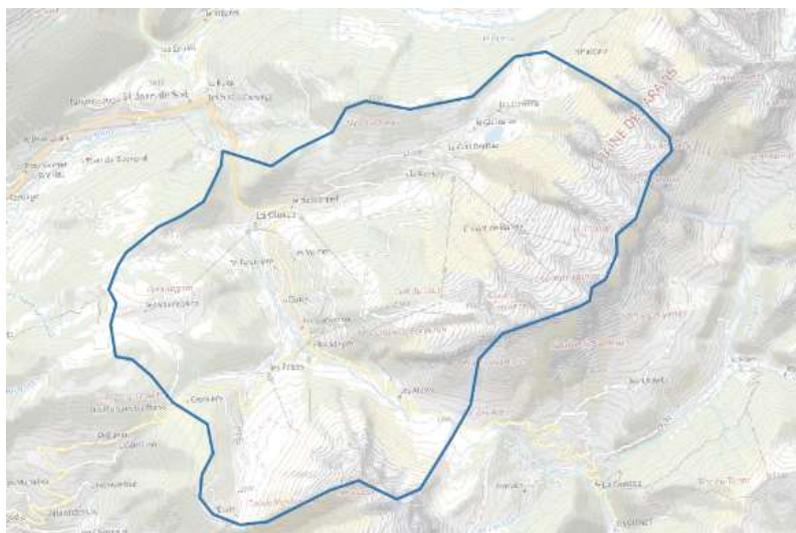
Le remplissage de la retenue de la Fériaz par le captage de la Patton se fait principalement pendant la période de fonte (avril - mai) avec un réassort en automne et des compléments pendant l'hiver.

Le volume prélevé annuel à la Patton est très variable d'une année à l'autre. Il évolue de 80 000 à 140 000 m³ de 2011 à 2017. Il augmente fortement de 2018 à 2020 avec un pic de près de 300 000 m³ en 2020. Il diminue sous la barre des 100 000 m³ de 2021 à 2023 avec un minimum d'environ 20 000 m³ en 2022.

3.3 Débits du Nom

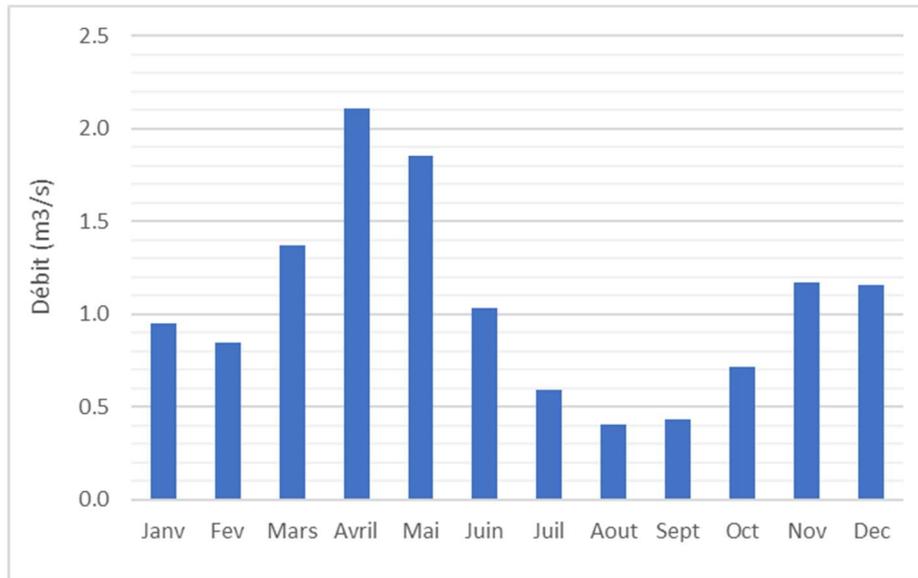
La connaissance de l'hydrologie du Nom est importante car elle conditionne les possibilités des prélèvements. En effet la présence de la station d'épuration des Lombardes implique le maintien d'un débit réservé pour garantir la dilution des effluents traités. Une station hydrométrique est installée au pont des Lombardes. Nous disposons des données journalières du Nom de juillet 2009 à aout 2024.

Le bassin versant topographique du Nom au pont des Lombardes est de 43,4 km².

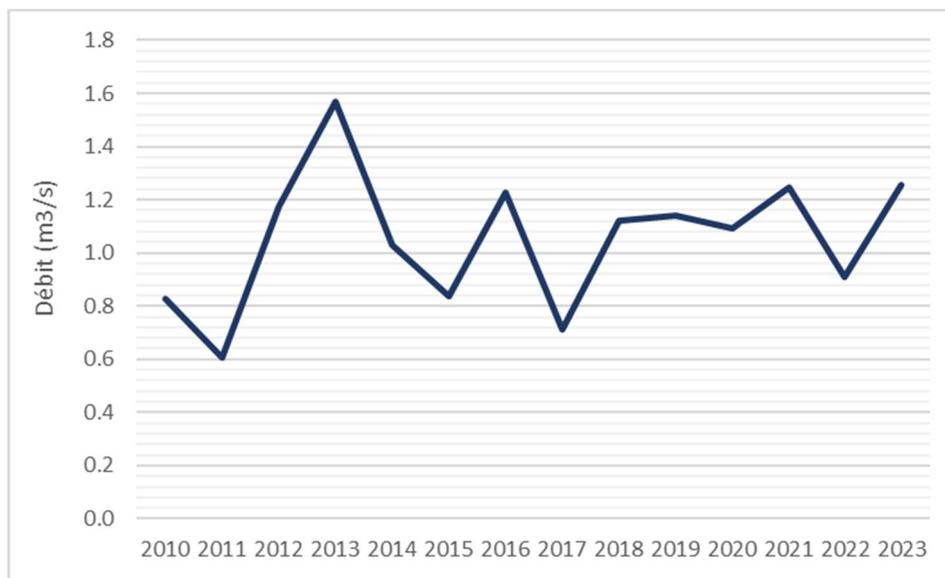


Bassin versant du Nom aux Lombardes

Les graphiques suivants présentent les données du Nom mesurées depuis aout 2009. Certaines données manquantes ont été reconstituées sur la base de coefficients de corrélations avec le Borne.



Débits moyens mensuels du Nom aux Lombardes (2009-2023)



Débits moyens annuels du Nom aux Lombardes (2009-2023)

Le Nom présente un régime hydrologique pluvio-nival avec un étiage en été, une période de hautes eaux au printemps lié à la fonte et une autre période de hautes eaux de moindre ampleur en automne liée aux précipitations.

La variabilité interannuelle est assez importante avec des moyennes annuelles pouvant varier de 0.6 à 1.6 m³/s sur les 14 années de mesures disponibles. Le module est de 1.05 m³/s sur cette période. Le débit moyen des 6 dernières années a toutefois été plus stable de l'ordre du module.

Le seuil de débit de 520 l/s en dessous duquel les prélèvements sont stoppés est de l'ordre des débits moyen mensuels de la période d'étiage estival que l'on peut assimiler au QMNA médian.

4 Méthodologie

Pour connaître la disponibilité de la ressource et son évolution sur une longue période notamment pour des horizons futurs, il est proposé la méthodologie suivante :

- Modélisation hydrologique (CemaNeige & GR4J) du Nom et de la ressource du captage de Gonière calée sur les mesures existantes ;
- Estimation des débits de Patton par transposition avec le Nom ;
- Extrapolation avec des données de simulations climatologiques après analyse des variables descriptives de l'hydrologie ;
- Analyse et prise en compte du besoin AEP actuel et futur ;
- Définition des possibilités de prélèvements en prenant en compte le respect des conditions d'alimentation de l'arrêté n°2012284-0006 ;

5 Modélisation hydrologique

5.1 Description et principe des modèles

5.1.1 Modèle GR4J

Le modèle GR4J est un modèle pluie/débit à 4 paramètres, à pas de temps journalier. Les données d'entrée sont donc des précipitations et les données de sortie des débits simulés. Il s'agit d'un modèle à 2 réservoirs. L'évapotranspiration est calculée avec la méthode d'Oudin.

Les 4 paramètres de calage sont les suivants :

- **X1** : capacité du réservoir de production (mm),
- **X2** : coefficient d'échanges souterrains (mm/jour),
- **X3** : capacité à un jour du réservoir de routage (mm),
- **X4** : temps de base de l'hydrogramme unitaire HU1 (jours).

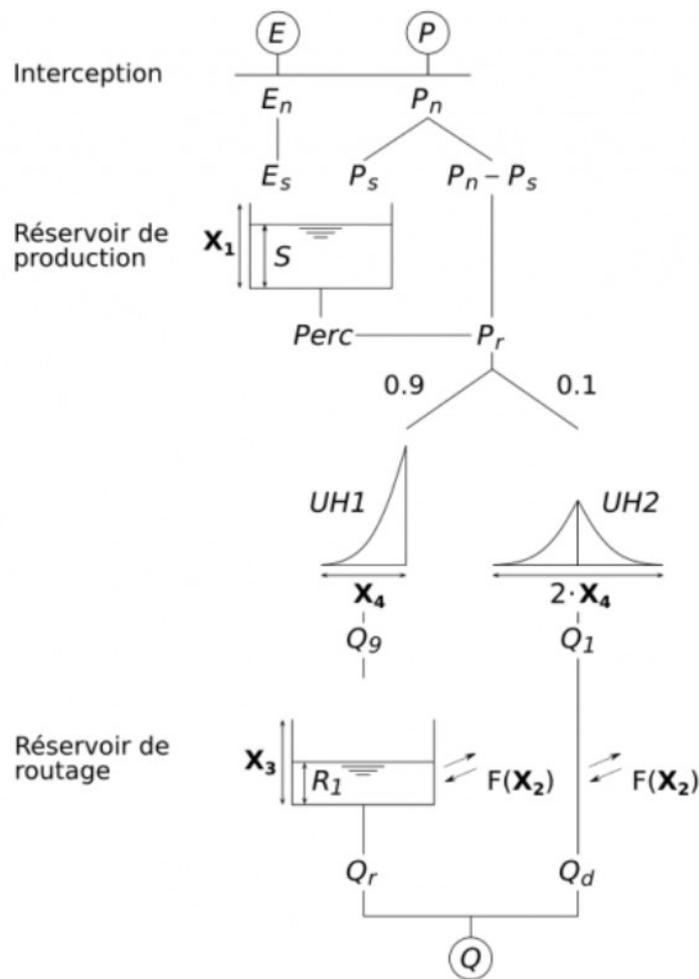


Schéma de principe du modèle GR4J (source INRAE)

5.1.2 Modèle Cemaneige

CemaNeige est un modèle permettant de prendre en compte les fractions solides/liquides des précipitations, les phénomènes de fonte et le stockage de la neige dans le manteau neigeux afin d'en déduire les apports liquides à pas de temps journalier. Ce module est développé et mis à disposition par l'INRAE. Il est couplé au modèle hydrologique GR4J dans lequel il agit sur les données d'entrée.

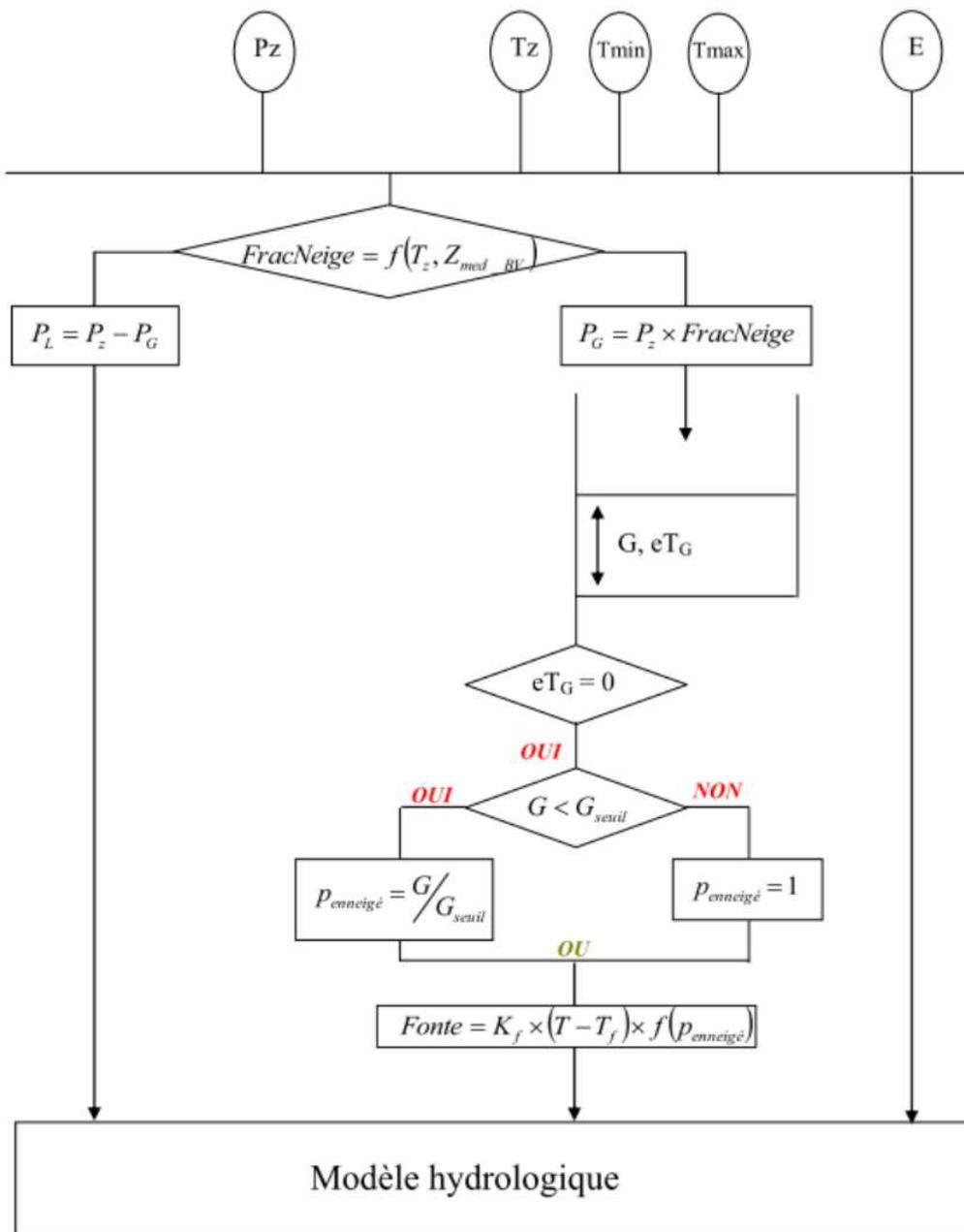


Schéma de principe du modèle CemaNeige (source INRAE)

Les descriptions précises des algorithmes des 2 modèles sont disponibles sur le site de l'INRAE.

5.2 Données d'entrée

En données d'entrée, sont utilisés les données de précipitation et de température de la station météorologique Météo-France 74136003_Grand Bornand. Il s'agit d'une station à 1300 m d'altitude la plus proche à moins de 10 km de la Clusaz et située sur le même massif des Aravis. Les données sont disponibles de 1994 à 2024.



Carte de localisation des stations météo environnantes

Une diminution des températures de 0.46 °C par 100 m de dénivelé est appliquée pour les différentes zones altimétriques du modèle par rapport à la station météorologique.

5.3 Calage des données du Nom

Les paramètres de calage obtenus pour le Nom sont les suivants :

BV= 43.4 km²

GR4J :

X1 capacité de production : 20.1 mm

X2 coefficient d'échange : -35.8 mm

X3 capacité de transfert : 403.4 mm

X4 base temporelle de l'hydrogramme unitaire : 1.5 jours

Cemaneige :

X5 facteur degré jour : 3,75

X6 inertie du manteau neigeux 0.3

Les critères de Nash sont les suivants :

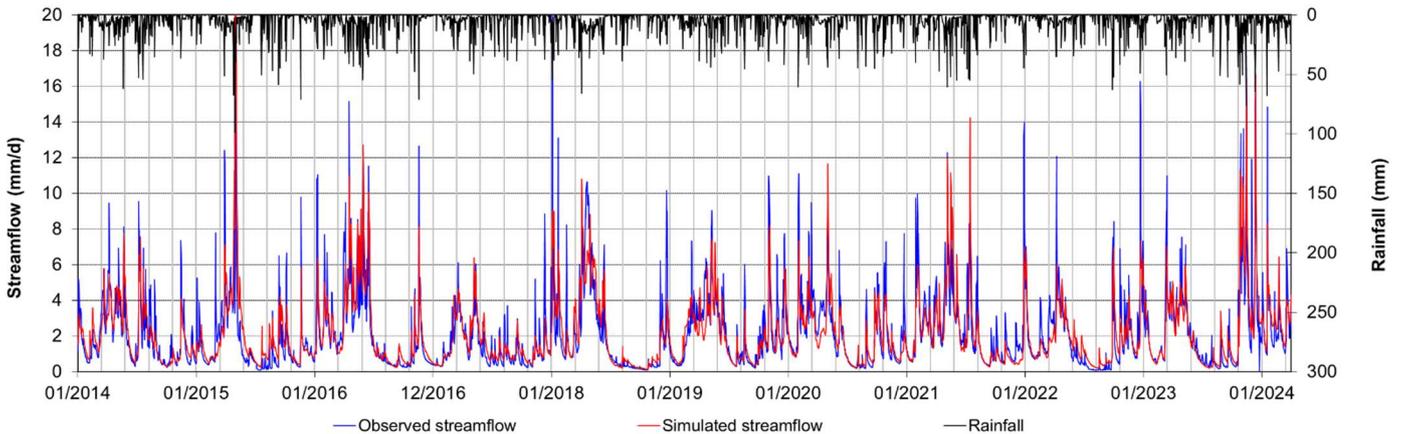
Nash (Q) = 69.9 %

Nash (VQ) = 77.4 %

Nash (LnQ) = 75.7 %

Biais = 100.0 %

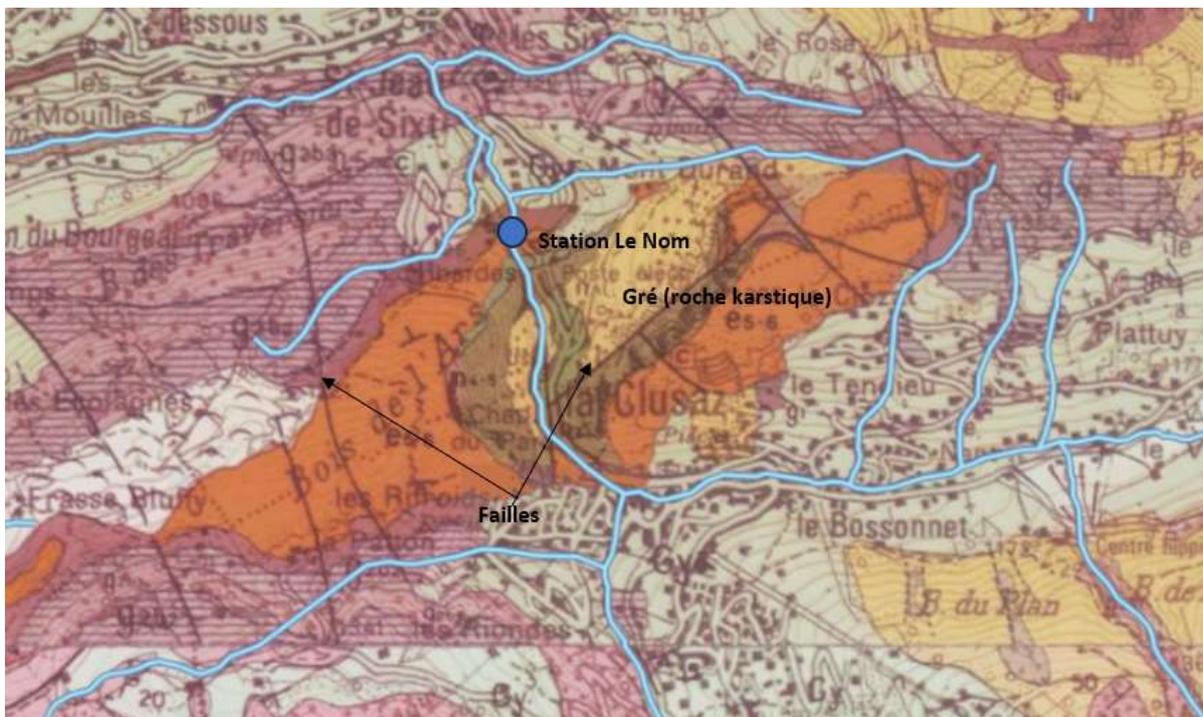
Les critères de Nash sont de l'ordre de 70 à 77% ce qui est jugé satisfaisant pour de l'hydrologie. Comme le montre le graphique suivant, la simulation retranscrit globalement bien les débits mesurés tant en hautes qu'en basses eaux.



Graphique de calage, débits mesurés et simulés du Nom

Le paramètre d'échange X2 est négatif et relativement important (10% du réservoir de transfert) ce qui se traduit par des pertes significatives depuis le bassin versant considéré. Ce paramètre est intéressant car il définit en quelques sortes le coefficient d'écoulement (écoulé/précipité). D'après le modèle environ 60% de l'impluvium tombé sur le bassin topographique ne participe pas aux écoulements au niveau de la station des Lombardes.

Cela pourrait s'expliquer notamment par des infiltrations karstiques au droit du bassin versant ainsi que par la zone géologique particulière du secteur. En effet, la station est située en aval directe d'une zone de Gré présentant de nombreuses failles. Des déperditions d'eau du Nom au droit de cette zone pourraient se produire et ressortir plus en aval d'après la localisation des failles.



