

Évolution des écosystèmes aquatiques alpins dans un contexte de changement climatique et d'augmentation des pressions anthropiques.



Equipes de recherche ZABR:

RIVERLY (INRAE) : S. Cauvy-Fraunié, N. Lamouroux, M. Forcellini, J. Becquet, B. Launay

CEN (CNRM): I. Gouttevin

IGE (UGA): T. Condom, A. Rabatel, J. Bolibar, A. Lemoine

LEHNA (Lyon1) : F. Malard

Thème de rattachement ZABR :

Changements climatiques et ressources

Thème de rattachement Agence de l'Eau :

Incidences et adaptations changement climatique Q1-Q40

Site ou Observatoire de rattachement ZABR :

Site atelier Arc-Isère : bassin versant de l'Arvan



INTRODUCTION

Les bassins versants de montagne forment des réseaux hydrographiques particulièrement complexes résultant de la combinaison de diverses sources d'eau: eaux de fonte glaciaire, neigeuse, eaux souterraines et précipitations (Hannah et al. 2007). Chaque source d'eau présente des caractéristiques hydrologiques et physico-chimiques distinctes, formant des habitats spécifiques qui abritent des communautés aquatiques particulières. Ainsi, au sein des bassins versants alpins, le mélange des différentes sources d'eau crée une mosaïque d'habitats générant une forte hétérogénéité environnementale, ce qui induit une forte variabilité spatiale de communautés aquatiques (Cauvy-Fraunié et al. 2015a). En raison de leur isolement, ces écosystèmes sont souvent encore considérés comme *pristine ecosystem*. Cependant, le changement climatique et les modifications hydrologiques associées risquent d'avoir de profondes répercussions sur la biodiversité aquatique alpine (Milner et al. 2017). En particulier, le réchauffement est plus rapide en altitude (Pepin et al. 2015), entraînant de profondes répercussions sur les multiples réservoirs d'eau de montagnes, tels que les glaciers, la couverture neigeuse, les lacs alpins et les zones humides.

Dans le monde entier, la plupart des glaciers de montagne ont reculé depuis la fin du petit âge glaciaire (il y a environ 150-250 ans), recul qui s'est accéléré au cours des cinq dernières décennies (GIEC, 2022 ; Zemp et al. 2019) et qui va continuer tout au long du XXI^e siècle (Hock et al. 2019). À titre d'exemple, dans les Alpes, les glaciers ne recouvraient plus que 1800 km² en 2015 (soit 14 % de moins qu'en 2003), dont 227 km² dans les Alpes françaises (soit 24 % de moins qu'en 2003 ; Paul et al. 2020). Étant donné que la plupart de ces glaciers sont de petite taille (62,5 % étaient inférieurs à 0,1 km² en 2015) et situés en dessous de 3500 m d'altitude, et compte tenu des différents scénarios climatiques, il est prévu que 76 à 97 % du volume actuel des glaciers alpins disparaisse au cours de ce siècle (Beniston et al. 2018). À l'échelle du bassin versant, le recul des glaciers induira d'abord une augmentation du débit annuel des eaux de fonte glaciaire jusqu'à un volume critique du glacier, suivie d'une diminution jusqu'à la perte totale des eaux de fonte lorsque le glacier aura disparu. Plusieurs bassins versants alpins ont déjà dépassé le point de bascule hydrologique du débit moyen maximal associé au retrait glaciaire (Huss & Hock, 2018). Cependant, en tête de bassin versant, à proximité des glaciers (c.-à-d. à quelques kilomètres du front glaciaire), les eaux de fonte glaciaire sont encore abondantes pendant la période estivale et contribuent significativement au débit annuel. De plus, la couverture neigeuse est également affectée par le réchauffement climatique (Matiu et al. 2021). Dans les Alpes, la durée de la couverture neigeuse a diminué de 22 à 35 jours au cours des 50 dernières années entre 1000 et 2000 m d'altitude et la hauteur moyenne de la couverture neigeuse hivernale a diminué d'environ 8 % en dessous de 2000 m d'altitude. On prévoit une réduction comprise entre 10 et 40 % à l'horizon 2050 et entre 30 et 80 % de la couverture neigeuse pour la fin du siècle selon les scénarios d'émissions (GIEC, 2022). De plus, les changements de température réduisent l'accumulation de neige en hiver et affectent la date de la fonte des neiges qui a lieu plus tôt au printemps (Barnett et al. 2005). Ainsi, la modification des flux et des stocks d'eau dans les réservoirs de montagne (glaciers, lacs, compartiment souterrain, etc.) sous l'effet du changement climatique a des répercussions hydrologiques profondes sur les bassins versants de montagne, à savoir une modification de la quantité, de la date et de la durée de la contribution en eau de fonte. Ceci conduit, à l'échelle du bassin versant, à des changements de la ressource globale annuelle en eau et à une réduction de la contribution des eaux de fonte et, à l'échelle du tronçon, à une diminution du débit des eaux de fonte, une intermittence accentuée, voir une extinction complète du ruissellement dans les cours d'eau.

Par ailleurs, les régions alpines ne font pas exception en matière de pressions anthropiques sur la ressource en eau (Campion, 2002). Alors qu'ils ont historiquement été assimilés à des châteaux d'eau des zones en aval avec une ressource en eau considérée presque illimitée, les bassins versants alpins sont, au contraire, soumis à de très fortes pressions sur la ressource. Le captage d'eau dans ces régions ne cesse d'augmenter pour pallier aux besoins croissants des stations de ski pour l'eau domestique et la neige de culture (le volume d'eau prélevé pour la production de neige a augmenté de 1 million de m³ par an entre 1995 et 2008 à l'échelle nationale ; Badre et al. 2009). Cette demande croissante, essentiellement pendant les périodes de forte affluence touristique, coïncide avec la période d'étiage hivernal, ce qui, dans un contexte de changement climatique augmente les risques de conflit au niveau du partage de la ressource entre les usagers (Magnier, 2013). Enfin, le développement des microcentrales hydroélectriques (< 500kW) ne cesse de croître en altitude (Gabbud & Lane, 2016). Ces perturbations accentuent les altérations hydrologiques liées à la fonte des glaciers et à la modification de la couverture neigeuse (altération du régime hydrologique à l'échelle locale et de l'hétérogénéité environnementale et de la connectivité à l'échelle du bassin versant). Ces altérations environnementales multi-échelles risquent d'engendrer des effets considérables aussi bien sur la structure que sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques alpins (Milner et al. 2017).

Bien qu'il existe, à l'échelle mondiale, un certain nombre d'études écologiques sur les rivières alpines, notamment dans les bassins versants sous influence glaciaire (Brown et al. 2007, Jacobsen et al. 2012, Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019), nous n'avons actuellement pas les connaissances suffisantes ni les outils nécessaires pour modéliser ces écosystèmes complexes et prévoir la réponse de la biodiversité alpine face aux multiples altérations hydrologiques. Ceci est dû, d'une part, à l'insuffisance de suivi écologique sur le long terme dans ces systèmes et, d'autre part, à l'absence d'études intégratives et interdisciplinaires à l'échelle du bassin versant. En effet, à l'heure actuelle, aucune étude n'a examiné simultanément les effets relatifs des conditions physico-chimiques, des caractéristiques hydrauliques et du régime hydrologique sur la structure des communautés aquatiques. De plus, l'approche '*habitat hydraulique*' qui permet de quantifier l'impact des altérations hydrologiques sur les communautés aquatiques, particulièrement appliquée en France (Lamouroux et al. 2016), n'a pas encore été adaptée aux systèmes alpins, hors zones à truite. Cette approche couple des modèles hydrauliques avec des modèles biologiques de préférences hydrauliques des organismes. Les modèles hydrauliques permettent de déterminer, à l'échelle de la section d'un cours d'eau, la distribution des fréquences d'habitats hydrauliques (vitesses, hauteurs d'eau, substrats, contraintes de cisaillement au fond) en fonction du débit (Lamouroux et al. 1992, Girard et al. 2014). Les modèles biologiques de préférences hydrauliques des organismes relient la densité des organismes avec les habitats hydrauliques (Doledec et al. 2007, Merigoux et al. 2009). Par conséquent, il est nécessaire dans un premier temps d'identifier les organismes (parmi les macroinvertébrés benthiques) qui doivent être considérés pour évaluer la qualité de l'habitat hydraulique des cours d'eau de montagne et dans un second temps de construire les modèles biologiques de préférences hydrauliques de ces organismes.

L'objectif principal de ce projet est d'étudier l'impact des altérations hydrologiques dues au changement climatique et à l'augmentation des pressions anthropiques sur les écosystèmes aquatiques des bassins versants alpins. Cette étude a été réalisée sur la partie amont du bassin versant de l'Arvan, un site atelier Arc-Isère labellisé par la ZABR, déjà très instrumenté, et qui servira de base à une étude régionale sur l'impact des altérations hydrologiques sur les écosystèmes aquatiques alpins. Ce sous bassin versant de 58 km² se situe entre 1400 m d'altitude à Saint-Jean-d'Arves à 3463 m au Pic de l'Etendard. Il inclut le glacier de Saint-Sorlin, un glacier suivi par le Service National d'Observation GLACIOCLIM

(<https://glacioclim.osug.fr/>) depuis plus de 50 ans. De plus, l'export sédimentaire lié à la fonte nivoglaciale de ce bassin versant est étudié sur l'Arvan à partir de mesures continues de débit et de concentrations en sédiments fin depuis plus de 10 ans à Saint-Jean-d'Arves (<https://bdoh.irstea.fr/ARC-ISERE/>; Tholet et al. 2021). Enfin, quatre stations du réseau Météo-France, réparties sur le bassin de l'Arvan, mesurent la température de l'air et les précipitations. Ce bassin versant constitue donc un site idéal pour réaliser une étude représentative glacio-hydro-écologique grâce à l'abondance des données historiques et aux mesures continues des données météorologiques, glaciologiques et hydrologiques.

Les objectifs de ce projet à l'interface entre glaciologie, hydrologie et écologie sont:

- d'estimer les ressources en eau du bassin versant de l'Arvan
- de déterminer les altérations hydrologiques résultant du changement climatique et des prélèvements
- de caractériser les régimes hydrologiques, les habitats hydrauliques et les conditions environnementales des rivières alpines
- de définir la composition des communautés de macroinvertébrés aquatiques
- d'identifier les relations entre les habitats et les macroinvertébrés aquatiques
- de hiérarchiser les facteurs d'impacts sur les macroinvertébrés aquatiques
- d'identifier les espèces cibles à considérer pour l'établissement futur de débits écologiques des cours d'eau alpins

Pour répondre à ces objectifs, le rapport est structuré en quatre parties :

- Une étude glaciologique sur le glacier de Saint-Sorlin qui décrit le glacier à l'heure actuelle (superficie, volume, bilan de masse), caractérise son évolution (passée et future) et quantifie sa contribution hydrologique (eau de fonte glaciaire)
- Une étude hydrologique du sous bassin versant de l'Arvan qui décrit le bassin versant (couverture des sols, précipitation liquide et solide), caractérise le régime hydrologique à l'exutoire (débit journalier, mensuel), son évolution passée et quantifie la contribution en eau de fonte glaciaire et nivale
- Une enquête sur les différents usages de l'eau qui décrit les prélèvements (type d'usages et volume)
- Une étude écologique sur les macroinvertébrés benthiques qui décrit la composition des communautés (densité, richesse, espèces spécifiques) selon les rivières alpines et caractérise les relations entre conditions hydrologiques, hydrauliques et physico-chimiques et les macroinvertébrés (à l'échelle de la communauté et des taxons).

Table des matières

INTRODUCTION	2
I. GLACIOLOGIE	7
<i>I.1 Evolution du glacier et de sa contribution hydrologique au cours de la période d'observations</i>	<i>8</i>
I.1.1. Superficie du glacier	8
I.1.2. Bilan de masse de surface de l'ensemble du glacier	8
I.1.2.1. Bilan de masse annuel	8
I.1.2.2. Ablation et fonte estivale	9
<i>I.2 Simulation de l'évolution future du Glacier de Saint-Sorlin</i>	<i>10</i>
1.2.1. Description générale de la démarche	10
I.2.2. Scénarios et modèles climatiques utilisés	11
I.2.3. Simulations de l'évolution future du Glacier de Saint-Sorlin	14
I.2.4. Incertitudes sur les simulations	18
<i>I.3. Conclusion</i>	<i>19</i>
II. PLUIE, NEIGE ET HYDROLOGIE GÉNÉRALE	20
<i>II.1 Caractéristiques générales du bassin versant</i>	<i>20</i>
<i>II.2 Données</i>	<i>21</i>
II.2.1 Données météorologiques	21
II.2.1.1 SPAZM	21
II.2.1.2 SAFRAN	22
II.2.2 Neige <i>in situ</i>	22
II.2.3 Données hydrologiques	22
II.2.3.1 Station hydrométrique de Saint-Jean-d'Arves	22
II.2.3.2 Station hydrométrique Arvan Glacier	23
<i>II.3 Modélisation glacio-hydro-nivologique avec J2000</i>	<i>25</i>
II.3.1 Principes de la modélisation	25
II.3.2 Performances de la modélisation avec J2000	26
<i>II.4 Caractérisation hydro-météorologique du bassin versant</i>	<i>28</i>
II.4.1 Météo et Neige	28
II.4.2. Contributions nivales et glaciaires au débit à l'exutoire	29
<i>II.5. Conclusion</i>	<i>33</i>
III. USAGES ET PRELEVEMENTS	34
IV ECOLOGIE	38
<i>IV.1 Caractéristiques des habitats des rivières alpines</i>	<i>38</i>
IV.1.1 Sites d'étude	38
III.1.2 Régimes hydrologiques des rivières alpines	39
III.1.3 Conditions physico-chimiques et hydrauliques	40
<i>III.2. Macroinvertébrés des rivières alpines</i>	<i>41</i>
III.2.1 Composition des communautés benthiques	41
III.2.2. <i>Rhithrogena delphinensis</i> , une espèce particulière	45
<i>III.3 Facteurs d'impact des macroinvertébrés</i>	<i>46</i>
III.3.1 Sites d'étude (3 bassins versants sous influence glaciaire)	46

III.3.2 Lien entre habitats et communautés	48
III.3.3 Lien entre habitats et populations	51
<i>III.4 Conclusion</i>	56
CONCLUSION GENERALE	58
IMPACT ET BENEFICES DU PROJET	60
<i>Publications scientifiques</i>	60
<i>Conférences</i>	60
<i>Poster</i>	61
<i>Etudiants</i>	61
<i>Research outcomes</i>	62
REFERENCES	63
APPENDICES	66
<i>Appendice 1. Liste des références utilisées pour l'identification des macroinvertébrés.</i>	66
<i>Appendice 2. Liste des taxons identifiés dans les trois bassins versants (Arvan, Vanoise, Arve)</i>	69

I. GLACIOLOGIE

Le bassin versant de l'Arvan inclut le Glacier de Saint-Sorlin. Ce glacier, illustré sur la figure 1, était d'une superficie d'environ 2 km² en 2015 (superficie importante par rapport aux glaciers des Alpes françaises dont la superficie moyenne est de 0,5 km² ; Gardent et al. 2014), qui s'étend de 3463 m à 2700 m (Fig. 1b). Le Glacier de Saint-Sorlin est instrumenté pour le suivi de son bilan de masse (Fig. 1c) de surface depuis 1957 (Vincent et al. 2020). Il fait partie des glaciers suivis par le Service National d'Observation GLACIOCLIM (<https://glacioclim.osug.fr/>) coordonné par l'Institut des Géosciences de l'Environnement à Grenoble (Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD).

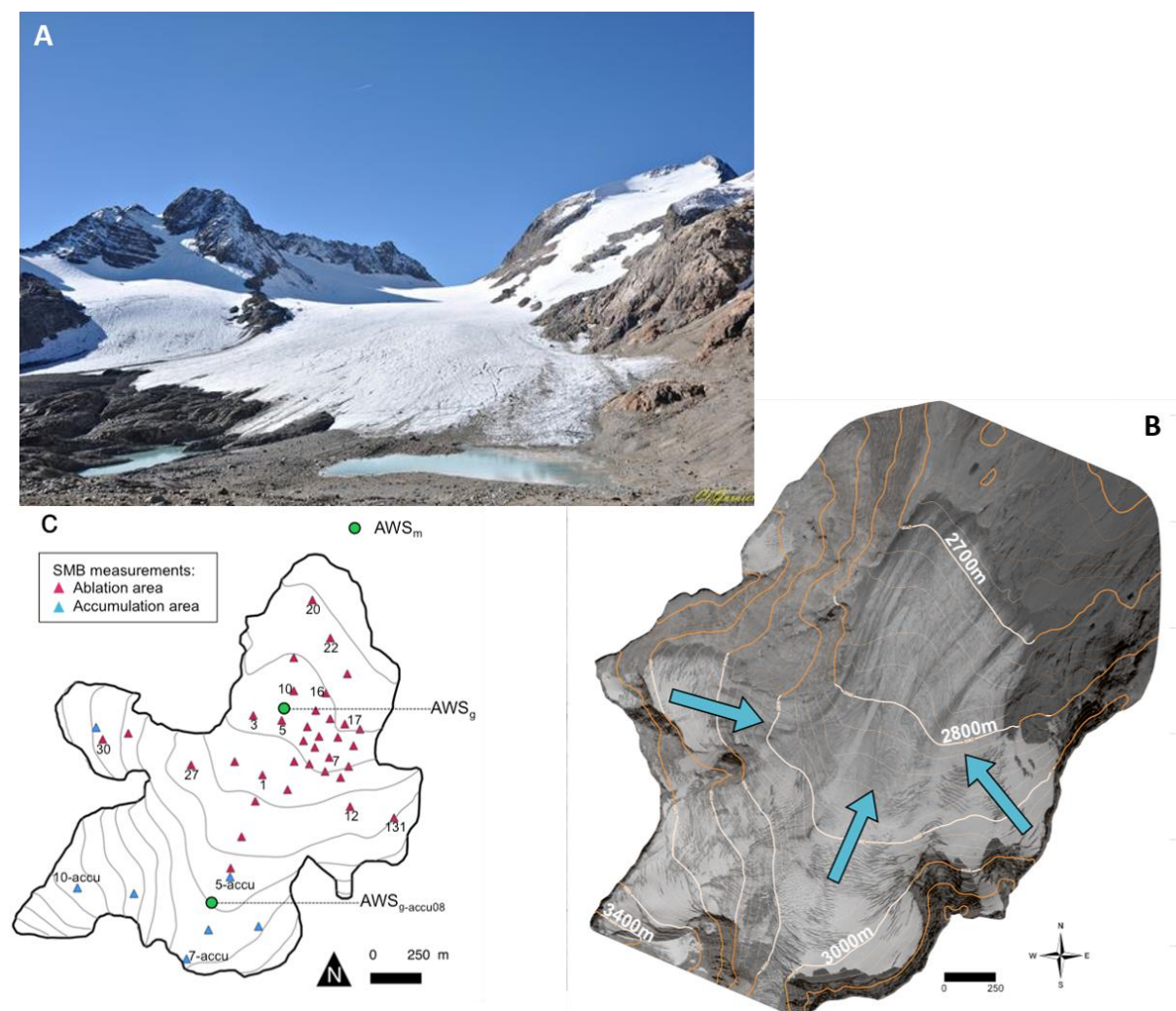


Figure 1. (A) Glacier de Saint-Sorlin (Massif des Grandes Rousses) (B) Photo aérienne de Saint-Sorlin (2003). Les flèches bleues indiquent les directions d'écoulement de la glace (C) Carte de Saint-Sorlin avec le réseau de points de mesures glaciologiques en zone d'ablation (triangles rouges) et d'accumulation (triangles bleus). Les points verts représentent l'emplacement des stations météorologiques : AWS_m pour celle pérenne sur la zone proglaciaire, AWS_g pour celles installées à la surface du glacier durant l'été 2008 uniquement

I.1 Evolution du glacier et de sa contribution hydrologique au cours de la période d'observations

I.1.1. Superficie du glacier

A l'échelle des Alpes françaises, plusieurs inventaires glaciaires ont été réalisés à partir de différentes sources de données : photographies aériennes historiques (depuis le milieu du XX^{ème} siècle) réalisée pour l'Institut Géographique National pour des besoins de cartographie du territoire ; cartes topographiques ; images satellites optiques (type SPOT, LANDSAT, ASTER et Sentinel-2). Ces données ont été publiées dans différents articles scientifiques (*e.g.*, Gardent *et al.* 2014; Paul *et al.* 2020) et sont mises à disposition de la communauté *via* l'initiative internationale *Global Land Ice Measurement from Space* (GLIMS, <http://www.glims.org/>). La figure 2 illustre la perte de surface du glacier de Saint-Sorlin qui s'élève à plus de 40% entre 1952 et 2015. Le contour de 1952 est issu de l'exploitation de photographies aériennes, celui de 1970 est issu de la première cartographie en 1/25000 (Série Bleue), ceux de 1985 et 2003 sont issus d'images optiques du satellite Landsat 5 (USGA, NASA), et celui de 2015 est issu d'images du satellite Sentinel-2 (ESA).

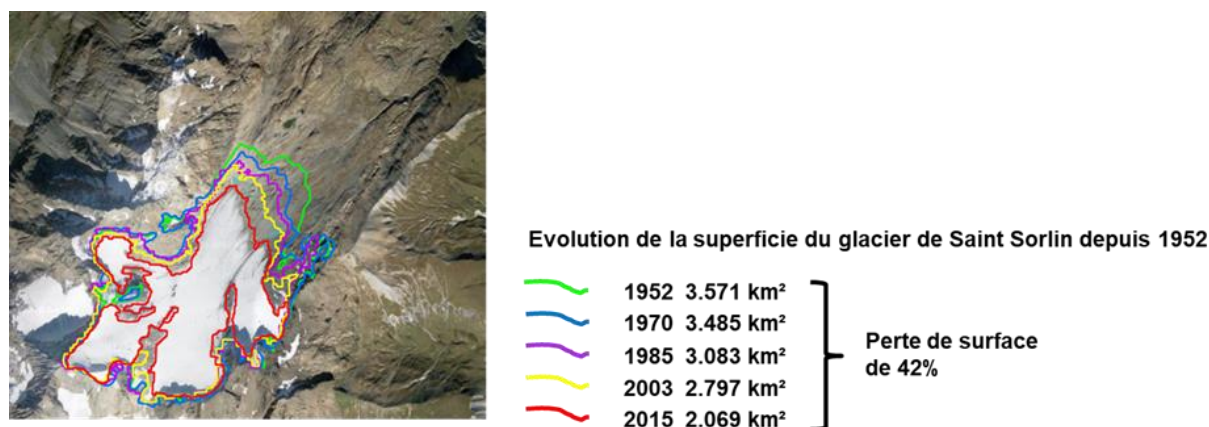


Figure 2. Evolution de la superficie du glacier de Saint-Sorlin entre 1952 et 2015

I.1.2. Bilan de masse de surface de l'ensemble du glacier

I.1.2.1. Bilan de masse annuel

Le bilan de masse du glacier est mesuré sur le terrain à partir d'un réseau de points (Fig. 1c) où sont mesurées l'accumulation (en général durant la seconde quinzaine d'avril quand l'enneigement est à son maximum), puis l'ablation à une fréquence quasi-mensuelle durant la période de fonte (entre mai et octobre). Les mesures d'accumulation sont faites à partir de carottages de la couche de neige accumulée pendant la période hivernale (mesure de l'épaisseur et de la densité de la couche de neige). L'ablation est mesurée à partir de balises en bois plantées dans la neige et la glace dont l'émergence à la surface du glacier augmentant au cours de la saison estivale est mesurée pour quantifier la fonte cumulée à chaque balise pendant la période séparant deux campagnes de mesures de terrain. La somme des termes d'accumulation et d'ablation permet de connaître le bilan de masse de l'année en chaque point. A l'échelle du glacier, les données ponctuelles sont interpolées en utilisant l'approche proposée par Lliboutry (1974) pour quantifier le bilan de masse sur l'ensemble de la surface (Vincent *et al.* 2000).

La figure 3 illustre le bilan de masse de surface pour l'ensemble du Glacier de Saint-Sorlin cumulé sur la période 1957-2018. La perte totale est de près de 48 m w.e. (*water equivalent*), ce qui équivaut à enlever une épaisseur moyenne de 48 m équivalent eau liquide (plus de 40 m d'épaisseur de glace) sur l'ensemble de la surface du glacier pour cette période, soit une moyenne annuelle de près de 0,8 m w.e./an. On note que la perte de masse est loin d'être homogène sur la période de mesures. Elle est très limitée pour la première moitié de la période considérée (environ 5 m w.e. en 30 ans, entre la fin des années 1950 et la fin des années 1980). Sur la seconde moitié (environ 30 ans entre la fin des années 1980 et la fin des années 2010), la perte cumulée est de plus de 40 m w.e. avec une augmentation notable à partir des années 2000.

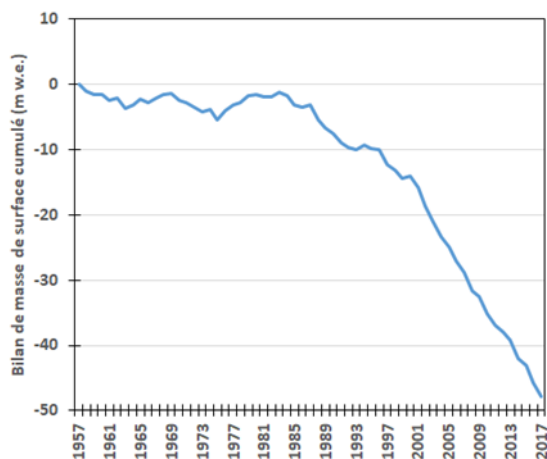


Figure 3. Bilan de masse cumulé du glacier de Saint-Sorlin entre 1957 et 2018

I.1.2.2. Ablation et fonte estivale

A partir des mesures mensuelles des balises d'ablation de la période 1996-2012, Réveillet et al. (2017) ont pu caler les paramètres d'un modèle permettant de quantifier la fonte journalière sur l'ensemble du glacier à partir des températures de l'air, de l'insolation potentielle et de facteurs de fonte spécifiques pour la neige et la glace. Cette approche de modélisation fait partie de la famille des approches dites "degrés-jour". Une fois quantifiée à l'échelle journalière, la fonte de l'ensemble du glacier peut être agrégée au pas de temps mensuel ou saisonnier. Ces résultats sont illustrés sur la figure 4. La figure 4A présente l'évolution de la fonte sur l'ensemble de la période d'ablation (moyenne sur la période avril-octobre) entre 1996 et 2012. On note une variabilité interannuelle importante (entre 450 et 720 L/s), notamment compte-tenu d'années à très forte ablation comme l'année 2003. A l'échelle mensuelle, la figure 4B illustre la fonte du glacier (de neige, puis de neige et de glace) pour chaque mois de la période d'ablation. Elle augmente progressivement au cours du printemps pour atteindre sa valeur maximale en août (environ 900 L/s en moyenne pour la période 1996-2012). On note que la fonte du glacier est encore conséquente en septembre (environ 600 L/s en moyenne pour la période 1996-2012) et en octobre (un peu moins de 400 L/s en moyenne pour la période 1996-2012), des mois pour lesquels le manteau neigeux hors glacier a généralement complètement disparu au sein du bassin versant de l'Arvan, faisant du Glacier de Saint-Sorlin un contributeur essentiel au débit de l'Arvan.