Contexte géologique du Nom en amont de la station de mesure

5.4 Calage des données de Gonière

Pour le captage de Gonière, l'approche du calage a été légèrement différente car il s'agit de sources sans bassin topographique ou hydrogéologique bien délimités. La taille du bassin versant a donc été calée de manière à obtenir un biais proche de 100% en fixant le paramètre X2 à 0. Cela permet d'avoir une estimation de la taille du bassin hydrogéologique efficace à l'alimentation de ces sources, il est ainsi évalué à 1.8 km².

En outre un seuil d'écrêtement des débits de 285 m³/h a été considéré pour simuler la limitation de débits captés. Les paramètres de calage obtenus pour le captage de Gonière sont les suivants :

BV= 1.8 km²

GR4J :

X1 capacité de production : 20.1 mm

X2 coefficient d'échange : 0 mm

X3 capacité de transfert : 403.4 mm

X4 base temporelle de l'hydrogramme unitaire : 1.5 jours

Cemaneige :

X5 facteur degré jour : 3,75

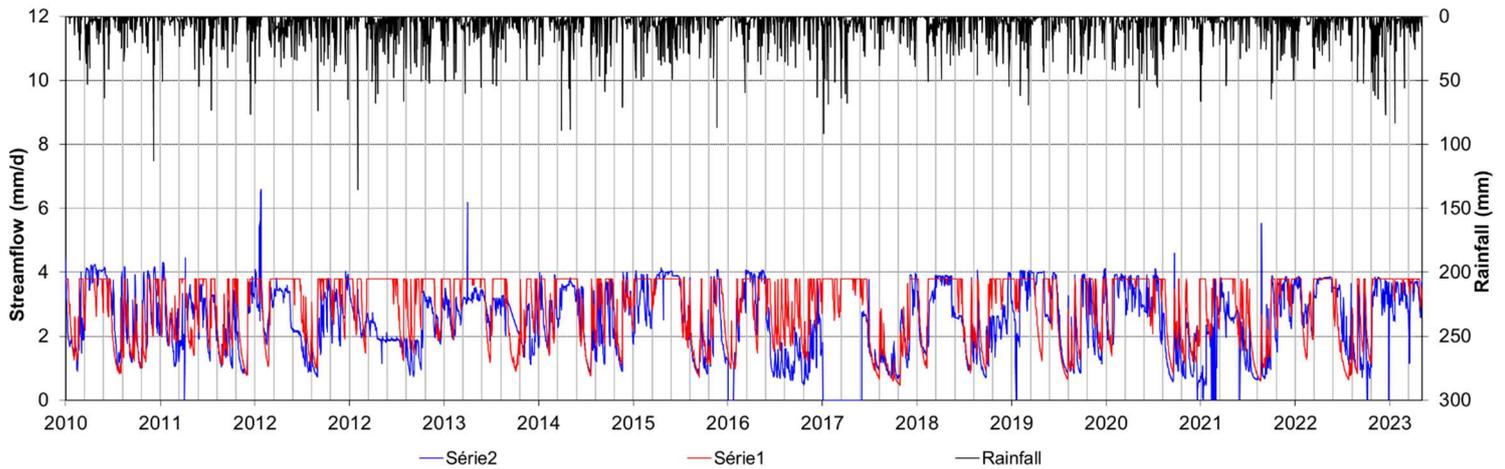
X6 inertie du manteau neigeux 0.3

Les paramètres de calage retenus pour lesquels le modèle s'ajuste le mieux aux débits de Gonière sont les mêmes que pour le Nom hormis pour paramètre d'échange X2 fixé à 0. Cela montre une bonne homogénéité dans la réponse hydrologique des sources de Gonière et du Nom.

Les critères de Nash sont très variables de l'ordre de 20 à 60% selon la période analysée. Ces valeurs plutôt mauvaises sont à relativiser avec la qualité des données de calage.

En effet, cet ouvrage réunit plusieurs sources avec un synoptique hydraulique relativement complexe et la donnée est issue de plusieurs compteurs. Les risques d'erreurs de mesure sont multipliés par rapport à une station hydrométrique classique. Il n'est pas rare d'observer des pics, des paliers ou des valeurs nulles non représentatif de l'hydrologie naturelle de ces sources mais plutôt lié à l'exploitation et aux possibles erreurs de mesure.

La vérification du calage du modèle a donc été effectué davantage de façon graphique. On note que globalement les ordres de grandeur sont respectés en particulier pour les données d'été et les courbes de tarissement. La modélisation est jugée acceptable et exploitable pour les besoins de cette étude.



Graphique de calage, débits mesurés et simulés au captage de Gonière

5.5 Estimation des débits de la Patton

L'estimation des débits de la Patton est délicate car seuls les débits alimentant la retenue de Fériaz ont été mesurés.

Les débits à Patton sont estimés par transposition depuis les débits du Nom (via le rapport de superficie des bassins versant) puis ajustés afin de permettre d'approcher un prélèvement total proche des prélèvements mesurés tout en respectant les contraintes de prélèvement ($Q_{\text{prel max}} = 108\text{m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{réservé}} = 144\text{m}^3/\text{h}$, $Q_{\text{Nom}} > 520\text{l/s}$). Pour cela, un coefficient de 1,9 a été appliqué aux données de Patton transposés.

Au final les débits de Patton sont estimés simplement en appliquant un coefficient de 0.0353 aux débits du Nom.

Une grande incertitude demeure néanmoins sur ces débits, les résultats sur la ressource du ruisseau de la Patton sont à interpréter avec précaution et ne seront donnés qu'à titre indicatif.

6 Evolution future de la ressource

6.1 Evolution climatique des variables descriptives de l'hydrologie

La ressource en eau future est intrinsèquement liée aux conditions climatologiques future. Nous proposons dans cette partie d'analyser les données issues des prévisions climatiques qui ont une influence sur l'hydrologie à savoir les précipitations et la température.

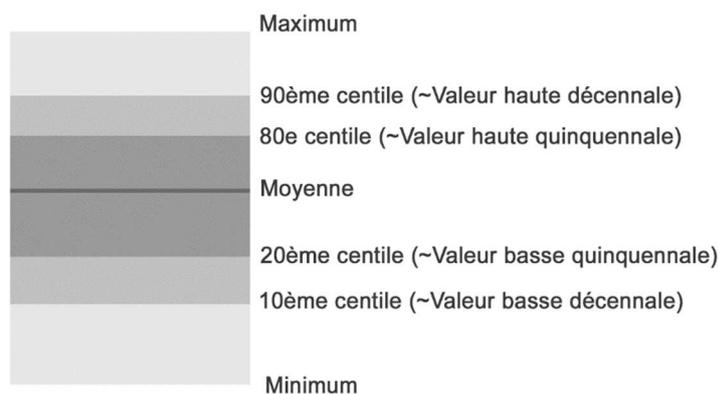
L'évapotranspiration est également calculée sur la base des températures moyennes ce qui permet d'en déduire les précipitations efficaces.

Les données présentées sont issues de l'ensemble des 11 modèles disponibles, il s'agit donc d'une approche multi-modèles. Les scénarios d'émission de gaz à effet de serres présentées sont le RCP4.5 (stabilisation des émissions) et RCP8.5 (augmentation des émissions). Il a été jugé inutile d'analyser le scénario RCP2.6 de diminution des émissions qui est admis aujourd'hui être trop optimiste et irréaliste.

Les données ont été téléchargées depuis le site DRIAS, il s'agit des données corrigées Adamont-2020 du massif des Aravis à l'altitude 1500 m qui est la plus représentative de l'altitude moyenne des bassins du Nom et des sources de Gonière.

Pour chaque variable et chaque scénario, sont présentés :

- L'évolution des médianes multi-modèles annuelles avec la médiane mobile calculée sur les 20 années précédentes et des enveloppes permettant de connaître la variabilité interannuelle/multi-modèle de la façon suivante :



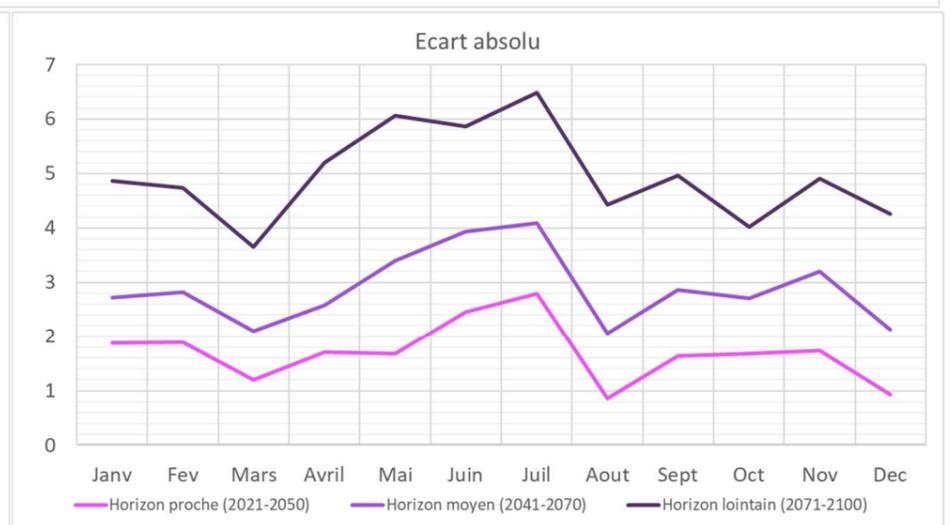
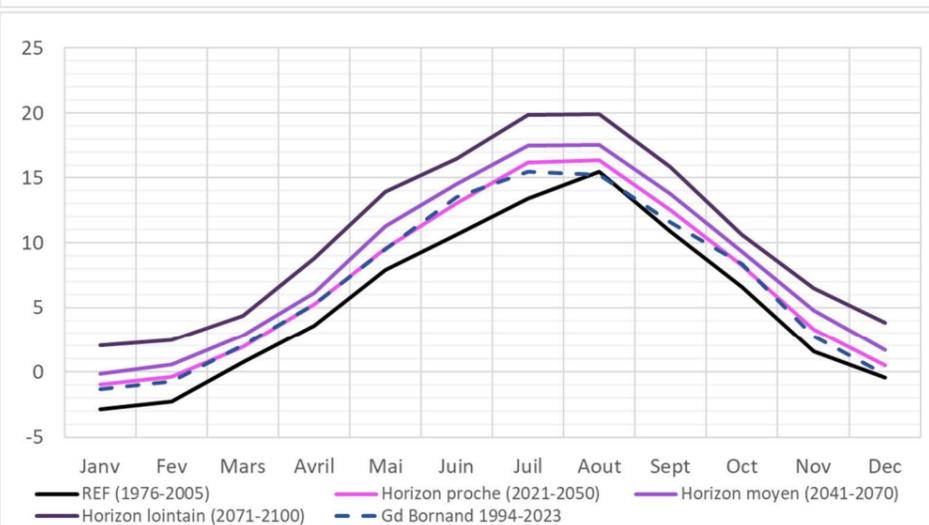
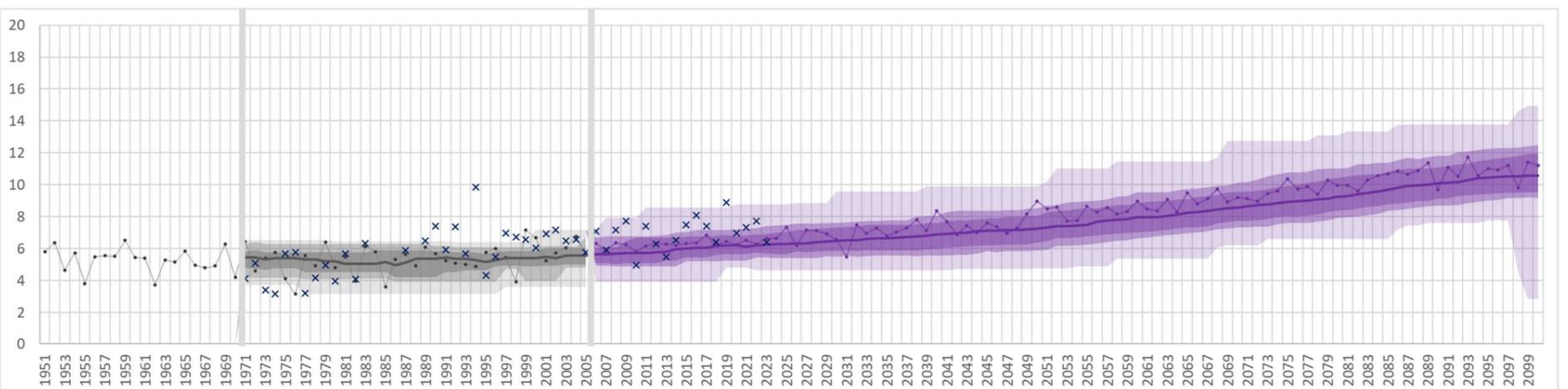
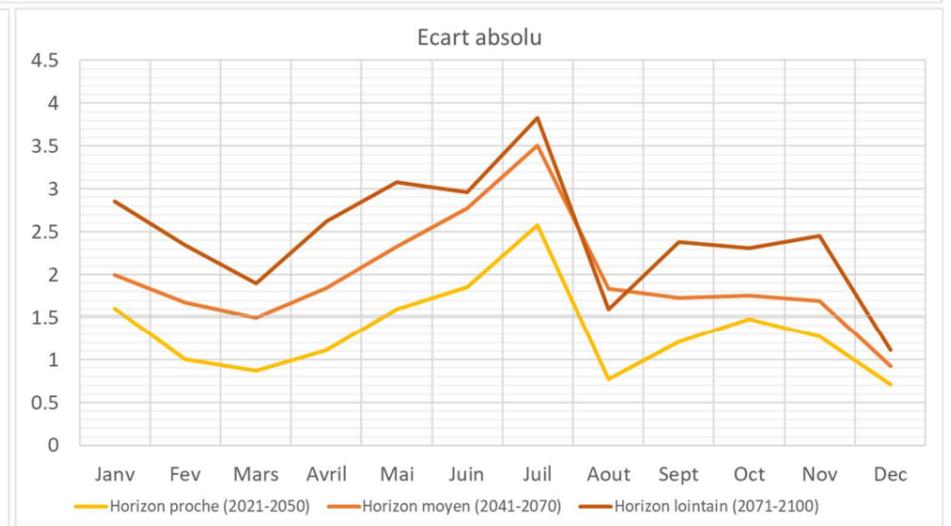
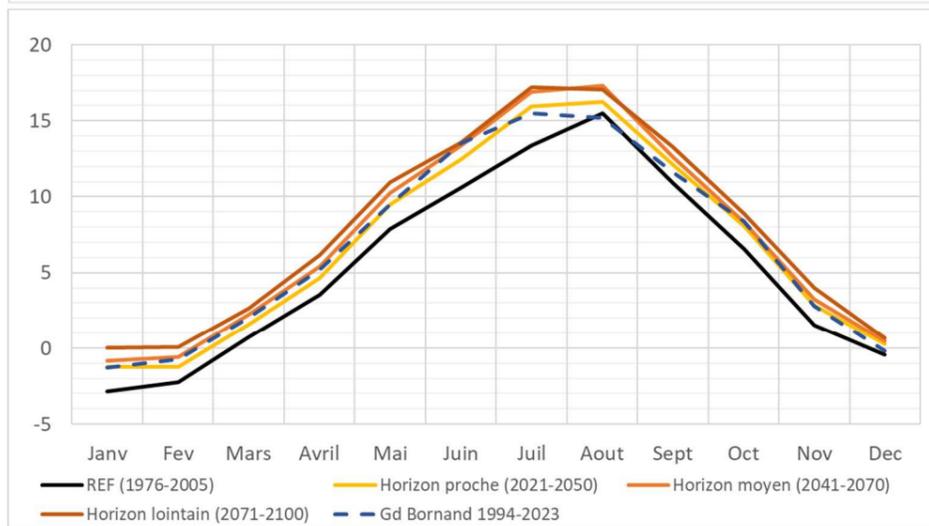
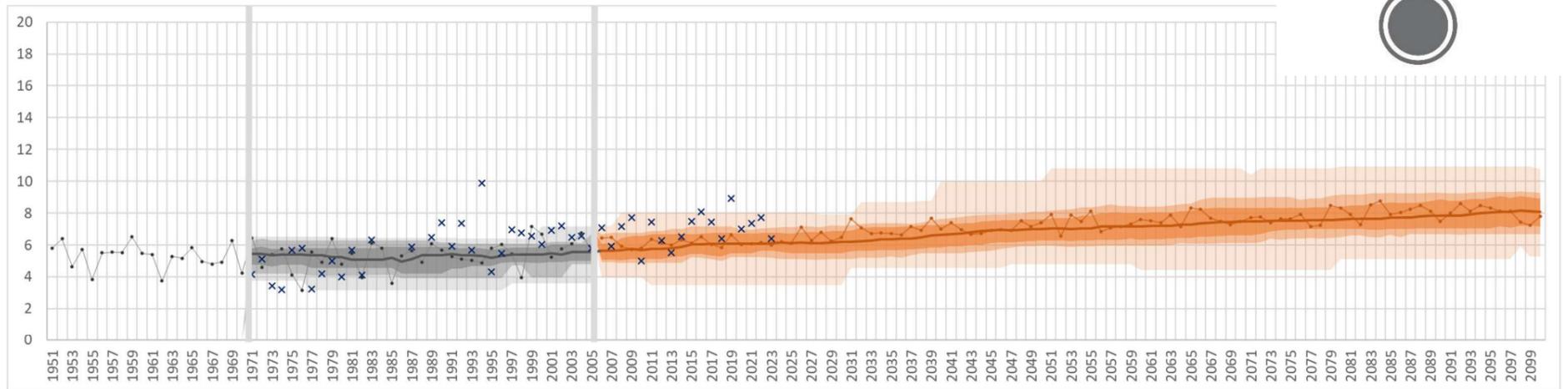
- L'évolution des moyennes mensuelles à différents horizons
- Les écarts en valeur absolue par rapport à la période de référence (1975-2006)

La période de référence est présentée en gris, le scénario **RCP4.5** en orange, le **RCP8.5** en violet.

Les données mesurées au Grand Bornand (T°C ajustée avec l'altitude) sont également présentées pour comparaison en points et pointillés bleus.



Température moyenne (°C)



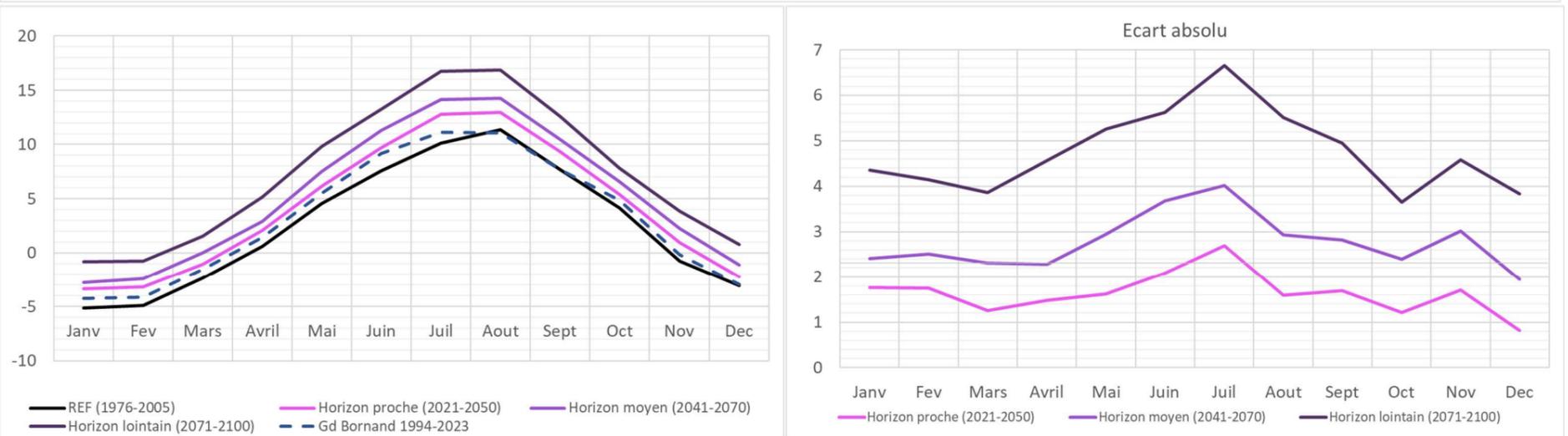
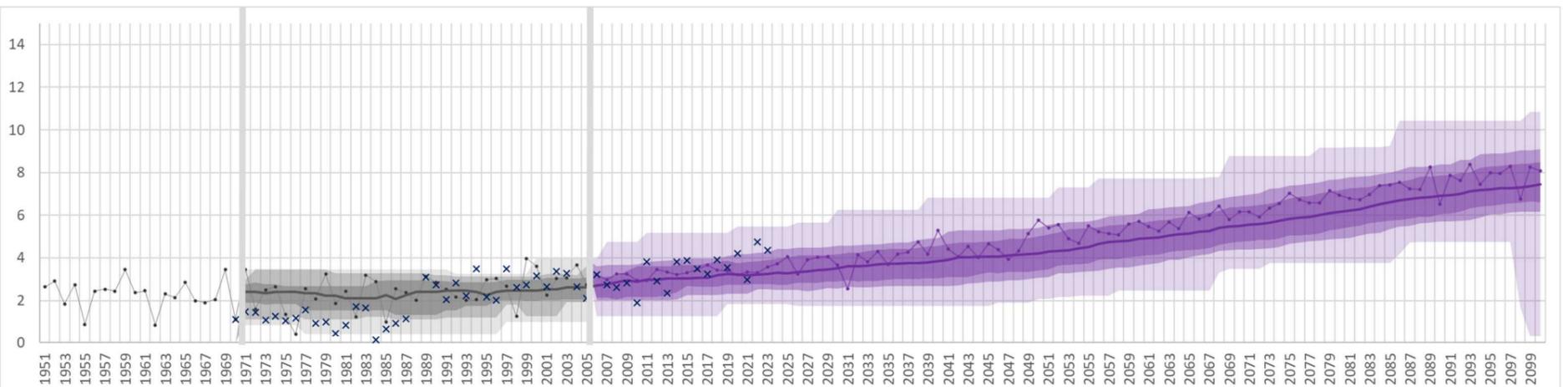
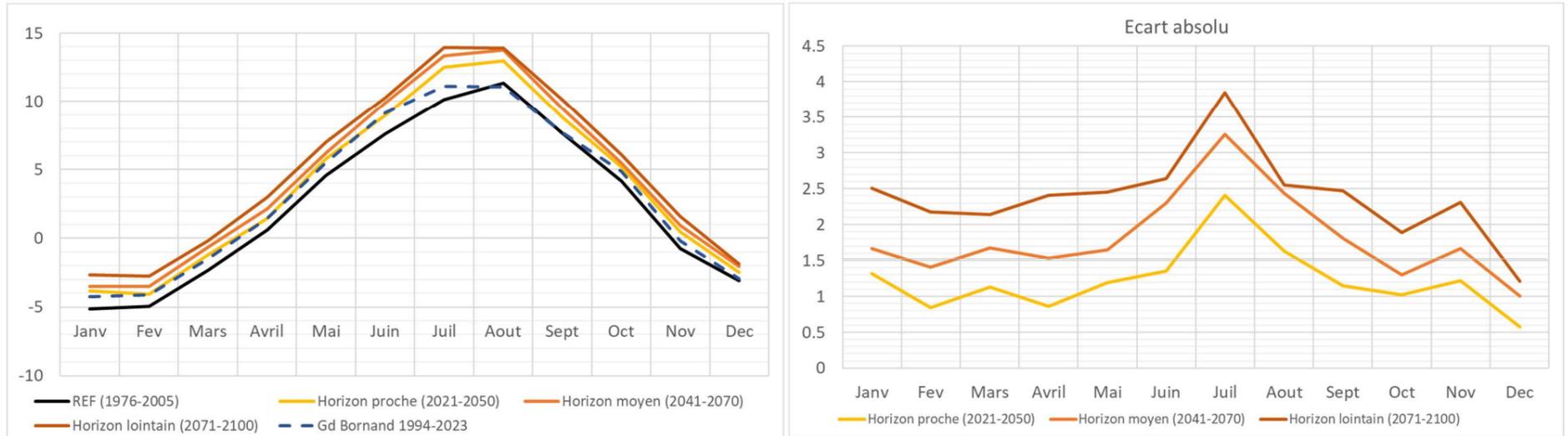
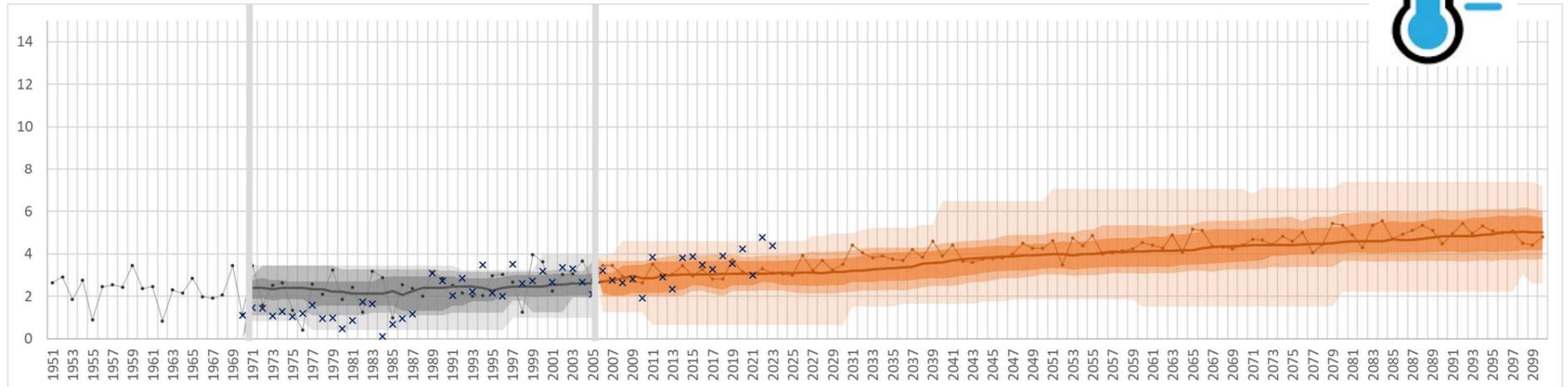
La température joue un rôle dans l'évapotranspiration, la part liquide/solide des précipitations et la fonte du manteau neigeux.

La température moyenne annuelle va augmenter significativement à l'avenir avec des écarts de l'ordre de 2 à 4°C à l'horizon moyen. Jusqu'en 2050, les deux scénarios donnent des résultats relativement proches avec un hausse de la médiane annuelle de l'ordre de 2°C. A partir de 2050, la croissance s'accélère pour le RCP8.5 allant à des moyennes annuelles maximum inédites en fin de siècle (14°C) alors qu'elle semble diminuer (la croissance pas la température) pour le RCP4.5 avec des écarts maximums à +5°C déjà présents en 2050. Les actions sur les émissions de gaz à effet de serre d'aujourd'hui ne se feront donc ressentir significativement qu'à partir de cette échéance.

En mensuel, le réchauffement sera davantage important les mois de mai à juillet.

Les données mesurées au Grand Bornand sont assez cohérentes avec les données simulées à partir de 1989. On observe un palier important à la fin des années 80 qui n'est pas retranscrit dans la période de référence des modèles, puis une augmentation assez régulière et similaire aux prévisions. Les valeurs sont supérieures à celles des modèles (tranche haute des enveloppes) et plutôt de l'ordre de celles prévues pour l'horizon proche.

Température minimale (°C)

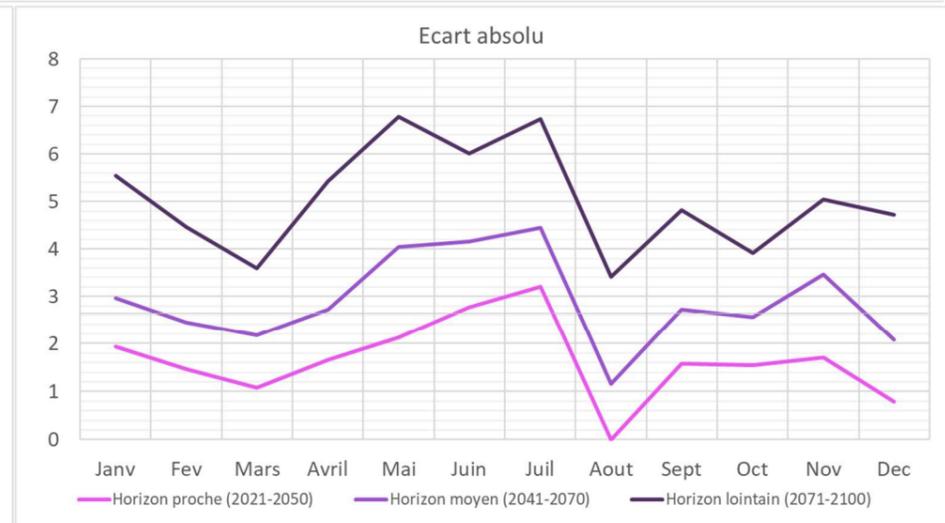
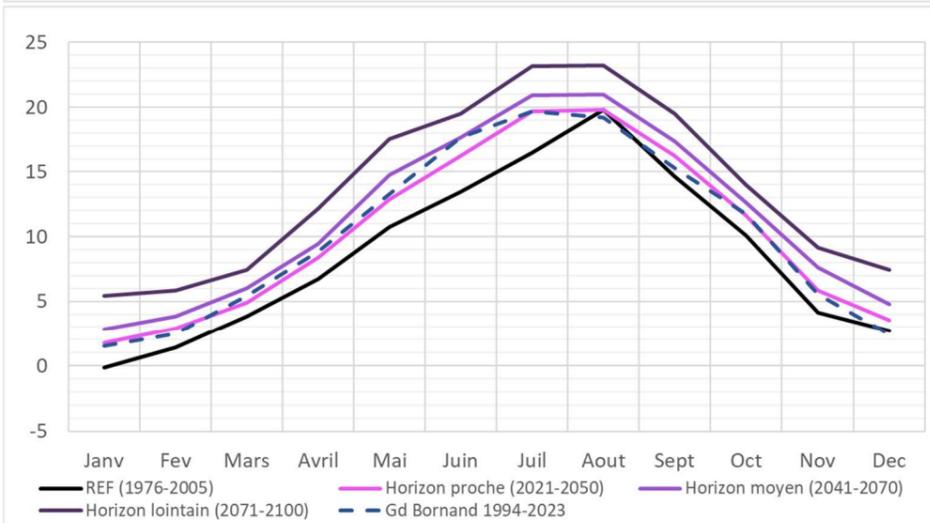
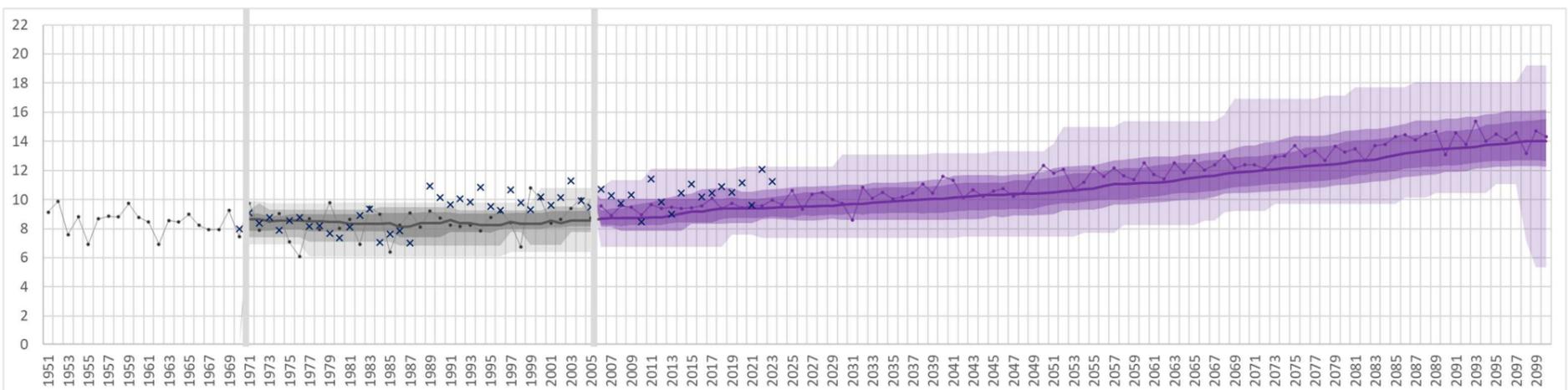
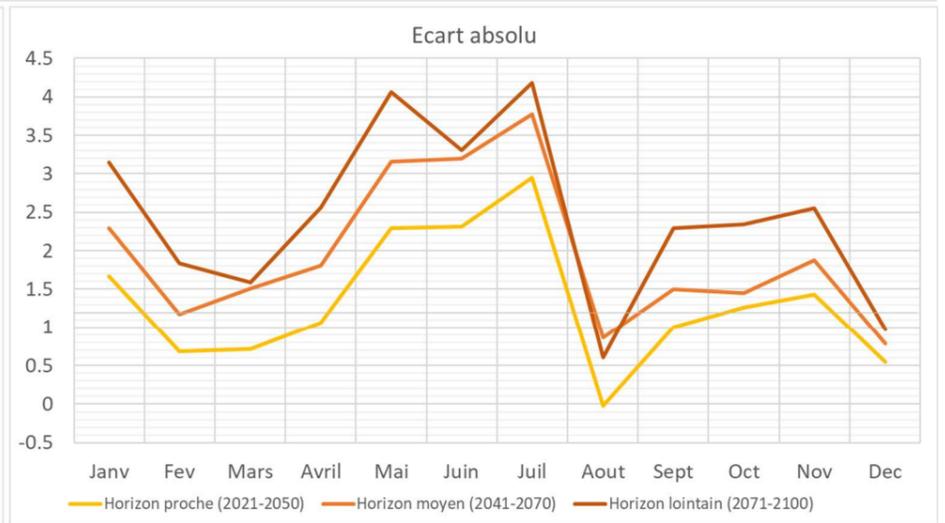
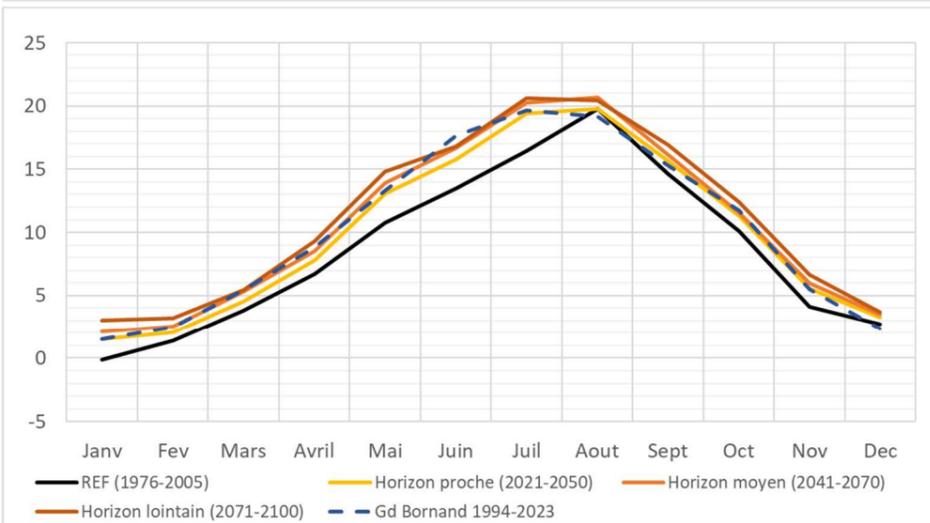
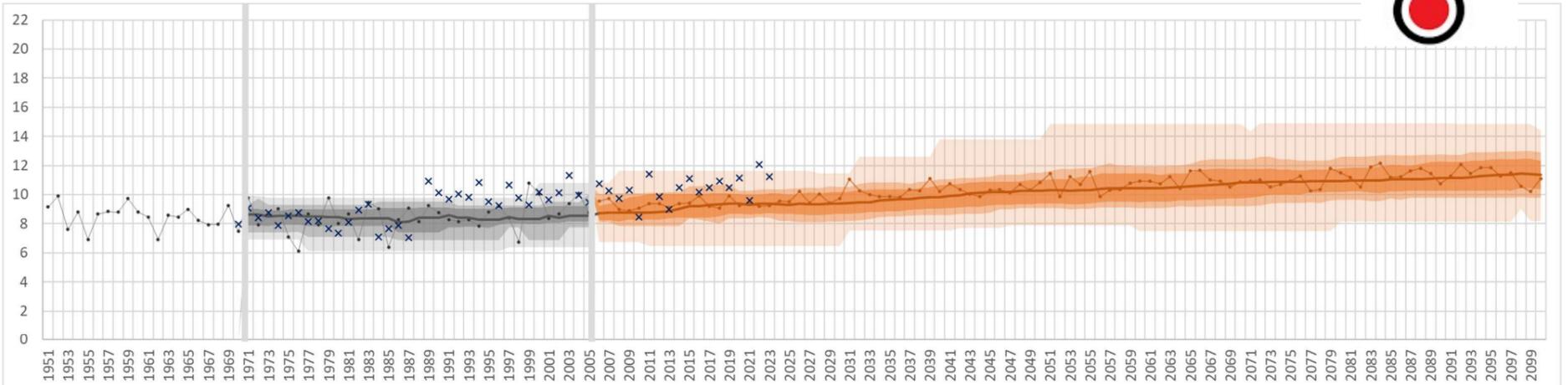
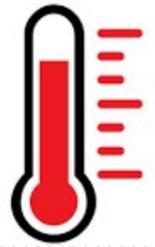


Les mêmes tendances sont observées pour la température maximale journalière moyenne. Les écarts sont du même ordre de grandeur seules les valeurs absolues sont diminuée d'environ 3°C par rapport aux températures moyennes présentées précédemment.

La répartition mensuelle des écarts présente un pic en juillet avec une croissance et décroissance assez régulière et des écarts moindres en hiver.

L'écart des valeurs du Grand Bornand par rapport aux modèles est moins important que pour les températures moyennes.

Température maximale (°C)

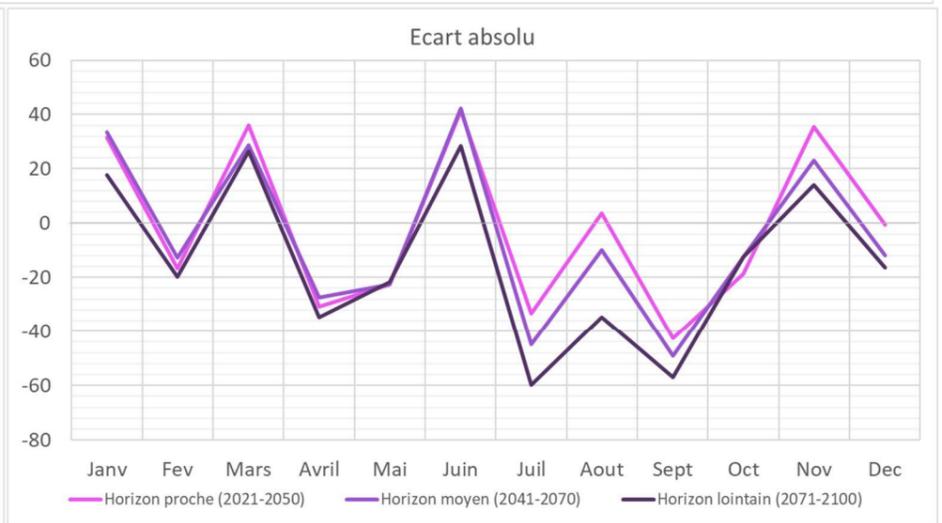
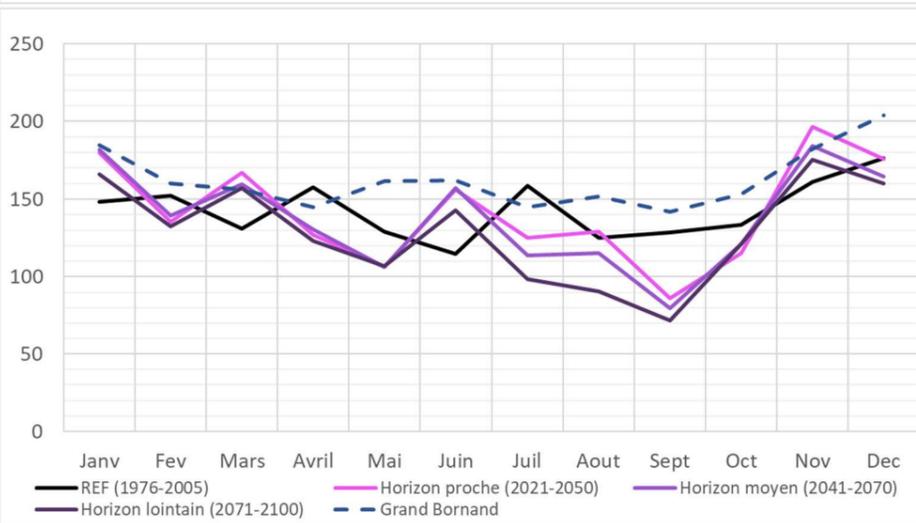
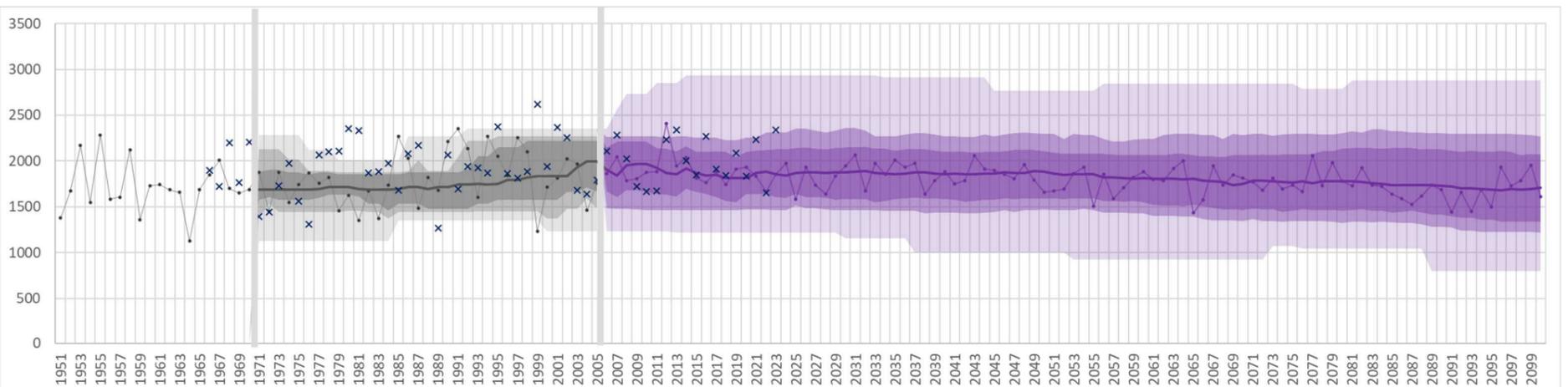
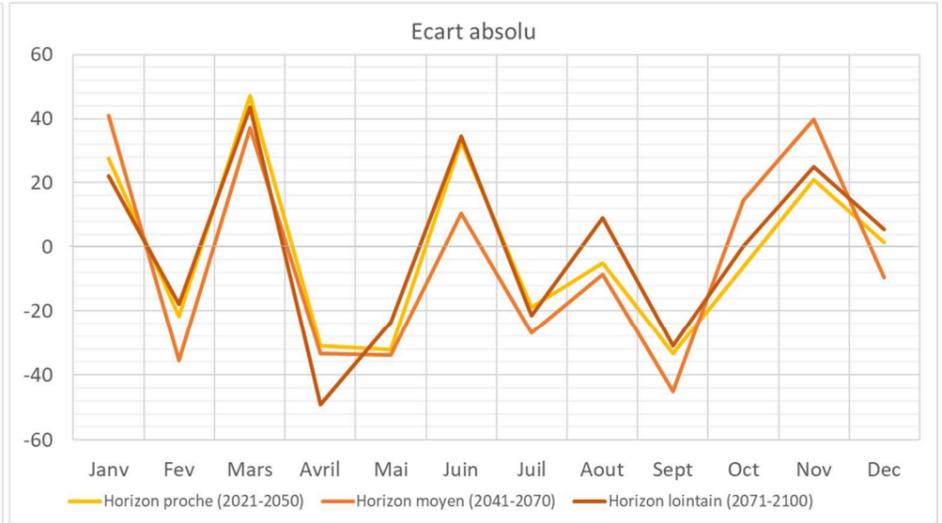
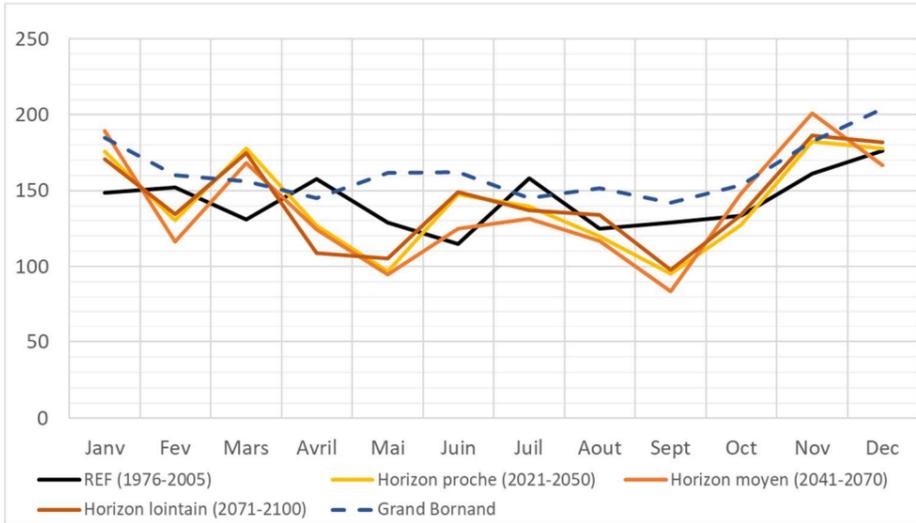
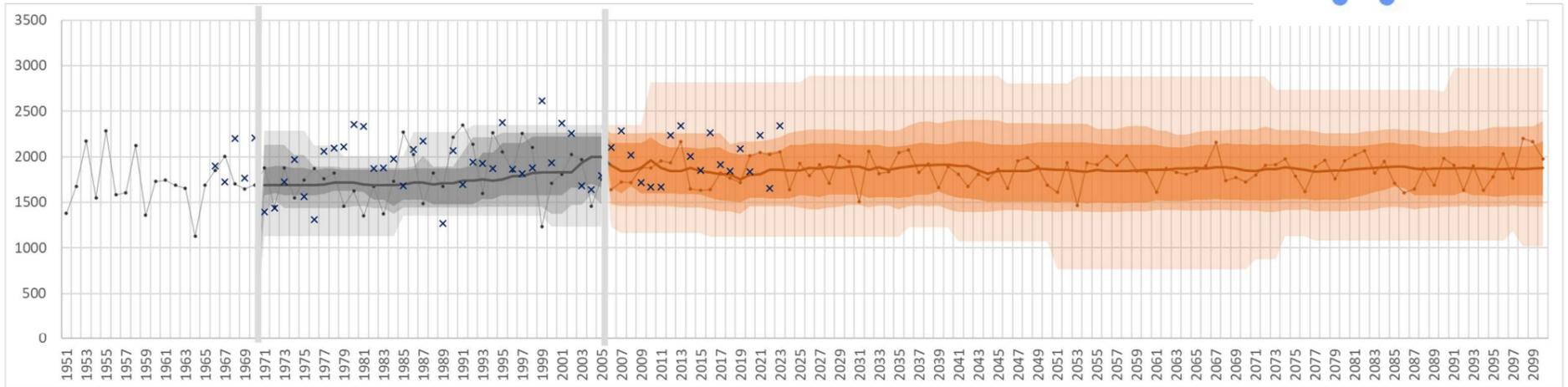