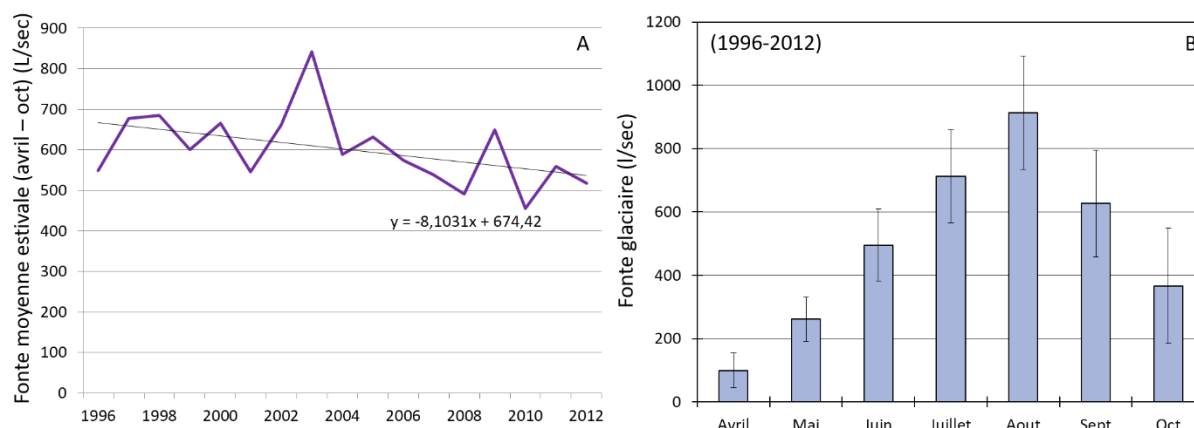


Figure 4. (A) Fonte moyenne estivale pour chaque année pour l'ensemble de la surface du Glacier de Saint-Sorlin au cours de la période 1996-2012 (B) Fonte mensuelle moyennée sur la période 1996-2012 (entre avril et octobre) pour l'ensemble de la surface du Glacier de Saint-Sorlin

I.2 Simulation de l'évolution future du Glacier de Saint-Sorlin

1.2.1. Description générale de la démarche

L'approche mise en œuvre pour simuler l'évolution future du Glacier de Saint-Sorlin utilise le modèle d'évolution de glaciers ALPGM (pour ALPine Parameterized Glacier Model), lequel a été développée dans le cadre de la thèse de doctorat de Jordi Bolibar (UGA, INRAE) à l'Institut des Géosciences de l'Environnement. La description exhaustive de cette chaîne de modélisation a fait l'objet d'une publication en anglais dans la revue internationale à comité de lecture « The Cryosphere » en open access et auquel nous renvoyons le lecteur (Bolibar et al. 2020). Pour des raisons de concision, nous ne décrivons ici que les grandes lignes et principales étapes de la chaîne de modélisation.

ALPGM est une chaîne de modélisation pour l'évolution des glaciers, open-source et codée en Python (<https://github.com/JordiBolibar/ALPGM>). Elle peut être divisée en deux étapes : (1) la simulation du bilan de masse de surface du glacier ; et (2) la simulation du changement de la géométrie du glacier. La première étape est basée sur une approche d'apprentissage automatique avec des réseaux de neurones, en prenant comme données d'entrée des variables météorologiques et topographiques. La seconde étape est basée sur une fonction paramétrée spécifique au glacier considéré qui permet d'actualiser annuellement la géométrie du glacier en fonction des valeurs du bilan de masse de surface du glacier simulées par l'étape 1.

L'exécution de la chaîne de traitement est configurée *via* l'interface graphique du modèle, ce qui permet d'exécuter ou de sauter l'une des étapes suivantes :

1. Les données de forçage météorologiques sont prétraitées afin d'extraire les données nécessaires au plus près du centroïde du glacier.
2. Les données de forçage météorologique et topographique, qui constituent les variables explicatives, ainsi que les valeurs de bilans de masse de surface annuels du glacier sur la période historique sont utilisées pour entraîner le réseau de neurones artificiels afin d'établir une relation statistique entre le bilan de masse et les variables explicatives.

3. Les performances de ce modèle peuvent être évaluées au moyen d'une validation croisée "leave-one-glacier-out" (LOGO) ou "leave-one-year-out" (LOYO). Ceci permet d'évaluer la performance du modèle dans les dimensions spatiale et temporelle. Cette étape peut être omise si l'on utilise des modèles déjà établis. Des mesures de performance statistique de base sont données (corrélation, RMSE).
4. Le composant de mise à jour de la géométrie du glacier commence par la génération de la fonction paramétrée spécifique au glacier en utilisant des modèles numériques de terrain (MNT) présélectionnés couvrant la zone d'étude pour des dates distinctes, ainsi que les contours des glaciers.
5. Une fois les étapes précédentes exécutées, les simulations d'évolution future sont lancées. Pour chaque glacier, la carte initiale des épaisseurs de glace et la fonction paramétrée sont récupérées. Les données météorologiques au niveau du centroïde des glaciers sont calculées avec un pas de temps annuel à partir des simulations climatiques disponibles et sur la base de l'évolution des caractéristiques topographiques du glacier. Ces données météorologiques sont utilisées pour simuler le bilan de masse annuel de surface à l'échelle du glacier en utilisant le modèle issu du réseau de neurones artificiels. Une fois qu'une valeur de bilan de masse annuel de surface du glacier est obtenue, les changements de géométrie sont calculés à l'aide de la fonction paramétrée, ce qui permet de mettre à jour le modèle numérique de terrain du glacier, la cartographie des épaisseurs de glace et le contour du glacier.

I.2.2. Scénarios et modèles climatiques utilisés

Les données de forçage utilisées par ALPGM sont les températures moyennes journalières de l'air et les cumuls journaliers de précipitations. Pour les simulations futures, ces données sont issues de la méthode ADAMONT (Verfaillie et al. 2017) développée par Météo-France qui vise à ajuster les projections de plusieurs couples de modèles climatiques globaux (GCM) et régionaux (RCM), produits dans le cadre du projet Euro-Cordex, pour les rendre applicables en zones de montagne. La méthode ADAMONT exploite les données climatologiques issues de la réanalyse SAFRAN (Durand et al. 2009) pour caractériser des relations statistiques entre SAFRAN et chaque couple de GCM- RCM pendant la période historique (1950-2005). Ces relations sont ensuite utilisées pour ajuster les projections futures 2006-2100, en utilisant plusieurs scénarios d'émission de gaz à effet de serre (RCP). Le tableau 1 présente les 13 combinaisons de couple de GCM-RCM disponibles dans le cadre d'Euro-Cordex et ajustées par la méthode ADAMONT. Il est important de noter que l'ensemble de ces combinaisons de modèles ont été utilisées dans Euro-Cordex en considérant les scénarios RCP 4.5 (scénario moyen) et 8.5 (scénario pessimiste), mais que seules trois d'entre elles ont été utilisées en considérant le scénario optimiste (RCP 2.6).

Tableau 1: Liste des combinaisons de modèles climatiques globaux (GCM) et régionaux (RCM) disponibles via Euro-Cordex, ajustées via la méthode ADAMONT, et utilisées pour la simulation de l'évolution future du Glacier de Saint-Sorlin. Pour chaque combinaison de modèles, sont indiqués les scénarios climatiques pour lesquels les données sont disponibles

Combinaison de GCM-RCM	Scénarios disponibles
CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCP 4.5, RCP 8.5
CLMcom-CCLM4-8-17_ICHEC-EC-EARTH	RCP 4.5, RCP 8.5
CLMcom-CCLM4-8-17_MOHC-HadGEM2-ES	RCP 4.5, RCP 8.5
CLMcom-CCLM4-8-17_MPI-M-MPI-ESM-LR	RCP 4.5, RCP 8.5
DMI-HIRHAM5_NCC-NorESM1-M	RCP 4.5, RCP 8.5
IPSL-INERIS-WRF331F_IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCP 4.5, RCP 8.5
KNMI-RACMO22E_MOHC-HadGEM2-ES	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5
MPI-CSC-REMO2009_MPI-M-MPI-ESM-LR	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5
SMHI-RCA4_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	RCP 4.5, RCP 8.5
SMHI-RCA4_ICHEC-EC-EARTH	RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5
SMHI-RCA4_IPSL-IPSL-CM5A-MR	RCP 4.5, RCP 8.5
SMHI-RCA4_MOHC-HadGEM2-ES	RCP 4.5, RCP 8.5
SMHI-RCA4_MPI-M-MPI-ESM-LR	RCP 4.5, RCP 8.5

Pour les figures présentant des résultats de simulations futures (Fig. 5-8), la même sémiologie graphique est utilisée : le panneau A illustre l'évolution de la variable considérée pour les 13 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 ; tandis que le panneau B illustre son évolution pour les 3 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5. En outre, pour chaque scénario, le trait gras correspond à la moyenne d'ensemble et les réalisations de chacune des combinaisons de GCM-RCM apparaissent en trait fin. S'agissant des scénarios 4.5 et 8.5, il est préférable de se référer au panneau A dans la mesure où celui-ci illustre les simulations pour l'ensemble des couples de GCM-RCM disponibles. Dans le panneau B, seules les trois combinaisons de GCM-RCM qui ont simulé les trois scénarios climatiques sont illustrées ; la moyenne d'ensemble est donc quantifiée sur trois combinaisons de GCM-RCM uniquement.

La figure 5 (panneaux A et B) présente l'évolution des températures (*via* le cumul de degrés-jour positifs : CPDD) et des précipitations (solides et liquides) calculées à l'altitude du centroïde du Glacier de Saint-Sorlin. Les données sont présentées à l'échelle annuelle et pour les saisons hivernales et estivales. La simulation de l'évolution future de ces deux variables est présentée pour chacune des 29 projections climatiques à notre disposition en considérant les différentes combinaisons de GCM-RCM et les différents scénarios climatiques (listés Tableau 1), entre 2015 et la disparition du Glacier de Saint-Sorlin dont la date varie entre 2070 et 2085 suivant les scénarios. D'après les travaux de Verfaillie et al. (2018), cet ensemble de projections climatiques couvre une large partie de la gamme de variation climatique pour la période d'intérêt.

Sur la figure 5, quels que soient le scénario et la combinaison de modèles considérée (panneaux A et B), on voit que la variabilité interannuelle des températures et des précipitations est importante pour l'ensemble de la période d'étude. Une différence apparaît à partir de 2050-60 pour les températures, période à partir de laquelle la tendance à la hausse est particulièrement marquée pour le scénario RCP 8.5. Rappelons que l'altitude à laquelle est calculé le cumul de degrés-jour positifs (CPDD) est celle du centroïde du glacier et que cette altitude augmente au fil du temps en lien avec l'évolution de la géométrie du glacier (Fig. 7). Ainsi, la température est calculée à une altitude de plus en plus haute, ce qui tend à partiellement contrebalancer la hausse des températures, notamment avec le RCP 4.5.

Concernant l'évolution des précipitations, il n'y a pas de tendance notable quel que soit le scénario que l'on considère, à la fois en termes de quantité et de variabilité interannuelle, sauf dans le cas des précipitations liquides pour les dernières années des périodes de simulations. Leur quantité tend à

augmenter à toutes les échelles de temps considérées (annuelle, hivernale, estivale) au détriment de la précipitation solide. Ceci implique, notamment pour la période hivernale, qu'en lien avec la hausse des températures, la limite pluie/neige dépasserait, au moins lors de certains événements, l'altitude du centroïde du glacier et, par conséquent, réduirait l'accumulation.

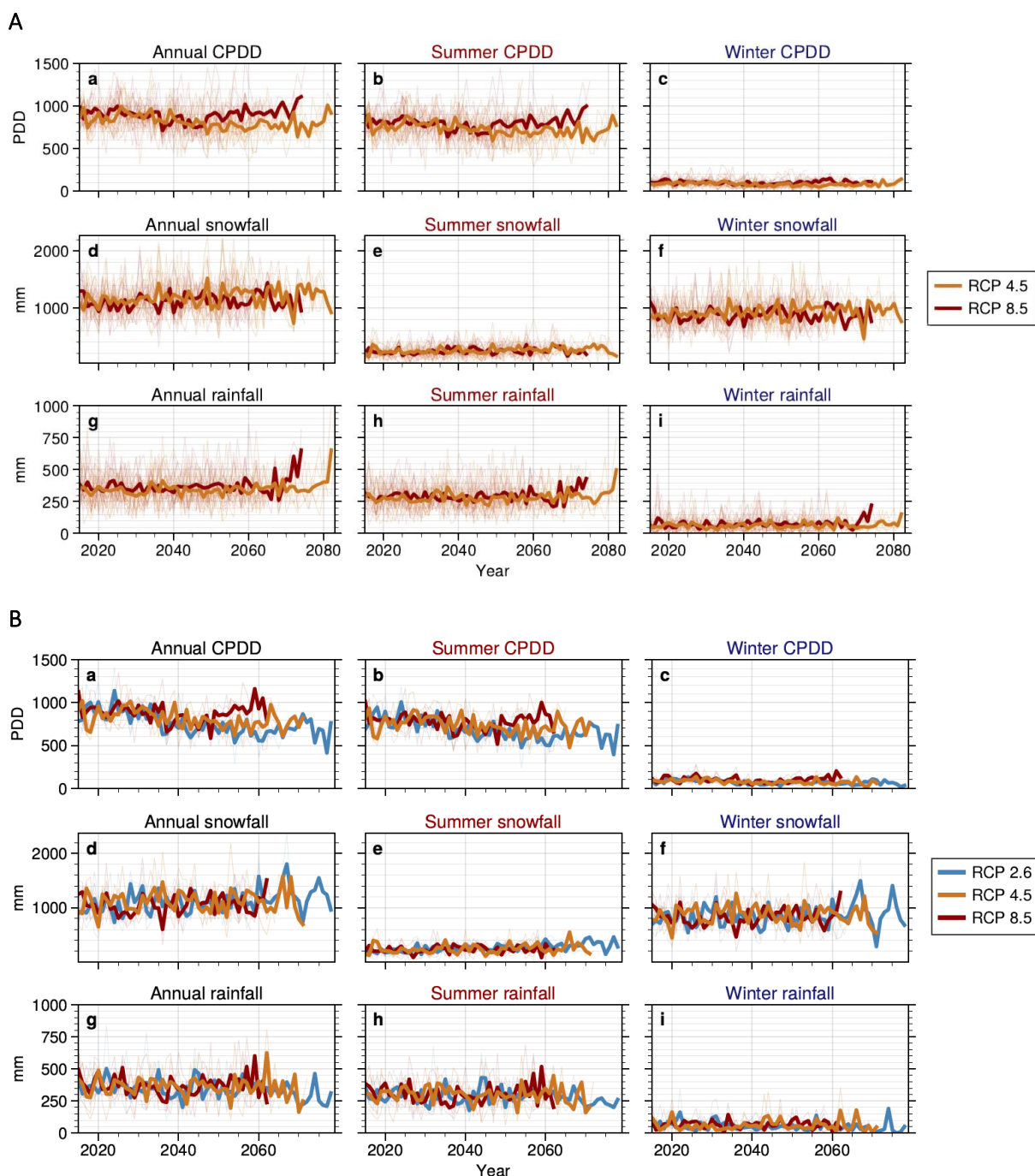
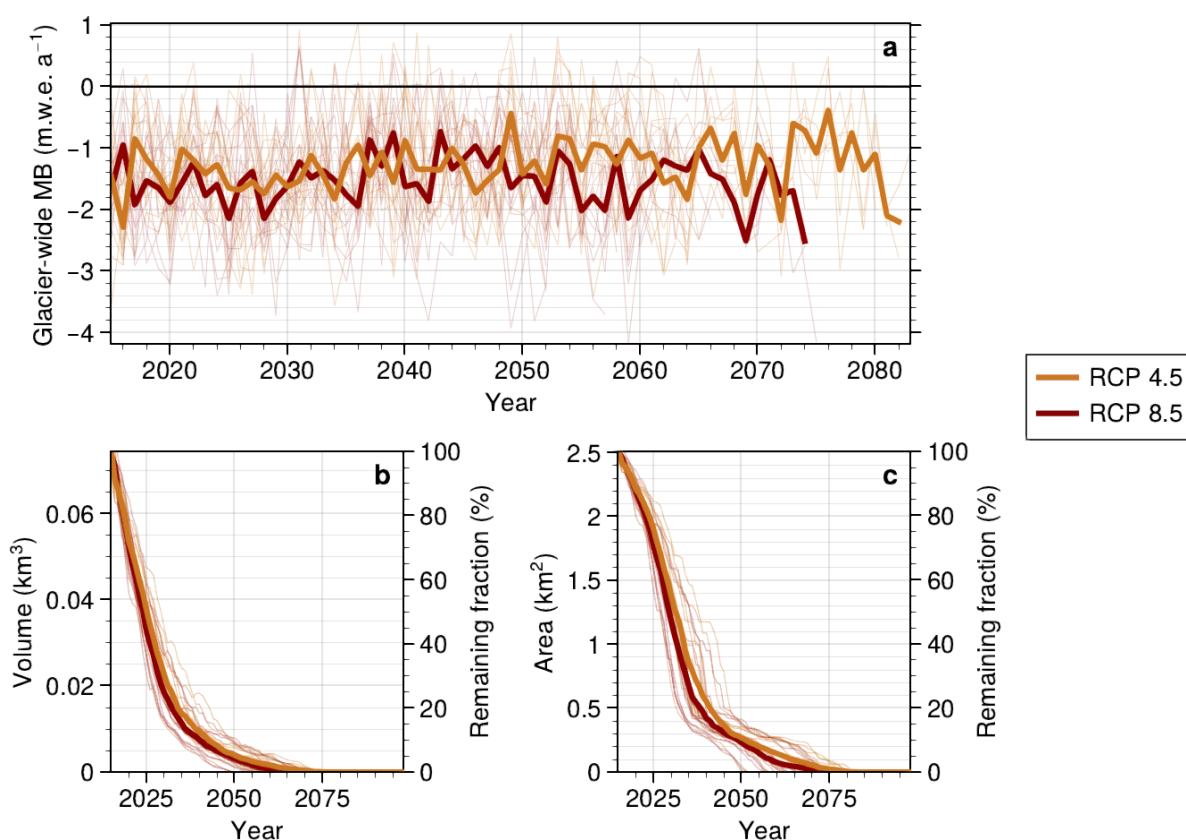


Figure 5 : Évolution future du cumul de degrés-jour positifs (CPDD) et des précipitations (solide et liquide) calculée à l'altitude du centroïde du Glacier de Saint-Sorlin, à l'échelle annuelle et pour la saison estivale et hivernale (A) Pour les 13 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (B) Pour les 3 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Pour chaque scénario, le trait gras correspond à la moyenne d'ensemble et les réalisations de chacune des combinaisons de GCM-RCM apparaissent en trait fin

I.2.3. Simulations de l'évolution future du Glacier de Saint-Sorlin

Les figures 6, 7, 8 illustrent l'évolution future de différentes variables pour le Glacier de Saint-Sorlin : le bilan de masse de surface annuel pour l'ensemble du glacier, son volume et sa superficie (Fig. 6), l'altitude moyenne du glacier (Fig. 7) et le volume d'eau produit par le glacier à l'échelle annuelle (Fig. 8). Sans surprise, l'évolution future du glacier de Saint-Sorlin issue des simulations montre une diminution importante du glacier jusqu'à sa complète disparition durant la seconde moitié du XXI^{ème} siècle, quels que soient le scénario et la combinaison de modèles utilisés. Pour un scénario donné, la variabilité entre les modèles est considérable comme l'illustrent les figures 6 à 8. La figure 6 illustre les simulations de bilan de masse de surface annuel jusqu'à sa disparition dont la date varie en fonction des scénarios.

A



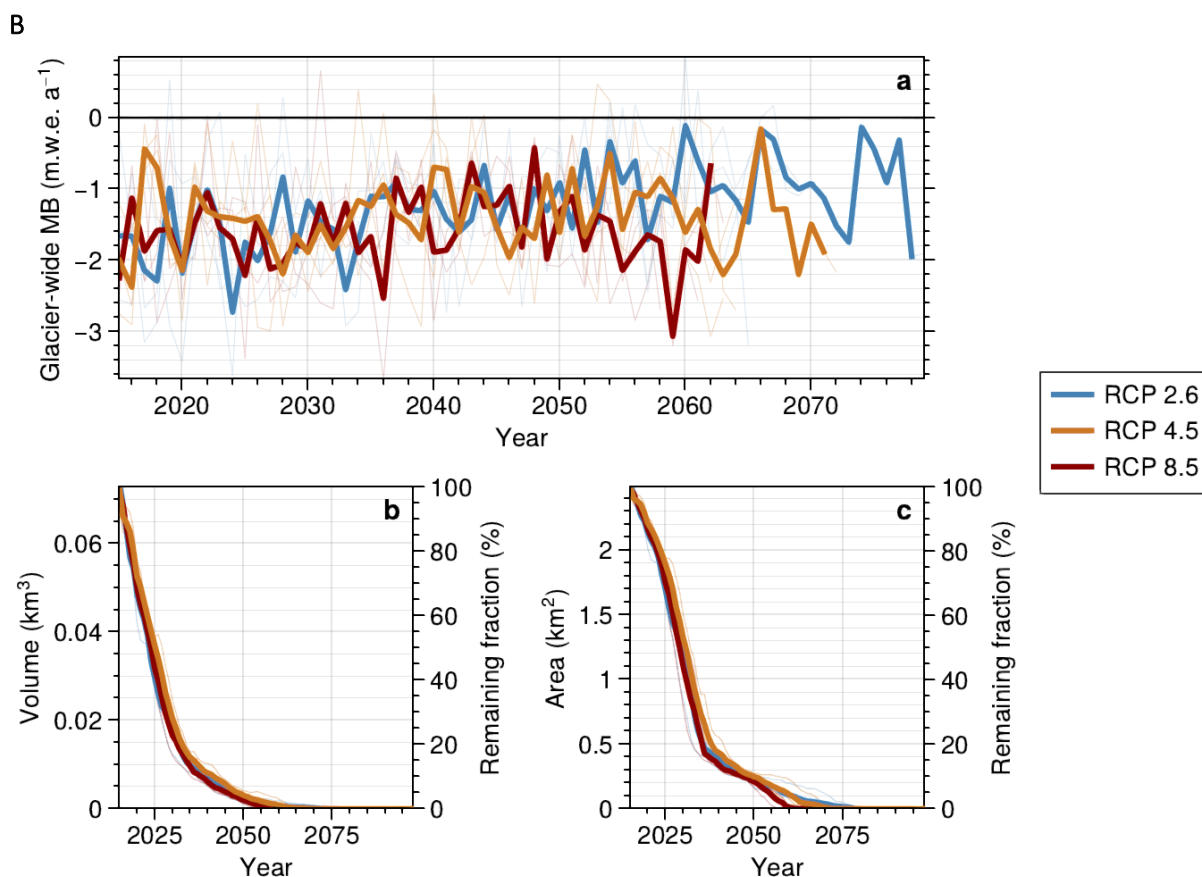


Figure 6 : Évolution future du bilan de masse annuel de surface, du volume et de la surface du Glacier de Saint-Sorlin (A) Pour les 13 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (B) Pour les 3 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Pour chaque scénario, le trait gras correspond à la moyenne d'ensemble et les réalisations de chacune des combinaisons de GCM-RCM apparaissent en trait fin

D'ici à l'horizon 2050, les simulations du bilan de masse de surface annuel ne montrent pas de différence notable en fonction du scénario climatique considéré. Des contrastes entre scénarios apparaissent durant la seconde moitié du siècle mais avec une importance limitée, excepté pour le scénario RCP2.6 (Fig. 6B), lequel permettrait au glacier de Saint-Sorlin de ne disparaître qu'une à deux décennies plus tard environ, en comparaison aux RCP8.5 et 4.5, respectivement. La plupart du volume de glace va disparaître avant la moitié du XXI^{ème} siècle, ce qui limite fortement l'impact des différences entre scénarios climatiques. La figure 6A illustre que pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, les bilans de masse de surface ne montrent pas de tendance, mais une forte variabilité interannuelle autour d'une valeur moyenne de l'ordre de -1,5 m w.e. / an environ ; comparable à ce que connaît le glacier actuellement. Dans le cas du scénario RCP8.5, des bilans de masse de surface un peu plus déficitaires de l'ordre de -2 m w.e. / an sont simulés de manière plus récurrente pour la fin de la période de simulation. Concernant les variations de volume et de surface du Glacier de Saint-Sorlin ; quel que soit le scénario considéré, le glacier devrait avoir perdu la moitié de son volume de 2015 (début de la simulation) d'ici 2030. Les différences entre les scénarios sont très faibles. En termes de surface, le glacier de Saint-Sorlin devrait avoir perdu la moitié de sa surface de 2015 (début de la simulation) d'ici 2035. Avant 2050, le Glacier de Saint-Sorlin devrait avoir diminué au point de ne représenter que moins de 10 % de son volume et de sa surface de 2015. Il ne persisterait alors qu'un petit résidu de glace vers les altitudes les plus hautes du Pic de l'Etendard, lequel, en fonction du scénario considéré, devrait disparaître entre le début des

décennies 2070 et 2080. La figure 7 illustre l'évolution de l'altitude moyenne du glacier, dont la hausse est d'environ 300 m (par rapport à sa valeur actuelle) jusqu'à sa disparition complète.

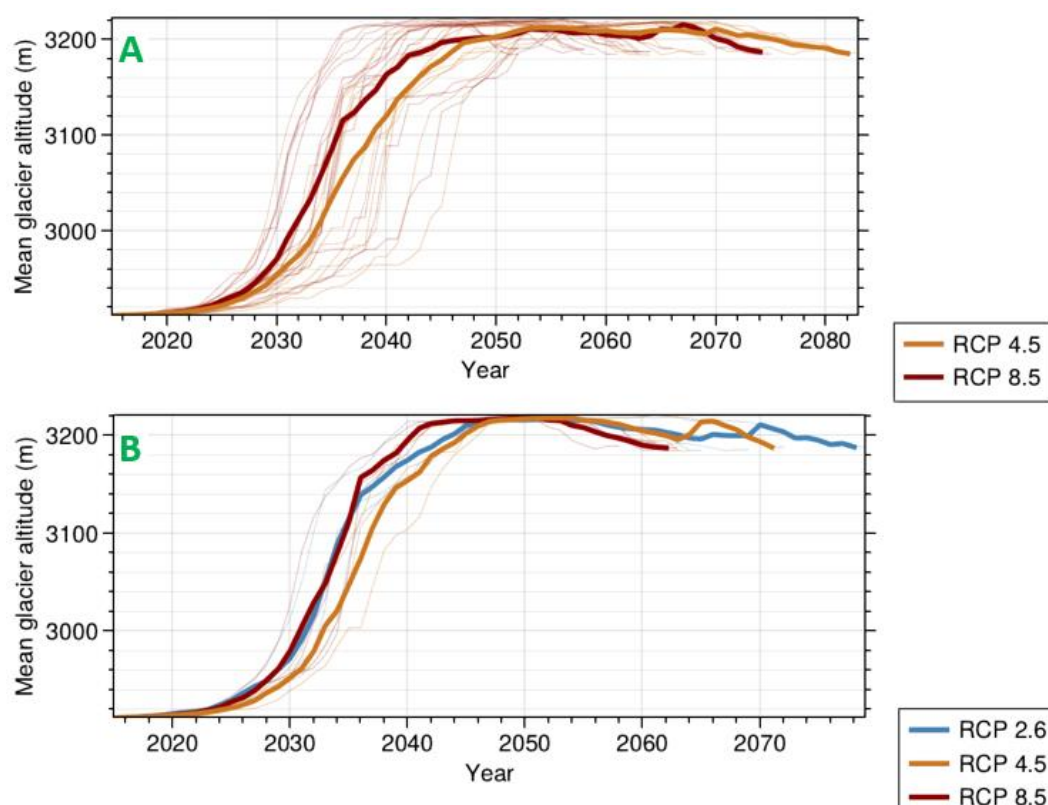


Figure 7 : Évolution future de l'altitude moyenne du glacier de Saint-Sorlin (A) Pour les 13 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (B) Pour les 3 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5

Le volume d'eau produit par le glacier au pas de temps annuel est illustré sur la figure 8. Ce volume d'eau produit à l'échelle annuelle n'est pas à confondre avec la fonte estivale ; on tient aussi compte ici de l'accumulation hivernale. Globalement, l'évolution du volume d'eau annuel produit par le glacier varie peu en fonction du RCP considéré, passant de 4 millions de m³ au début de la période de simulation (2015) à moins de 1 million de m³ à partir de 2035. La variabilité interannuelle tend à diminuer en fonction du "pessimisme" du scénario considéré; ceci est à relier au fait que plus le scénario est défavorable (le RCP8.5), plus la perte est la caractéristique "habituelle". Dans le cas d'un scénario optimiste (RCP2.6), le Glacier de Saint-Sorlin pourrait connaître des pertes faibles à l'échelle annuelle en lien avec des conditions climatiques moins défavorables. Il est important de souligner le fait que la figure 8 n'illustre que le volume d'eau issu de la perte de masse du glacier ; en d'autres termes, la contribution des précipitations liquides dans le bassin versant et de la fonte du manteau neigeux en dehors du glacier ne sont pas pris en compte ici.