Les mêmes tendances sont observées pour la température maximale journalière moyenne. Les écarts sont du même ordre de grandeur seules les valeurs absolues sont augmentées d'environ 5°C par rapport aux températures moyennes présentées précédemment.

La répartition mensuelle des écarts est plus chaotique d'un mois à l'autre, les écarts les plus importants surviennent au printemps et début d'été.

L'écart des valeurs du Grand Bornand par rapport aux modèles est plus important que pour les valeurs moyennes.

Précipitations totales (mm)

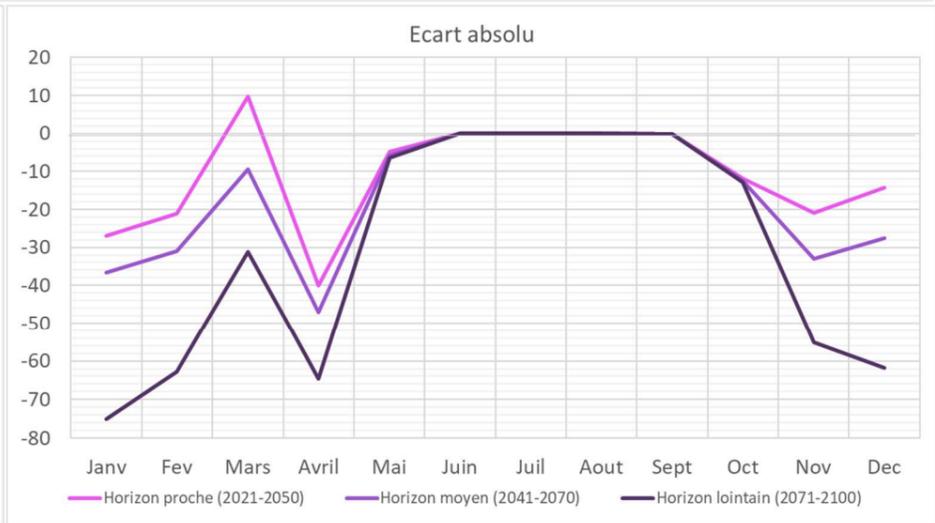
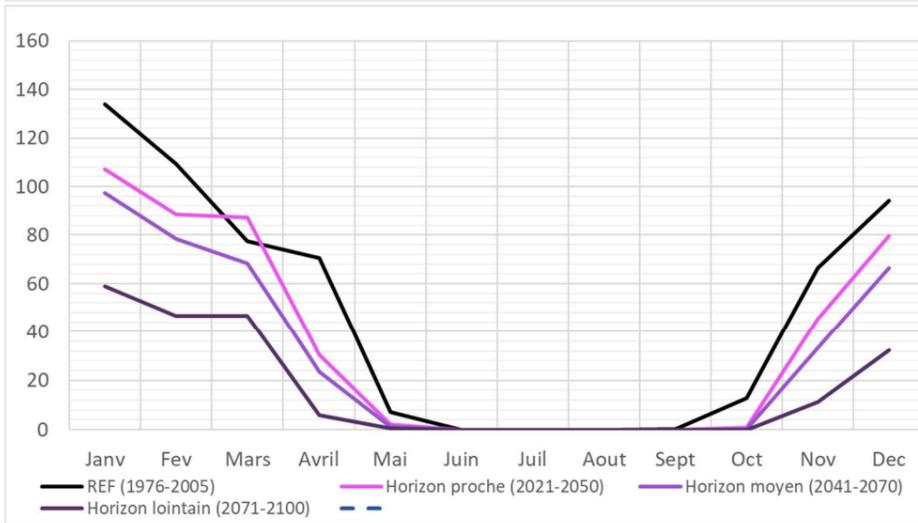
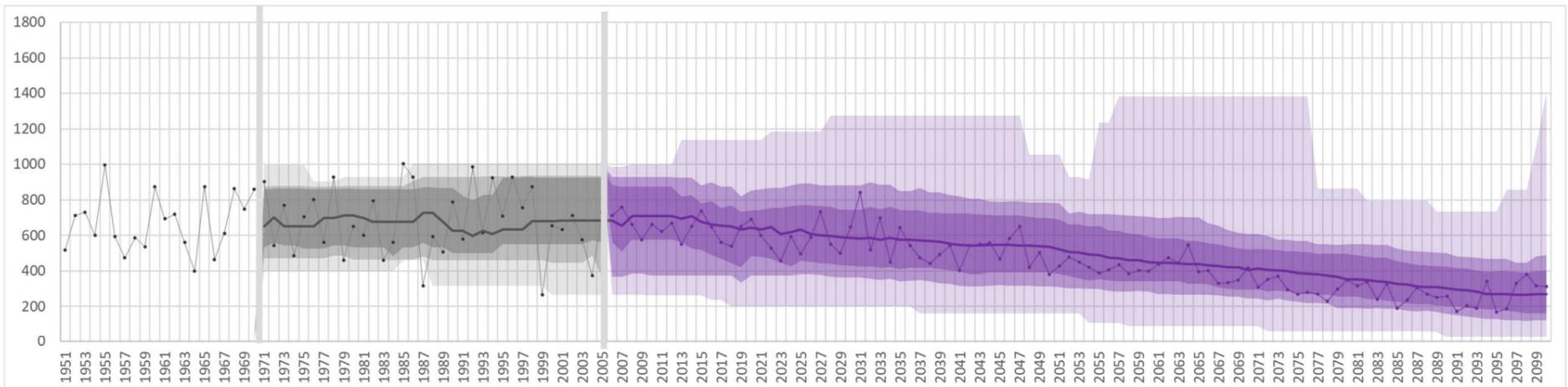
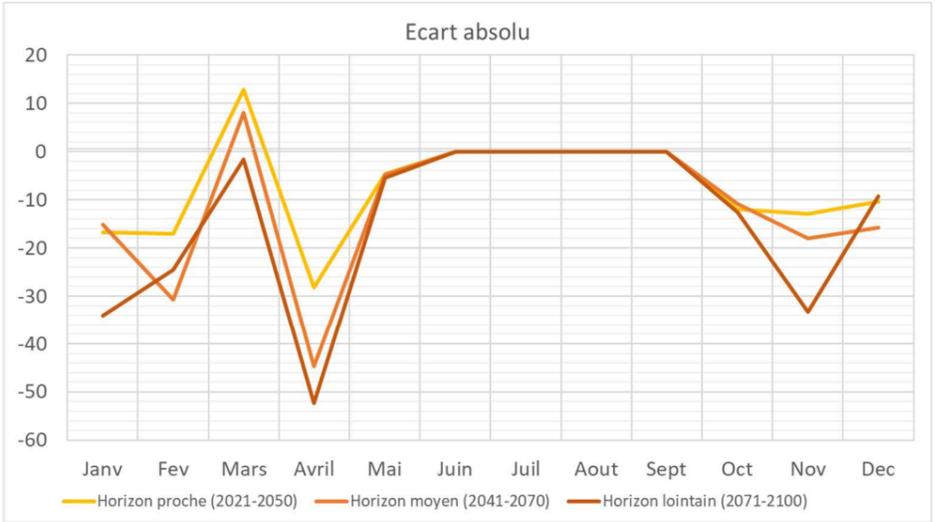
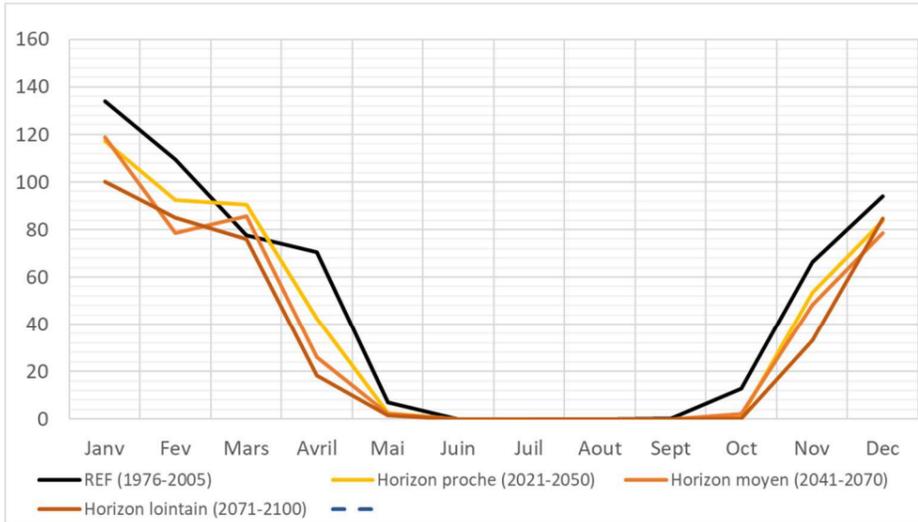
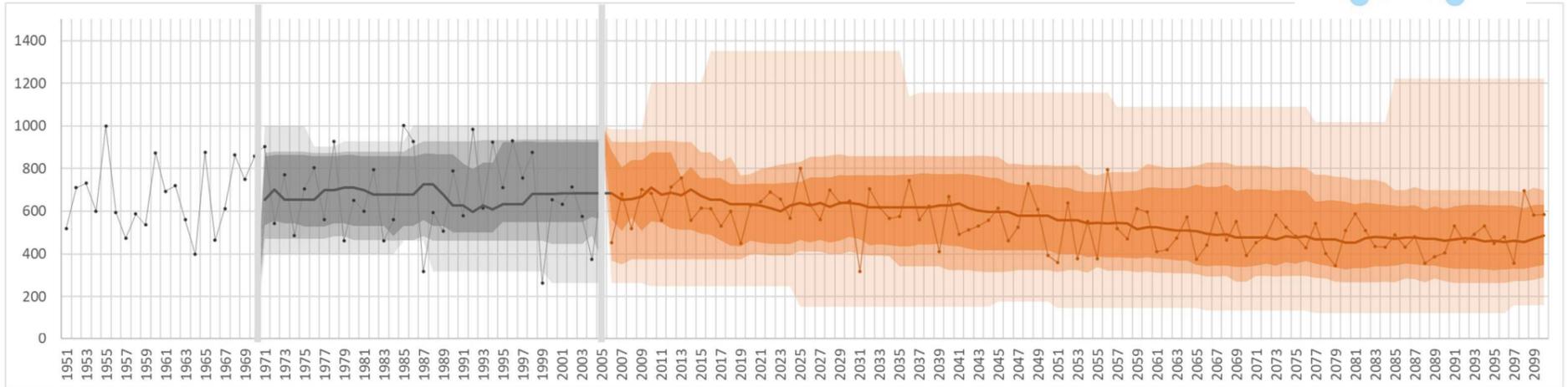
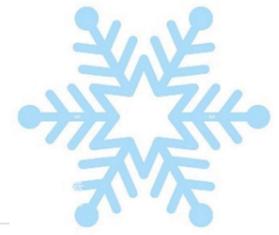


Les précipitations moyennes annuelles présentent une évolution relativement stable mais une forte variabilité interannuelle avec des valeurs de l'ordre de 1500 à 2000 mm dans l'enveloppe des références décennales. La médiane est très stable pour le RCP4.5 avec même une légère augmentation par rapport à la période de référence contrairement au RCP8.5 où elle diminue légèrement à partir de 2050 jusqu'à -93mm (-5%).

La répartition mensuelle moyenne des écarts est à dents de scie, de +40 mm à -60 mm/mois avec une tendance à la baisse pour la période estivale.

Les données mesurées au Grand Bornand sont cohérentes et du même ordre de grandeur que celles issues des modèles, légèrement supérieures. Elles sont globalement comprises dans l'enveloppe décennale hormis pour la période de référence où la variabilité interannuelle est plus forte pour le Grand Bornand.

Précipitations solides (mm)

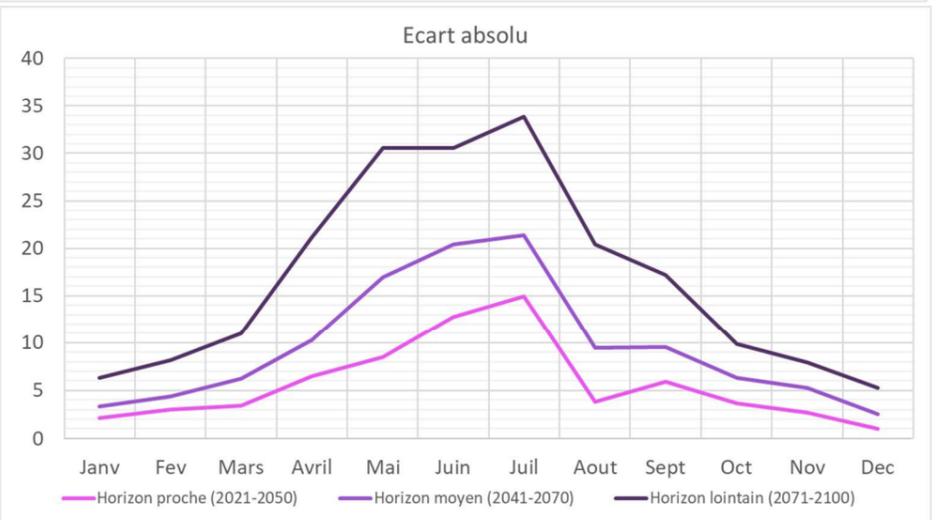
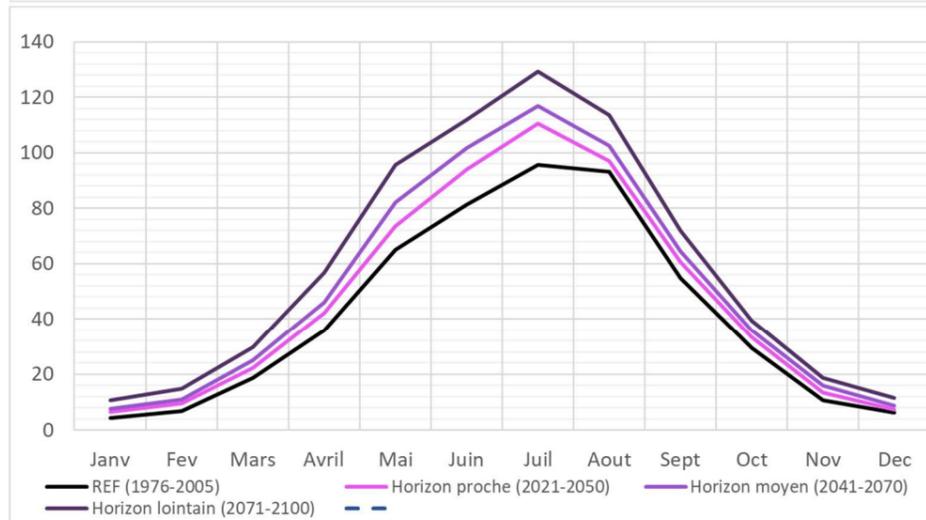
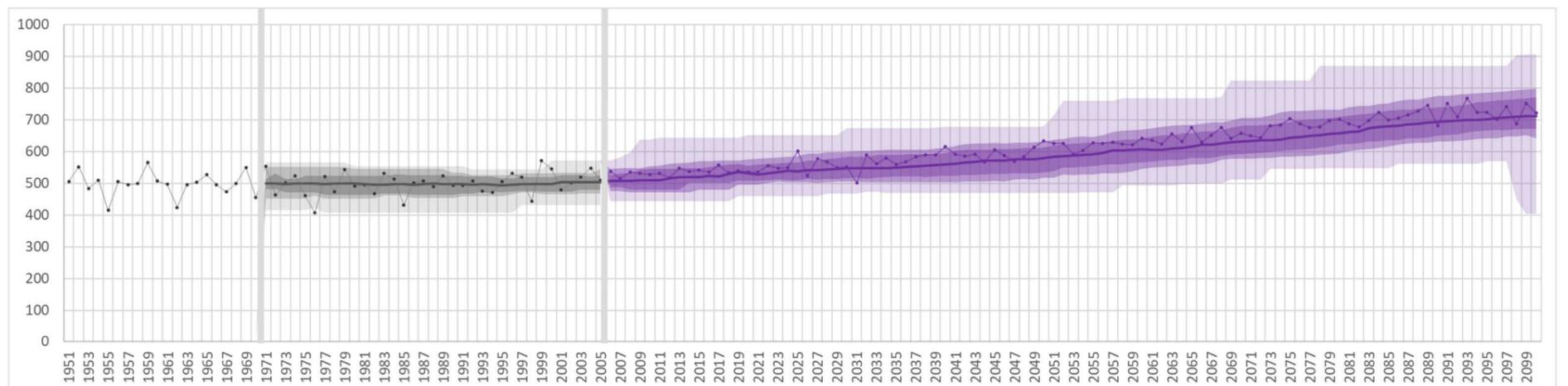
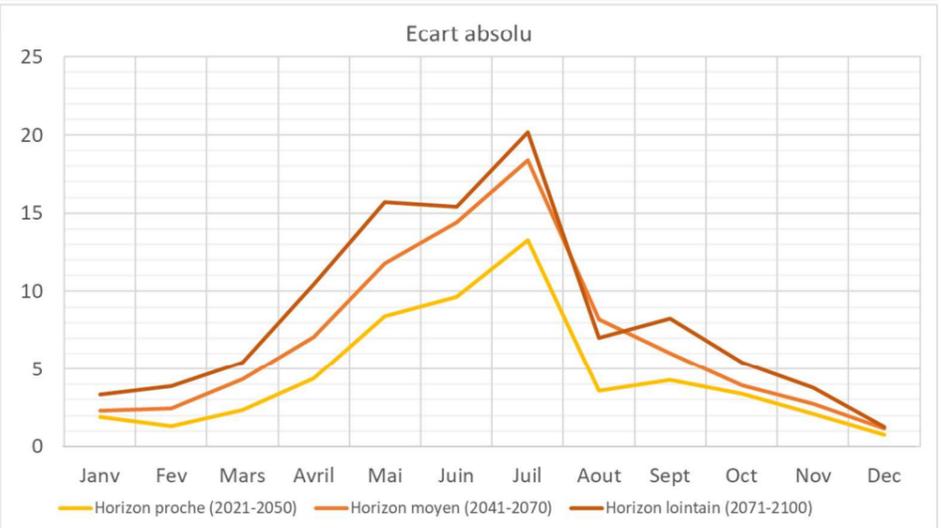
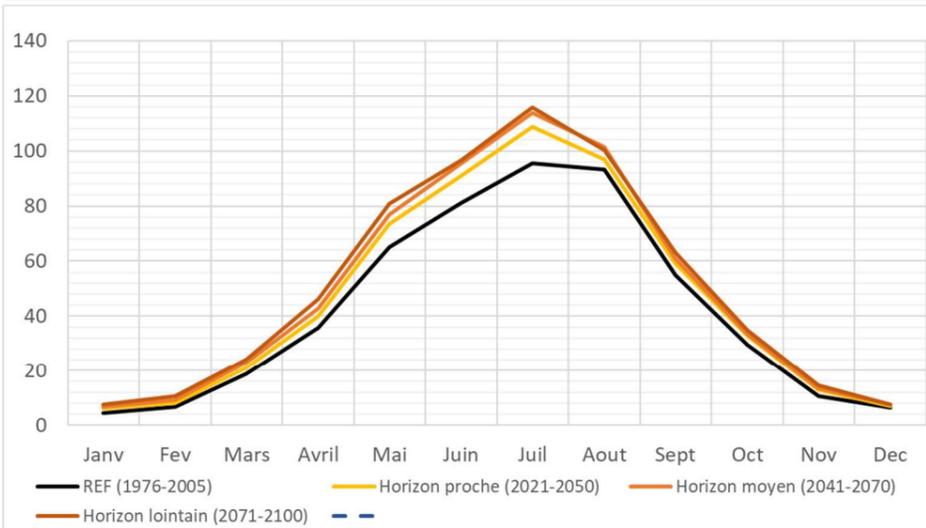
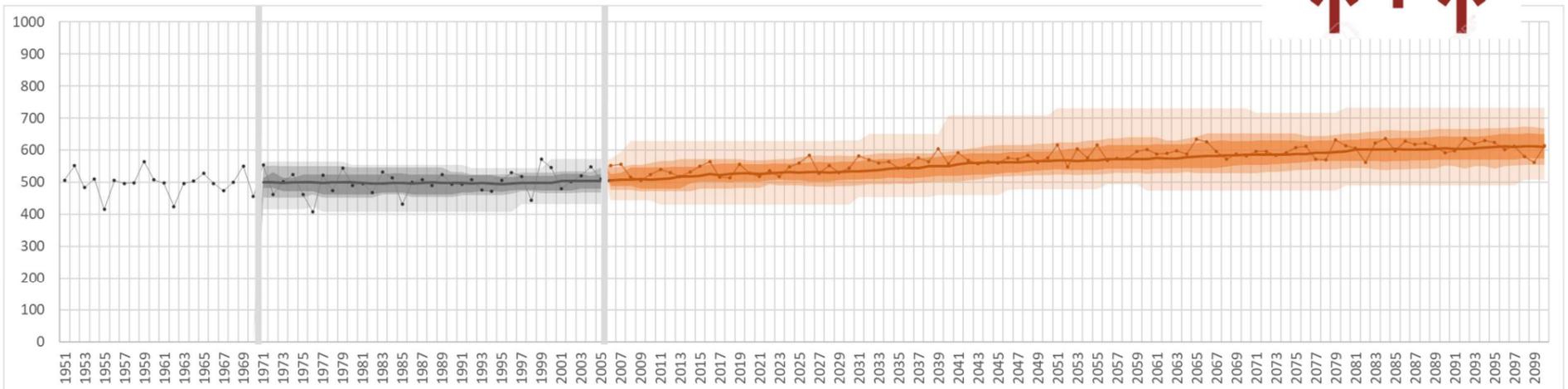