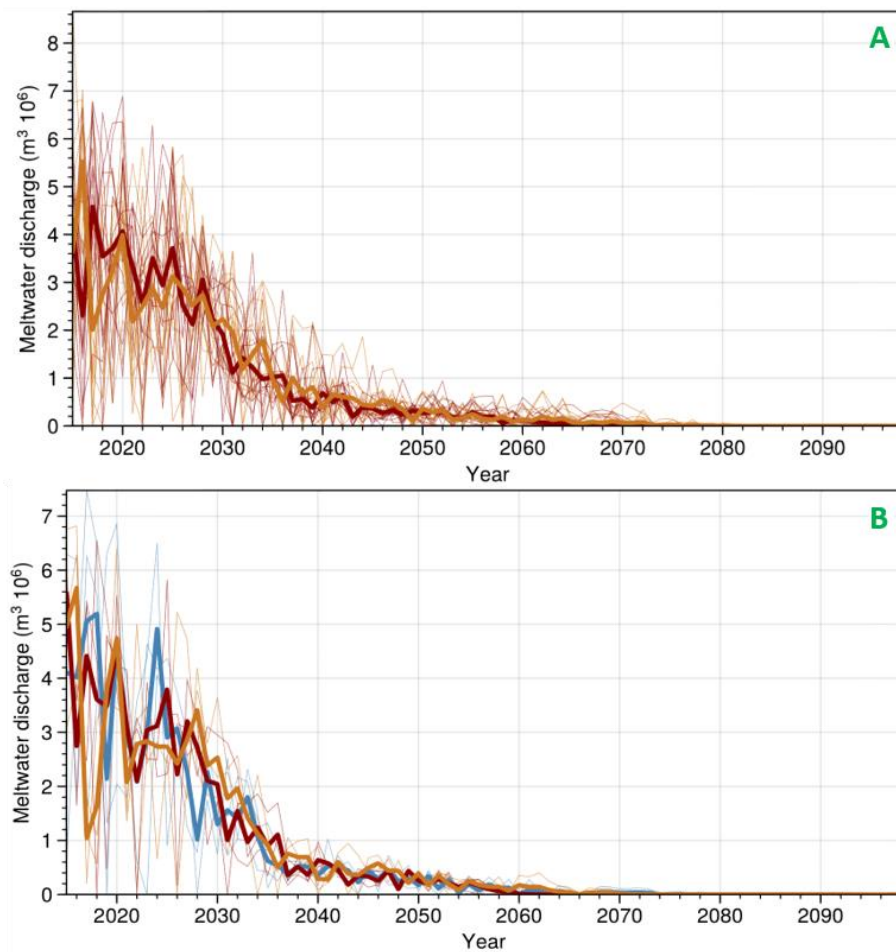


Figure 8 : Évolution future du volume d'eau annuel produit par le glacier de Saint-Sorlin (volume d'eau accumulée sur le glacier sous forme solide + volume d'eau de fonte estivale). Ce volume est calculé en multipliant le bilan de masse annuel par la surface du glacier (A) Pour les 13 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 (B) Pour les 3 combinaisons de GCM-RCM proposant des simulations climatiques pour les scénarios RCP 2.6, 4.5 et 8.5. Pour chaque scénario, le trait gras correspond à la moyenne d'ensemble et les réalisations de chacune des combinaisons de GCM-RCM apparaissent en trait fin.

La Figure 9 donne un aperçu de l'évolution future du Glacier de Saint-Sorlin par l'intermédiaire d'une représentation cartographique en 3D. Pour la réalisation de cette figure, le scénario choisi est le RCP4.5 et la combinaison de GCM-RCM choisie est celle qui est la plus proche de la moyenne d'ensemble pour ce scénario.

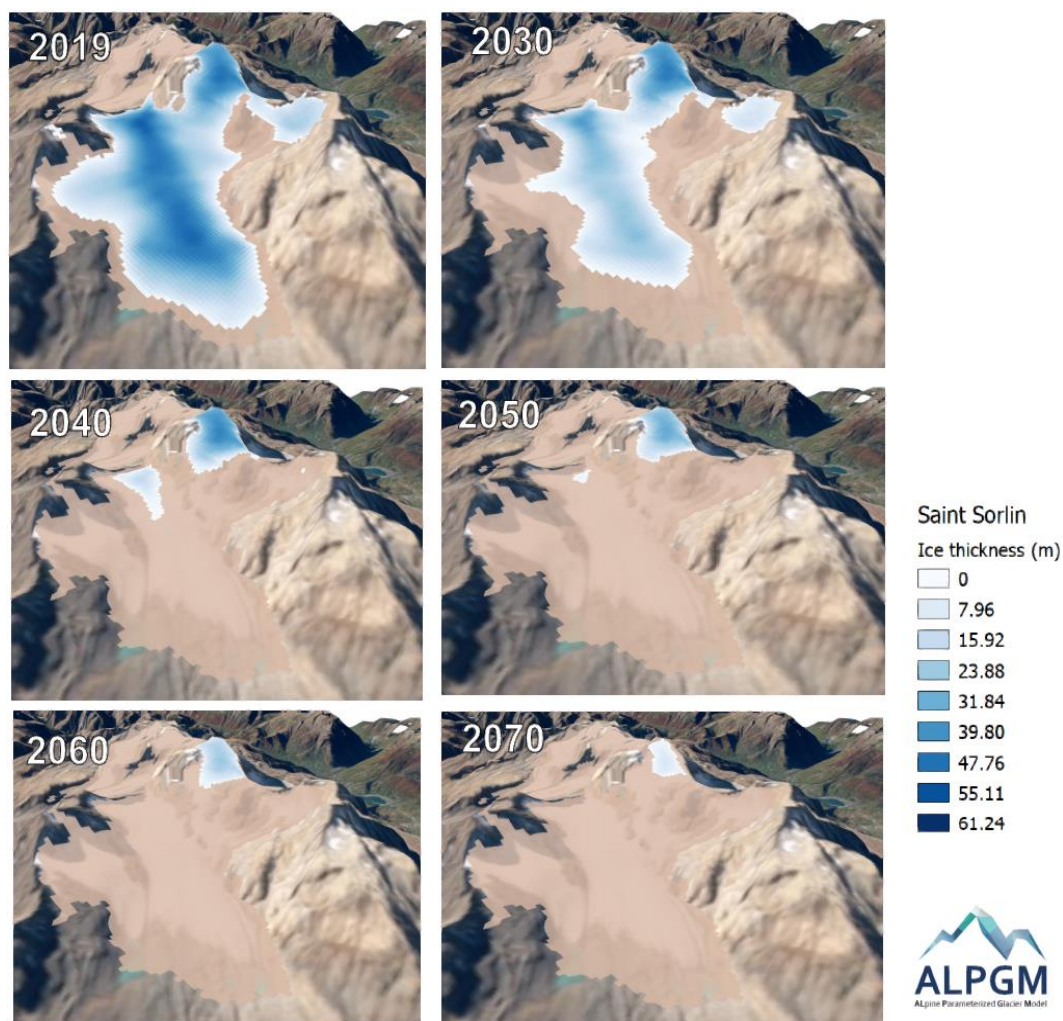


Figure 9 : Évolution future du Glacier de Saint-Sorlin au pas de temps décennal jusqu'en 2070 simulée à partir de l'approche de modélisation ALPGM en considérant la combinaison de GCM-RCM CLMcom-CCLM4-8-17_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5 et le scénario climatique RCP 4.5. Cette combinaison de GCM-RCM a été choisie car sa réalisation future est proche de la moyenne d'ensemble multi-modèles. Le gradient de couleur rend compte de l'épaisseur de glace pour chaque pas de temps

1.2.4. Incertitudes sur les simulations

Les incertitudes des simulations sont reliées aux différents éléments de la chaîne de modélisation : (1) les scénarios climatiques envisagés ; (2) les combinaisons de modèles climatiques globaux et régionaux utilisés pour simuler l'évolution des variables climatiques utilisées ; (3) la cartographie de la distribution des épaisseurs initiales de glace ; (4) l'approche de modélisation pour simuler le bilan de masse de surface, d'une part, et l'évolution de la géométrie du glacier, d'autre part. Les trois scénarios climatiques (RCP) pour lesquels des simulations futures des variables climatiques sont disponibles *via* le projet Euro-Cordex et le traitement de ces données par l'approche ADAMONT correspondent à ce qui est classiquement utilisé dans les travaux du GIEC. Le scénario RCP2.6 est considéré comme un scénario « optimiste » dans lequel les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle globale seraient fortement réduites ; à l'inverse, le scénario RCP8.5 est le plus négatif, avec une augmentation constante des émissions. En considérant ces différents scénarios, on couvre donc l'ensemble du spectre des probables pris en compte actuellement par la communauté scientifique. Pour chaque scénario, les différentes

combinaisons de modèles montrent une variabilité très importante dans les simulations futures d'évolution du climat. Ainsi, là encore notre approche d'ensemble qui considère toutes les combinaisons de modèles disponibles nous permet de couvrir un large spectre du domaine des possibles évolutions futures des conditions climatiques. Concernant les épaisseurs de glace. Les mesures directes de terrain par géoradar sont principalement disponibles sur la partie centrale du glacier, où nous avons par conséquent un degré de confiance élevé sur la morphologie du lit-rocheux sous glaciaire. En revanche, peu d'informations sont disponibles pour le versant Nord du Pic de l'Etendard, là où de la glace persiste au-delà de 2050. Dans ce secteur, les épaisseurs de glace sont issues d'un travail de simulation réalisé à l'échelle globale et basé sur la pente en surface du glacier et sur la contrainte de cisaillement basale (Huss et Farinotti, 2012; Farinotti et al. 2019). Aussi, il est probable que les simulations de l'évolution future du glacier au-delà de 2050 soient entachées d'une incertitude plus importante en fonction d'une possible sous/surestimation des épaisseurs de glace sur le versant Nord du Pic de l'Etendard. Le modèle de bilan de masse de surface a été éprouvé et validé dans les travaux de thèse de Jordi Bolibar (Bolibar et al. 2020a). De même, la méthode « Delta H » pour simuler l'évolution du glacier a été utilisée dans de nombreux travaux. Il convient cependant de souligner que s'agissant d'approches de modélisation basée sur des relations statistiques, on fait l'hypothèse de la stabilité dans le temps de ces relations qui pourraient cependant changer dans le temps, au fur et à mesure que le glacier diminue et que sa géométrie s'éloigne fortement de celle de départ.

I.3. Conclusion

Actuellement, la superficie du glacier de Saint-Sorlin est d'environ 2 km² contre 3.6 km² en 1952. Il a ainsi perdu plus de 40% de sa surface durant les 70 dernières années. Depuis la fin des années 60, la perte totale d'épaisseur du glacier s'élève à près de 48 m w.e. (*water equivalent*) ce qui correspond à enlever une épaisseur moyenne de 48 m équivalent eau sur l'ensemble de la surface du glacier pour cette période. Au cours de la période 1996-2012, la fonte sur l'ensemble de la période d'ablation (moyenne sur la période avril-octobre) présente une forte variabilité interannuelle, entre 450 (2018) et 720L/s (2003). On observe néanmoins une tendance à la diminution. Quels que soient le scénario d'émission de gaz à effet de serre et la combinaison de modèles climatiques globaux et régionaux utilisés, les simulations glaciologiques montrent une diminution importante du glacier jusqu'à sa complète disparition durant la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Par rapport aux mesures effectuées sur le Glacier de Saint-Sorlin en 2015, on estime une perte de 50% de son volume d'ici 2030 et 50% de sa superficie d'ici 2035. Enfin, il ne devrait rester que 5% de son volume en 2050 et 5 % de sa superficie en 2060. Ainsi la contribution en eau de fonte glaciaire va drastiquement diminuer dès 2030.

II. PLUIE, NEIGE ET HYDROLOGIE GÉNÉRALE

II.1 Caractéristiques générales du bassin versant

Le bassin versant de l'Arvan à Saint-Jean-d'Arves, tel que délimité dans notre étude de modélisation hydrologique (Fig. 10), couvre une superficie de 58 km² avec un pourcentage d'englacement (%GCC) de 4 % lié au Glacier de St Sorlin situé sous le Pic de l'Etendard dans la partie méridionale du bassin (chiffres en 2015 où l'extension du glacier était de 2.069 km²). Avec une dominante de prairies alpines et de zones rocailleuses, ce bassin versant comprend également des zones urbanisées, avec les villages de Saint-Sorlin-d'Arves et de Saint-Jean-d'Arves. Les zones rocheuses du bassin sont à l'origine d'une érosion conséquente. Des marnes hautement érodables recouvrent la partie Sud-Est du bassin versant, le reste du bassin, aux sols peu profonds, étant dominé par des roches métamorphiques. La station hydrométrique opérée par la DREAL Rhône-Alpes depuis juillet 2000 est située juste à l'amont du village de Saint-Jean-d'Arves.

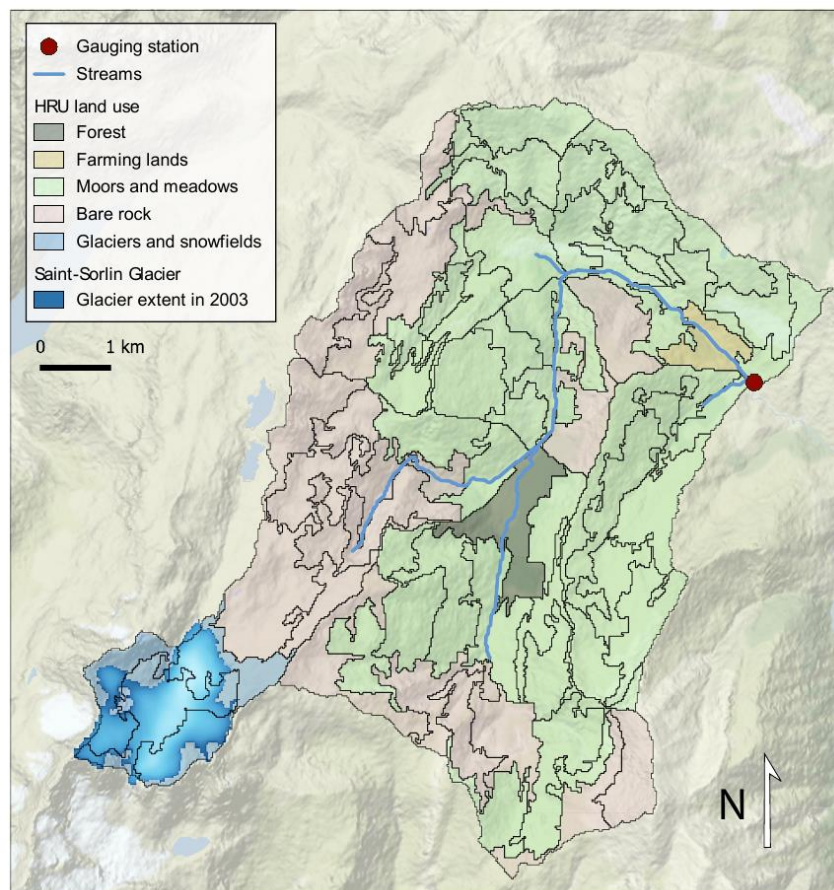


Figure 10. Caractérisation des surfaces du bassin versant de l'Arvan à Saint-Jean-d'Arves dans le modèle J2000. Les entités aux contours noirs correspondent aux 'Hydrological Response Units' (HRUs) du modèle, dont le type dominant de surface est figuré sur la carte. Les zones de forêt sont en vert foncé et les prairies alpines en vert clair. Les zones principalement rocailleuses sont en brun clair, tandis que le glacier de Saint Sorlin apparaît en bleu foncé dans son contour de 2003. En bleu pâle sont figurées les HRUs partiellement englacées du modèle. La station hydrométrique est matérialisée par un point rouge.

II.2 Données

II.2.1 Données météorologiques

Les données météorologiques exploitées dans le cadre de ce projet sont de deux natures :

- des données ponctuelles issues de stations d'observation opérées par Météo-France ou l'observatoire des glaciers et du climat SNO-GLACIOCLIM
- des produits "grillés" issus d'approches de modélisation et de réanalyses: les produits SAFRAN-BA et SPAZM, que nous détaillons ci-après.

En pratique, les données des stations météorologiques du bassin d'étude et de son voisinage ont été exploitées en appui ponctuel pour diagnostiquer des défaillances de la modélisation, principalement liées à des incohérences des forçages météorologiques. Nous n'en ferons pas un rapport détaillé dans le présent document mais invitons le lecteur intéressé à se rapporter à Jestin et al. (2018) pour plus d'informations. Nous ne décrivons donc ci-après que les produits météorologiques "grillés" utilisés pour l'étude.

II.2.1.1 SPAZM

SPAZM (SPAtialisation en Zones de Montagne, Gottardi, 2009, abbr. SPZ) propose des chroniques de températures minimales, maximales et précipitations journalières reconstruites par EDF sur une grosse moitié du territoire français, incluant notamment les Alpes (Fig. 11). La résolution spatiale du produit est de 1 km x 1 km sur 1948-2012. SPAZM repose sur l'utilisation de gradients altitudinaux de température et précipitation, observés entre les stations des réseaux d'observation d'EDF, d'une partie du réseau de Météo-France et de réseaux frontaliers (italien et espagnol). Pour la température, ces gradients sont calculés par saison, considérant l'hiver (octobre à février) où les gradients sont plutôt faibles en raison des fréquentes inversions de température en zone de montagne et l'été (mars à septembre) où les gradients sont plus forts. Le caractère pluvieux/non pluvieux des journées est aussi pris en compte. Pour les précipitations c'est le « type de temps », au sens météorologique du terme (retour d'est, onde atlantique, etc..) qui gouverne l'ébauche spatiale des gradients altitudinaux. Cette ébauche est ensuite ajustée aux données du réseau d'observation pour construire la pluie à l'échelle kilométrique.

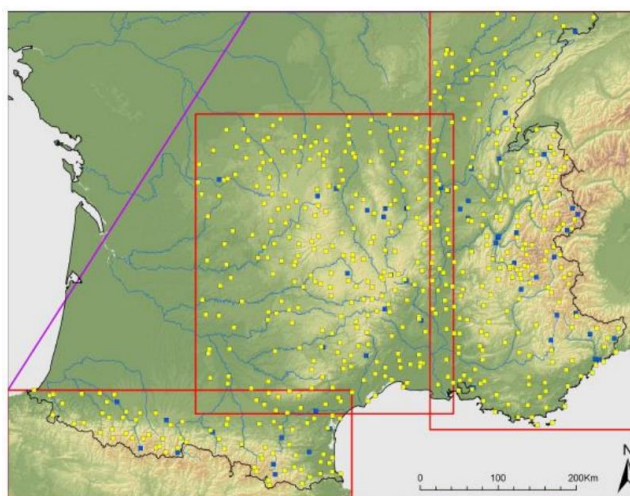


Figure 11: localisation des stations d'observation de la température de l'air utilisées dans SPAZM Source : Gottardi, 2009.

SPAZM est post-traité ici avec un coefficient correctif intégré pour la sous-captation des précipitations nivales, un biais bien identifié dans la modélisation hydrologique de montagne. Ce coefficient a fait l'objet d'études approfondies par EDF (Picouet, 2012) : s'il présente une forte variabilité tant spatiale qu'interannuelle, ce coefficient est en moyenne plus élevé dans les Alpes du Nord que dans les Alpes du Sud. Nous nous basons sur les valeurs moyennes retenues par Picouet (2012) pour majorer la précipitation nivale par 1.5 dans les Alpes du Nord, dont la zone d'étude fait partie.

II.2.1.2 SAFRAN

SAFRAN (Système d'Analyse Fournissant des Renseignements À la Nivologie) est un système d'analyse de Météo-France (Durand et al. 2009, Vernay et al. 2019, Vernay et al. 2021) combinant les données observationnelles du réseau de Météo-France avec une modélisation de l'atmosphère. Dans sa version nivologique, que nous appelons ici 'BA' pour Bandes d'Altitudes, cette analyse est faite à l'échelle de chaque massif de montagne, dans une géométrie conceptuelle de bandes d'altitude de 300 m (Fig. 12). Cette reconstruction couvre la période d'août 1958 à nos jours à l'échelle journalière et permet de fournir jour après jour les conditions météorologiques les plus réalistes dans cette géométrie au vu des informations disponibles. En revanche, ce produit ne permet pas des analyses de tendances climatiques ou d'effets liés à de telles tendances dans des modèles applicatifs aval, en raison d'une forte inhomogénéité temporelle dans le nombre des observations assimilées (Vernay et al. 2021). SAFRAN existe aussi sur l'ensemble du territoire métropolitain dans une version moyennée sur des mailles de 8km x 8km. Cette version est très utilisée par les hydrologues. Elle sera appelée simplement 'SAF' ou 'SAFRAN' dans la suite.

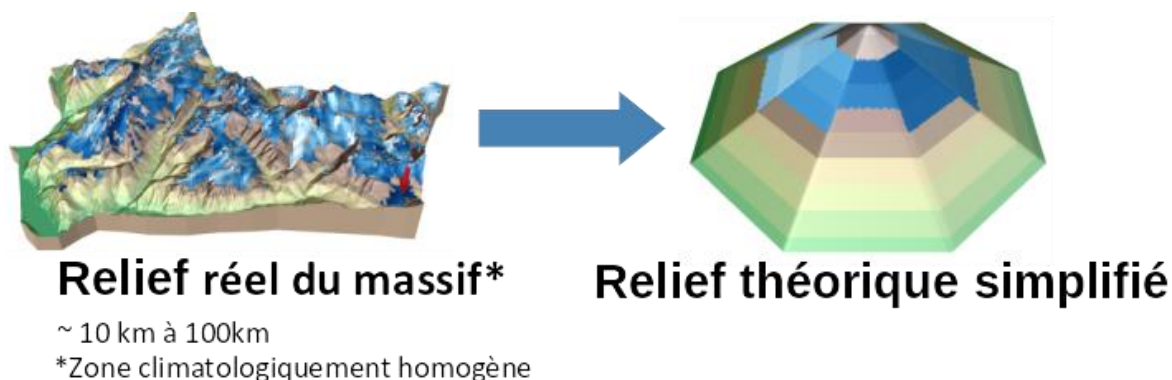


Figure 12. Illustration du relief théorique simplifié de SAFRAN-BA sur un massif de montagne

II.2.2 Neige *in situ*

Les données de hauteur de neige des réseaux nivôses et nivo-météorologiques de Météo-France ont été exploitées pour l'évaluation de la modélisation nivale sur le bassin d'étude, notamment la station du Corbier la plus proche de la zone d'étude. Le lecteur est invité à consulter Gouttevin et al. (2017) pour plus de détails sur ces produits et leur usage pour l'évaluation de J2000.

II.2.3 Données hydrologiques

II.2.3.1 Station hydrométrique de Saint-Jean-d'Arves

Opérée par la DREAL Rhône-Alpes, cette station hydrométrique fournit depuis le 19 juillet 2000 des chroniques de débit basées sur une mesure de hauteur d'eau. Les mesures de débits de la station de

l'Arvan à Saint-Jean-d'Arves [La Vilette] (W1055020) disponibles au sein de la Banque HYDRO5 couvrent la période qui s'étend du 20/07/2000 au 19/01/2016. La station est gérée par la DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. A cet exutoire, le bassin versant couvre une surface de 58 km² pour une altitude allant de 1363 m à 3373 m. La station comporte plusieurs années avec des données manquantes : 2000-2002, 2004-2007, 2009-2010 et 2015-2016. Les données manquantes sont le plus souvent relevées lors des périodes hivernales, plus spécifiquement lors des mois de janvier et de décembre qui se caractérisent par de fortes périodes de gel. Suite à la mise en place d'une centrale hydroélectrique de type "micro-centrale" sur le torrent de l'Arvan, une nouvelle station, située plus en amont, a été mise en place depuis août 2019 et se situe au lieu-dit L'Endroit. Les données mesurées à cette station ne sont pas encore disponibles à ce jour (Juin 2021).

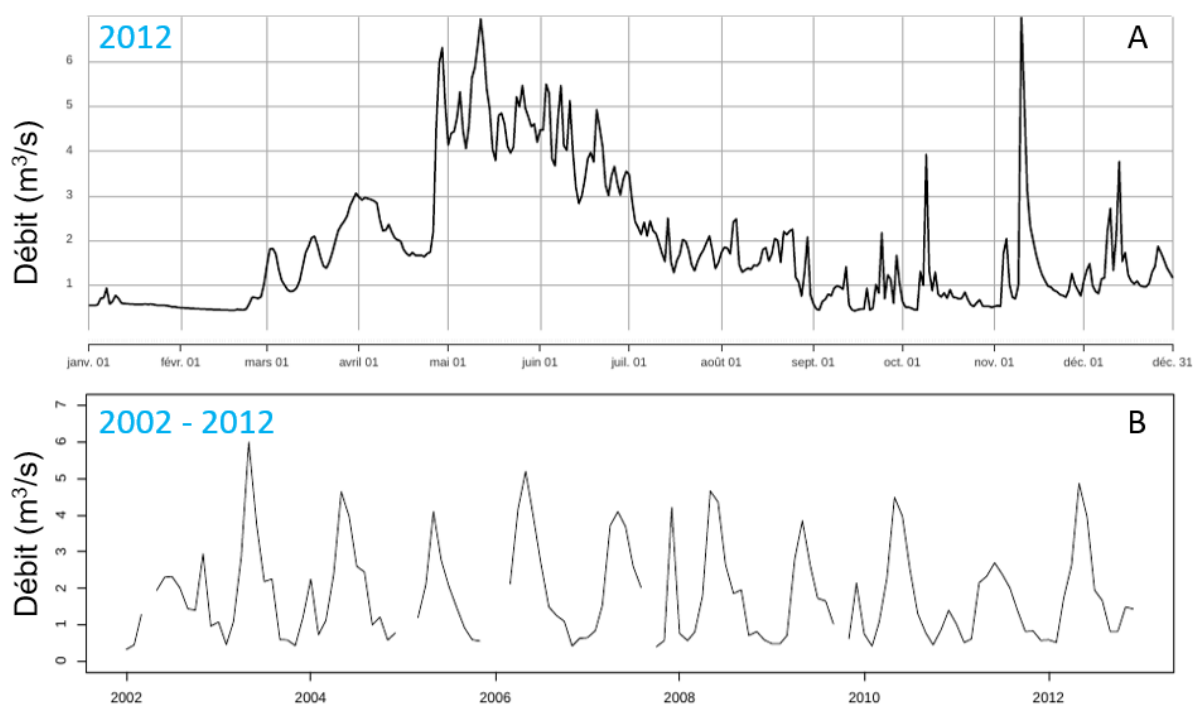


Figure 13. (A) Débits journaliers de l'Arvan à Saint-Jean-d'Arves pour l'année 2012 (B) Débits mensuels de l'Arvan à Saint-Jean-d'Arves sur la période 2002-2012

II.2.3.2 Station hydrométrique Arvan Glacier

Grâce à ce projet, nous avons pu acquérir et installer une station hydrométrique en haute altitude à proximité du glacier ou l'influence anthropique nommée Station Hydro Arvan Glacier et située à 2400 m d'altitude aux coordonnées 45.178722° W // 6.188070° N. La surface du bassin versant associée est de 5.5 km² (site 3, Fig. 29).