La part solide de précipitations c'est-à-dire la neige naturelle va significativement diminuer en raison de la hausse des températures. On observe donc toujours la cassure dans la décroissance entre les deux scénarios à partir de 2050. A l'horizon 2050 la diminution à l'année est de l'ordre de 150 à 200 mm pour les deux scénarios soit près du tiers. En fin de siècle les précipitations solides auront diminué de 170mm pour RCP4.5 et 360 mm pour RCP8.5 soit plus de la moitié avec des années extrême ou la neige serait quasiment absente.

Comme pour les précipitations totales la variabilité interannuelle est assez prononcée (+/- 200 mm) mais l'enveloppe décennale tend à se resserrer pour le RCP8.5.

En vue de la relative stabilité dans l'évolution des précipitations totales, les volumes perdus en précipitations solides sont autant d'eau qui sera précipitée sous forme liquide.

Evapotranspiration (mm)

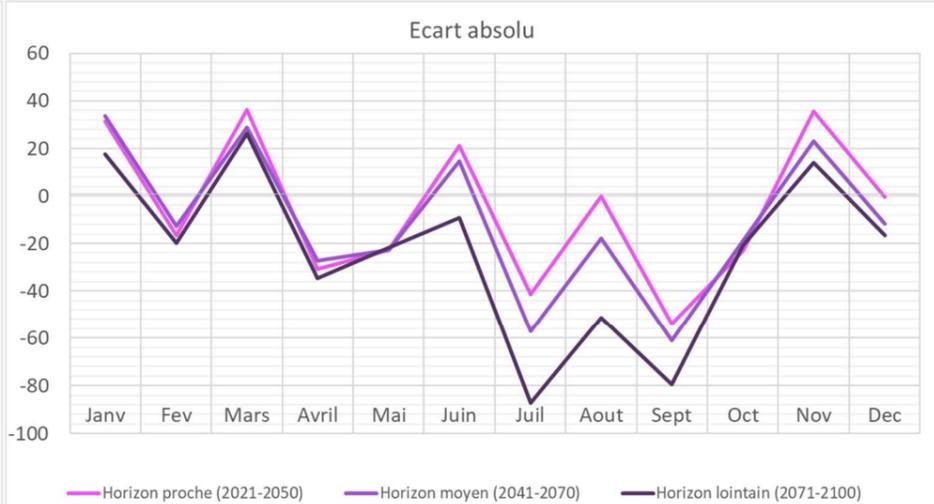
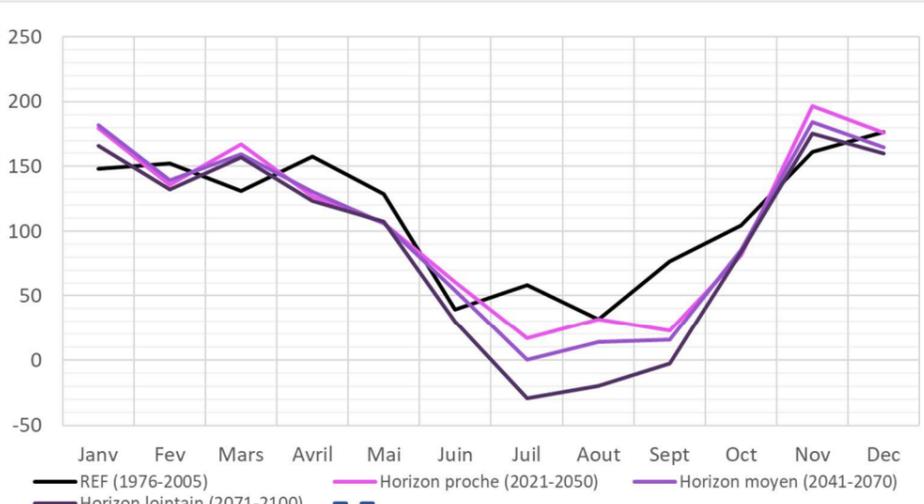
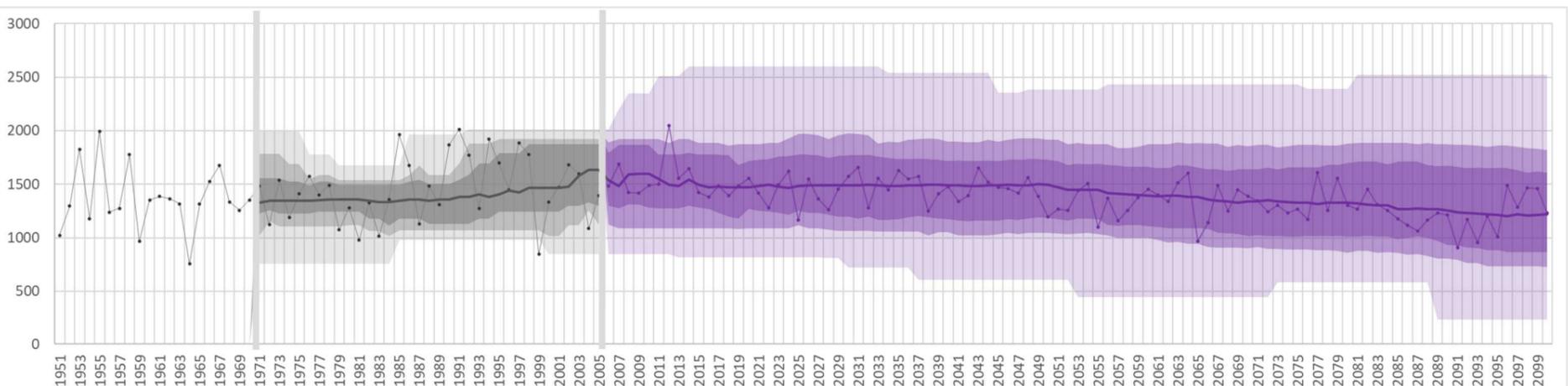
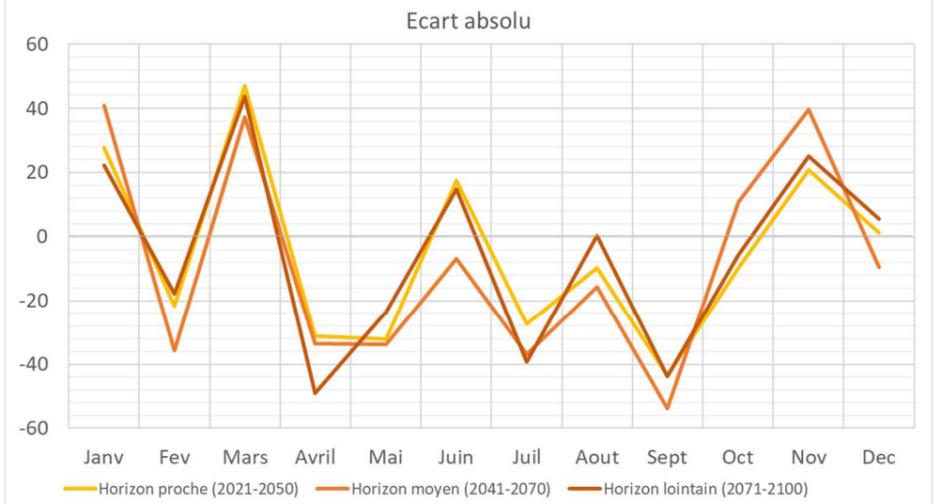
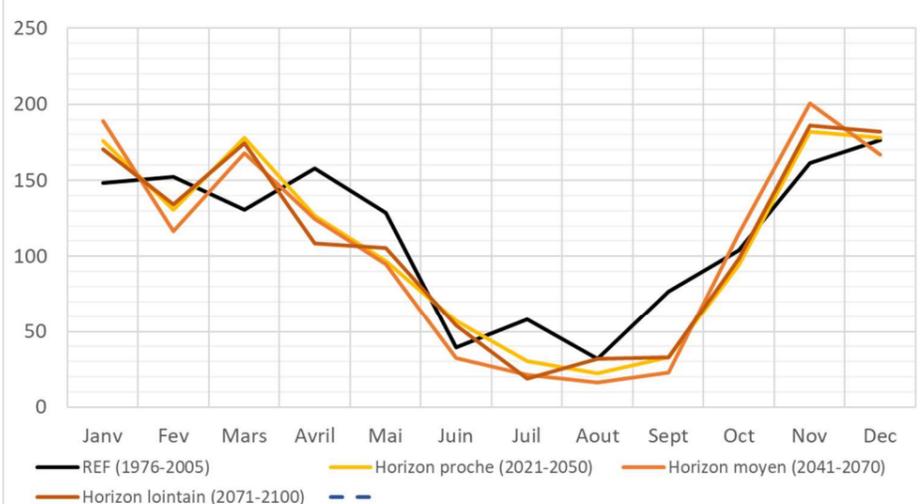
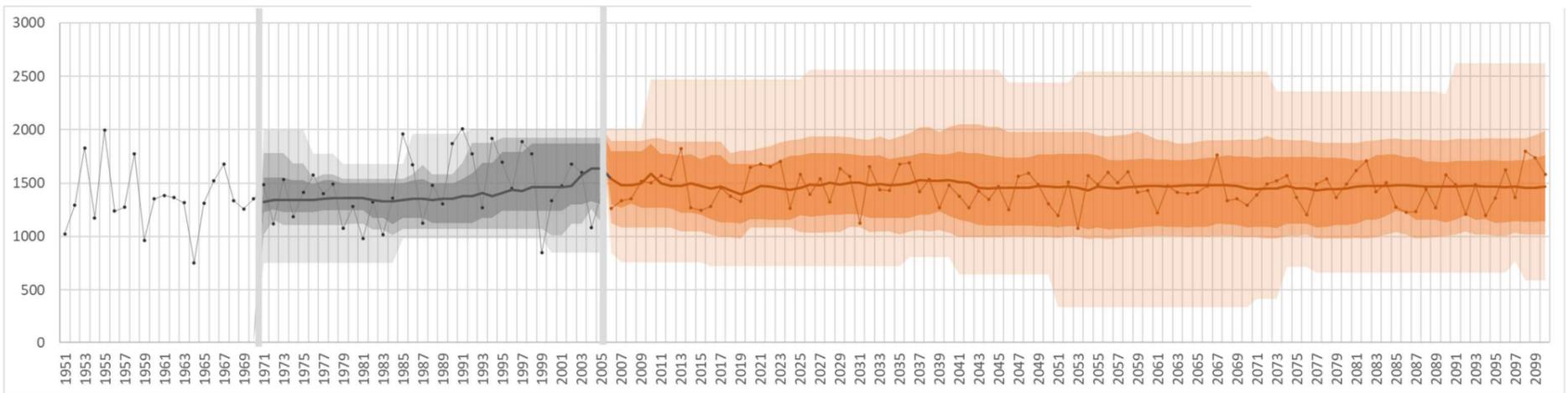


L'évapotranspiration potentielle (ETP) est calculée sur la base des températures moyennes avec la formule d'Oudin (cf annexe 1). L'ETP suit en toute logique la tendance des températures avec une augmentation pour la fin de siècle de l'ordre de 100mm pour RCP4.5 et 200mm (+20%) pour RCP8.5 (+40%).

La hausse est beaucoup plus prononcée en printemps et en été où l'ETP est la plus forte.



Précipitations efficaces (mm)



Les précipitations efficaces sont les précipitations totales moins l'ETP. Ce sont les précipitations qui participent à la recharge des aquifères et aux écoulements de surface. L'évolution des précipitations efficaces prend donc en compte la variabilité des précipitations totales et l'augmentation de l'ETP présentés précédemment.

Pour le RCP4.5, l'augmentation des précipitations annuelles compense globalement celle de l'ETP on se retrouve avec des écarts inférieurs à 2% quel que soit l'horizon.

Pour le RCP8.5, les précipitations efficaces diminuent d'environ 75 mm (-5%) à l'horizon moyen et -220 mm (-15%) à l'horizon lointain. Cela se manifeste principalement en été, période de tendance à la baisse des précipitations et où la hausse de l'ETP est la plus forte. Le reste de l'année l'évolution est à dents de scie entre +/- 40mm/mois.

6.2 Conclusion sur l'évolution des variables climatiques

L'analyse de ces projections climatiques appelle aux remarques suivantes concernant l'évolution de la ressource en eau sur le massif des Aravis.

- On constate tout d'abord que les écarts entre les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 deviennent significatifs et augmentent à partir de 2050.
- A l'horizon moyen (2041-2070) la ressource totale annuelle ne sera pas ou peu diminuée mais ne se répartira pas de la même façon au cours de l'année :
 - o La ressource sera a priori plus importante en hiver avec une part liquide des précipitations plus importante et un maintien de l'enneigement moins robuste ;
 - o Au printemps, le processus de fonte présentera un stockage plus faible lié à la diminution globale de l'enneigement naturel et se fera de manière différée en raison de la hausse de température. Ainsi la fonte sera donc probablement plus avancée dans l'année et sera moins abondante lors des pics actuels ;
 - o Les étés seront bien plus secs en raison d'une baisse de précipitations et d'une augmentation de l'évapotranspiration liée à la hausse des températures. L'étiage sera plus sévère et plus long en raison de l'avancée du processus de fonte réduisant le stockage au printemps ;
 - o La ressource en automne devrait être globalement peu modifiée.

Cette évolution sera d'autant plus prononcée pour les cours d'eau qui présentent un bassin de petite taille d'eau et/ou à régime hydrologique nival, beaucoup plus sensible à l'évolution du stockage lié à l'enneigement et à la pluviométrie.

L'injection des données de prévision climatiques dans les modélisations hydrologiques permettront de vérifier ces conclusions.

6.3 Extrapolation des modèles hydrologiques pour l'évolution future de la ressource

Pour extrapoler les débits simulés par les modèles hydrologiques avec les données de prévisions climatiques, nous proposons de retenir le scénario RCP8.5. Comme nous l'avons vu, le choix du scénario n'a pas une grande influence sur les résultats à l'horizon moyen c'est pourquoi nous nous limiterons à ce seul scénario qui est également le plus pessimiste et par conséquent sécuritaire.

Il ne paraît pas pertinent d'utiliser la médiane multi-modèles des températures et précipitations en entrée car cela lisserait les événements extrêmes. Nous prenons le parti de plutôt utiliser les résultats d'un seul modèle mais dont les statistiques (médianes, max, min) sont les plus proches de celles de l'ensemble.