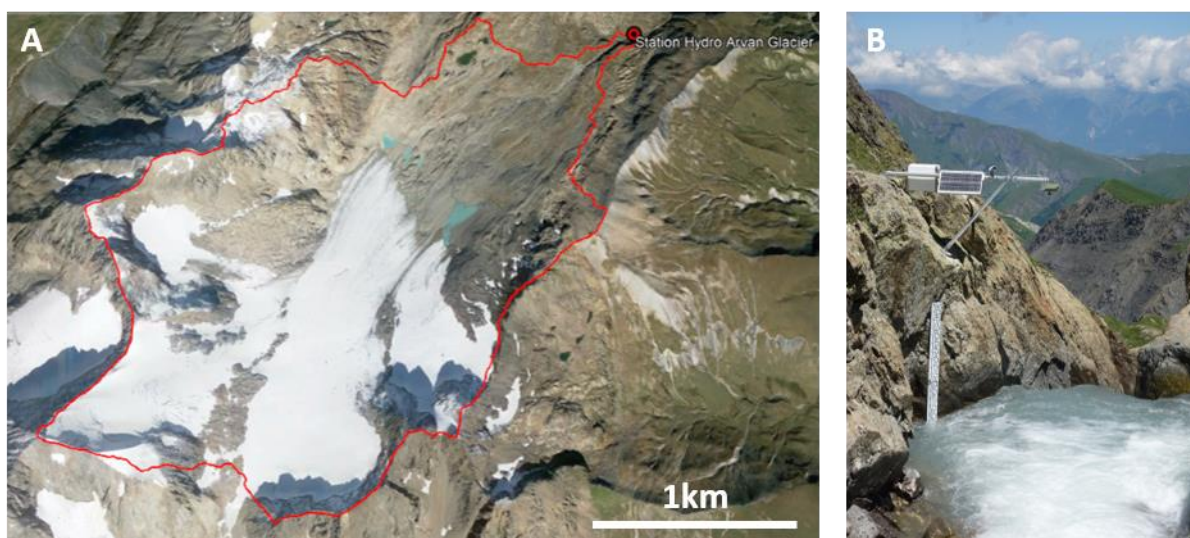


Figure 14. Trait rouge : Emprise du bassin versant de la station hydrométrique Arvan Glacier; point rouge: localisation de la station hydrométrique télétransmise. Station hydrométrique autonome et télétransmise Arvan Glacier. Pas de temps d'acquisition 10 minutes

Au niveau de la station hydrométrique nous avons installé une échelle limnimétrique fixe permettant d'avoir un point de référence des niveaux mesurés. La centrale d'acquisition est autonome (système de batterie et de panneau solaire) et télétransmise (par GSM) et fonctionne avec une acquisition radar (non intrusive) ce qui permet d'éviter les détériorations lors de crues (Fig. 14).

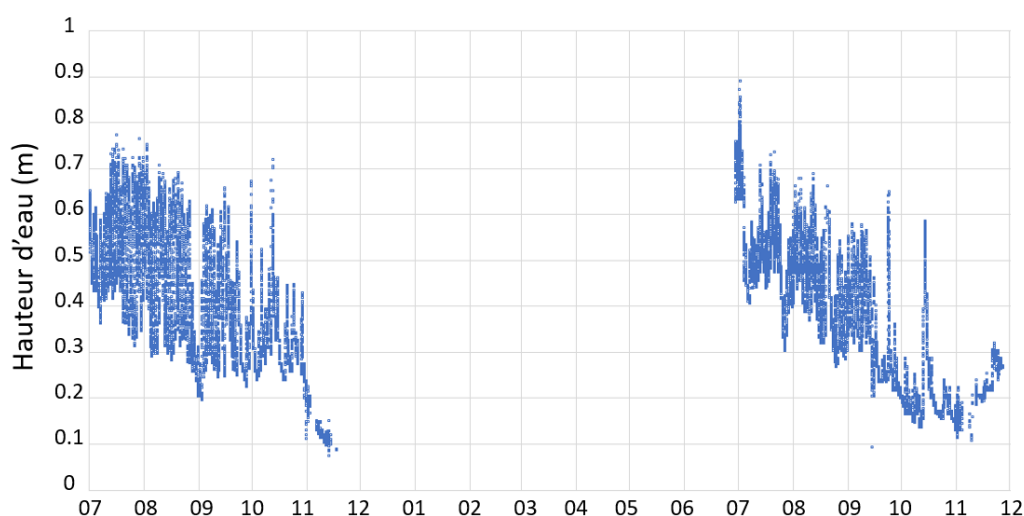


Figure 15. Chronique de hauteur mesurée à la station hydrométrique Arvan Glacier du 07/2019 au 12/2020 (la référence est l'échelle limnimétrique)

La figure 15 permet de quantifier les variations de niveau d'eau à la station durant les périodes printanière, estivale et automnale. Durant l'hiver, la station et la rivière sont recouvertes par la neige et aucune mesure valide n'est possible. Les niveaux observés minimum en début d'hiver sont de 0.1 m et les niveaux maximum estivaux qui arrivent lors d'épisodes de fonte important et/ou de précipitations estivales importantes atteignent 0.9 m. Étant donné le pas de temps de mesure très fin (10 minutes), il permet de mettre en exergue pendant la période estivale du cycle nyctéméral avec de forts débits le jour lié à la fonte de neige et de glace et de plus faibles débits la nuit lorsque l'insolation est minimale.

Nous sommes actuellement en cours de réalisation de la courbe de tarage de la station (relation hauteur/débit) ce qui permettra à partir de 2022 d'avoir des chroniques de débits observées comparables aux chroniques simulées par J2000. Il faut souligner que peu de mesures hydrométriques à l'échelle des Alpes existent à haute altitude ce qui rend ce point de mesure particulièrement intéressant pour quantifier les ressources en eau de ce massif.

II.3 Modélisation glacio-hydro-nivologique avec J2000

II.3.1 Principes de la modélisation

Le modèle J2000 (Nepal et al. 2014, Braud et al. 2017, Gouttevin et al. 2017) est un modèle hydrologique distribué s'attachant à la représentation des principaux processus hydrologiques à l'œuvre dans un bassin versant (interception, évapotranspiration, accumulation et fonte, infiltration, routage). Il est développé par l'Université de Jena et enrichi de nombreuses contributions de collaborateurs externes dont INRAE (Bolibar, 2020a). Cet outil permet de réaliser une modélisation nivo-hydrologique à partir de données physiographiques (modèle numérique de terrain, couvert végétal, caractérisation pédologiques et géologiques) et en utilisant en entrée des forçages météorologiques (précipitation, température, et évapotranspiration de référence). La discrétisation spatiale repose sur des HRU : Hydrological Response Units, à savoir des entités spatiales relativement homogènes au vu de leur couverture végétale, pédologie, géologie et topographie. Sur ces entités, les processus hydrologiques sont décrits de façon uniforme par le modèle. Le maillage adopté sur l'Arvan comprend une soixantaine de HRUs, de taille moyenne 1km² (Fig. 10).

Lors de la thèse de Jordi Bolibar (2018-2020), un module pré-existant d'hydrologie glaciaire dans J2000 (Nepal et al. 2014) a été couplé avec un modèle indépendant de dynamique glaciaire (Bolibar et al. 2020b-c) basé sur des réseaux de neurones profonds et fonctionnant au pas de temps annuel. Ce modèle permet de représenter l'évolution en surface, bilan de masse et masse de glace restante des glaciers des Alpes françaises sur les dernières décennies (Bolibar et al. 2020a : Chapitre I). Ce couplage a nécessité plusieurs étapes :

- Le calcul de la fraction englacée de chaque HRU au fil du temps, avec un pas de temps annuel correspondant à celui du modèle de dynamique glaciaire. Cette fraction a été calculée à l'aide d'un package python spécifiquement développé pour cet usage, Glaciers-to-J2K.
- L'interpolation de ces fractions englacées au pas de temps journalier du modèle hydrologique J2000. Cette interpolation est faite de façon linéaire et uniquement pendant la période d'ablation du glacier considérée statique dans le temps et courant du 1er juin au 30 septembre.
- Le développement des deux composants du modèle J2000, GlacierFractionReader et GlacierFractionAssigner, destinés à la lecture et l'exploitation de fractions englacées dynamiques dans le modèle. Ces fonctionnalités étaient jusqu'alors inexistantes, de sorte que toutes les simulations réalisées sur des glaciers étaient effectuées à surfaces englacées constantes, hypothèse peu réaliste sous changement climatique.
- L'adaptation du module glaciaire préexistant à des surfaces englacées évolutives, via notamment une mise à l'échelle des précipitations tombant sur le glacier et impactant le bilan de masse.

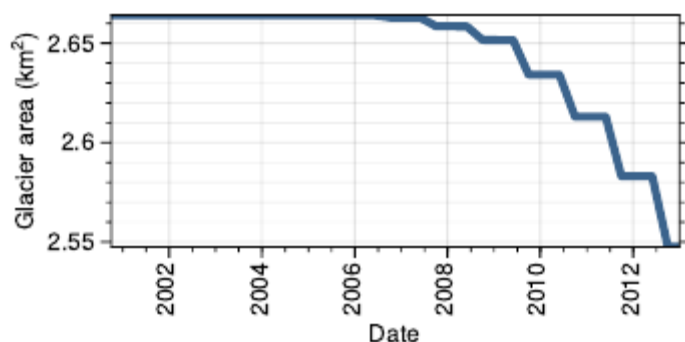


Figure 16. Évolution de la surface englacée du glacier de St Sorlin dans J2000. La simulation dynamique commence en 2003, date à laquelle des données d'initialisation des volumes de glace sont disponibles (Farinotti et al. 2019) ; elle fait suite à un spinup de 19 ans du modèle effectué à surface englacée constante, afin d'initialiser les variables hydrologiques du modèle. La simulation est satisfaisante malgré les légères incohérences entre les HRUs du modèle et les surfaces réellement englacées (Fig. 10) et les incertitudes associées aux conditions glaciologiques initiales et à la modélisation

La modélisation du bilan des processus d'accumulation et ablation, conduisant aux masses glaciaires et aux flux d'eau exportés depuis le glacier, est effectuée via un modèle degré jour (Nepal et al. 2014). Des facteurs degré-jour différents pour la neige et la glace ont été employés. Également, un facteur correctif de la précipitation du glacier a été introduit, afin de palier deux déficiences majeures de la modélisation dans ces zones: les forçages météorologiques y sous-estiment régulièrement les précipitations, en raison du manque de stations d'observations en altitude et de la sous-captation des précipitations neigeuses par vents modérés à forts. Ensuite, des processus locaux conduisant à des sur-accumulations au niveau des glaciers, comme les dépôts d'avalanche, ne sont pas pris en compte.

Dans le modèle glacio-nivo-hydrologique J2000 déployé sur l'Arvan les 3 paramètres facteur de fonte degré-jour pour la glace, pour la neige, et facteur correctif de précipitations sur glacier ont été calibrés à l'aide des bilans de masse hivernaux et estivaux observés. Le facteur correctif de précipitation est ajusté en fonction du bilan de masse hivernal, qu'il influence principalement ; les facteurs de fonte de glace et neige sont ensuite ajustés sur la base du bilan de masse estival.

II.3.2 Performances de la modélisation avec J2000

Cette calibration donne des résultats très satisfaisants en termes de représentation des bilans de masse annuels, hivernaux et estivaux du glacier de St Sorlin (Fig. 17). En raison de la faible durée d'observation disponible et du caractère saisonnier ou annuel de ces mesures, il n'a pas été envisagé de mettre en place une validation croisée pour évaluer la robustesse dans le temps des paramètres estimés du modèle. Ainsi, les simulations glacio-nivo-hydrologiques de J2000 ont été faites directement sur la même période, pour la calibration comme l'exploitation.

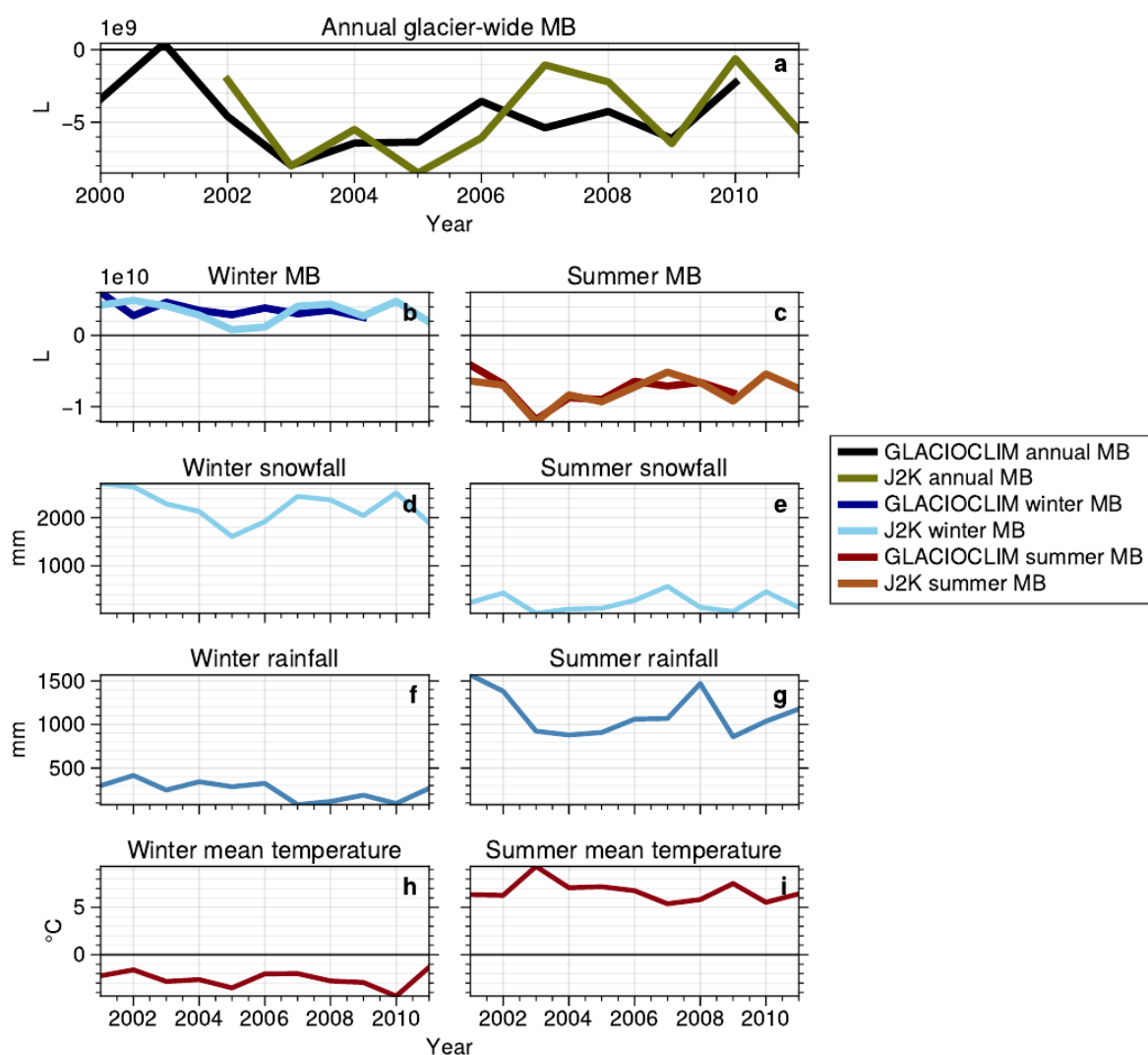


Figure 17. Observations et modélisation, dans J2000, des bilans de masse annuels, hivernaux et estivaux du glacier de St Sorlin. Les principaux facteurs météorologiques impactant ces bilans sont aussi représentés

Le modèle hydrologique J2000 sur l'Arvan a été évalué et optimisé dans le cadre d'un précédent projet soutenu par l'AERMC, l'Action Neige. Nous ne revenons pas sur ces éléments d'amélioration du modèle ici. La modélisation glaciologique introduite dans le modèle, permet une nette amélioration de sa représentation des flux hydrologiques en termes de bilan hydrologique global (réduction du biais annuel sur le volume simulé de 14% à moins de 2%), et de ses performances en période de fonte nivale (période du 1er avril au 31 juillet : réduction du biais en débit de 19% à 13%) et glaciaire (du 1er juillet au 30 septembre : réduction du biais en débit de 38% à moins de 4%). Les autres performances du modèle sont inchangées (Fig. 18, Tableau 2). Les performances sont basées sur le critère Kling-Gupta efficiency (KGE, Gupta et al 2009). A Noter que les prélèvements anthropiques n'ont pas été pris en compte dans la modélisation J2000.

Performances Arvan Amont avec et sans glacier

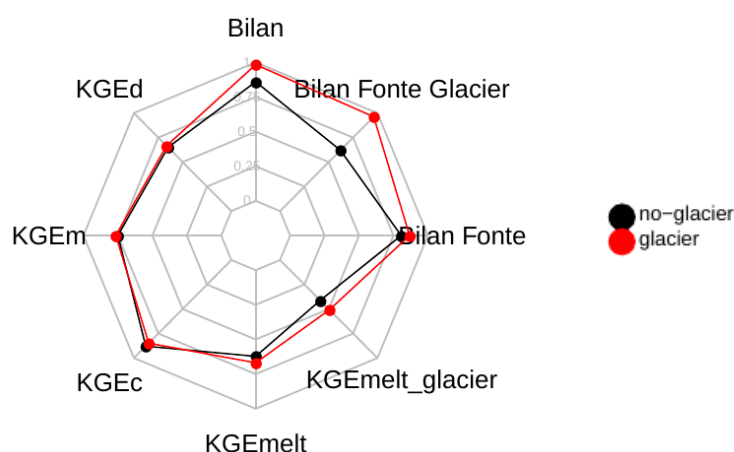


Figure 18. Visualisation des performances comparées des modélisations avec (rouge) et sans (noir) glacier sur le bassin versant de l'Arvan à Saint-Jean-d'Arves. Le Tableau 2 décrit les indices utilisés. Les variables "Bilan" correspondent à 1-pBiais

Tableau 2. Indices de performances de la modélisation glacio-nivo-hydrologique avec J2000 sur le bassin versant de l'Arvan à Saint-Jean-d'Arves avec ou sans prise en compte du glacier

		no-glacier	glacier
	KGE _d	0.65	0.67
KGE mensuel	KGE _m	0.75	0.77
KGE cycle saisonnier		0.88	0.85
KGE en période de fonte nivale	KGE journalier	0.62	0.67
KGE en période de fonte glaciaire	KGE _{melt_ice}	0.41	0.51
Biais sur le débit annuel (%)	pBiais	-14	1.6
Biais en période de fonte nivale (%)	pBiais _{melt}	-19.4	-13.3
Biais en période de fonte glaciaire (%)	pBiais _{melt_ice}	-38	3.8

II.4 Caractérisation hydro-météorologique du bassin versant

II.4.1 Météo et Neige

Selon le jeu de données SPAZM, il tombe sur le bassin versant de l'Arvan environ 1650 mm de précipitation par an, à part quasi égale entre neige (850 mm) et pluie (800 mm). Ces valeurs sont proches de celles de SAFRAN-BA (1590 mm de précipitations annuelles). Le jeu de données SAFRAN à 8km x 8km donne en revanche des précipitations annuelles plus basses sur ce bassin (1388 mm), qui d'ailleurs ne permettent pas la fermeture du bilan hydrologique même en tenant compte des contributions glaciaires (le déficit est alors de l'ordre de 500 L/s en moyenne annuelle, soit presque 30% du débit moyen annuel de 1800 L/s). La figure 19 illustre les précipitations et températures moyennes annuelles indiquées sur le bassin versant par les 3 jeux de données exploités, tandis que la figure 20 illustre la variabilité interannuelle des précipitations nivales et liquides, et de la température, au niveau du glacier de St Sorlin. On y note en particulier quelques hivers où la neige tombe en abondance : 2001, 2002, 2007 et

2010 ; ou déficitaires : 2005 ; des hivers où le manteau neigeux tient et atteint de belles épaisseurs au cours de l'hiver : 2001, 2003, 2006, 2008, 2010 et 2012 (Fig. 20) ; ainsi que des étés particulièrement chauds : 2003, 2009 ; ou neigeux : 2007. SPAZM permettant la modélisation hydrologique la plus proche des observations après optimisation du modèle hydrologique J2000 (Gouttevin et al. 2017), nous prendrons préférentiellement ce jeu de données comme référence.

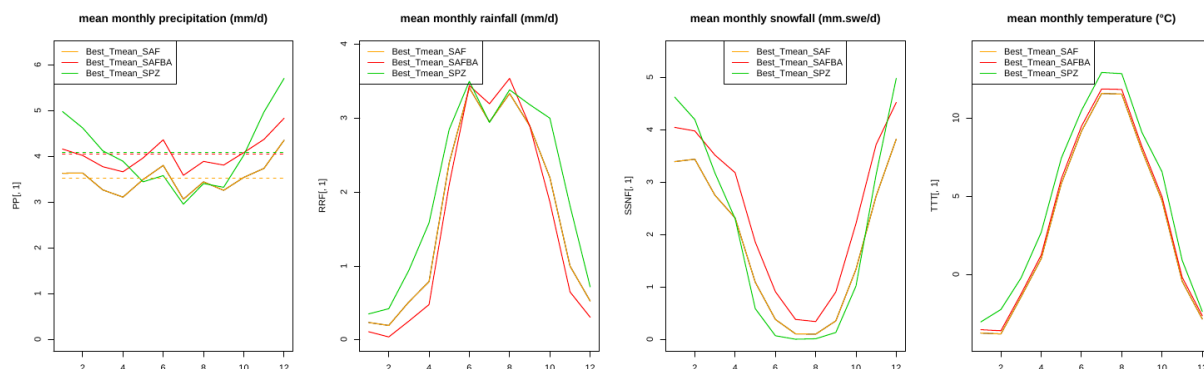
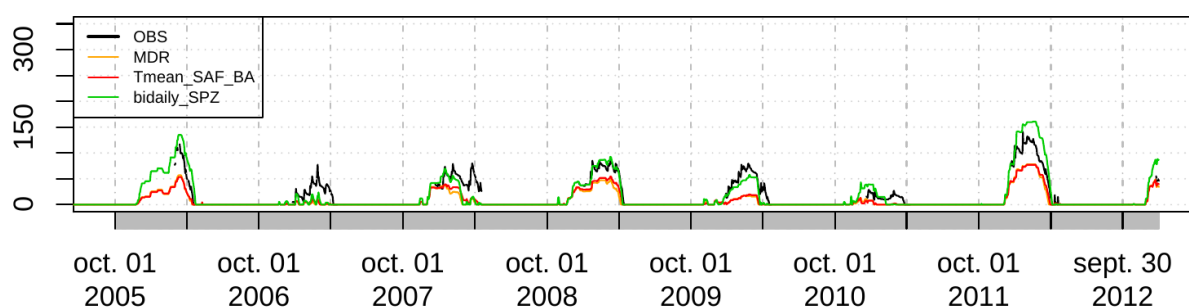


Figure 19 : Cycle saisonnier des précipitations totales, pluvieuses et neigeuses (a-c) selon les trois jeux de données exploités, en moyenne interannuelle sur la période 1985-2012. Le panel (d) montre les différences dans la température moyenne du bassin versant entre ces jeux de données



comparison of HRU (alt=1618m) to Nivo Le Corbier (alt=1585m)

Figure 20 : Comparaison au poste nivo-météorologique du Cordier, 1585 m a.s.l., de la hauteur de neige simulée dans J2000 forcé par SPAZM (vert), SAFRAN-BA (rouge) et SAFRAN (orange) sur la période 2005-2012

II.4.2. Contributions nivales et glaciaires au débit à l'exutoire

La modélisation avec J2000-glacier permet d'estimer, de façon annuelle, interannuelle et saisonnière, les contributions glaciaires et nivales à l'écoulement. Au plan saisonnier, le pic annuel de débit en provenance du glacier est atteint au mois août dans la modélisation avec J2000 (Fig. 21-22), en cohérence avec les estimations effectuées sur la base d'un modèle calé sur les observations in-situ de bilans de masse (Fig. 4). Ce pic de débit est en revanche légèrement supérieur dans la modélisation J2000, où il excède les 1000 L/s là où il atteignait 900 L/s dans les estimations empiriques. Cette surestimation de l'ordre de 10%, qui reste dans les marges d'erreur de l'estimation, peut être liée au coefficient correctif de la précipitation nivale sur le glacier, potentiellement responsable d'une sur-accumulation de neige compensée par un facteur de fonte de la neige trop fort. Notons toutefois qu'au mois d'août, pic de l'export d'eau d'origine glaciaire, modélisation et observations coïncident en termes

de débit total à l'exutoire (Fig. 21), et le glacier, via la fonte de neige mais surtout de glace en cette période avancée de l'été, contribue pour plus de 50% du débit à l'exutoire (Fig. 22b). Les contributions glacio-nivales des zones glaciaires à l'écoulement apparaissent également surestimées en juillet, septembre et octobre, avec une surestimation de 100 à 300 L/s (Fig. 4 et Fig. 22b). Cette forte surestimation à l'automne est aussi manifeste dans la surestimation du débit automnale du modèle J2000 à l'exutoire, qui est de plus forte amplitude. Les mêmes mécanismes d'erreur que pendant le début de l'ablation glaciaire, s'ajoutent probablement à une faiblesse du modèle hors glaciers dans la représentation des débits automnaux. Un travail sera entrepris dans la dernière année du projet BERGER (financement Région AuRA) pour corriger ces limitations, notamment via une paramétrisation améliorée des écoulements profonds.

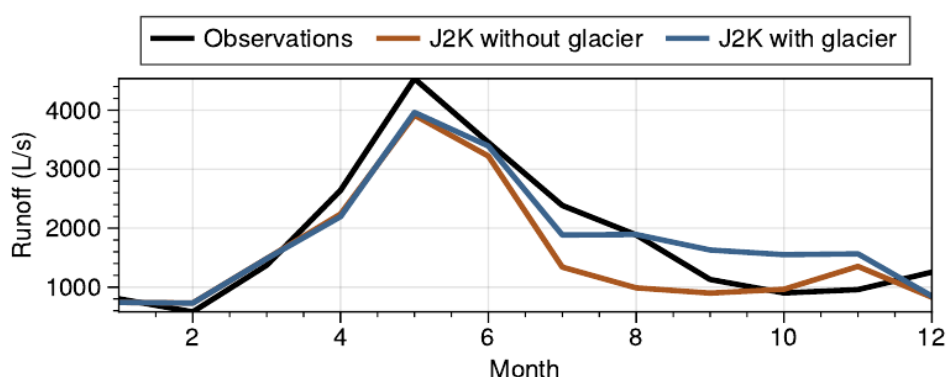


Figure 21 : Débit moyen mensuel interannuel du bassin versant de l'Arvan à Saint-Jean-d'Arves, sur la période 2001-2012 où des observations sont disponibles. Le cycle saisonnier observé (noir) est comparé au cycle saisonnier modélisé par J2000 forcé par SPAZM avec (bleu) et sans composante glaciaire (orange)

Sur ce bassin au régime nivo-glaciaire marqué, la contribution des zones enneigées à l'écoulement, via la fonte nivale et/ou l'écoulement d'eau de pluie étant tombée sur de la neige et temporairement retenue dans le manteau neigeux, est majeure de novembre à juin (Fig. 22c). Sur cette période, les contributions à l'écoulement des zones enneigées dépassent 50%. Elles sont les plus fortes entre janvier et avril, où elles dépassent les 70%.

La modélisation renseigne aussi quant à la variabilité interannuelle des contributions des zones nivales et glaciaires à l'écoulement (Fig. 23-25).