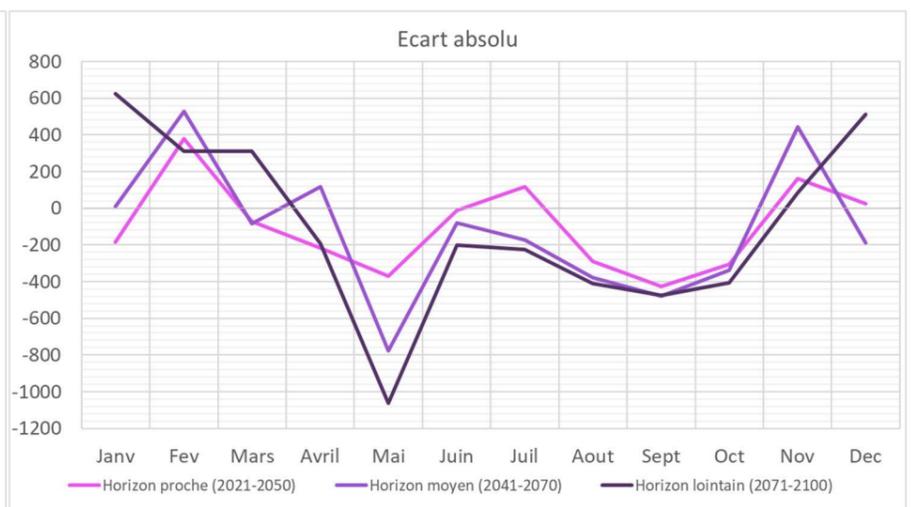
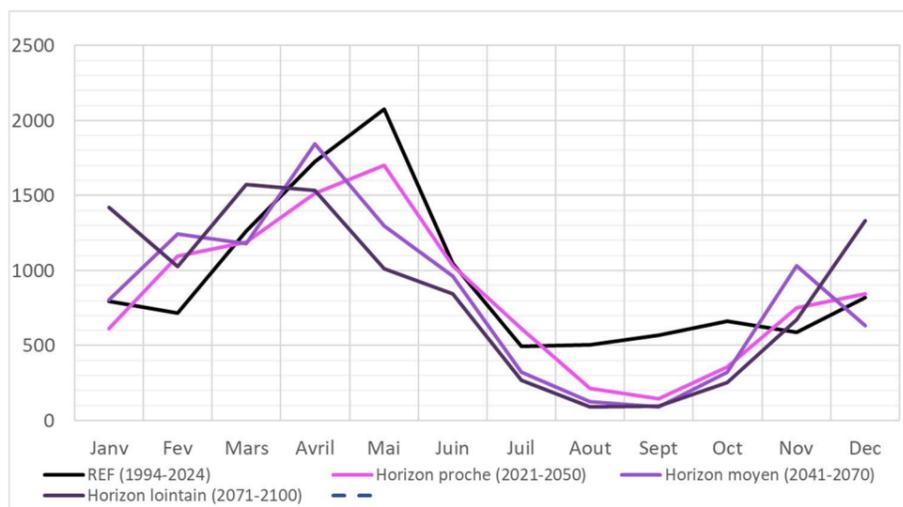
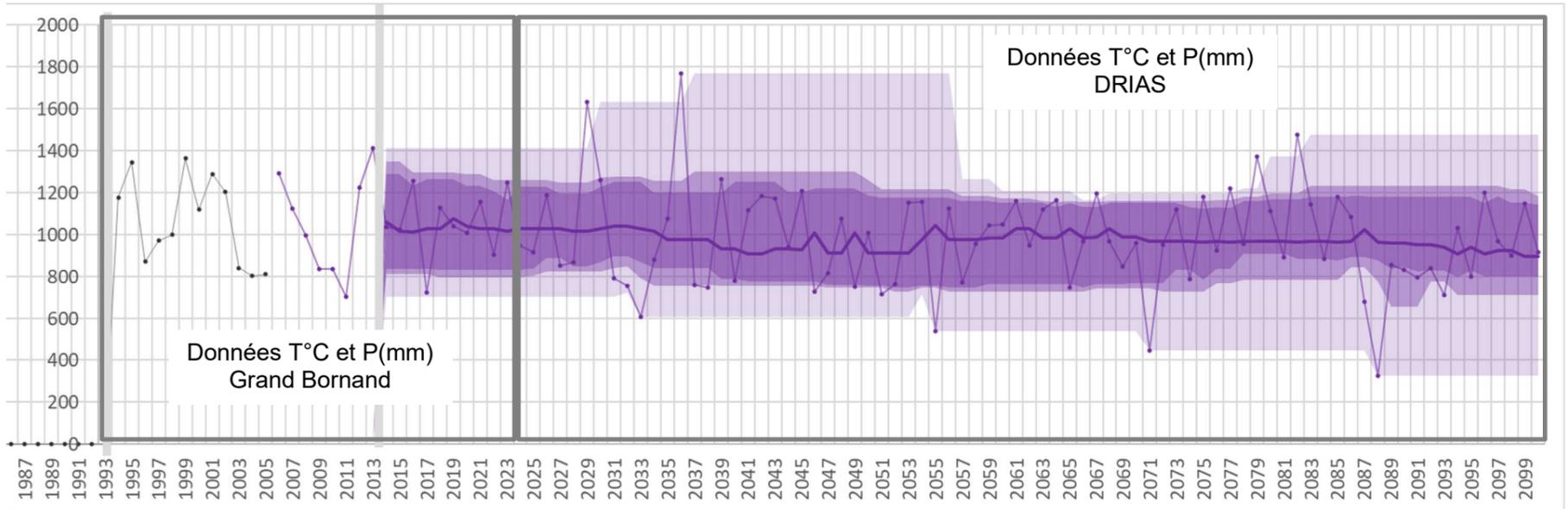
Nous retenons ainsi les modèles RACMO22E EC-EARTH (RCM GCM) pour les températures et CCLM4-8-17 HadGEM2-ES (RCM GCM) pour les précipitations.

Les données injectées sont donc celles issues du Grand Bornand de 1994 à 2024 et celles des modèles climatologiques ci-dessus de 2024 à 2100.

6.4 Résultats des modèles hydrologiques

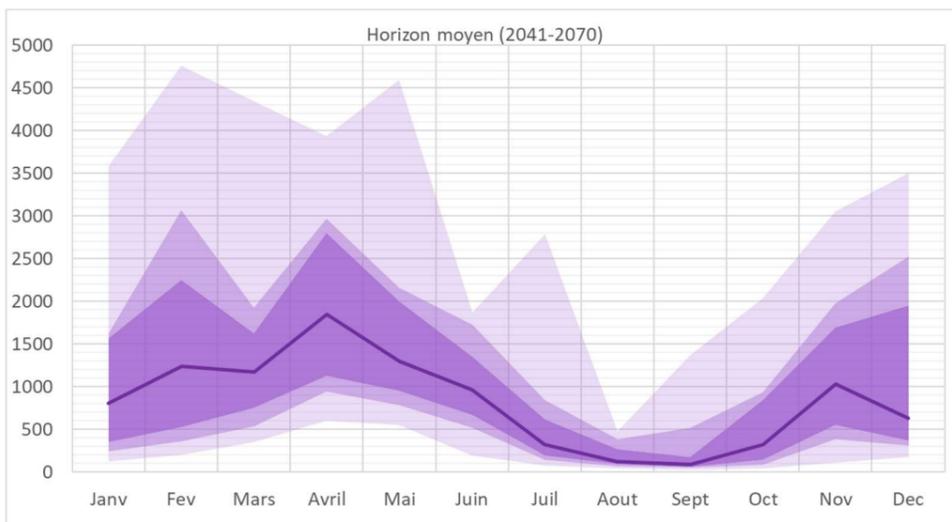
Les résultats des modèles hydrologiques de Gonière et du Nom sont présentés ci-dessous.

6.4.1 Le Nom (l/s)



RCP8,5	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Année
REF (1994-2024)	797.2	715.7	1262.4	1727.9	2074.7	1044.7	494.2	503.1	569.8	661.5	586.0	820.7	1037.2
Horizon proche (2021-2050)	613.1	1094.4	1189.8	1512.3	1703.4	1032.2	611.3	213.9	144.0	356.6	748.5	845.4	945.7
Horizon moyen (2041-2070)	804.4	1243.0	1177.8	1845.2	1296.3	964.6	320.5	124.7	91.2	324.3	1031.0	634.0	989.8
Horizon lointain (2071-2100)	1422.5	1026.0	1574.3	1533.1	1013.2	845.7	268.9	92.5	94.4	254.3	669.7	1333.8	937.9

Les résultats pour le Nom confirment les remarques précédentes :

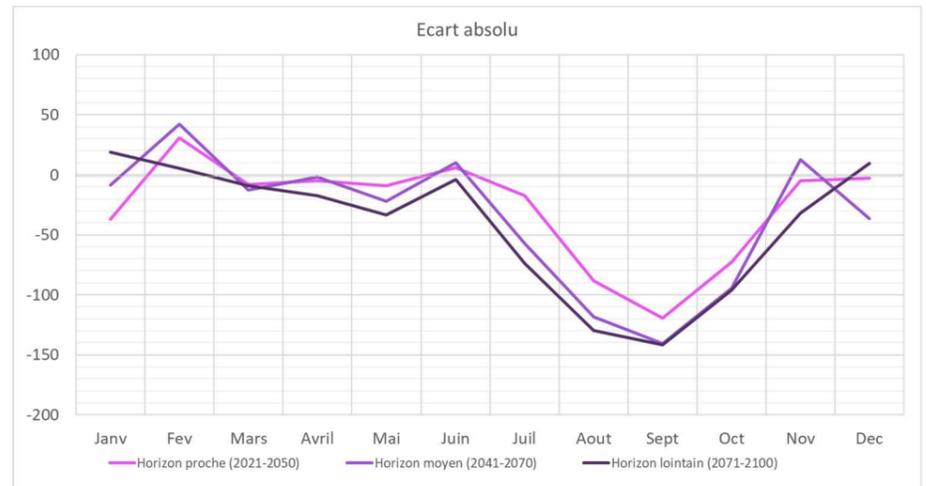
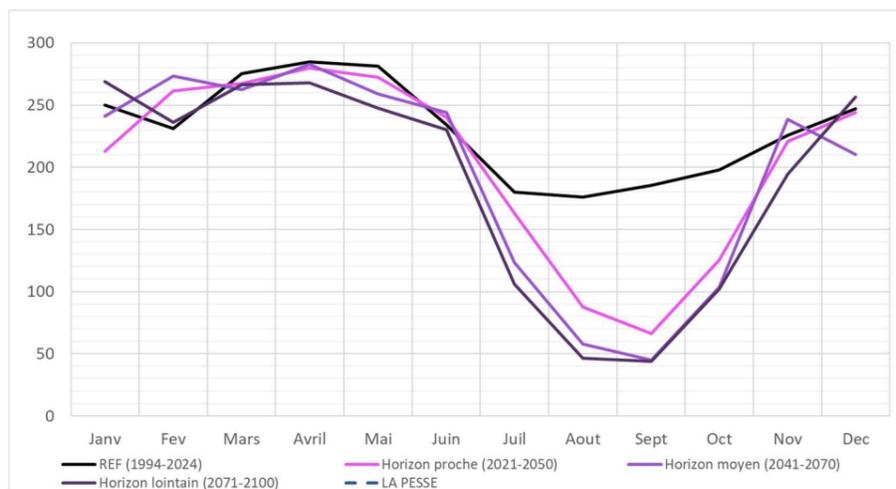
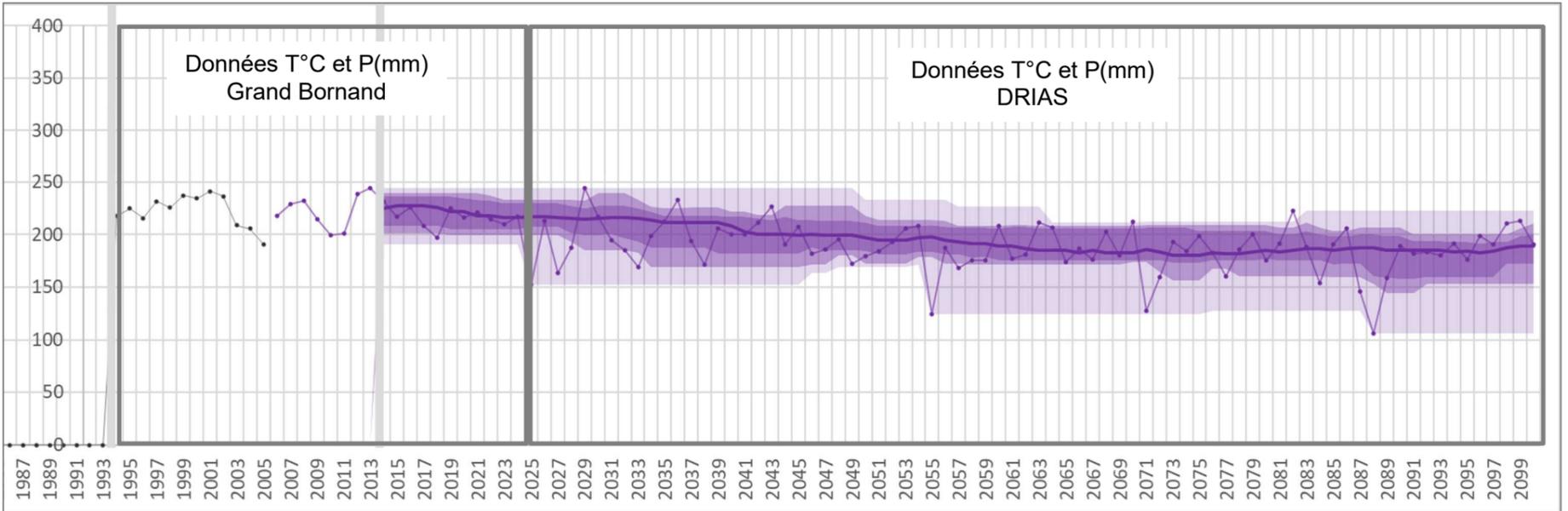


- L'étiage estival sera nettement plus prononcé. Le débit sera beaucoup plus fréquemment sous le seuil des 520 l/s en été à l'avenir, rendant impossible tout prélèvement pendant de plus longues périodes ;
- Le pic de fonte est diminué et se décale vers les mois antérieurs avec une survenance plutôt vers avril que mai à l'horizon moyen ;
- Les débits hivernaux sont globalement plus importants.
- La ressource annuelle est diminuée de 5% entre 'horizon moyen et la période de référence.
- Le module est de l'ordre de 950 à 1000 l/s. Cela montre que le débit de 520 l/s est supérieur à la moitié du module, ce qui n'est pas représentatif d'un étiage prononcé mais plutôt de moyennes/basses eaux.

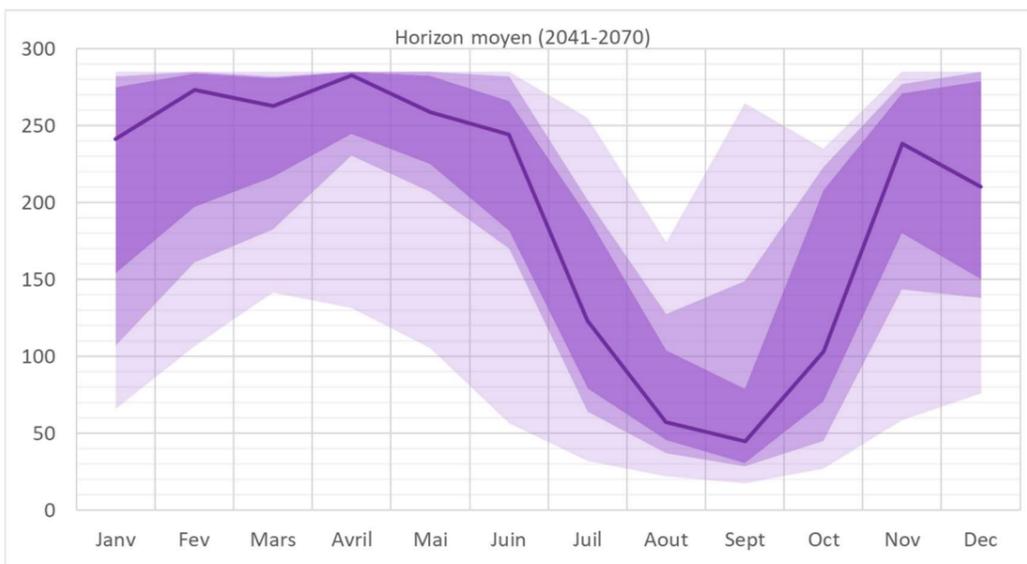
Notons que les écarts négatifs importants avec la période de référence sont amplifiés par le fait que les précipitations du modèle climatologique sont un peu sous-estimées par rapport à celles du Grand Bornand ayant servi au calage comme le montre les graphiques de précipitations totales.

6.4.2 Captage de Gonière (m3/h)

Ces résultats représentent la ressource disponible à Gonière en sortie du modèle hydrologique sans encore considérer le besoin AEP ni les limitations liées aux modalités de prélèvement règlementaires.



RCP8,5	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Année
REF (1994-2024)	250.1	231.0	275.5	285.0	281.2	234.2	180.2	175.9	185.4	198.1	225.9	247.0	225.3
Horizon proche (2021-2050)	212.8	261.6	267.3	279.8	272.3	240.0	163.0	87.5	66.1	125.5	220.8	244.2	199.5
Horizon moyen (2041-2070)	241.3	273.4	262.7	282.9	258.9	244.1	123.1	57.6	45.1	103.3	238.4	210.5	187.0
Horizon lointain (2071-2100)	268.7	236.2	266.5	267.9	247.6	230.4	106.2	46.3	43.7	102.2	194.2	256.3	187.4



Les mêmes tendances sont observées pour Gonière à la différence que le seuil d'écrêtement des débits à 285 m³/h atténue l'effet d'augmentation des débits en hiver et le décalage du pic de fonte.

Ces phénomènes auront bien lieu sur la ressource naturelle mais se feront moins ressentir au niveau du captage qui ne comptabilise pas les débits supérieurs au seuil d'écrêtement. Notons que ce dernier est dépassé tous les ans pendant la fonte.

En raison de ce seuil d'écrêtement, l'augmentation de la ressource hivernale ne compense plus la diminution estivale, la ressource disponible à Gonière à l'année est donc diminuée de 17% à l'horizon moyen.

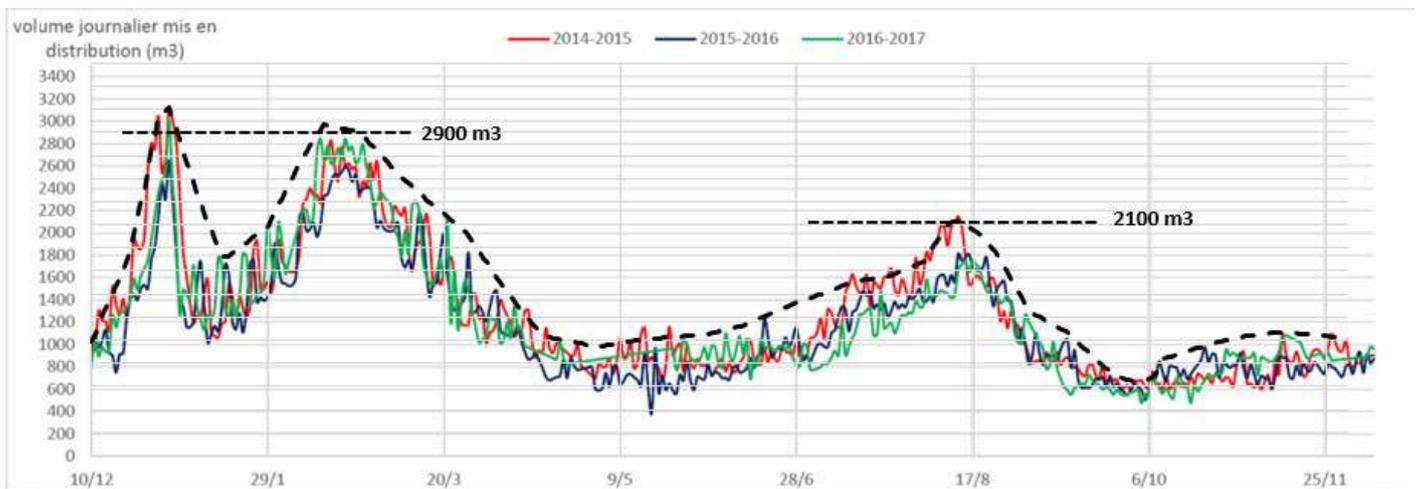
7 Analyse du besoin AEP actuel et futur

Pour l'estimation des besoins d'alimentation en eau potable (AEP), nous nous baserons sur les données prélevées pour l'AEP mesurés à Gonière et sur le schéma directeur du petit cycle de l'eau (2017 MOA O des Aravis). D'après O des Aravis ce dernier document est toujours la référence en ce qui concerne le besoin AEP actuel et futur.

Distribution AEP totale

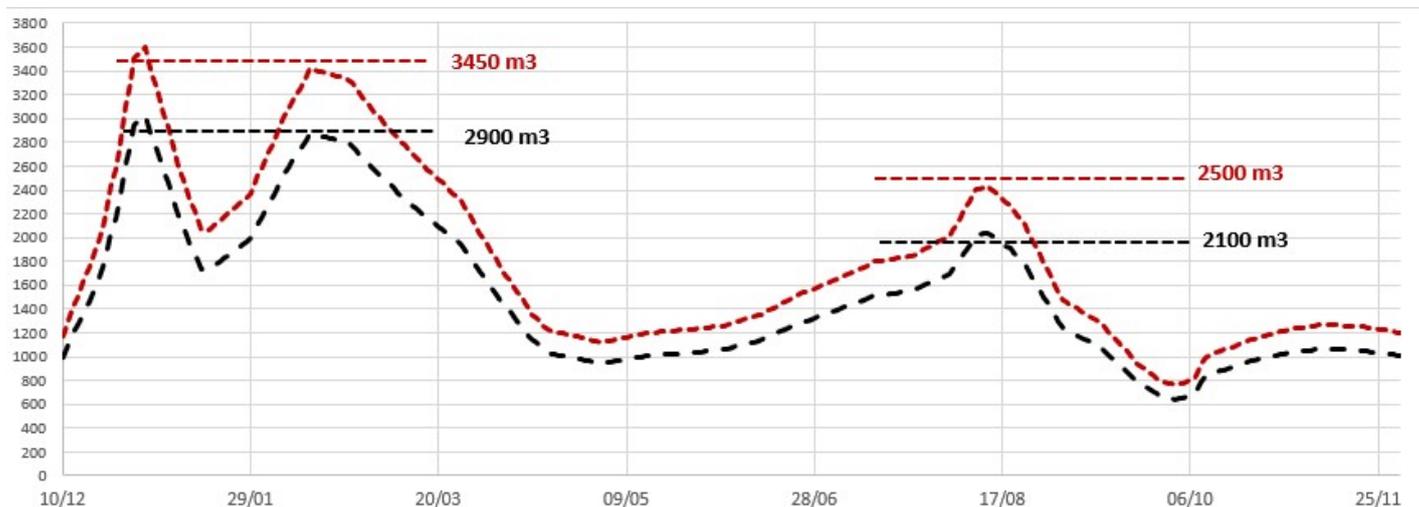
Le graphique suivant présente les volumes journaliers AEP totaux mis en distribution à la Clusaz sur 3 années (2015-2017). Sur cette période on remarque que l'évolution de la distribution est similaire sur les 3 années avec des périodes de surconsommation lié à l'activité touristique : deux en hiver et un en été.

La courbe en pointillés noirs représente la tranche haute des différentes courbes. La valeur haute des saisons hivernales et estivales est respectivement de 2900 m³/j et 2100 m³/j.



Volumes AEP (m³/j) mis en distribution (2015-2017)

Une augmentation de 19% du besoin conduit à la courbe en pointillés rouge qui représente la tranche haute des besoins futurs selon les hypothèses de croissance touristique, démographique et économiques prises dans le schéma directeur.