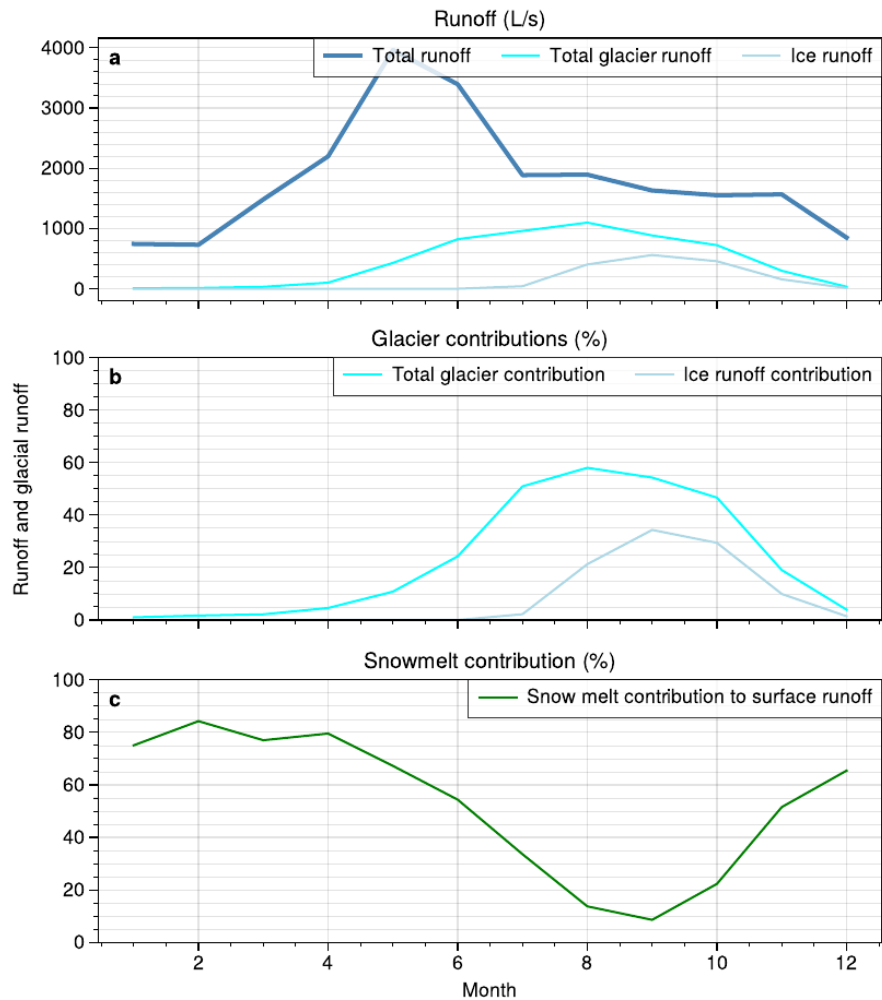


Figure 22 : (a) Débit moyen interannuel modélisé par J2000 à Saint-Jean-d'Arves sur la période 2001-2012 ('total runoff') et contributions glaciaire pure (fonte de la glace, bleu clair) et totale (fonte de la neige et de la glace sur le glacier) (b) Contributions glaciaires totale et glaciaire pure, en % (c) Contribution en % de la fonte nivale à la lame d'eau disponible pour l'écoulement. Cette fonte nivale inclut l'eau de pluie retenue dans le manteau neigeux et écoulee ultérieurement

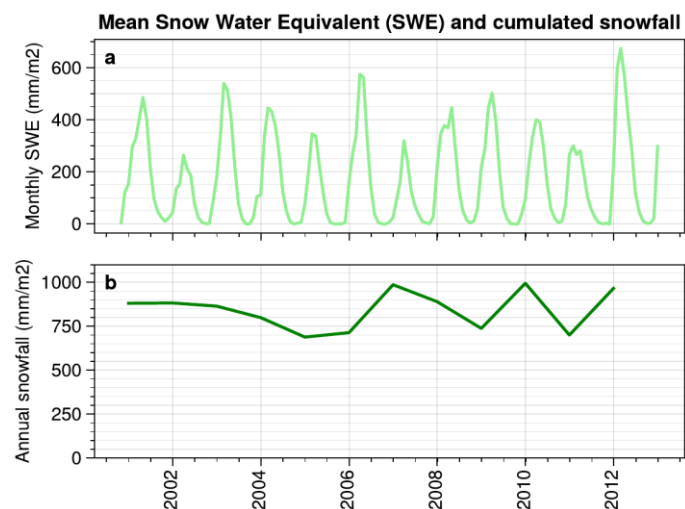


Figure 23 : (a) Équivalent en eau (SWE) mensuel moyen sur le bassin de l'Arvan à St Jean d'Arve, (b) Cumul de neige annuel sur ce bassin sur la période 2000-2012

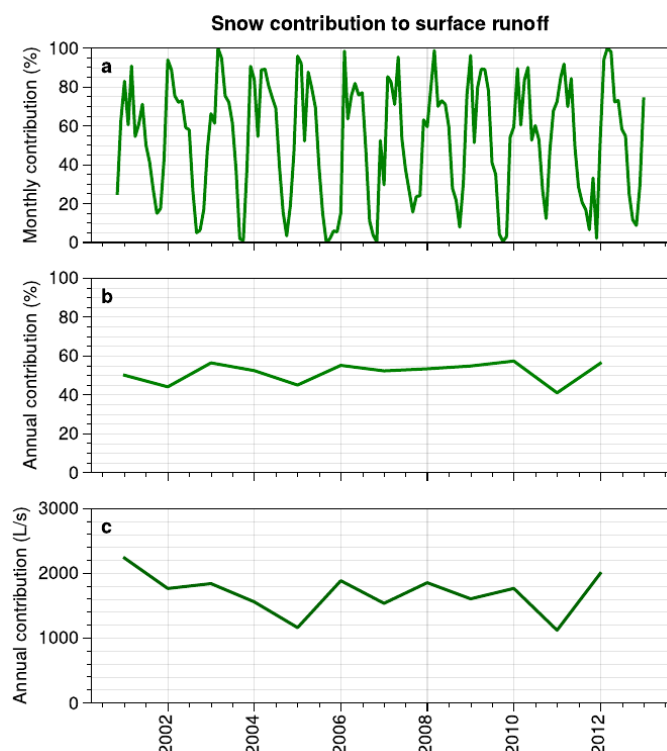


Figure 24 : Contribution mensuelle (a) puis annuelle (b et c), sur la période 2000-2012, de la fonte nivale à la lame d'eau disponible pour l'écoulement. Cette fonte nivale inclut l'eau de pluie retenue dans le manteau neigeux et écoulee ultérieurement

La fonte nivale, incluant l'eau de pluie retenue dans le manteau neigeux et écoulee ultérieurement, contribue pour une large part à la lame d'eau disponible pour l'écoulement pendant les mois d'hiver et de printemps, avec un maximum de contribution entre 85 et quasiment 100% au pas de temps mensuel. Les années à faible enneigement, comme 2005 ou 2011, la fonte nivale contribue pour env. 40% de l'écoulement annuel disponible sur le bassin. Les années de fort enneigement, comme 2003 ou 2012, cette contribution atteint les 60% en moyenne annuelle. A noter une particularité de l'année 2002, caractérisée par un enneigement au sol assez faible (Fig. 23a) mais avec des précipitations neigeuses plutôt dans la moyenne. Cette année est en fait marquée par un hiver particulièrement doux, impliquant beaucoup de fonte hivernale, d'où une faible accumulation de neige malgré des chutes conséquentes, et une contribution de la fonte nivale à l'écoulement dans la moyenne.

La fonte purement glaciaire contribue entre 3.5 et 21% du débit moyen annuel de l'Arvan. L'année 2001 en particulier est caractérisée par un faible export d'eau de fonte glaciaire (3.5%): l'hiver particulièrement enneigé et l'été plutôt frais ont induit une assez forte contribution nivale à l'écoulement, mais ont relativement préservé le glacier, dont le bilan de masse est cette année-là excédentaire (Fig. 25a). L'année 2005 en revanche, dont nous avons précédemment pointé le faible enneigement, est caractérisée par la plus forte fonte glaciaire entre 2002 et 2012, également concomitante avec le bilan de masse le plus déficitaire dans la modélisation avec J2000. La contribution des fontes nivales et glaciaires des zones englacées est plus importante, évoluant entre 20 et 35% (Fig. 25b). L'année 2003, caractérisée par une forte canicule estivale, correspond à la plus forte contribution

en volume, avec près de 500 L/s (495 L/s) de débit moyen annuel contribué par les zones glaciaires, soit 36% du débit de l'Arvan cette année-là (Fig. 25c).

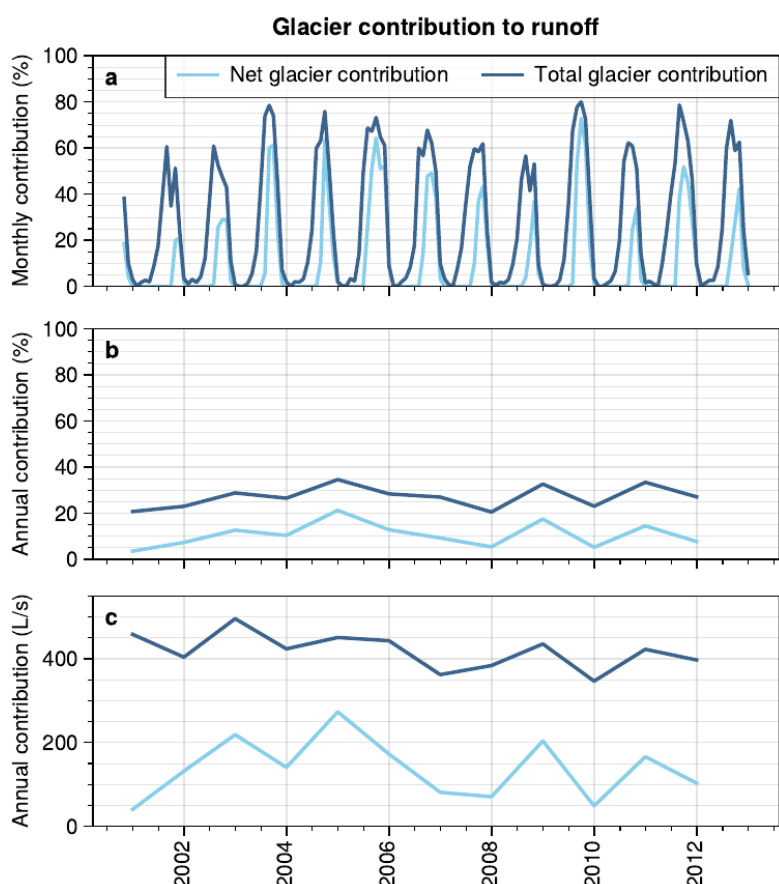


Figure 25 : Contribution mensuelle (a) puis annuelle (b et d), sur la période 2000-2012, de la fonte sur glaciaire (net glacier contribution) et glacio-nivale (total glacier contribution) au débit de l'Arvan

II.5. Conclusion

L'Arvan est un cours d'eau alpin au régime glacio-nival. Il prend sa source au glacier de Saint-Sorlin à 2700 m d'altitude. À Saint-Jean-d'Arves, à 1363 m, où le bassin versant couvre une surface de 58 km², il est caractérisé, sur la période 2002-2012, par un débit moyen annuel de 1850 L/S, avec un maximum de débit annuel de 4500 L/s survenant au mois de Mai, et un étiage hivernal marqué à 500 L/s au mois de Février. L'étiage automnale peut également être important, aux mois de septembre et octobre. En moyenne, la fonte de la neige contribue entre 40 et 60% au débit annuel de l'Arvan et le glacier de Saint-Sorlin contribue lui entre 20 et 35% selon les années. De plus, les eaux de fontes (neige et glace) sur le glacier contribuent pour près de 60% du débit de l'Arvan au mois d'août et se poursuivent en septembre et octobre, limitant les étiages en cette période.

III. USAGES ET PRELEVEMENTS

La description des différents usages de l'eau sur le bassin versant de l'Arvan à l'amont de Saint-Jean-d'Arves sont issus des stages d'Antoinette Jestin (2018) et de Dorothée Evrard (2020). Les informations résumées dans cette partie proviennent de données récoltées en ligne sur les sites de la BNPE (Banque Nationale des prélèvements quantitatifs en eau), du BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), Skiinfo, Météo France, la Banque Hydro (<https://hydro.eaufrance.fr/>), l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques), CRYOBS-CLIM (LaCRYosphère, un Observatoire du CLIMat), la DREAL (directions Régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement) Rhône-Alpes ainsi que de données récoltées auprès des utilisateurs et acteurs locaux de la gestion en eau tel que la Fromagerie, les Mairies de Saint-Jean et Saint-Sorlin-d'Arves, Sybelles, la Station d'épuration (SIVOM des Arves), le Service de l'eau potable de la Communauté de Communes Cœur de Maurienne Arvan (3CMA), SUEZ à Saint-Jean-de-Maurienne.

Le bassin versant de l'Arvan connaît une décroissance importante de la population permanente depuis la fin du XVIII^{ème} siècle. Alors qu'on comptait 2 569 habitants permanents dans les deux villages Saint-Sorlin et Saint-Jean-d'Arves en 1793, on n'en compte plus que 608 en 2018; une diminution de 76 % (Fig. 26a). Cependant, le bassin versant de l'Arvan connaît un accroissement très important de la population entre les mois de décembre et avril pour la saison touristique hivernale et entre les mois de juillet et août pour la saison touristique estivale. L'évolution saisonnière du nombre d'habitants a été calculé à partir des données de traitements de la STEP en considérant qu'1EH = 170 L/j (EH : équivalent-habitant est une unité conventionnelle de mesure de la pollution moyenne rejetée par habitant et par jour, Fig. 26b).

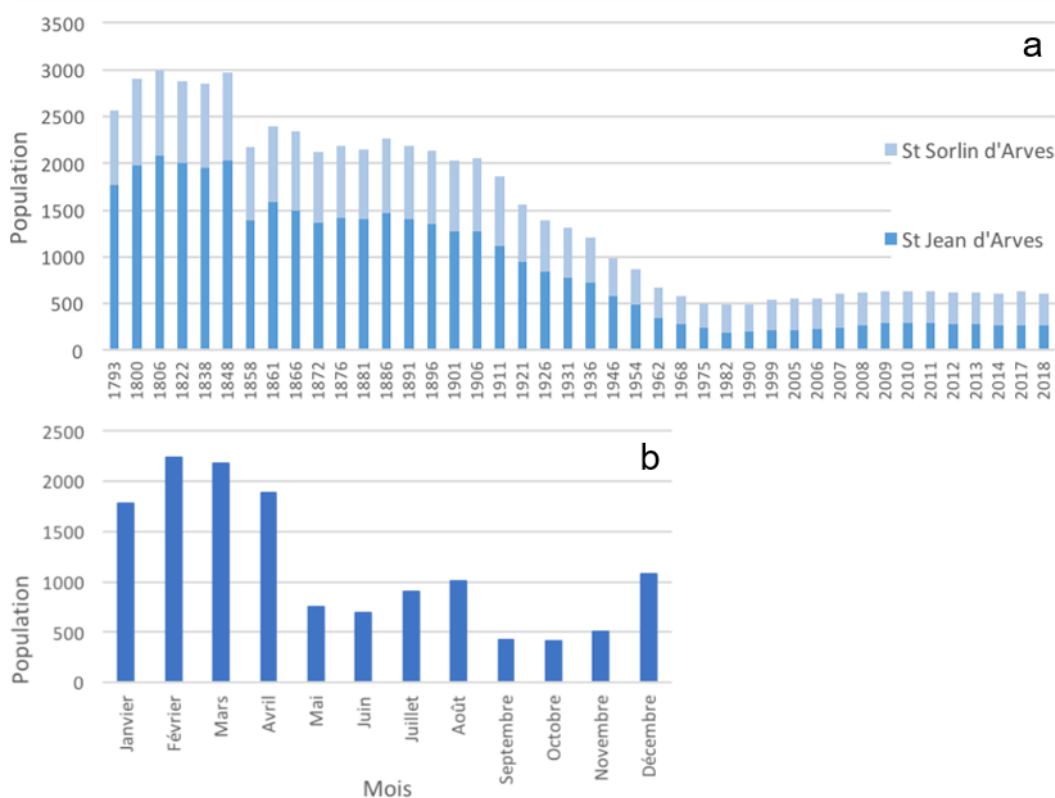


Figure 26 (a) Evolution annuelle du nombre d'habitants permanents à Saint-Jean et Saint-Sorlin-d'Arves de 1793 à 2018 (Insee, Mairies Saint-Jean et Saint-Sorlin-d'Arves). (b) Evolution mensuelle du nombre d'habitants permanents et touristiques et proportion en 2008 et 2010 à Saint-Jean et Saint-Sorlin-d'Arves (Insee, STEP Sivom des Arves)

Dans le bassin versant de l'Arvan englobant les deux communes de Saint-Sorlin et Saint-Jean-d'Arves Saint-Jean, les usages de l'eau sont : l'eau potable, la production de neige de culture, la fromagerie, l'élevage et l'hydroélectricité. L'eau utilisée pour ces différents usages provient du **lac Bramant** pour la consommation en eau potable, l'élevage, la fromagerie et la neige de culture, de la **source de la Vignette** pour la consommation en eau potable, de la **rivière Arvan** pour la neige de culture et l'hydroélectricité et d'autres petits torrents pour l'élevage estival (Tableau 3).

Tableau 3: Caractéristiques des captages d'eau pour l'eau potable (AEP) et la production de neige de culture (neige). Chiffres selon les arrêtés préfectoraux

Captages	Usages	Coord. Geo.	Alt. (m)	Débit de prélèvement maximum instantané (L/s)	Débit de prélèvement maximum annuel (m³/an)
Source de la Vignette	AEP	6,21720 - 45,22493	1702	8,7	120 000
Lac Bramant	AEP	6,175645 - 45,201663	2445	100	1 280 000
	neige				540 000
ARVAN (Plan du Moulin)	neige	6,231158 - 45,218307	1489	11,4	240 000
ARVAN (Les Mazets)	neige	6,260078 - 45,208684	1404	12	150 000

Alimentation en eau potable (AEP). Afin d'alimenter les communes en eau potable, l'eau est prélevée depuis le lac Bramant (pour les communes de Saint-Jean et Saint-Sorlin-d'Arves) et depuis la source de la Vignette (pour la commune de Saint-Sorlin-d'Arves). Le lac Bramant est une source externe au bassin versant de l'Arvan (Fig. 29) et une conduite gravitaire permet d'alimenter en eau potable les communes depuis ce lac. Il existe d'autre part une station de pompage de secours partant du lac. Pour la période 2015-2020, le volume d'eau potable distribué était en moyenne de 89 540 m³/an pour Saint-Sorlin-d'Arves et 83 986 m³/an pour Saint-Jean-d'Arves (Rapport 3CMA, 2020).

Production de neige de culture. Le bassin versant de l'Arvan comprend le domaine skiable des Sybelles et en particulier la station de ski de Saint-Sorlin-d'Arves. Cette station de ski est parcourue par 120 km de pistes et couvre une superficie skiable de 204 ha (*skiinfo*). Pour assurer un enneigement suffisant des pistes, de la neige de culture est produite chaque année. Pendant la période 2015-2020, en moyenne plus de 365 000 m³ d'eau sont consommée par an pour la neige de culture (DDT, Savoie). Il existe sur le bassin versant deux retenues collinaires : la retenue César Durand (160 000 m³) à Saint-Sorlin-d'Arves et la retenue du col de la Chal (100 000 m³) à Saint-Jean-d'Arves. La retenue César Durand est majoritairement remplie par la fonte de la neige au printemps ainsi que par un ruisseau à l'amont (146 332 m³/an pour la période 2015-2020). Elle est également alimentée en eau par la rivière de l'Arvan (prélèvement autorisé entre novembre et mars) au niveau du captage du plan du Moulin (101 321 m³/an pour la période 2015-2020 ; DDT, Savoie). Enfin, la retenue est aussi alimentée par de l'eau issue du réseau d'adduction d'eau potable directement depuis le lac Bramant (20 762 m³/an pour la période 2015-2020 ; Rapport 3CMA, 2020). La retenue collinaire du col de la Chal est également en partie alimentée par de l'eau potable (83 447 m³/an pour la période 2015-2020) et par la rivière de l'Arvan au niveau du captage des Mazets (14 126 m³/an pour la période 2015-2020 ; DDT, Savoie). A noter que, selon les arrêtés préfectoraux, les deux captages (plan du Moulin et Mazet) doivent permettre un débit instantané réservé au niveau de la station de la DREAL de 330 L/s.

Industrie. Une seule industrie est présente dans le bassin versant : la Fromagerie Coopérative Laitière de la Vallée des Arves. Celle-ci est raccordée à la STEP Sivom des Arves pour le traitement des effluents. La fromagerie consomme en moyenne 7 500 m³ d'eau par an, avec 2.5 millions de litres de lait collectés transformés en Beaufort (3L d'eau nécessaire par litre de lait transformé).

Agriculture. L'unique pratique agricole est l'élevage. On compte 250 vaches laitières (Tarines) à Saint-Jean-d'Arves et 150 vaches à viande à Saint-Sorlin-d'Arves. Une vache laitière consomme entre 90 et 120 litres d'eau par jour durant la période de lactation (10 mois). En dehors de cette période, cette consommation chute à 50 litres d'eau par jour. Ainsi, une fourchette de 30 à 39 m³ d'eau d'abreuvement par vache laitière peut être considérée par an. À cela s'ajoute l'eau de nettoyage pour la traite. Pour les élevages laitiers, 76 % de la consommation d'eau est effectuée pour l'abreuvement et 18 % pour la traite. Les autres bovins consomment quotidiennement de 30 à 50 litres d'eau (entre 10.8 et 18 m³/an). En été, 2 300 moutons et chèvres (consommation d'en moyenne 6 litres d'eau par jour) sont répartis sur les deux communes et en hiver on n'en compte plus que 500. Globalement, le bétail consomme l'eau des rivières l'été et de l'eau potable dans les exploitations agricoles l'hiver. On estime donc une consommation d'eau totale entre 14 920 et 17 783 m³/an pour l'agriculture sur ce bassin versant, dont 5 688 - 7 394 m³ d'eau potable pour les 6 mois d'hivers et 8 232 - 10 388 m³ d'eau non potable pour entre mai et octobre.

Hydroélectricité. Une petite centrale hydroélectrique du Pont des Tours est en service depuis 2019. C'est la centrale la plus en amont sur l'Arvan. Les principales caractéristiques du projet hydroélectrique indiquées sur l'arrêté préfectoral sont les suivantes :

- Module de l'Arvan estimé à la prise d'eau : 1,56 m³/s
- Cote de crête du barrage : 1 422,75 m NGF
- Niveau normal d'exploitation : 1 422,75 m NGF
- Cote de restitution à l'Arvan : 1 292,00 m NGF
- Hauteur de chute brute : 130,75 m
- Débit minimum d'amorçage de la turbine : 150 L/s
- Débit maximum prélevé : 3 m³/s, (soit 1,9 x le module)
- Puissance maximale brute : 3 848 kW
- Débit réservé de Mai à Août : 160 L/s, (10,3 % du module de l'Arvan)
- Débit réservé de Septembre à Avril : 270 L/s, (17,3 % du module de l'Arvan)
- Production d'énergie théorique escomptée par an : 8 000 000 kWh

La centrale hydroélectrique peut donc fonctionner lorsque le débit amont est au moins égal à la somme du débit réservé (160 ou 270 L/s) et du débit minimum d'amorçage de la turbine (150 L/s), soit un débit de 310 ou 420 L/s.

Ainsi, pour la période 2015-2020, 268 749 m³ d'eau potable a été distribuée dans le réseau pour les besoins en eau potable pour les deux villages (besoins domestiques, communaux, pertes), la production de la neige de culture, l'élevage et la fromagerie. De plus, 261 780 m³ sont prélevés directement dans les rivières (dont 115 447 m³ dans l'Arvan) pour la neige de culture et un maximum 10 388 m³ est directement consommé par les troupeaux l'été. On estime donc un besoin de 540 917 m³/an dans le bassin versant de l'Arvan, dont 66% pour la neige de culture et 32% en eau potable ; avec 50% distribué par le réseau d'eau potable (provenant de la source de la vignette et du lac Bramant) et 50% prélevé directement dans le milieu. A noter cependant que les prélèvements d'eau pour la production de la neige de culture varient fortement au cours de l'année selon les différentes sources (Fig. 28). On observe

ainsi un pic de prélèvement entre novembre et janvier dans la rivière de l'Arvan (jusqu'à 40 000 m³/mois) et en mai-juin lors de la fonte nivale dans les ruisseaux attenants à la retenue de César Durand. Ainsi, les prélèvements effectués au sein du bassin versant de l'Arvan (sans compter la source de la Villette) correspondent en moyenne sur l'année à environ 0.5% du débit moyen de l'Arvan, jusqu'à 1.76% au mois de janvier où les prélèvements sont les plus élevés et les débits les plus faibles.

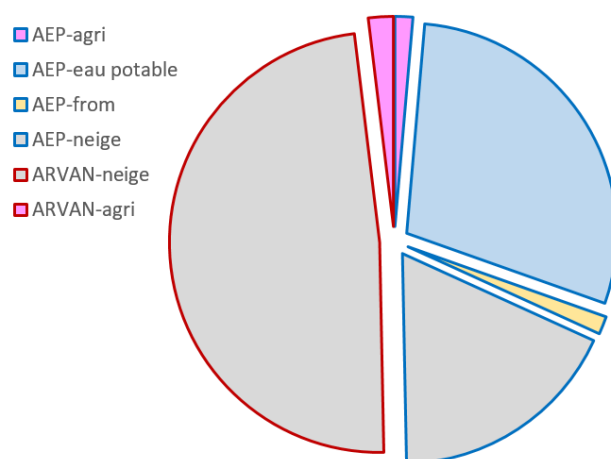


Fig. 27. Pour la période 2015-2020, répartition de la consommation d'eau annuelle en fonction des usages (agri : élevage, from : fromagerie, eau potable et neige de culture) et selon la source : eau potable distribuée (contour bleu) vs. prélèvement direct dans le milieu (contour rouge).

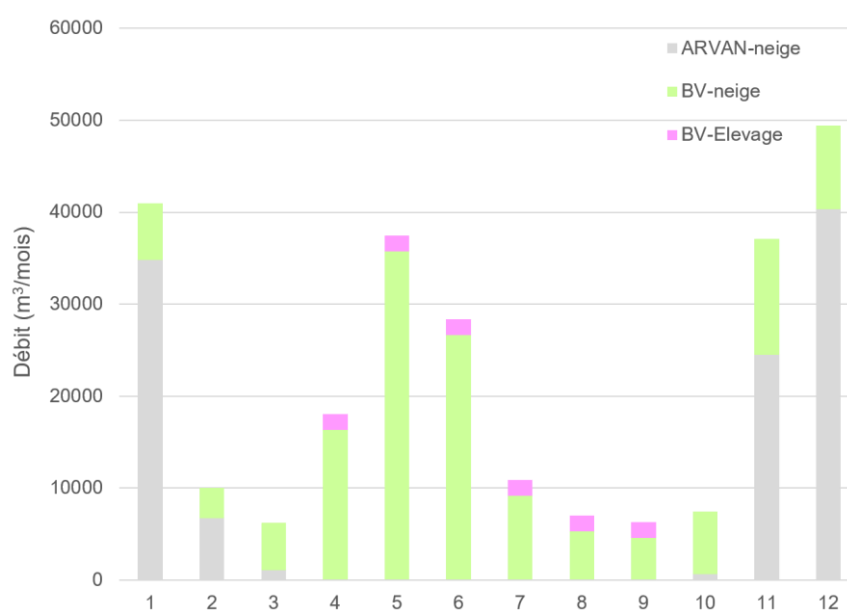


Fig. 28. Moyenne des volumes d'eau (en m³) prélevée par mois pour la période 2015-2020 pour la neige de culture dans la rivière Arvan (gris), dans les ruisseaux attenants à la retenue de César Durand (vert), et consommé par le pâturage l'été (rose).

IV ECOLOGIE

IV.1 Caractéristiques des habitats des rivières alpines

IV.1.1 Sites d'étude

Le bassin versant d'étude englobe une dizaine de cours d'eau permanents qui se jettent dans le cours d'eau principal de l'Arvan. Ces cours d'eau sont d'origine de fonte glaciaire, nivale, eau pluviale, ou de source. L'étude hydrobiologique a été réalisée sur 20 sites réparties entre 1430 et 2667m de façon à couvrir la plus forte hétérogénéité de conditions hydrologiques et environnementales (Fig. 29 et Tableau 4). Les sites sont ainsi localisés sur des cours d'eau depuis les têtes de bassin versant jusqu'en aval de confluences pour obtenir un gradient de contribution des différentes sources d'eau, depuis un maximum d'influence glaciaire jusqu'à des eaux de source, ainsi que leurs mélanges.

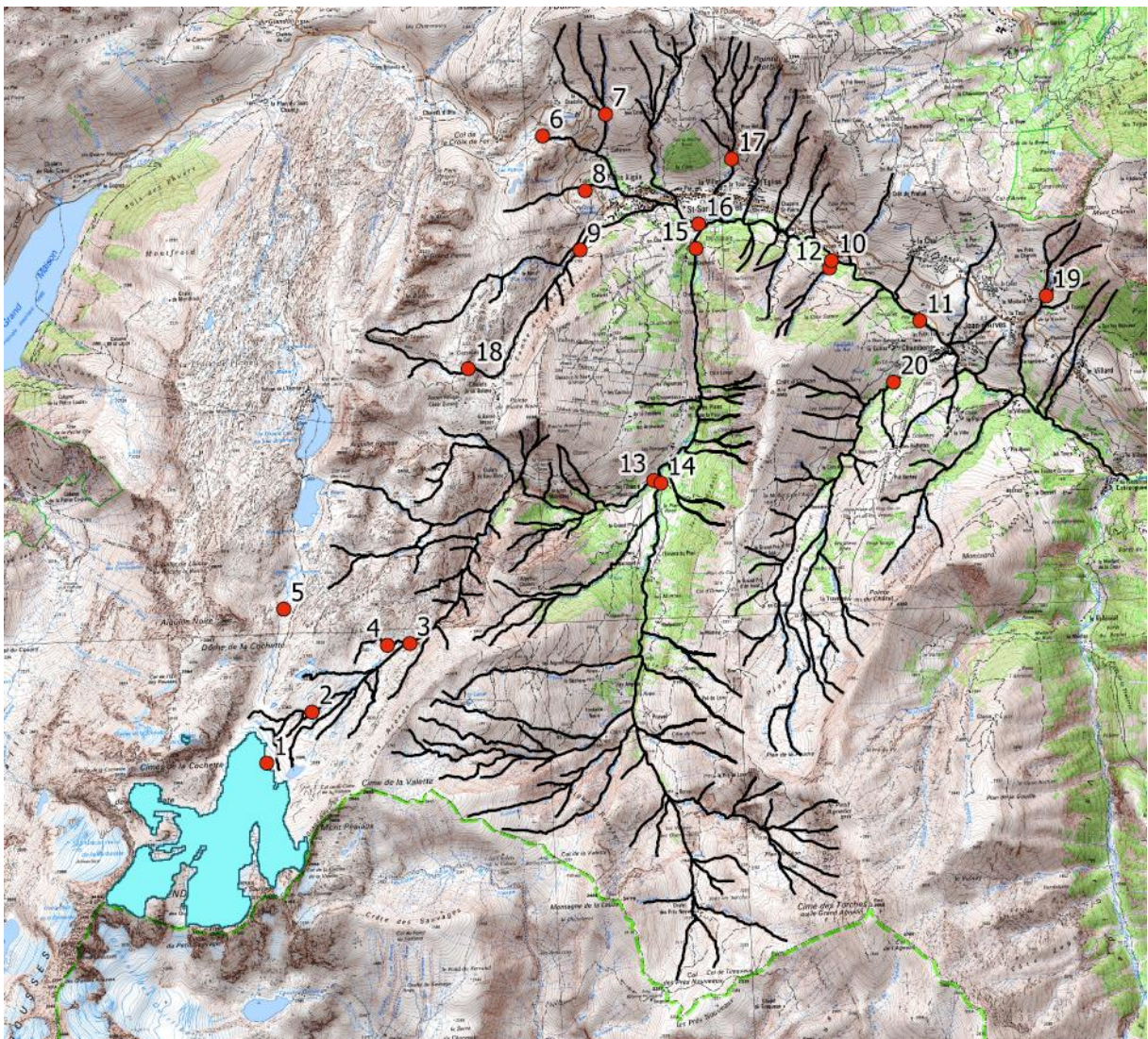


Figure 29. Sites d'études des communautés d'invertébrés aquatiques du bassin versant de l'Arvan

III.1.2 Régimes hydrologiques des rivières alpines

Pour chaque site, nous avons modélisé les débits à partir de J2000 (voir partie II) sur la période 2002-2012. A partir de ces simulations sur 10 ans, nous avons calculé les débits spécifiques (débits normalisés par la surface du bassin versant) ainsi que 3 indices hydrologiques qui permettent de caractériser les différents types de régime hydrologique. Qsum : la moyenne interannuelle du débit moyen d'été (de juin à septembre) ; CV : la moyenne interannuelle du coefficient de variation des 12 débits mensuels, et 30-Day Min : la moyenne interannuelle du débit minimal sur 30 jours consécutifs (30-Day Min). Sur la figure 30, on peut observer que les sites à forte influence glaciaire (sites 2, 3, 13) présentent les plus forts débits spécifiques mensuels. On observe également un décalage dans la saison des maximums de débits spécifiques mensuels des sites à influence d'eau de fonte exclusivement de neige (pic de débit en mai ; par ex. sites 7 et 9) aux sites avec influence de fonte de glace (pic de débit en juin). La date de l'augmentation des débits mensuels liée à la fonte est en partie liée à l'altitude, avec des dates plus précoces à de faibles altitudes (par ex. sites 14 et 15). Pour les cours d'eau sans influence glaciaire, la période d'étiage s'étale de début juillet à début octobre. Les sites localisés sur des cours d'eau à régime de type de nivo-pluvial (sites 7, 17, 19) sont particulièrement instables, avec des fortes variabilités temporelles (valeur de CV élevée, Fig. 31). Les sites à fortes influences glaciaires présentent les plus forts débits moyens estivaux (valeur de Qsum élevée).

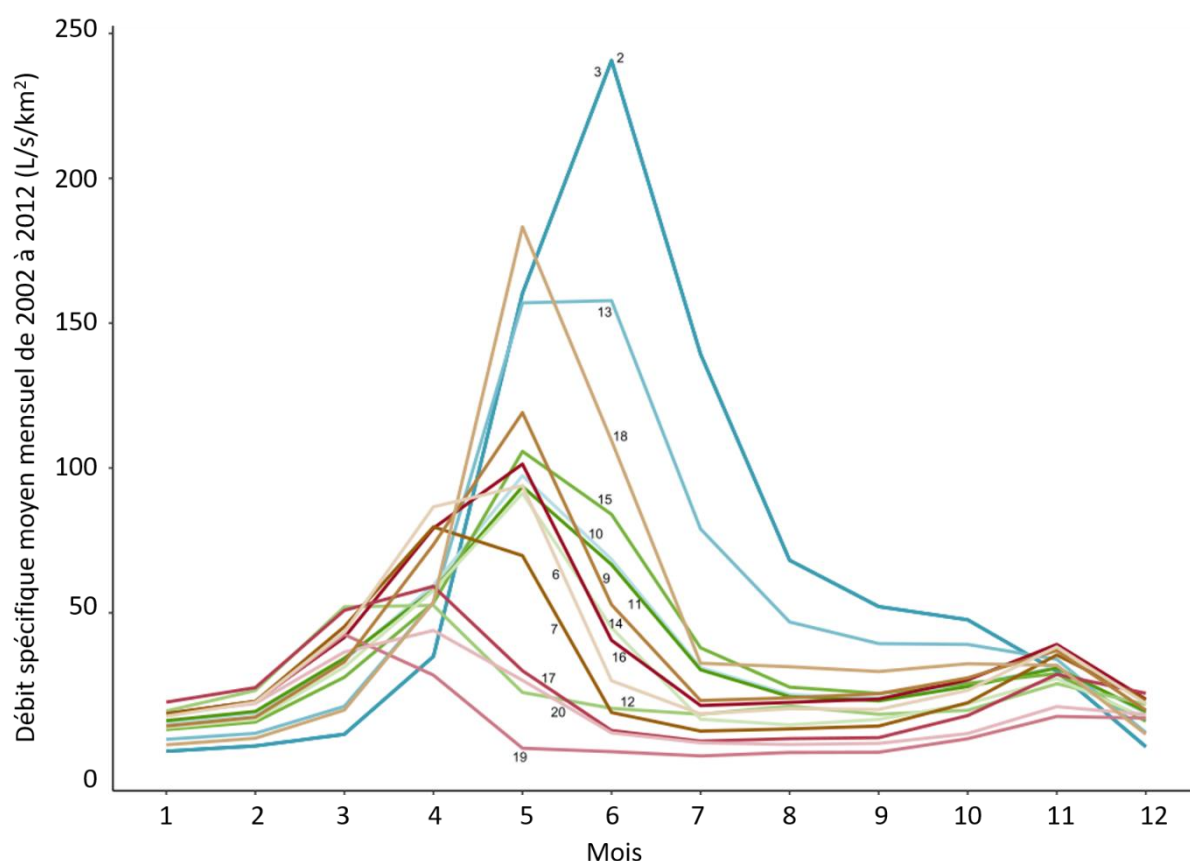


Figure 30. Débits spécifiques moyens mensuels simulés avec J2000 pour les 20 sites d'étude (période 2002-2012)

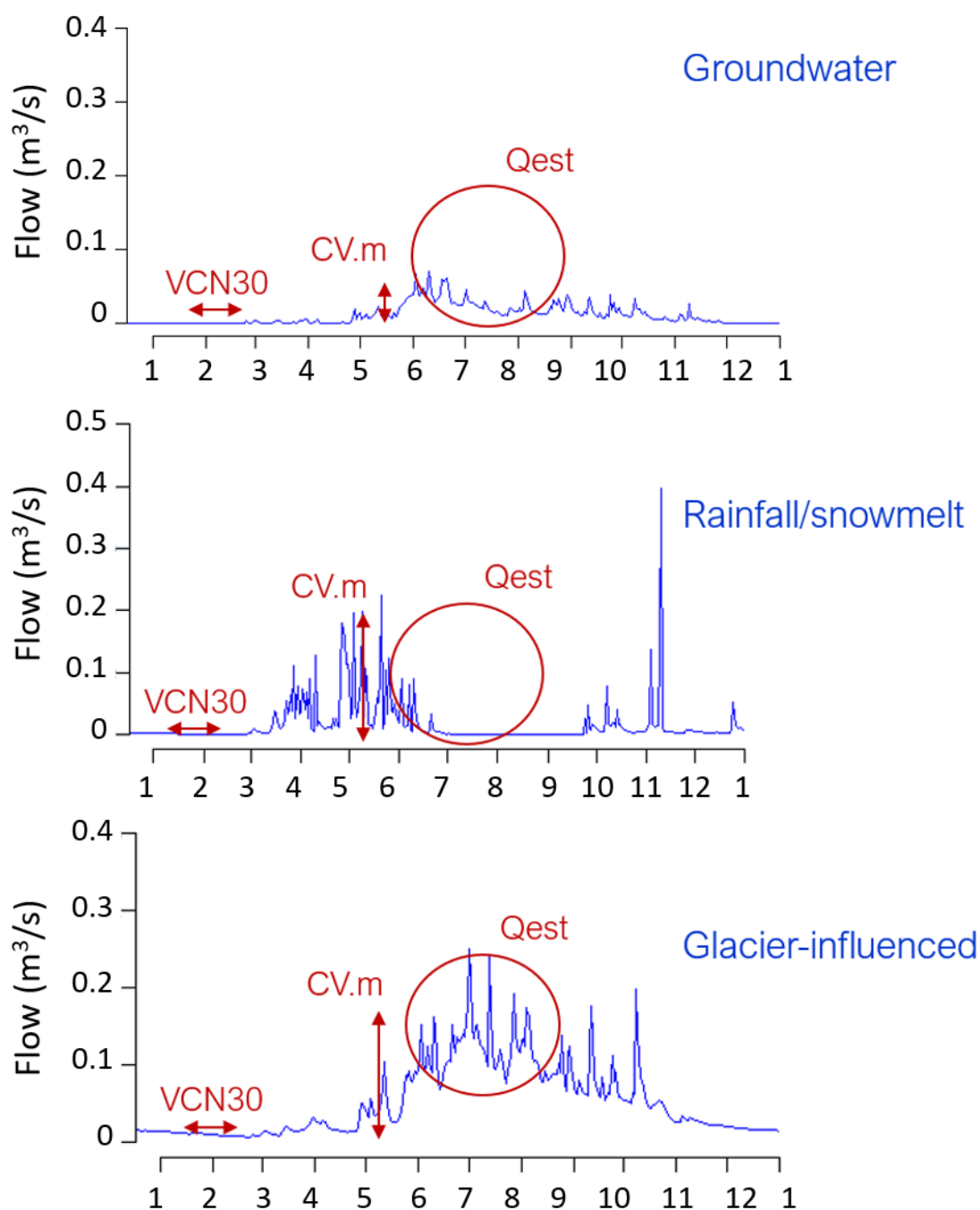


Figure 31. Exemple de régime hydrologique pour une rivière à dominante glaciaire, nivo-pluviale, et d'eau de source. Illustration des 3 indices hydrologiques : Q_{sum} : la moyenne interannuelle du débit moyen d'été (de juin à septembre) ; CV : la moyenne interannuelle du coefficient de variation des 12 débits mensuels, et 30-Day Min : la moyenne interannuelle du débit minimal sur 30 jours consécutifs (30-Day Min)

III.1.3 Conditions physico-chimiques et hydrauliques

La campagne hydrobiologique a été réalisée entre fin juillet et début août 2018. À chaque site, nous avons mesuré la température de l'eau, le pH, la concentration en oxygène dissous, la saturation en oxygène, la conductivité et la turbidité (appareils portables de mesure et sondes HACH et PONSEL). À

chaque point d'échantillonnage de macroinvertébrés (5 points par site, voir ci-dessous), nous avons également mesuré la hauteur d'eau, la vitesse à 40% de la hauteur d'eau et le substrat (granulométrie).

Les cours d'eau alimentés exclusivement par des glaciers sont caractérisés par une faible température de l'eau (< 4°C) qui augmente au fur et à mesure que l'on s'éloigne du front glaciaire. Les cours d'eau glaciaires présentent également une forte turbidité (c'est-à-dire une quantité importante de sédiments en suspension) liée à la farine glaciaire dissoute dans les eaux de fonte (Clarke 2005). A noter que le bassin versant de l'Arvan est un cas particulier car il abrite également des rivières non-glaciaires très turbides en raison des versants constitués de roches tendres particulièrement érodables qui se concentrent dans les rivières à la fonte des neiges ou lors d'épisodes pluvieux (Auberson 1952). Les rivières d'eau de fonte de glace et de neige présentent également une faible conductivité électrique contrairement aux eaux souterraines.

Tableau 4. Caractéristiques environnementales mesurées pendant la campagne d'échantillonnage de macroinvertébrés.

sites	%GCC	elevation (m)	mean width (m)	mean depth (cm)	temperature (°C)	ph	conductivity (μS/cm, 25°C)	turbidity (NTU)	oxygen concentration (mg/l)	oxygen saturation (%)	lat (Decimal Degrees)	long (Decimal Degrees)
1	63.7	2667	0.83	1.59	1.3	8.8	17	103	9.13	92	45.167404	6.167356
2	48.3	2633	5.00	18.60	2.2	7.6	12	124	9.70	96	45.17226	6.173809
3	37.5	2393	5.97	28.93	6.7	7.4	18	45	8.90	96	45.178559	6.187868
4	0.0	2455	2.55	6.43	11.5	7.8	68	3	7.52	94	45.178482	6.184735
5	0.0	2509	2.00	11.20	4.0	7.8	298	3	9.50	97	45.182429	6.170569
6	0.0	1959	0.85	5.77	14.8	7.6	58	9	7.56	94	45.227958	6.208934
7	0.0	1862	0.59	3.26	15.6	8.5	292	46	7.67	96	45.229676	6.217974
8	0.0	1722	0.56	6.93	13.1	7.8	26	1	8.13	95	45.222268	6.214717
9	0.0	1732	3.24	11.03	10.0	8.1	154	2	8.63	94	45.216469	6.213683
10	4.4	1467	9.22	29.89	12.4	8.2	292	31	8.54	NA	45.214293	6.248599
11	4.2	1430	5.50	20.37	9.7	8.0	280	30	8.93	NA	45.208537	6.26005
12	0.0	1475	0.74	2.71	18.2	8.3	468	18	7.38	NA	45.213726	6.248228
13	15.8	1602	6.00	21.21	6.9	7.8	210	7	9.56	95	45.193584	6.222568
14	0.0	1607	4.77	10.14	12.2	8.6	488	73	8.34	95	45.193286	6.223571
15	6.2	1506	7.39	27.20	12.8	8.2	290	50	8.28	94	45.216159	6.229745
16	0.0	1496	2.17	8.54	13.5	8.3	291	5	8.46	96	45.218926	6.228385
17	0.0	1566	1.25	4.75	17.6	8.4	333	1	7.63	96	45.224791	6.235196
18	0.0	2206	0.77	11.50	9.7	8.5	98	3	8.46	96	45.20496	6.196987
19	0.0	1601	0.69	1.50	22.0	8.2	2430	21	7.14	99	45.210173	6.278421
20	0.0	1461	1.83	7.55	18.0	8.4	1124	4	7.47	NA	45.20417	6.257253

III.2. Macroinvertébrés des rivières alpines

III.2.1 Composition des communautés benthiques

Pendant la campagne hydrobiologique spatiale (été 2018), nous avons réalisé pour chaque site un échantillonnage de la communauté de macroinvertébrés benthiques à partir de filet surber (5 échantillonnages répartis aléatoirement sur le site, chacun de 0.05 m², maille du filet à 500 μm). Les macroinvertébrés étaient ensuite conservés dans le l'éthanol (96%) jusqu'au tri et identification en laboratoire à la loupe binoculaire (LEICA, M 205C). Les ordres des Ephéméroptères, Plécoptères, Trichoptères et Coléoptères ont été identifiés au genre ou à l'espèce lorsque cela était possible, tandis que la majorité des Diptères ont été identifiés à la famille ou à la sous-famille. Les références utilisées pour l'identification des macroinvertébrés sont répertoriées dans l'appendice 1.



Figure 32. Illustration des mesures environnementales et échantillonnages d'invertébrés sur le bassin versant de l'Arvan

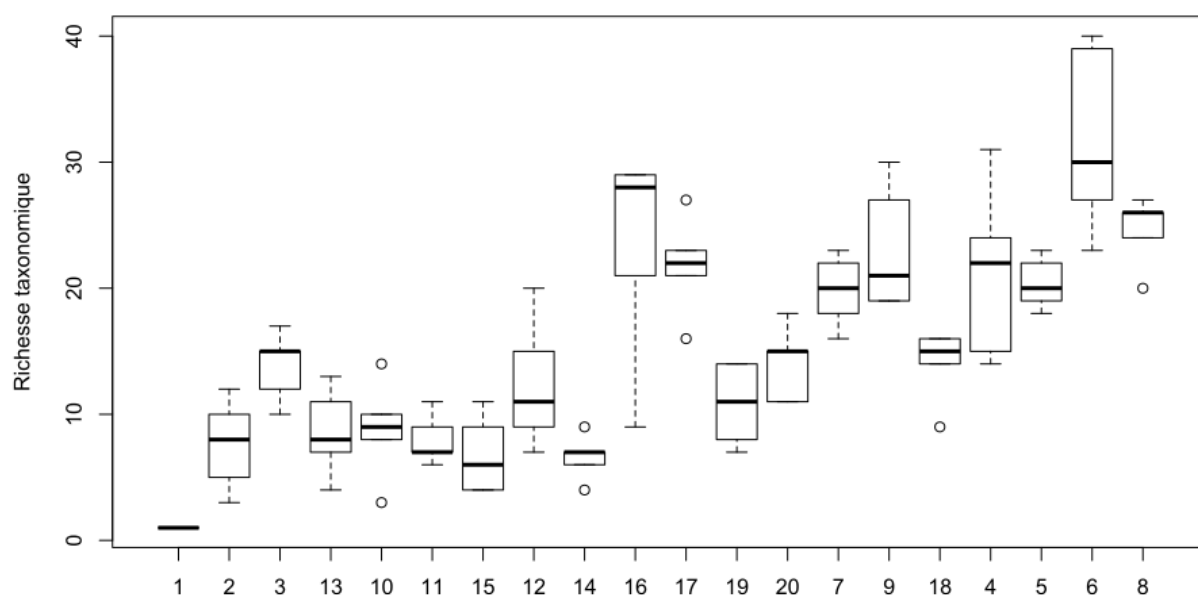
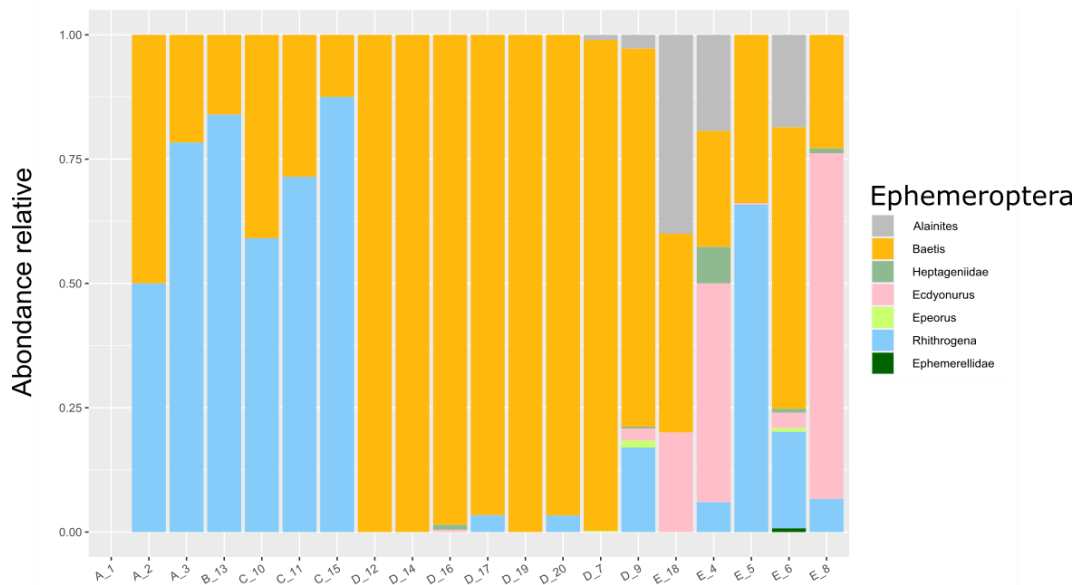
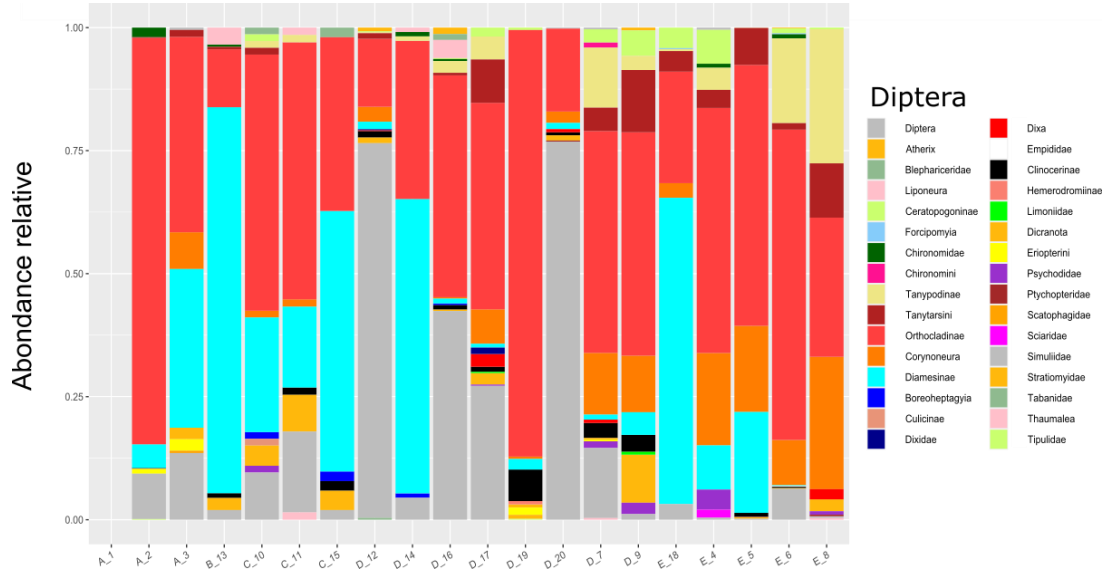
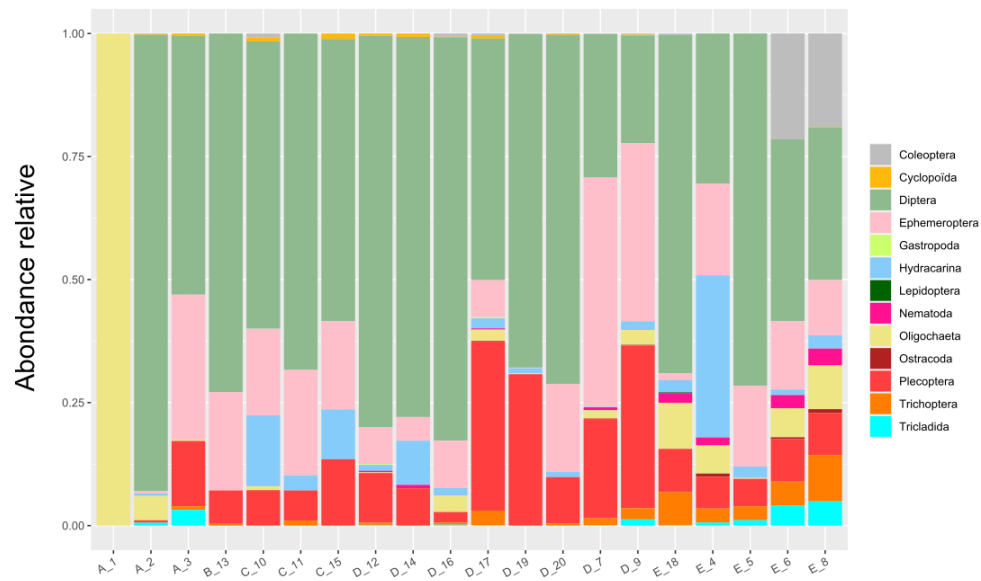


Figure 33. Richesse taxonomique moyenne par site pour les 20 sites de l'Arvan, classé par ordre d'influence glaciaire décroissant.

La richesse taxonomique (nombre de taxons par site) varie entre 1 (site 1) et 48 (site 6) avec un minimum dans les sites à forte influence glaciaire et un maximum dans les sources d'altitude (Fig. 33). Les densités varient entre 20 et 23120 individus par m². Globalement, les diptères sont dominants dans la majorité des sites (58%), suivis des éphémères (15%), et plécoptères (12%, Fig. 34). Parmi les éphémères, le genre *Rhithrogena* est dominant dans les rivières avec influence glaciaire, alors que les *Baetis* présentent les plus fortes abondances dans les autres rivières alpines. Parmi les plécoptères, les *Protonemura* dominent dans la majorité des sites. Les trichoptères (2.5%) ne sont présents que dans 15 sites, avec *Rhyacophilidae* et *Limnephilidae* comme familles dominantes.