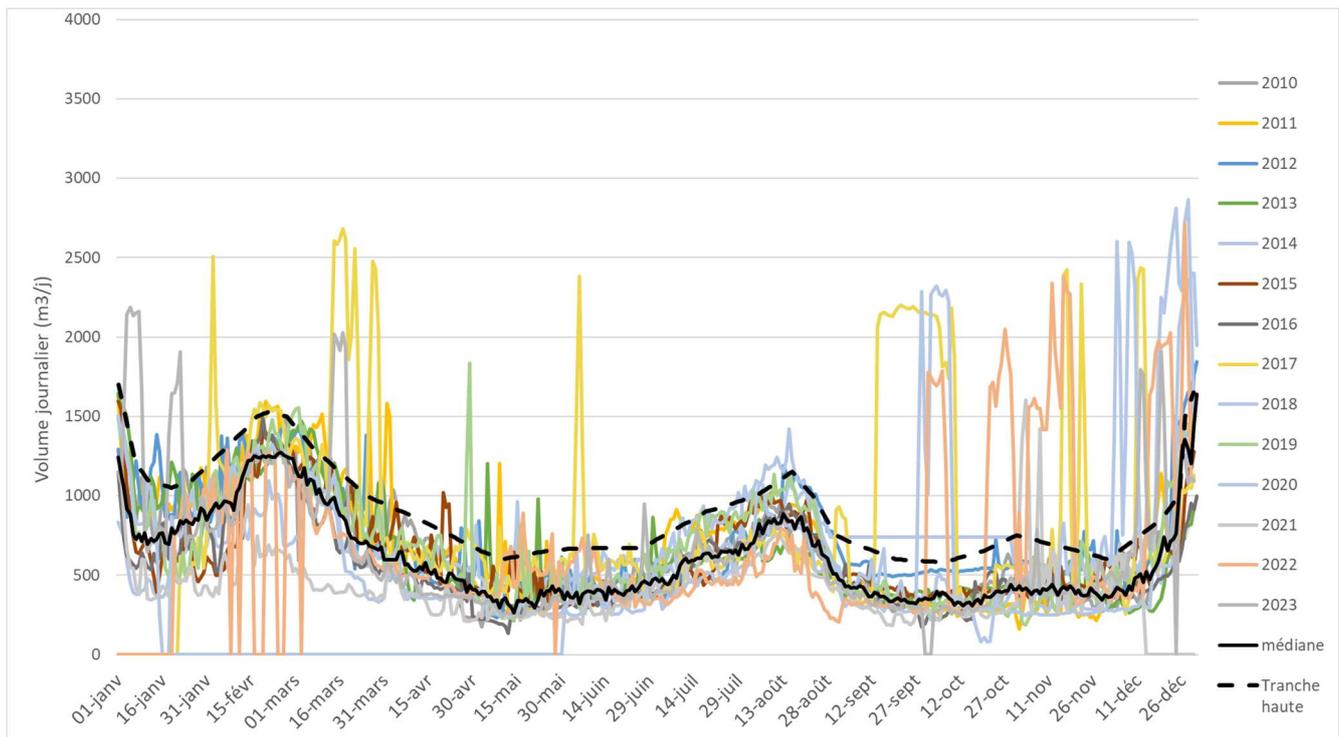


Volumes AEP (m³/j) mis en distribution tranche haute actuels et futurs

Distribution AEP depuis Gonière

Les volumes AEP mis en distribution depuis le captage de Gonière sont présentés ci-dessous (période 2010-2023) :

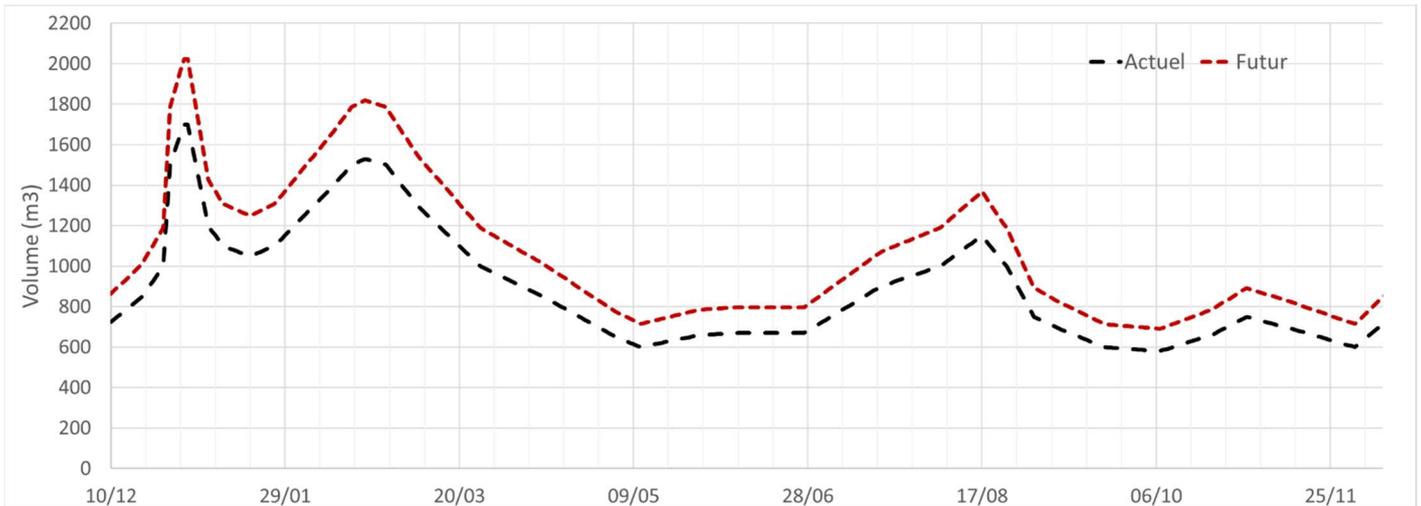
Il apparaît globalement la même forme des courbes avec celle de la distribution totale. Le même travail de lissage est effectué à la main pour faire ressortir la courbe représentative en tranche haute. On note la présence de pics ou paliers anormalement hauts et survenant à des périodes différentes de l'année. Ces artefacts non représentatifs d'une exploitation habituelle sont ignorés dans le tracé de la courbe (comme cela avait d'ailleurs été fait dans le schéma directeur pour l'AEP total).



Volumes AEP (m³/j) mis en distribution depuis Gonière (2010-2023)

En comparant les données de distribution AEP total avec celles provenant uniquement du captage de Gonière, il ressort que le captage de Gonière contribue en moyenne à 62% à la distribution AEP totale. La ressource AEP à la Clusaz provient donc en grande partie de ce captage.

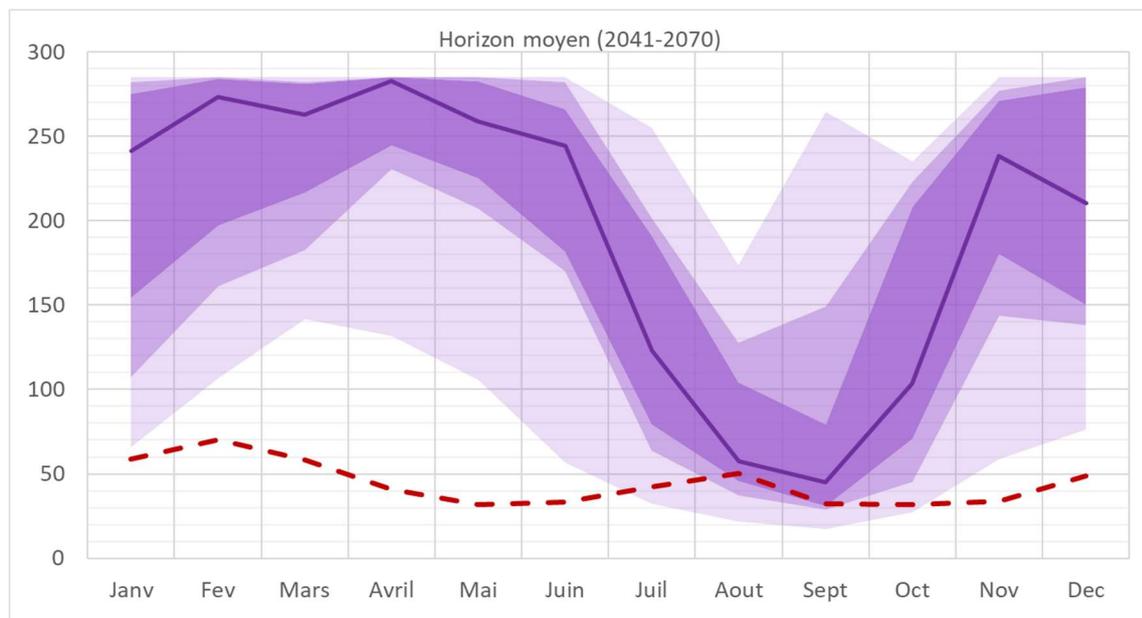
En supposant que l'augmentation du besoin futur se manifesterait de façon homogène sur l'ensemble des captages AEP, le besoin futur à Gonière est estimé en appliquant une majoration de 19% sur la courbe de tranche haute.



Volumes AEP (m3/j) mis en distribution depuis Gonière tranche haute actuels et futurs

Cela nous donne ainsi les chroniques théoriques pour une année type à forte consommation AEP à l'état actuel et à l'état futur. Soit respectivement sur l'ensemble de l'année 13 500 m³ et 16 000 m³

Il est intéressant de comparer les débits moyens mensuels du besoin futur AEP avec la ressource estimée à Gonière à l'horizon moyen (graphique ci-dessous). Il ressort que le besoin AEP sera toujours satisfait hormis en été pour des conditions de sécheresse quinquennales ou pire. La tension concernera donc la période estivale. Le reste de l'année malgré la plus forte demande AEP, la ressource demeurera largement disponible.



Comparaison du besoin futur (pointillées rouges) avec la ressource à Gonière (courbes et enveloppes mauves)

8 Estimation de la ressource disponible pour la neige

La ressource disponible pour la neige est estimée en soustrayant le distribution AEP aux débits du captage de Gonière et le débit réservé (40 l/s) pour la Patton. Les données mesurées (jugées fiables) sont utilisées en priorité quand elles sont disponibles. Quand elles ne le sont pas et pour les estimations futures jusqu'en 2100, les données sont issues des modèles hydrologiques et de la courbe théorique de distribution AEP future.

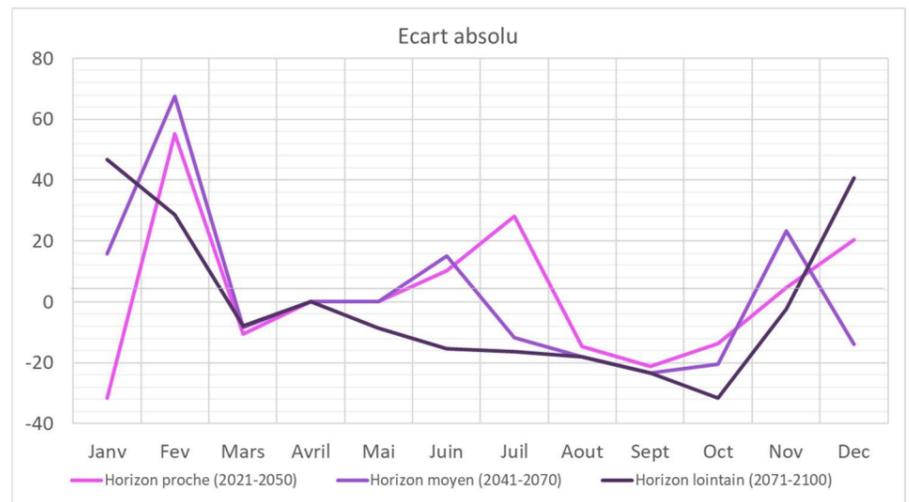
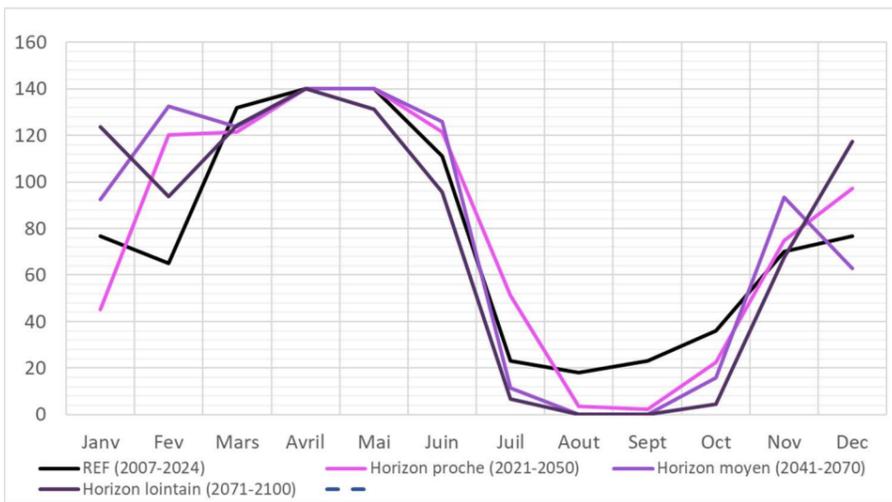
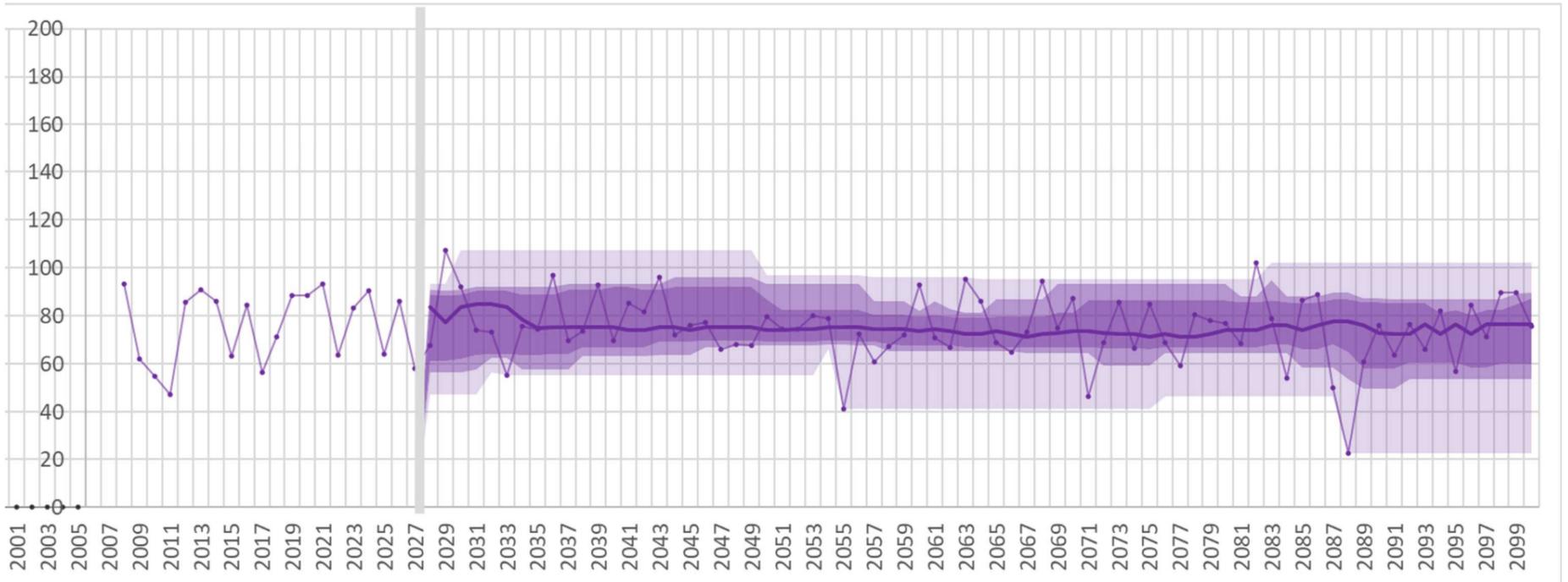
Les modalités de prélèvement sont ensuite appliquées aux volumes journaliers estimés :

- Volumes bornés avec la valeur de prélèvement maximum autorisée pour la neige (140m³/h pour Gonière ; 108 m³/h pour la Patton)
- Volume rendu nul si le débit du Nom est inférieur à 520 l/s

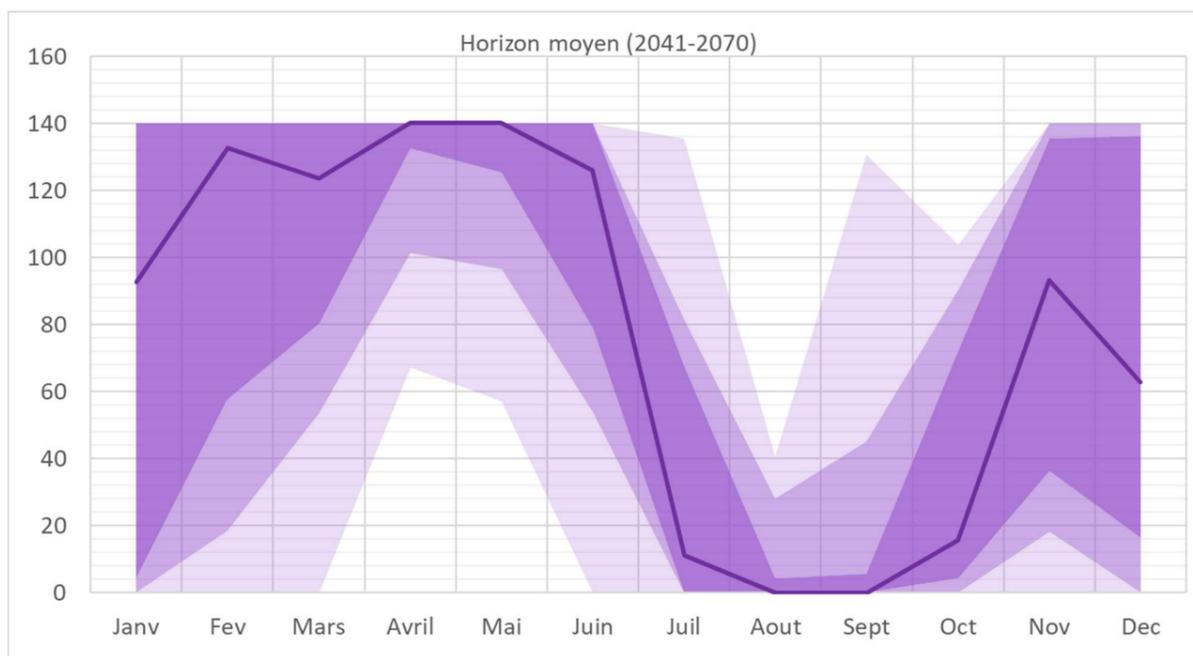
On obtient ainsi une chronique de débit disponible pour la neige de la ressource à Gonière et la Patton

Les graphiques suivants présentent ces résultats en débit (m³/h) puis en volume (m³) avec un focus sur l'horizon moyen.

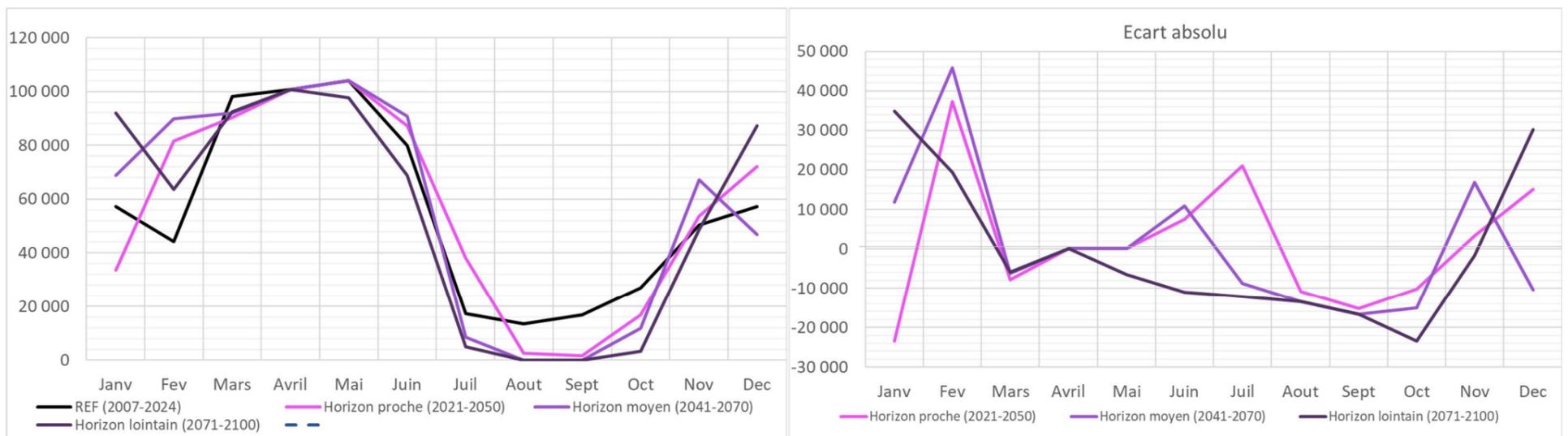
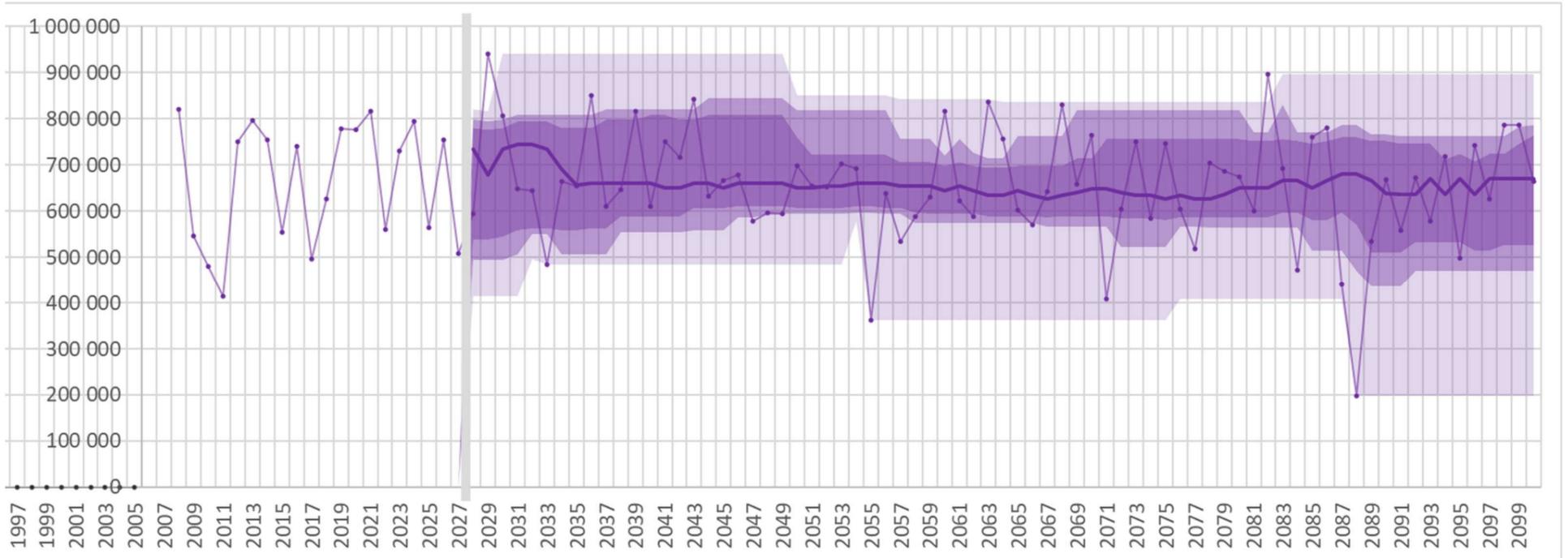
8.1.1 Débits disponibles pour la neige à Gonière (m³/h)