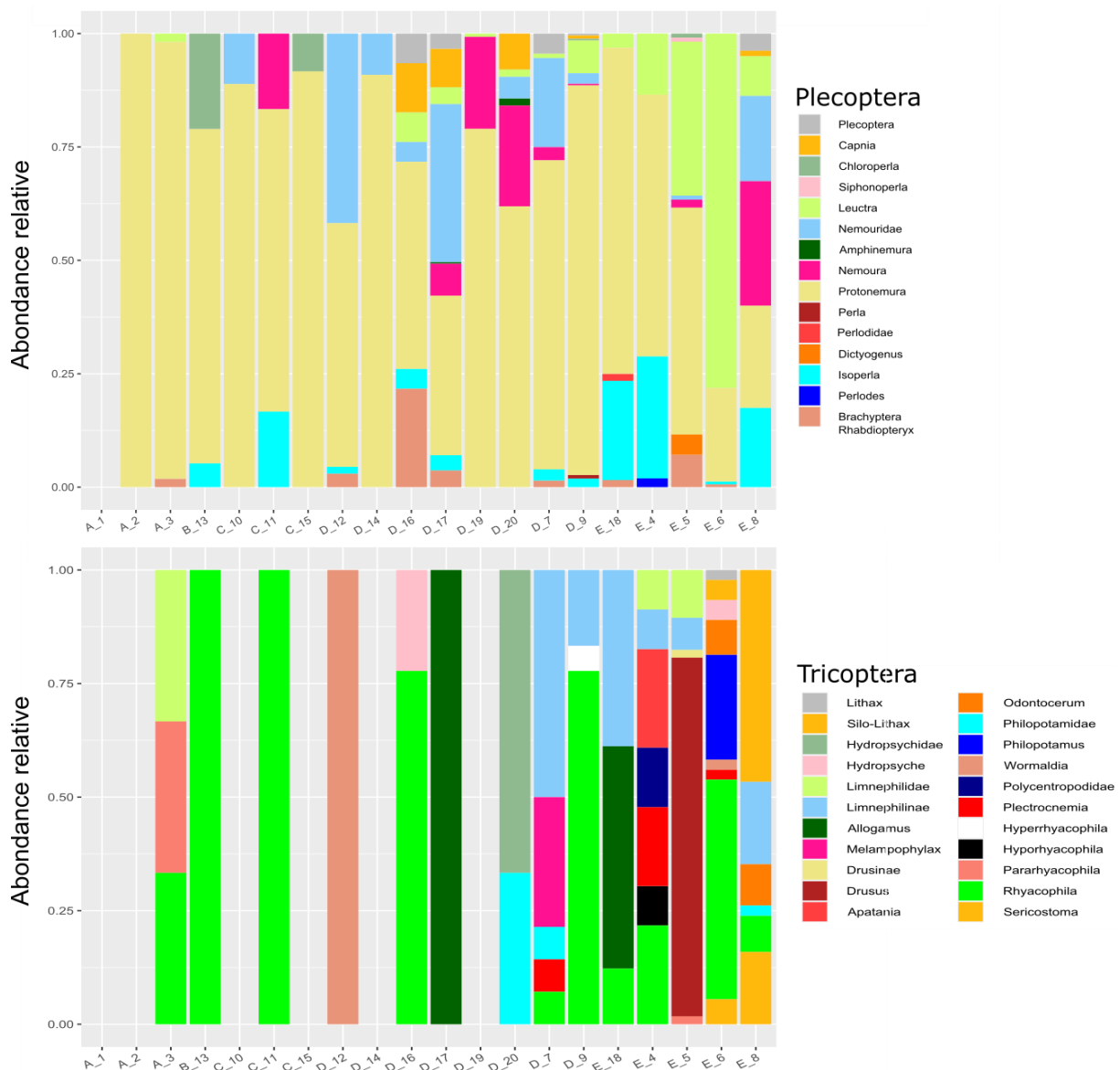


Figure 34. Abondance relative des taxons dominants pour 1) toute la communauté de macroinvertébrés, 2) les Diptères, 3) les Plécoptères, 4) les Ephémères et 5) les Trichoptères. Les lettres A, B, C, D, E et F sur l'axe des abscisses indiquent la typologie de rivière alpine des 20 sites (voir Fig. 36 pour les différents groupes)

III.2.2. *Rhithrogena delphinensis*, une espèce particulière

Parmi les 48 taxons collectés, nous avons identifié l'espèce *Rhithrogena delphinensis* (Fig. 35.). Il s'agissait d'une espèce des Alpes occidentales connue au sud du massif des Arves et en bordure Nord du massif des Ecrins par seulement 4 larves. *R. delphinensis* appartient au groupe *alpestris sensu* Sowa (1984), dont 5 espèces sont connues dans les Alpes occidentales : *R. delphinensis*, *R. alpestris* Eaton, 1885, *R. alpestris*, *R. allobroga* Sowa & Degrange 1987, *R. vaillanti* Sowa & Degrange, 1987 et *R. landai* Sowa & Soldán, 1984 (Bauernfeind & Soldán, 2012). La description originale de *R. delphinensis* ne fut réalisée qu'à partir d'une unique larve capturée en 1959 dans un torrent des Hautes-Alpes, au Sud du Massif des Arves : *Holotype* larve âgée, *provenance* : torrent du Gâ à le Chazelet (département des Hautes-Alpes, France), *altitude* 1700 m, 27.VII.1959 (*leg. Ch. Degrange*) (Sowa & Degrange, 1987). L'espèce est décrite comme très proche de *R. alpestris*. En 1986, des collectes complémentaires dans le

ruisseau du Gâ et de la Romanche près de la Grave (Hautes-Alpes) ont permis de capturer 3 nouveaux individus. Ainsi, Degrange et Sowa (1988) apportent des compléments à la description de la larve de stade intermédiaire et à partir d'individus plus récents que l'holotype.

Depuis 1986, l'espèce n'avait plus jamais été observée. Dans le cadre de ce projet, nous avons collecté cette espèce sur les sites 10, 11, 13 et 15, c.-à-d., exclusivement dans des cours d'eau présentant une influence glaciaire. En complément de la campagne hydrobiologique spatiale, une campagne temporelle a été réalisée. Suivant le même protocole que celui présenté précédemment, les sites 10 et 11 ont été échantillonnés 10 fois entre 2018 et 2020. Les densités observées pendant ces 3 années laissent à penser que la population de *R. delphinensis* de ces sites de l'Arvan est particulièrement bien structurée et se trouve dans son optimum écologique. Quel que soit le stade de développement, les larves colonisent des substrats minéraux de type galets/blocs, nettement dominants dans ces cours d'eau. Avec $0,8 \text{ m.s}^{-1}$ en moyenne et des valeurs comprises entre $0,03$ et $1,7 \text{ m.s}^{-1}$, les gammes de vitesses sélectionnées par *R. delphinensis* sont fortes. *R. delphinensis* est donc une espèce rhéophile, à l'image de la majorité des *Rhithrogena* (Buffagni et al. 2021). Le cortège de *Rhithrogena* collectées sur les sites à *R. delphinensis* est sensiblement le même sur l'Arvan que sur le Torrent du Gâ et la Romanche, à savoir un cortège typiquement orophile : *R. nivata*, *R. loyolaea*, *R. hybrida* et *R. alpestris*.



Figure 35. Photo de larve de *Rhithrogena delphinensis* prise dans la rivière de l'Arvan (gauche) et au laboratoire (droite)

III.3 Facteurs d'impact des macroinvertébrés

III.3.1 Sites d'étude (3 bassins versants sous influence glaciaire)

Afin d'améliorer notre compréhension des processus structurant les communautés benthiques, nous avons étudié les relations hydrobiologiques dans 3 bassins versants. Dans le cadre d'un projet complémentaire, BERGER, financé par la région AuRA et d'une thèse CIFRE INRAE-TEREO, des mesures hydrobiologiques similaires (même protocole) ont été réalisées dans deux autres bassins versants alpins : l'Arve et la Vanoise (Fig. 36). Ainsi, les trois bassins versants glaciaires (Arve, Vanoise, Arvan) présentent un pourcentage variable de couverture glaciaire. Le bassin versant Arve (199 km^2 , 1020-4246 m

d'altitude, 30 %GCC à Chamonix) dans le massif du Mont-Blanc, incluait 60,4 km² de couverture glaciaire en 2015, dont la Mer de Glace et l'Argentière. Le bassin versant de la Vanoise (70 km², 1702-3588 m d'altitude, 13 %GCC à Pralognan-la-Vanoise) dans le parc national de la Vanoise, comprend les glaciers du Génepy, de la Rosoire, de la Masse et de la Gebroulaz, couvrant respectivement 1,4, 0,4, 0,2 et 2,9 km² en 2015. Le bassin versant de l'Arvan (58 km², 1402-3465 m d'altitude, 4 %GCC à Saint-Jean-d'Arves) est situé dans le massif des Grandes Rousses, et comprend le glacier de Saint-Sorlin, qui couvrait une superficie de 2,1 km² en 2015 (Paul et al. 2020). En plus des 20 sites de l'Arvan, 29 sites sur l'Arve, et 17 sites en Vanoise ont été sélectionnés le long d'un gradient d'influence glaciaire afin d'englober le maximum de types d'habitats. Sur ces 66 sites, les mêmes mesures physico-chimiques et hydrauliques ainsi que les mêmes simulations hydrologiques ont été réalisées afin d'étudier l'effet des conditions environnementales, hydrologiques et hydrauliques sur la distribution spatiale des macroinvertébrés benthiques.

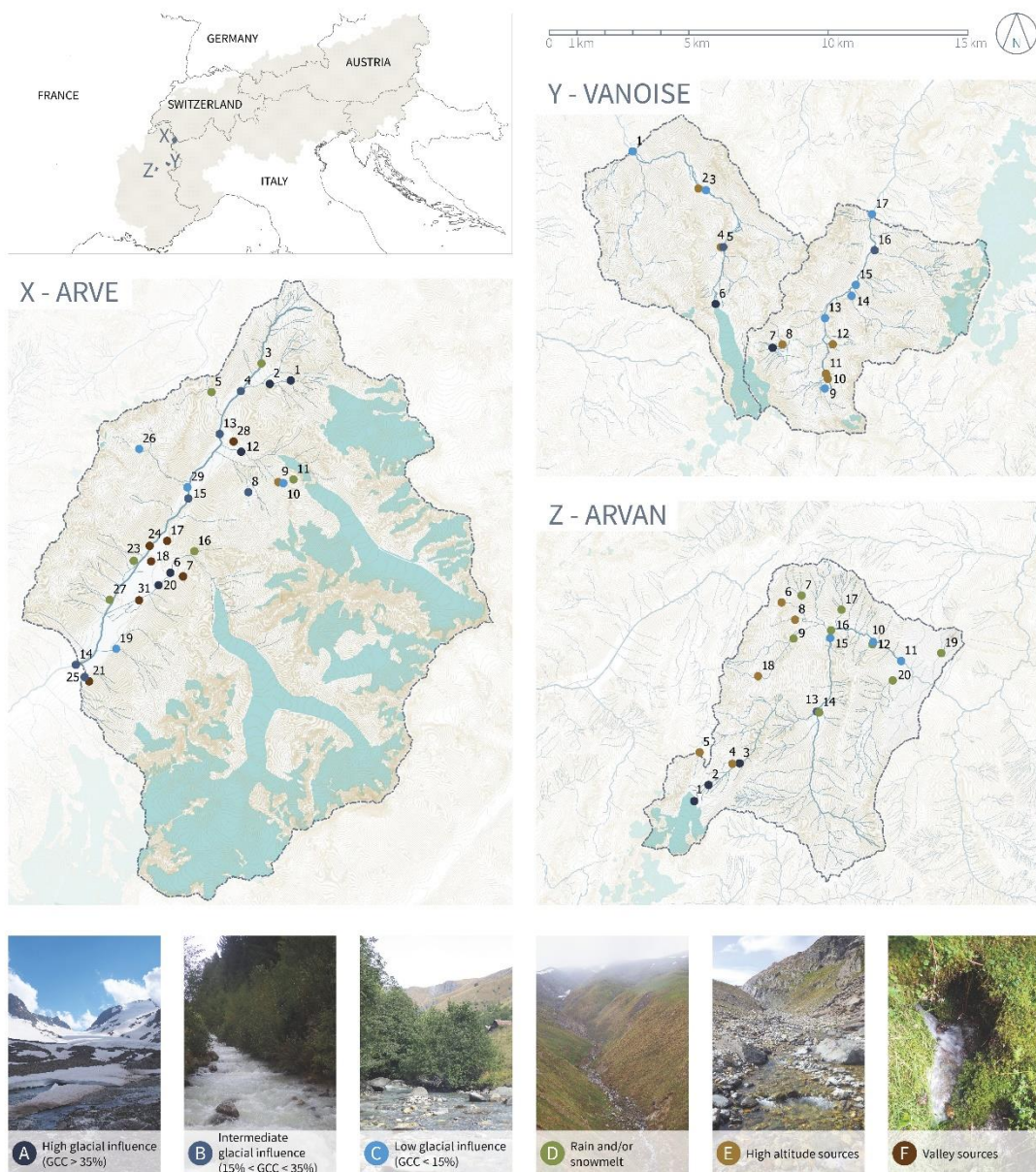


Figure 36. Carte des trois bassins versants alpins et répartition géographique des sites d'étude, classés selon les six types de rivières alpines, groupes A-F. Les formes bleues correspondent aux zones de glaciers en 2015 (Paul et al., 2020). GCC signifie couverture glaciaire dans le bassin versant

Pour caractériser les conditions d'habitats locales (conditions environnementales, hydrologiques et hydrauliques) selon les types de rivières alpines, nous avons défini six groupes selon l'origine de leur source en eau et de l'altitude. Les groupes (A-C) sont en partie alimentés par l'eau de fonte glaciaire et les D-F n'ont aucune influence glaciaire. Les groupes A, B et C ont été séparés selon leur degré d'influence glaciaire, avec une influence glaciaire élevée ($GCC > 35\%$), intermédiaire ($15\% < GCC < 35\%$) et faible ($GCC < 15\%$), respectivement. Le groupe D est alimenté par les précipitations et/ou la fonte des neiges et les eaux souterraines. Les groupes E-F sont majoritairement alimentés par les eaux souterraines et se situent à moins de 1 km de la source ; E-F). Le groupe E comprend les sources d'altitude (> 1500 m) et le groupe F les sources de fond de vallée.

Pour évaluer comment la structure de la communauté était liée à l'environnement, nous avons utilisé une analyse multivariée de co-inertie (Dolédec & Chessel, 1994), dont les résultats sont présentés dans la figure 37.

III.3.2 Lien entre habitats et communautés

Au sein des trois bassins versants, nos sites d'étude présentent une forte hétérogénéité des conditions environnementales. Par exemple, la turbidité varie entre 0,01 et 2380 NTU, la vitesse d'écoulement varie entre 0,017 et 0,810 m/s, et le débit estival varie entre 0,06 et 2,58 (Tableau 5). La carte factorielle environnementale (Fig. 37a) montre que les groupes A-F présentent des conditions d'habitat différentes. En particulier, les groupes avec influence glaciaire A-C ont une turbidité et un débit estival (Q_{sum}) plus élevés. Les sites ayant un faible débit minimal sur 30 jours consécutifs correspondent aux sites à plus haute altitude. Les sites non glaciaires et les plus éloignés de leur source (D) sont associés à une plus grande variabilité du débit mensuel, de la température et de la conductivité. Ainsi, la variabilité environnementale entre les sites du groupe D est bien plus importante que dans les groupes E-F (d'après la taille des ellipses, figure 37a). Les conditions environnementales des sites du groupe E varient en fonction du débit estival, de la vitesse d'écoulement et de la température. Le pH et la taille du substrat étaient moins représentés sur les deux premiers axes du CoA.

Tableau 5: Caractéristiques environnementales des sites des trois bassins versants. Les valeurs correspondent à Moyenne \pm Ecart-type [Minimum – Maximum]

	Arve	Vanoise	Arvan
GCC (%)	15 \pm 19 [0 – 56]	12 \pm 16 [0 – 50]	9 \pm 18 [0 – 64]
ALT (m a.s.l.)	1374 \pm 375 [1025 – 2348]	2168 \pm 258 [1708 – 2620]	1867 \pm 439 [1430 – 2667]
SLO (°)	14 \pm 13 [1 – 55]	8 \pm 7 [1 – 21]	10 \pm 7 [1 – 25]
WID (m)	3.8 \pm 3.9 [0.2 – 14.0]	3.8 \pm 2.0 [1.0 – 7.0]	3.1 \pm 2.6 [0.6 – 9.2]
TEMP (°C)	9.5 \pm 3.1 [3.4 – 18.0]	5.3 \pm 2.7 [0.1 – 9.5]	11.6 \pm 5.5 [1.3 – 22.0]
pH (-)	8.0 \pm 0.4 [7.3 – 8.9]	8.0 \pm 0.2 [7.4 – 8.6]	8.1 \pm 0.4 [7.4 – 8.8]
COND (μ S/cm ²)	114 \pm 153 [8 – 609]	344 \pm 389 [56 – 1611]	362 \pm 548 [12 – 2430]
OXY (mg/L)	9.6 \pm 2.0 [1.8 – 11.8]	9.5 \pm 0.5 [8.8 – 10.6]	8.3 \pm 0.8 [7.1 – 9.7]
TURB (NTU)	74 \pm 171 [0 – 635]	420 \pm 825 [2 – 2380]	29 \pm 36 [1 – 124]
DEP (cm)	12.0 \pm 5.7 [2.8 – 23.6]	13.0 \pm 3.9 [7.0 – 18.6]	14.3 \pm 9.0 [2.0 – 32.6]
VEL (m/s)	0.22 \pm 0.13 [0.02 – 0.58]	0.39 \pm 0.10 [0.31 – 0.61]	0.38 \pm 0.21 [0.05 – 0.81]
SUB (mm)	83 \pm 34 [1 – 136]	86 \pm 22 [51 – 123]	100 \pm 35 [20 – 173]
Qsum (-)	1.61 \pm 0.45 [0.50 – 2.58]	1.99 \pm 0.41 [1.51 – 2.55]	0.95 \pm 0.56 [0.06 – 1.83]
CV (-)	1.13 \pm 0.52 [0.40 – 2.13]	1.50 \pm 0.33 [0.96 – 2.06]	2.02 \pm 0.78 [1.28 – 4.76]
30-Day Min (-)	0.10 \pm 0.07 [0.00 – 0.27]	0.03 \pm 0.03 [0.00 – 0.07]	0.06 \pm 0.04 [0.00 – 0.11]

Au total, nous avons collecté 45 742 individus, appartenant à 187 taxons de 19 ordres différents. La richesse taxonomique moyenne était de 23, allant de 1 sur le site Arvan 1 à 52 sur le site Arve 7. La richesse taxonomique augmente du groupe A au groupe F. La densité moyenne est de 2 772 ind/m², avec un minimum de 4 ind/m² sur le site Arvan1 et un maximum de 14 936 ind/m² sur le site Arve 9. Nous avons identifié 128 taxons dans l'Arve, 121 dans l'Arvan et 82 dans la Vanoise. Parmi les 187 taxons identifiés, 45 taxons étaient communs aux trois bassins versants, tandis que 43, 15 et 30 étaient présents exclusivement en Arve, Vanoise et Arvan, respectivement (Appendice 2). En terme d'abondance relative, les diptères sont l'ordre le plus représenté (48,6%), suivi des plécoptères (12,0%) et des éphéméroptères (11,8%). Les trichoptères et les coléoptères représentent respectivement 3,8% et 0,9% des individus. Les diptères sont dominants dans les groupes A à E, représentant respectivement 45%, 60%, 53%, 49% et 50% de l'abondance totale dans ces groupes, contre 24% dans le groupe F. Les éphéméroptères sont plus dominants dans les cours d'eau alimentés par des glaciers (29%, 29% et 19% pour les groupes A à C, respectivement) que les cours d'eau non glaciaires (par exemple, seulement 4% pour le groupe F). Les trichoptères ont une abondance relative plus élevée dans les cours d'eau non glaciaires.

La figure 37b montre **principalement un effet de l'influence glaciaire sur la structure des communautés**. Elle indique que la composition des communautés benthiques est relativement similaire au sein des groupes A, B et F (ellipses plus petites) par rapport aux groupes C, D et E. Les groupes A et B présentent une composition de communauté benthique similaire (superposition des ellipses), caractérisés par une faible abondance totale, associée à de fortes valeurs de turbidité et de débit estival. Les groupes C et E comptent des abondances plus élevées de *Diamesinae*, *Rhithrogena spp*, *Dictyogenus spp*, *Baetis alpinus*, et *Crenobia alpina*, associés à des débits estivaux et vitesses élevées. Les groupes D et F

comptent eux des abondances plus élevées de *Baetis alpinus/melanonyx*, Tanypodinae, Simuliidae, *Protonemura* spp. et Orthocladiinae, associés à des températures, variabilités de débits mensuels et conductivités élevés.

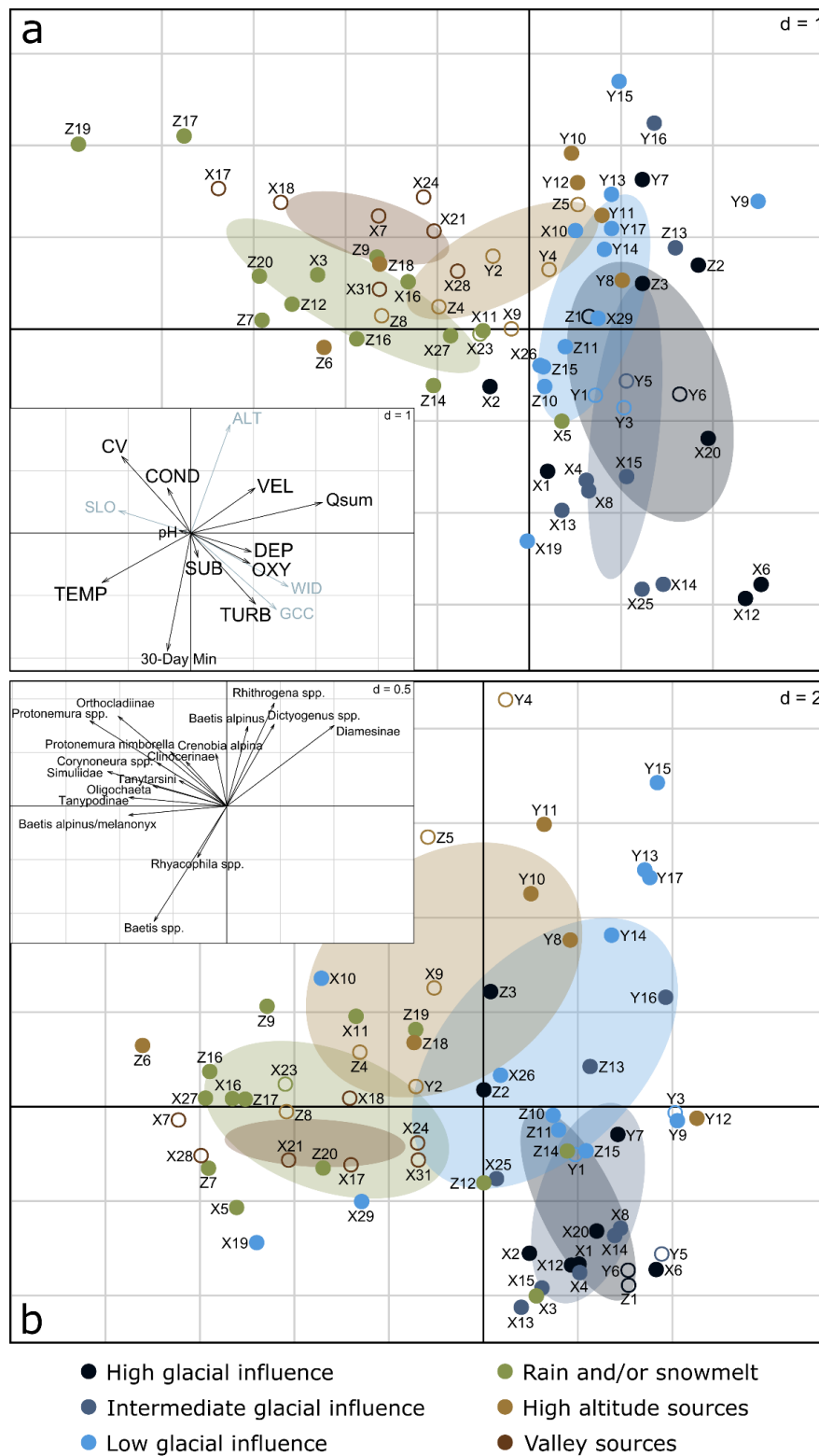


Figure 37. Cartes factorielles environnementales (a) et biologiques (b) des sites selon l'analyse de co-inertie. X, Y et Z correspondent aux bassins versants de l'Arve, de la Vanoise et de l'Arvan. Les ellipses regroupent 66 % des sites pour chaque groupe de rivières alpines. Les points vides correspondent aux

sites projetés comme sites supplémentaires en raison de certaines valeurs environnementales manquantes. Les encarts montrent les scores factoriels des variables environnementales (a, les variables géographiques (en gris) sont projetées ici comme variables supplémentaires uniquement) et les scores factoriels des taxons de macroinvertébrés (b, uniquement ceux ayant des scores $\geq 0,4$ en valeur absolue)

III.3.3 Lien entre habitats et populations

Pour caractériser le lien entre les variables d'habitat et l'abondance des macroinvertébrés à l'échelle de la population, nous avons utilisé des modèles linéaires généralisés à effets mixtes (GLMM.NB, en supposant une distribution binomiale négative des abondances de macroinvertébrés), avec les variables physico-chimiques, hydrauliques et hydrologiques (variables d'habitat) comme effets fixes et l'identité du bassin versant comme effet aléatoire. Ces modèles ont été appliqués aux 23 taxons les plus abondants: 9 Diptères (principalement identifiés à la sous-famille), 5 Ephéméroptères (dont 2 à l'espèce), 4 Plécoptères, et *Rhyacophila* spp, Hydracarina, Oligochaeta, *Crenobia alpina* et Nematoda (Tableau 6). Pour tous les modèles, les trois types de variables d'habitat (physico-chimiques, hydrauliques et hydrologiques) contribuent de manière significative à la distribution des macroinvertébrés. Au moins une des cinq variables physico-chimiques était présente dans 91% des modèles (sauf pour *Liponeura* spp. et *Rhithrogena loyolaea*). La turbidité est le facteur physico-chimique principal, avec un effet négatif sur l'abondance significatif dans 83 % des modèles, sauf pour *Liponeura* spp., Clinocerinae, Diamesinae et *Rhithrogena loyolaea*. Au moins une des variables hydrauliques est incluse dans 74% des modèles de taxons. En particulier, la vitesse (dans 43% des modèles) avec un effet négatif significatif sur 9 taxons, dont Ceratopogoninae, Clinocerinae et *Dicranota* spp. et une influence positive sur *Rhithrogena* spp. Au moins une des trois variables hydrologiques était incluse dans 70% des modèles, en particulier les débits estivaux (dans 43% des modèles) avec un effet négatif significatif sur 8 taxons, dont 4 diptères (Ceratopogoninae, *Liponeura* spp., Orthocladiinae et Tanytarsini). La température, la conductivité et la hauteur d'eau ont été incluses dans 39% des modèles, avec des effets variables selon le taxon considéré. Le pH, l'oxygène dissous, le débit minimal sur 30 jours consécutifs et la variabilité des débits mensuels apparaissent dans moins de 35% des modèles sélectionnés. Le substrat n'a un effet significatif (positif) que sur *Baetis alpinus*, *Baetis alpinus/melanonyx* gr.alpinus et *Rhyacophila* spp.