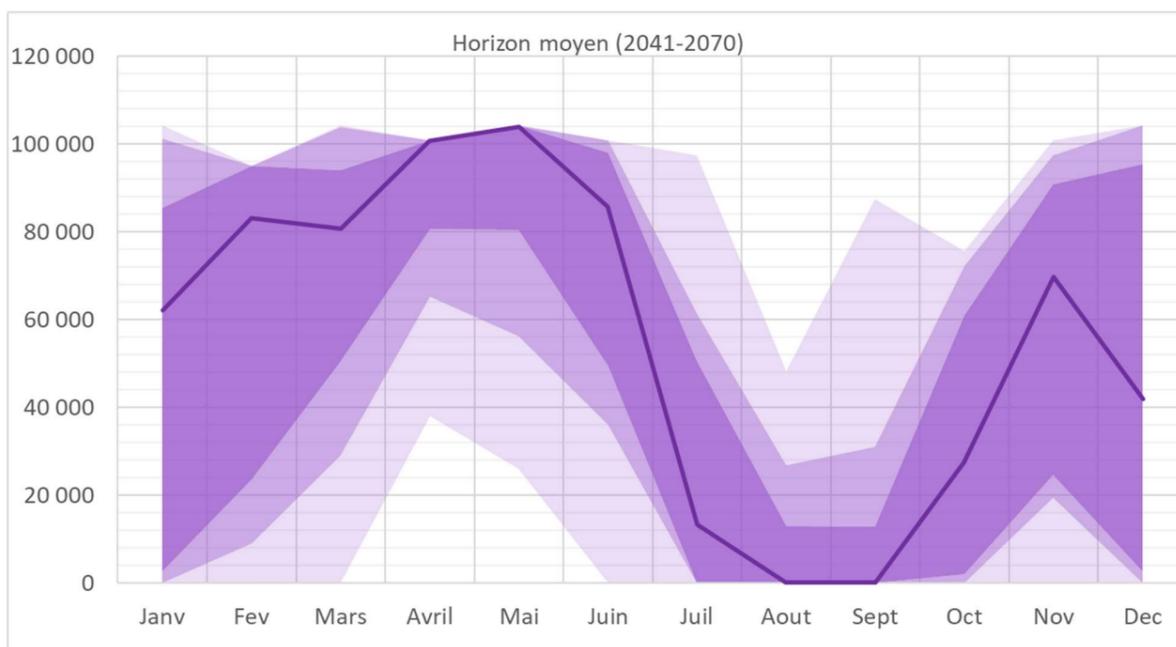
Débit disponible (m3/h)	Janv	Fev	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Année
REF (2007-2024)	76.8	65.1	132.0	140.0	140.0	111.0	23.0	18.1	23.2	36.1	70.0	76.8	84.4
Horizon proche (2021-2050)	45.2	120.2	121.5	140.0	140.0	121.3	51.3	3.5	2.1	22.5	74.7	97.1	75.3
Horizon moyen (2041-2070)	92.6	132.7	123.7	140.0	140.0	126.0	11.3	0.0	0.0	15.8	93.3	62.8	74.6
Horizon lointain (2071-2100)	123.6	93.8	124.2	140.0	131.3	95.7	6.8	0.0	0.0	4.5	67.7	117.4	76.0



8.1.2 Volumes disponibles pour la neige à Gonière (m³)



Volumes disponibles (m3)	Janv	Feb	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Année
REF (2007-2024)	57 120	44 158	98 206	100 800	104 160	79 899	17 143	13 440	16 718	26 880	50 400	57 120	740 067
Horizon proche (2021-2050)	33 600	81 521	90 398	100 800	104 160	87 360	38 133	2 567	1 539	16 706	53 760	72 240	659 728
Horizon moyen (2041-2070)	68 880	89 952	92 035	100 800	104 160	90 720	8 400	0	0	11 760	67 200	46 744	653 576
Horizon lointain (2071-2100)	91 965	63 612	92 400	100 800	97 678	68 880	5 040	0	0	3 360	48 720	87 360	666 062



La ressource annuelle moyenne actuelle à Gonière est estimée à 740 000 m³ contre 654 000 m³ à l'horizon moyen soit une diminution de 86 000 m³ (-12%). Les possibilités de prélèvement seront surtout réduites en été avec des volumes moyens quasi nul en aout et septembre à l'horizon moyen.

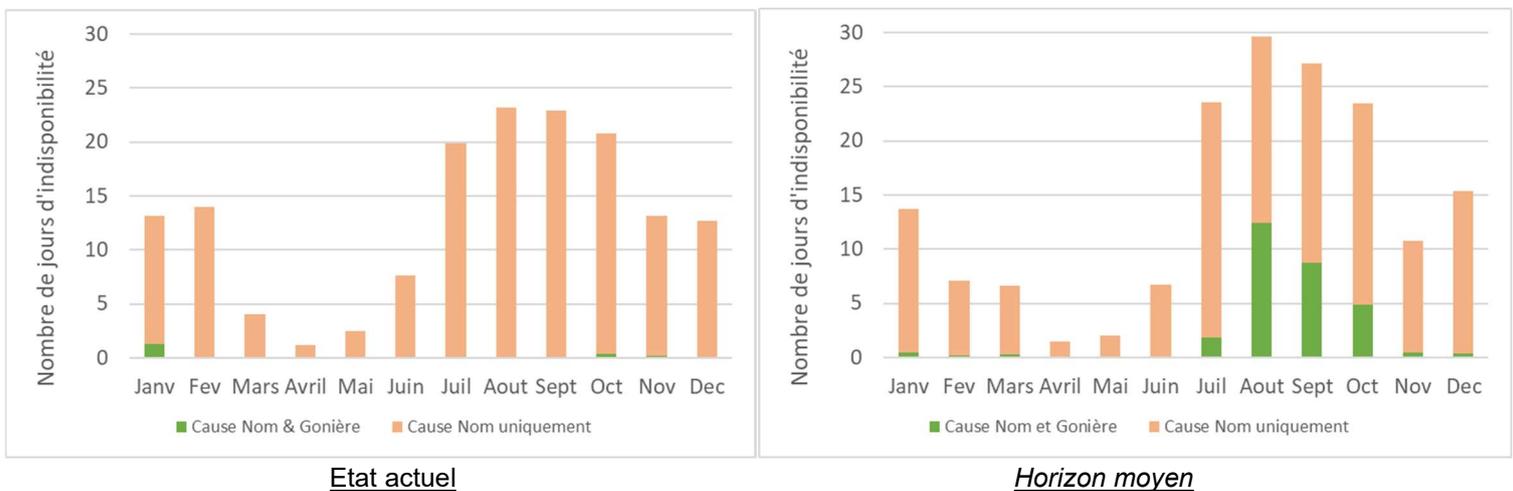
Le reste de l'année la ressource est davantage disponible avec une atteinte du débit maximum de prélèvement très fréquente pendant la fonte et qui peut durer en moyenne deux mois d'affilé (avril-mai) et jusqu'à quatre mois pour des années plus humides que la normale. Pendant ces périodes le volume prélevable est de l'ordre de 100 000 m³ par mois

Il est également pertinent de s'intéresser aux périodes où il est impossible de prélever.

Les graphiques suivants montrent le nombre de jours moyens par mois où il est impossible de prélever au captage de Gonière en fonction de la cause d'indisponibilité :

- En orange il s'agit du nombre de jours où le débit du Nom est sous le seuil des 520 l/s alors que de la ressource serait disponible en surplus de l'AEP.
- En vert il s'agit du cas où le débit du Nom est sous le seuil des 520 l/s et qu'en plus il n'y a plus d'eau disponible pour la neige après prélèvement AEP.

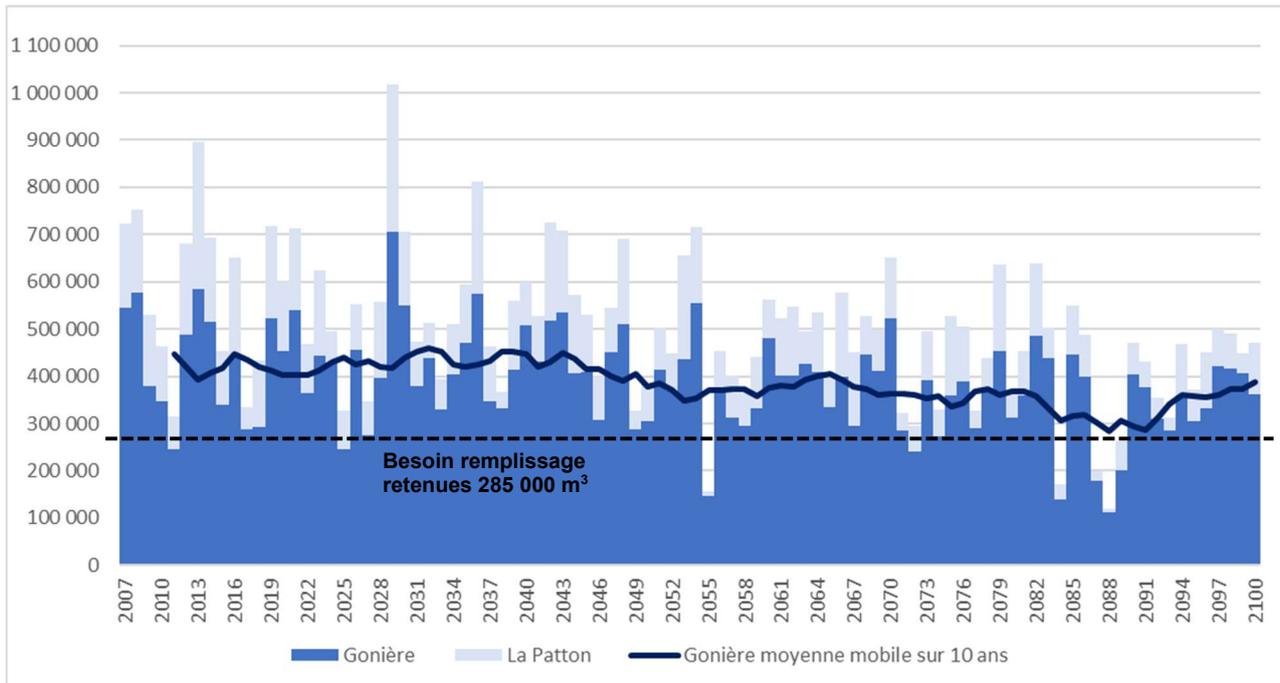
Le cas où la ressource est indisponible après prélèvement AEP mais que le débit du Nom est supérieur à 520 l/s ne se présente jamais ce qui montre que la condition de prélèvement basée sur le seuil du Nom aux Lombardes est plus limitante que la ressource à Gonière elle-même.



Ces graphiques montrent qu'à l'état actuel, l'indisponibilité est quasiment toujours liée au débit du Nom uniquement. Ce n'est plus le cas à l'horizon moyen où la ressource à Gonière serait également indisponible pendant certaines périodes en été (en moyenne 25 jours sur toute la période estivale). Les débits du Nom peuvent potentiellement être inférieurs à 520 l/s n'importe quand dans l'année mais de façon beaucoup moindre pendant le printemps.

Le volume maximum de prélèvement autorisé est de 405 000 m³. Le remplissage des retenues représentant un stockage total de 271 000 m³ a lieu en présaison. Concrètement l'exploitant prélève environ 285 000 m³ pour le remplissage en présaison. La différence vient des pertes (fuites, évaporation). Les 120 000 m³ autorisés restant peuvent être utilisés en décembre et janvier pour reremplir les retenues pendant la première campagne de production et compléter l'enneigement en cours de saison.

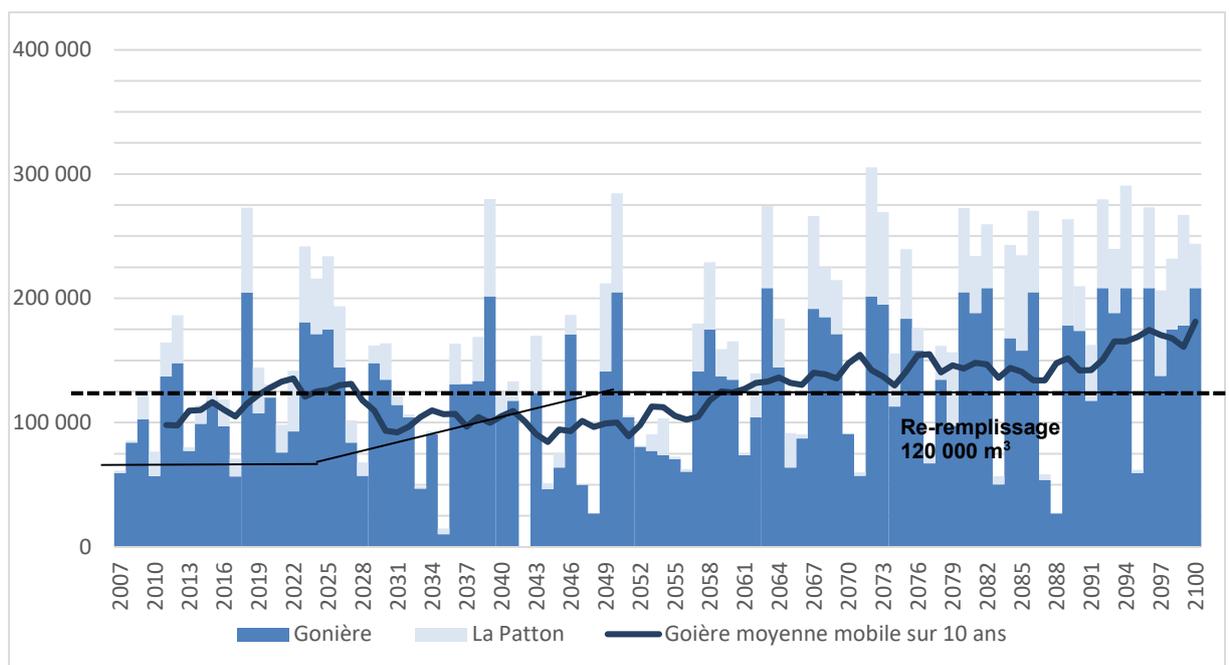
Le graphique suivant présente la ressource disponible à Gonière et la Patton durant la période d'avril à novembre :



Volumes disponibles pour la neige d'avril à novembre

Le ressource en présaison est et sera en général largement disponible pour remplir les retenues, hormis quelques rares années. Les possibilités d'alimentation des lacs restent donc pérennes. Aujourd'hui le volume moyen annuel potentiellement disponible à Gonière pour la neige est d'environ 430 000 m³ sur cette période, il tend à se réduire aux alentours de 350 000 m³ à l'horizon moyen

Le graphique suivant présente la ressource disponible à Gonière et la Patton durant la période de décembre et janvier :

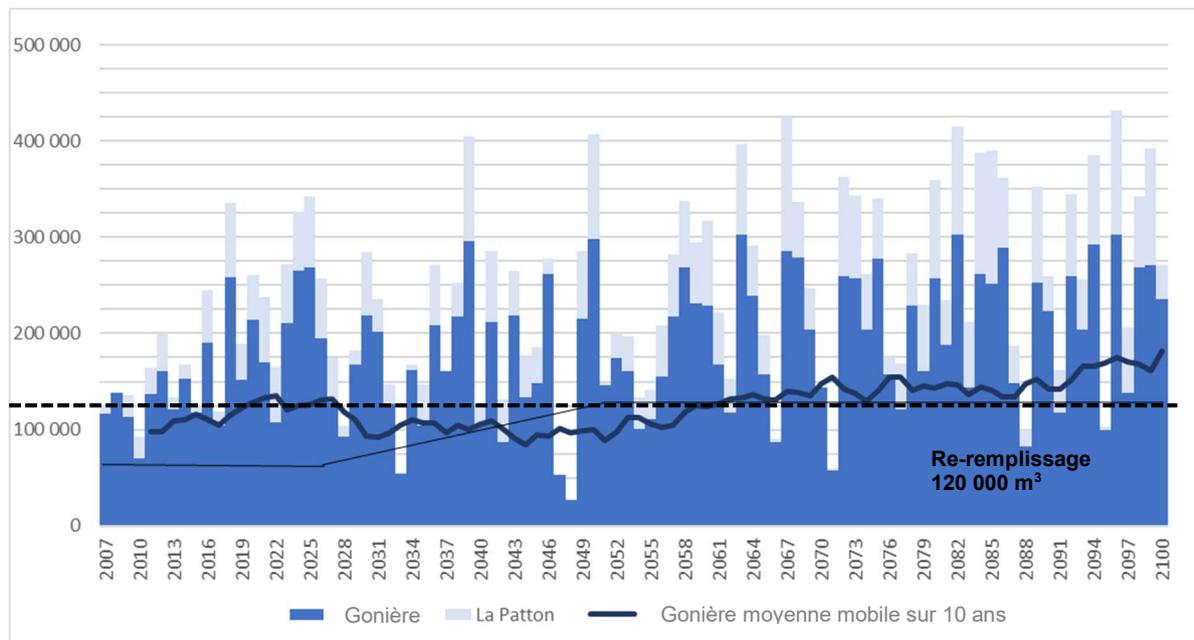


Volumes disponibles pour la neige de décembre et janvier

En cours de saison, bien que la ressource hivernale moyenne tende à augmenter en raison des précipitations sous forme liquide plus fréquente et une fonte du manteau neigeux, la variabilité interannuelle de la ressource demeure importante.

Si l'on considère les apports des mois de décembre et janvier, la totalité du besoin supplémentaire potentiel (120 000 m³ restant sur les 405 000 m³) en cours de saison est plus incertain aujourd'hui mais pourra être satisfait environ deux années sur trois à partir de l'horizon moyen.

En considérant également les apports du mois de février comme le montre le graphique suivant, il sera possible d'assurer d'atteindre la totalité du besoin au courant du mois de février, hormis quelques rares années dans le futur (<1 année sur 10).



Volumes disponibles pour la neige de décembre à février

Ces constatations montrent que la ressource sera globalement disponible pour exploiter la totalité du droit d'eau de la station. Toutefois lors de certains hivers, le re-remplissage des retenues pour compléter l'enneigement suite à la première campagne de production pourra être insuffisante en milieu de saison (janvier-février) pour assurer la totalité de l'enneigement potentiel. Ces manques provisoires pourront être gérés par une priorisation des pistes à enneiger tant que des volumes de stockages supplémentaires ne seront pas disponibles.

9 Conclusion

Cette étude a permis de montrer les tendances d'évolution future de la ressource en eau à la Clusaz.

A l'horizon moyen, l'hydrologie annuelle sera peu diminuée (-5%) mais ne se répartira pas de la même façon au cours de l'année. Globalement la période de fonte sera avancée ce qui impliquera des débits hivernaux plus forts mais une avancée dans le temps et une diminution de l'intensité de la période de hautes eaux. Les périodes d'étiage estivale devraient être encore plus sèches et longues. La ressource en automne semble relativement peu modifiée.

La majorité des prélèvements (AEP et neige) proviennent du captage de Gonière. Les prélèvements neige y sont conditionnés notamment par les débits du Nom à l'aval de la Clusaz.

L'hydrologie à ce captage et celle du Nom ont été modélisés ce qui a permis de caractériser la ressource actuelle et future grâce aux données de modélisations climatiques.

La confrontation de cette ressource avec les besoins AEP montrent que la ressource sera largement disponible pour assurer la distribution AEP à Gonière avec un surplus conséquent pour la neige hormis en période estivale ou des tensions pourraient survenir en cas d'année particulièrement sèche ($T > 5$ ans).

Les prélèvements neige sont principalement limités par le respect du seuil de 520 l/s du Nom aux Lombardes qui est un débit de moyennes/basses eaux. Ce débit est couramment atteint durant l'année et de façon beaucoup plus fréquente et durable en été.

Néanmoins la ressource disponible pour la neige selon les modalités de prélèvement actuelles devrait rester suffisante en présaison (avril-nov) pour remplir l'ensemble de retenues hormis quelques rares années ($T > 10$ ans). Le re-remplissage en hiver sera également possible mais pourra être insuffisant une année sur trois avec uniquement la ressource de décembre-janvier nécessitant des compléments en février et une priorisation des pistes à enneiger.