Tableau 6: Résultats des modèles multivariés GLMM.NB reliant l'abondance des taxons aux variables significatives d'habitat, pour 23 taxons sélectionnés. Les valeurs correspondent aux pentes de régression \pm l'erreur standard. Le niveau de significativité est (NS) : non significatif ; (.) : $0,05 \leq p < 0,1$; (*) : $0,01 \leq p < 0,05$; (**) : $0,001 \leq p < 0,01$; (***) : $p < 0,001$. Les pentes négatives sont en gras

	pH	TEMP	OXY	COND	TURB	DEP	VEL	SUB	Qsum	CV	30-Day Min	Marginal R ²	Cross-validation
<i>Baetis alpinus</i>	-2.15 * ± 0.89	-0.22 *** ± 0.05		0.79 ** ± 0.26	-0.55 *** ± 0.14			0.02 * ± 0.01				0.43	NS
<i>Baetis alpinus/melanonyx</i>					-0.46 *** ± 0.13		-3.03 * ± 1.18	0.02 * ± 0.01	-1.07 *** ± 0.25			0.39	*
<i>Baetis</i> spp.			1.38 *** ± 0.35		-0.78 *** ± 0.20		-9.20 *** ± 2.00		-4.57 *** ± 0.69	-5.23 *** ± 1.40		0.60	NS
<i>Rhithrogena loyolaea</i>						0.16 *** ± 0.02	-2.83 * ± 1.20				-10.56 *** ± 2.33	0.45	
<i>Rhithrogena</i> spp.	-4.16 ** ± 1.43				-0.62 * ± 0.28		6.76 * ± 2.82					0.22	
<i>Isoperla</i> spp.	2.83 * ± 1.21	0.21 . ± 0.12	1.45 *** ± 0.43		-1.10 *** ± 0.23							0.40	***
<i>Nemoura</i> spp.	-2.85 . ± 1.54			1.42 *** ± 0.30	-0.55 * ± 0.25		-6.30 *** ± 1.87				7.08 ** ± 2.25	0.40	
<i>Protonemura nitida</i>	-6.29 . ± 3.70	0.74 ** ± 0.24	3.08 ** ± 0.96	1.85 ** ± 0.72	-1.59 ** ± 0.55				1.61 * ± 0.70			0.51	**
<i>Protonemura</i> spp.					-0.62 *** ± 0.14	0.07 * ± 0.03			-0.80 * ± 0.33	2.29 *** ± 0.68		0.50	*
<i>Rhyacophila</i> spp.		0.18 * ± 0.07			-0.53 ** ± 0.20			0.03 * ± 0.01			9.69 ** ± 2.94	0.37	
Ceratopogoninae		-0.20 ** ± 0.07			-0.71 *** ± 0.20		-6.83 ** ± 2.13		-1.46 ** ± 0.47			0.38	*
Clinocerinae	-3.55 *** ± 0.97	-0.11 * ± 0.05		1.45 *** ± 0.29			-4.28 ** ± 1.59					0.43	**
<i>Corynoneura</i> spp.			-0.82 *** ± 0.22	-0.77 *** ± 0.19	-0.36 * ± 0.16	-0.11 ** ± 0.04						0.32	**

Diamesinae	-0.28 *** ± 0.08	-1.27 *** ± 0.26					1.08 * ± 0.46	0.34	***
<i>Dicranota</i> spp.		0.36 * ± 0.17	0.57 *** ± 0.14	-0.38 ** ± 0.12	0.12 *** ± 0.03	-3.68 ** ± 1.13		0.35	*
<i>Liponeura</i> spp.							-1.61 ** ± 0.55	0.04	.
Orthocladiinae		0.42 * ± 0.20	-0.68 *** ± 0.14	-0.36 ** ± 0.11			-0.63 * ± 0.30	3.49 *** ± 0.75	0.39 **
Simuliidae				-0.41 ** ± 0.16				3.23 ** ± 1.16	0.20
Tanytarsini			-1.40 *** ± 0.25	-0.88 *** ± 0.22	-0.09 . ± 0.05		-1.45 ** ± 0.47	0.33	***
<i>Crenobia alpina</i>	-3.46 ** ± 1.18	-0.35 ** ± 0.12		-1.30 ** ± 0.45	-0.20 ** ± 0.06	-7.52 ** ± 2.73		0.36	NS
Hydracarina	-2.18 * ± 0.85			-0.79 *** ± 0.18	-0.09 * ± 0.04			4.42 * ± 1.94	0.29 NS
Nematoda	-0.28 ** ± 0.09			-1.07 *** ± 0.27	-0.47 *** ± 0.12	-5.81 . ± 3.00		12.16 *** ± 3.62	0.66 *
Oligochaeta			-1.18 *** ± 0.23	-0.77 *** ± 0.15	-0.15 *** ± 0.04		-0.88 * ± 0.42	0.38	*

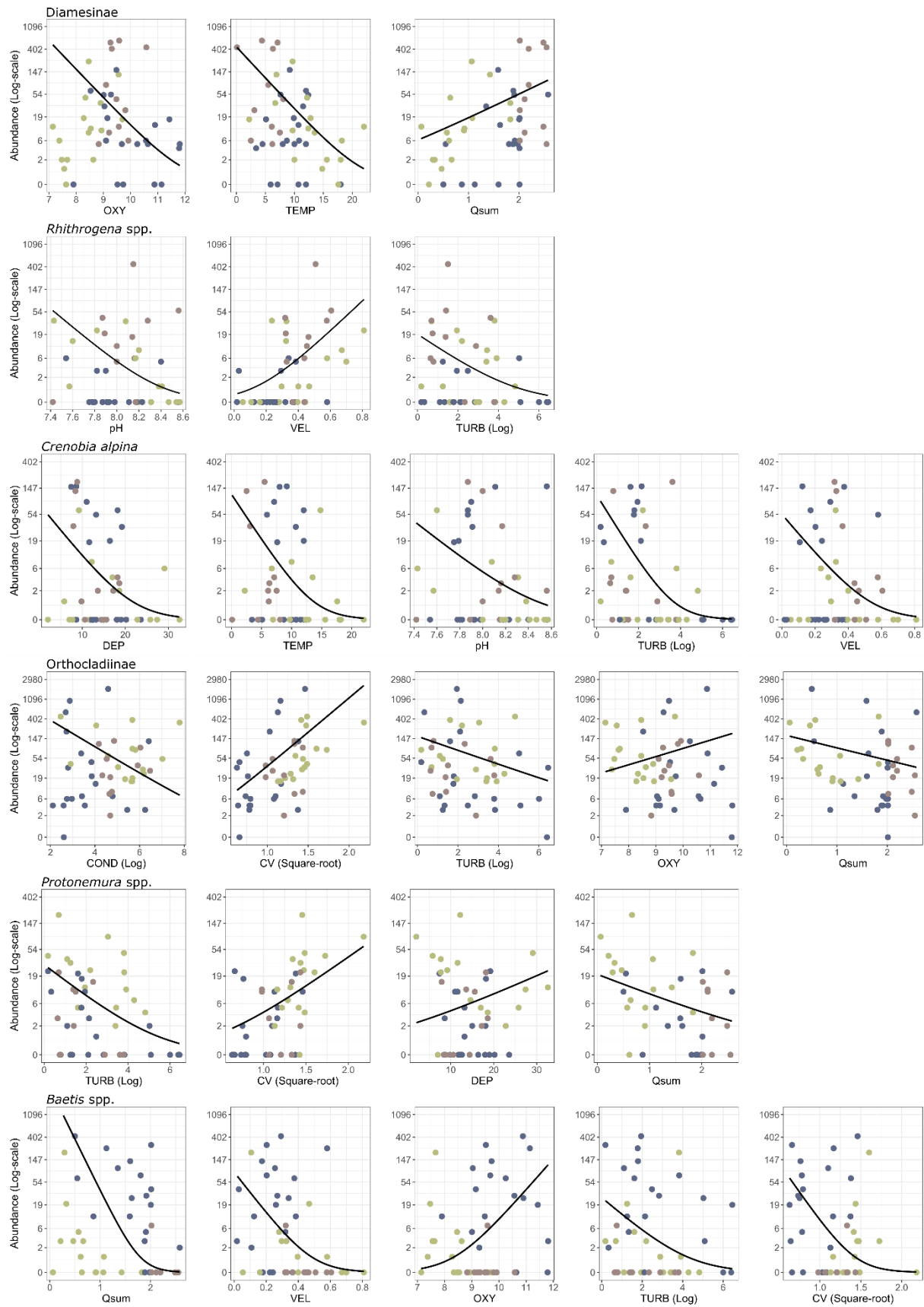


Figure 38. Ajustements des modèles multivariés GLMM.NB reliant l'abondance des taxons aux variables significatives d'habitat, pour 6 taxons sélectionnés. Les réponses univariées aux variables environnementales individuelles sont présentées, les autres variables environnementales étant fixées à leur valeur moyenne. La couleur des points correspond aux trois bassins versants différents (bleu : Arve, marron : Vanoise, vert : Arvan).

La figure 38 présente les ajustements des modèles pour les 6 taxons dominants qui participent le plus à la dissimilarité entre les communautés des différents types de rivières alpines, avec notamment une dominance de *Diamesinae*, *Rhyacophila* spp. et *Crenobia alpina* dans les groupes C et E et une dominance de *Protonemura* spp. et *Orthocladinae* dans les groupes D et F (Fig. 37). Ainsi, les *Diamesinae* sont plus abondants dans les sites présentant des faibles concentrations en oxygène, température, mais un débit estival élevé. Les *Rhithrogena* spp. sont plus abondants dans les sites présentant de faibles pH, et turbidités mais des vitesses élevées. De fortes valeurs de température, hauteur d'eau, pH, turbidité et vitesse entraînent de faibles abondances de *Crenobia alpina*. L'abondance des *Orthocladinae* est plus élevée pour des valeurs faibles de conductivité, turbidité et débit estival, et des valeurs fortes de variabilité des débits mensuels et concentration en oxygène. Les *Protonemura* spp. sont plus abondants à des faibles valeurs de turbidité et débit estival, et fortes hauteurs d'eau et variabilités des débits mensuels. Enfin, nous avons observé une forte abondance de *Baetis* spp. dans les sites à faibles vitesses, turbidités, variabilités des débits mensuels, débits estivaux et fortes concentrations en oxygène.

Ainsi, parmi les 23 modèles sélectionnés, chaque type de variable d'habitat (physico-chimiques, hydrauliques et hydrologiques) a eu un effet significatif sur la distribution des macroinvertébrés alpins. Cependant, la combinaison des variables sélectionnées varie selon les taxons. Par conséquent, aucun modèle commun à tous les taxons n'a pu être identifié. Néanmoins, nous observons des effets majeurs significatifs de la turbidité (83%), du débit estival et de la vitesse d'écoulement (43%) tandis que la profondeur de l'eau, la conductivité et la température sont apparues dans seulement 39% des modèles sélectionnés. Ainsi, la turbidité a eu un effet négatif significatif sur 83% des taxons sélectionnés. Ce résultat a été confirmé par Castella et al. (2001) qui ont montré une relation significative entre les sédiments en suspension et les densités de macroinvertébrés pour 94% de ses 16 taxons sélectionnés. En réduisant la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau, la turbidité limite la production primaire (Bilotta & Brazier, 2008), ce qui peut avoir un impact sur les taxons de macroinvertébrés racleurs se nourrissant de matière organique autochtone, tels que *Corynoneura* spp. ou *Baetis alpinus* (Schmidt-Kloiber & Hering, 2015). Une concentration élevée en sédiments en suspension peut également affecter les filtreurs tels que les Simuliidae en obstruant leur appareil filtrant (Cauvy-Fraunié & Dangles, 2019) et en réduisant le taux d'ingestion de nourriture car leurs entrailles se remplissent de sédiments inorganiques (Jones et al., 2012). La vitesse d'écoulement a eu un impact significatif sur 11 taxons (43%), avec un effet positif sur *Rhithrogena* spp, connu comme un taxon rampant (Tachet et al. 2010) rhéophile (Dolédéc et al. 2007). Ce résultat est cohérent avec l'étude de Forcellini et al. (2020), montrant la préférence de *Rhithrogena* spp. pour les microhabitats à écoulement rapide dans les petits ruisseaux jusqu'aux grandes rivières en Allemagne et en France. Cependant, contrairement à Forcellini et al. (2020), nous avons observé une diminution de l'abondance de *Baetis* spp., *Nemoura* spp. et *Dicranota* spp. avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement. Ces divergences peuvent être dues à des différences taxonomiques, ou pourraient être expliquées par des différences dans la gamme de vitesse d'écoulement entre les deux études. Par exemple, Forcellini et al. (2020) ont détecté une augmentation de l'abondance de *Nemoura* spp. au-dessus de 0.8 m/s, alors que la vitesse maximale de nos sites

d'étude était de 0.81 m/s. Enfin, le débit estival a été sélectionné dans 43 % des modèles avec un effet négatif sur huit taxons de différents ordres (par exemple *Baetis* spp., *Protonemura* spp., Ceratopogoninae, Oligochaeta). De même, Larsen et al. (2021) ont montré une diminution de la richesse taxonomique avec l'augmentation du débit en juillet dans des cours d'eau nivo-glaciaires et Robinson et al. (2004) ont observé des taux de dérive plus élevés pendant les débits d'été dans des cours d'eau alimentés par des glaciers, ce qui a conduit à des densités de macroinvertébrés plus faibles. Néanmoins, deux taxons étaient positivement associés au débit d'été, notamment les Diamesinae qui semblaient résistants aux débits élevés (Füreder & Niedrist, 2020).

Dans l'analyse de co-intertie, on observe une co-structure entre les communautés de macroinvertébrés et les variables d'habitat partagées entre les bassins versants de l'Arve et de l'Arvan, et dans une moindre mesure avec le bassin versant de la Vanoise (la gamme des scores environnementaux - Axes 1 de la carte factorielle environnementale - plus étroite et plus élevée, Fig. 37). De plus, dans les modèles GLMM.NB sur le lien entre les variables d'habitat et l'abondance des macroinvertébrés, les coefficients de corrélation intra-class (ICCadj) qui correspondent à la proportion de la variance expliquée par l'effet aléatoire (l'identité du bassin versant) sont très faibles, ce qui indique que les réponses des macroinvertébrés aux variables d'habitat ont un bon degré de transférabilité entre les bassins versants alpins. Ainsi, les résultats de cette étude peuvent être transférables à d'autres bassins versants alpins et ainsi contribuer à estimer la réponse des macroinvertébrés aux changements environnementaux à l'échelle des Alpes.

III.4 Conclusion

Les bassins versants alpins abritent différents types de rivières qui, selon la source en eau et l'altitude, présentent des conditions hydrologiques, hydrauliques et physico-chimiques extrêmement contrastées. On a mesuré notamment des turbidités entre 0 et 2380 NTU, des températures estivales de l'eau entre 0.1 et 22°C, des variabilités de débits mensuels entre 0.4 et 4.76. Dans son ensemble, le réseau hydrographique alpin offre donc effectivement une mosaïque d'habitats particulièrement prononcée. Parallèlement, on observe une très forte variabilité spatiale de la composition des communautés d'invertébrés. Cette étude confirme qu'il existe bien une co-structure entre les variables d'habitats et les communautés de macroinvertébrés et nos résultats montrent qu'aussi bien les conditions hydrologiques, hydrauliques et physico-chimiques participent de manière significative à la distribution spatiale des communautés benthiques. Néanmoins, parmi les 11 variables d'habitats étudiées, la turbidité, le débit estival et la vitesse d'écoulement sont les paramètres qui structurent le plus la distribution spatiale des taxons dominants. Dans ces bassins versants alpins, les communautés d'invertébrés sont donc particulièrement influencées par la présence d'un glacier, en particulier par son apport en sédiment fin et son apport en eau de fonte notamment pendant la période estivale. Ainsi, la structure des communautés aquatiques de ces rivières alpines risque d'être fortement affectée par le retrait glaciaire car la réduction de la contribution en eau de fonte glaciaire va engendrer dans les rivières glaciaires 1) une diminution de la teneur en sédiment en suspension, 2) une altération des régimes hydrologiques des rivières glaciaires et 3) une réduction du débit entraînant une modification des vitesses d'écoulements. Ainsi, aussi bien l'augmentation des prélèvements anthropiques que la fonte du glacier sont une menace pour ces écosystèmes.

Grâce au présent projet ZABER-AERMC et au projet BERGER, nous avons collecté et identifié un total de 187 taxons dans les 3 bassins versants de l'Arve, Vanoise et Arvan, parmi lesquels 39 taxons peuvent être considérés comme dominants (abondance totale > 100 individus) et 45 taxons sont communs aux 3 bassins versants. Parmi les 187 taxons observés, des modèles de préférences d'habitats hydrauliques (modèles de réponse des organismes à l'hydraulique des microhabitats utilisés par les bureaux d'études pour définir des débits écologiques) existent seulement pour 23 taxons et des tests de réponses à l'hydraulique (Forcellini et al. 2021). Parmi ces 23 taxons, seulement 12 sont communs aux 3 bassins versants et 9 sont des taxons dominants. Ainsi, il existe des modèles de préférences d'habitats hydrauliques seulement pour 12% de la totalité des taxons identifiés dans les 66 rivières alpines, 26% des taxons communs aux 3 bassins versants et 23% des taxons dominants (Appendice 2). Comme ces modèles de préférences d'habitats hydrauliques sont pertinents uniquement si le taxon est relativement fréquent, il reste encore plus de 3/4 de modèles à développer pour pouvoir appliquer cette méthode de façon générique dans les rivières alpines. De plus, à l'exception de quelques espèces (par ex. *Baetis alpinus*, *Rhyacophila tristis*), les modèles existants ont été réalisés au genre, voire à la famille. Or, comme leur développement est basé sur des campagnes de mesures situées à moins de 650 m d'altitude (sauf un site sur vingt-deux à 1149 m), les genres (ou familles) n'incluent en majorité probablement pas les mêmes cortèges d'espèces. A noter que parmi les 39 taxons dominants, en plus des 9 modèles validés, des modèles de préférences d'habitats hydrauliques ont été testés sur 9 autres taxons mais n'étaient pas significatifs. Cependant, encore une fois, à part *Potamopyrgus antipodarum*, il ne s'agit très probablement pas des mêmes espèces. Il apparaît donc urgent de développer de nouveaux modèles de préférences d'habitats hydrauliques sur les taxons de macroinvertébrés dominants dans les cours d'eau alpins afin d'une part de vérifier la concordance des réponses hydrauliques avec celles obtenues à basse altitude et d'autre part développer des modèles pour les taxons spécifiques des rivières alpines. Pour l'établissement futur de débits écologiques des cours d'eau alpins, les taxons à considérer en priorité sont les espèces dominantes parmi les genres *Baetis*, *Rhithrogena*, *Protonemura*, *Rhyacophila*, *Liponeura* ainsi que les Diamesinae et les Simuliidae (Appendice 2).

CONCLUSION GENERALE

Affluent de l'Arc dans la vallée de la Maurienne, l'Arvan prend sa source au glacier de Saint-Sorlin à 2700 m d'altitude. À Saint-Jean-d'Arves, à 1363 m, le bassin versant de l'Arvan couvre une surface de 58 km². A cette altitude, le débit moyen annuel de l'Arvan était entre 2002 et 2012 de 1850 L/s, correspondant à 58 341 600 m³/an. Pendant cette période, la contribution annuelle en eau de fonte de l'ensemble de la surface du glacier était comprise entre 20 à 35%. L'Arvan étant un cours d'eau alpin au régime glacio-nival, son régime hydrologique présente une forte saisonnalité, caractérisée par des débits maximaux (> 4500 L/s) au printemps (mi-avril à juin) lors de la fonte de la neige (60 à 80% du débit), un maintien de débits élevés (~ 2000 L/s) par la fonte du glacier (entre 50 à 60% du débit) pendant la période estivale (juillet-août) et un étiage hivernal marqué (500 L/s) en Février. Entre 2015 et 2020, la consommation moyenne annuelle à l'échelle du bassin versant était de 540 917 m³/an, dont environ 172 000 m³/an en eau potable (32%) et 360 000 m³/an pour la neige de culture (66%). 50% sont prélevés directement dans la rivière Arvan ou ses affluents (majoritairement pour la neige de culture). Les 50% restants sont distribués dans le réseau d'eau potable et proviennent en partie du lac Bramant, extérieur au bassin versant d'étude. Ainsi, les prélèvements effectués au sein du bassin versant de l'Arvan (sans compter la source de la Villette) correspondent en moyenne sur l'année à environ 0.5% du débit moyen de l'Arvan, jusqu'à 1.76% au mois de janvier où les prélèvements sont les plus élevés et les débits les plus faibles. Cependant, le débit de l'Arvan va rapidement être considérablement affecté par la fonte du glacier de Saint-Sorlin. En effet, nous estimons une perte de 50% du volume du glacier dans les 10 prochaines années, ce qui engendrera notamment une réduction significative du débit pendant la période estivale, avec des effets non négligeables sur les usages et les écosystèmes. A titre d'exemple, en soustrayant la part de la contribution en eau de fonte glaciaire (modélisée avec J2000) au débit de l'Arvan et en considérant un fonctionnement optimum de la centrale hydroélectrique (c.-à-d. un débit maximum prélevé de 3 m³/s, un débit minimum réservé entre 160 et 270 L/s et un débit minimum d'amorçage de 150 L/s) ; la production en énergie sera fortement affectée de mai à novembre (Fig. 39).

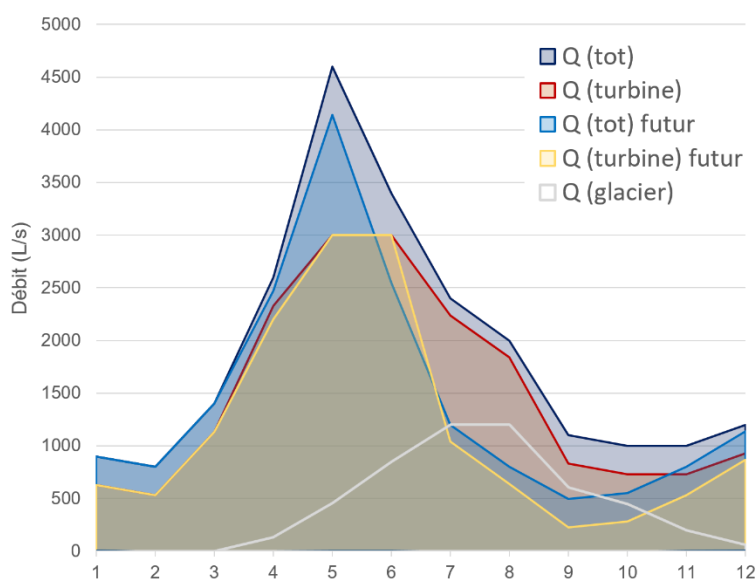


Figure 39. Débit moyen mensuel (L/s) 1) de l'Arvan pour la période 2001-2012 (Q(tot)), 2) de fonte glaciaire pour la période 2001-2012 (Q(glacier)), 3) de l'Arvan lorsque la contribution du glacier sera nulle (Q(tot)futur), 4) maximum turbiné pour la période 2001-2012 (Q (turbine), 5) maximum turbiné lorsque la contribution du glacier sera nulle.

Par ailleurs, ce bassin versant alpin abrite différents types de rivières qui, selon l'origine de l'eau et l'altitude, présentent des conditions hydrologiques, hydrauliques et physico-chimiques extrêmement contrastées. Il y a tout d'abord l'Arvan, exclusivement alimenté par la fonte du glacier (et neige sur le glacier) jusqu'à 2400 m d'altitude. Le cours d'eau est alors caractérisé par une forte turbidité, une faible conductivité, de faibles températures, une forte variabilité de débit, avec des débits maximaux pendant la fonte du glacier. En s'éloignant du glacier et après chaque confluence, l'influence glaciaire s'affaiblit et les eaux se réchauffent. La majorité des rivières de ce bassin versant est également alimentée par la fonte des neiges au printemps et présente donc aussi un régime hydrologique caractérisé par une forte variabilité temporelle, avec un décalage de la date du pic de débit en fonction de l'altitude. Au contraire, les eaux de sources présentent des conditions physico-chimiques et hydrologiques bien plus stables. Ainsi, dans son ensemble, le réseau hydrographique de l'Arvan offre donc une mosaïque d'habitats particulièrement prononcée. Parallèlement, nous observons une très forte variabilité spatiale de la composition des communautés de macroinvertébrés. En effet, parmi les 121 taxons collectés dans ce bassin versant, nous observons des communautés très différentes selon l'origine de l'eau. La richesse taxonomique est globalement plus faible dans les sites le long de l'Arvan (surtout proche du glacier) et un affluent à dominance nivo-pluviale caractérisé par des valeurs de turbidité extrême liées aux marnes transportées par la fonte de la neige. Cependant, nous observons une dominance des Diamesinae (sous-famille de Chironomidae, Diptère) et *Rhithrogena* (Ephéméroptères) dans les sites sous influence glaciaire. En particulier, *Rhithrogena alpestris* et *Rhithrogena delphinensis* ont été observées exclusivement dans les sites à influence glaciaire (l'Arvan entre 1 400 et 1 600 m d'altitude). *Rhithrogena delphinensis* est une espèce rare, inféodée au massif des Arves et aux bordures nord est des Grandes Rousses et nord des Écrins. Ces espèces de macroinvertébrés sont donc les premières menacées par la fonte glaciaire. L'analyse exceptionnelle de 66 sites dans 3 bassins versants alpins sous influence glaciaire dont l'Arvan a mis en valeur une co-structure entre les variables d'habitats et les communautés de macroinvertébrés. Notre étude permet de hiérarchiser l'influence significative des conditions hydrologiques, hydrauliques et physico-chimiques sur la structure des communautés benthiques et la distribution des taxons. Parmi les 11 variables d'habitats étudiées, les plus influentes sont la turbidité, le débit estival et la vitesse d'écoulement. Par exemple, nous observons de plus fortes d'abondances de *Baetis* spp. et *Crenobia alpina* dans les sites caractérisés par une faible turbidité, de plus fortes d'abondances de *Protonemura nitida* (Plécoptères) et Diamesinae dans les sites caractérisés par de forts débits estivaux et de plus fortes d'abondances de *Rhithrogena* spp. dans des fortes vitesses. Les communautés de macroinvertébrés qui vivent dans les rivières alpines sont donc en majorité structurées par 3 variables d'habitats sujettes à l'altération par la fonte du glacier et les prélèvements en eau. En effet, la réduction de la contribution en eau de fonte glaciaire va engendrer sur l'Arvan une diminution de la teneur en sédiment en suspension ainsi qu'une altération des régimes hydrologiques : modification de la variabilité temporelle et réduction du débit entraînant une diminution des vitesses d'écoulements. Ainsi, aussi bien l'augmentation des prélèvements anthropiques que la fonte du glacier sont une menace pour ces écosystèmes.

Le présent projet AERMC-ZABR constitue donc la première brique d'un modèle sur la réponse de la biodiversité alpine aux altérations hydrologiques et environnementales dues au changement climatique et à l'augmentation des pressions anthropiques à l'échelle de l'arc alpin français. Cette modélisation pourra être réalisée grâce à un couplage entre modèles glaciologiques (dynamique du volume glaciaire, Bolibar et al. 2022), hydrologiques (simulation des débits avec J2000 en prenant en compte la dynamique glaciaire ; Bolibar et al. 2020a), hydrauliques (modélisation statistique des habitats

hydrauliques, Girard et al. 2014) et de distribution d'espèces (lien entre habitats et macroinvertébrés; Becquet et al. under review ; Forcellini et al. 2020).

Grâce à cette étude nous avons pu, à l'échelle du bassin versant de l'Arvan ; 1) réaliser le bilan hydrologique du bassin versant en prenant en compte aussi bien la contribution en eau de fonte glaciaire et neigeuse que les prélèvements ; 2) déterminer l'évolution du glacier de Saint-Sorlin et de sa contribution hydrologique depuis les années 1950 et simuler les évolutions futures ; 3) caractériser les habitats (conditions hydrologiques, hydrauliques et physico chimiques) des rivières alpines ; 4) hiérarchiser l'influence des variables d'habitats structurant la distribution spatiale des communautés de macroinvertébrés benthiques et l'abondance des taxons dominants. La simulation des glaciers de l'arc alpin français a été réalisée dans le projet complémentaire BERGER (Jordi et al. 2020). Il reste maintenant à 1) réaliser les simulations hydrologiques en prenant en compte la dynamique glaciaire, 2) estimer les besoins en eau futurs, en particulier pour la neige de culture, 3) développer les modèles biologiques de préférences d'habitats hydrauliques pour les espèces dominantes des bassins alpins ici identifiés, que ce soit par test des modèles développés dans des cours d'eau de basse altitude (existants pour environ ¼ des taxons) ou développement de nouveaux. Ces développements de modèles de préférences hydrauliques sont en cours, et leur intégration dans les outils disponibles en routine pour les études de débit écologiques est envisagée dès cette année.

IMPACT ET BENEFICES DU PROJET

Publications scientifiques

- Launay B., Barnasson J., Becquet J., Brulin M., Cauvy-Fraunié S., Forcellini M. (2021). Découverte d'une nouvelle population de *Rhithrogena delphinensis* Sowa & Degrange, 1987, dans le massif des Arves, et compléments à la description de la larve (Ephemeroptera, Heptageniidae). *Bulletin de la Société Entomologique de France*, 126(4), 401-420.
- Becquet J., Lamouroux N., Condom T., Gouttevin I., Forcellini M., Launay B., Rabatel A., Cauvy-Fraunié S. Environmental drivers of macroinvertebrate distribution in alpine streams. *Freshwater Biology*. *Under review*
- Becquet J., Lamouroux N., Forcellini M., Cauvy-Fraunié S. Modelling hydraulic preferences of alpine macroinvertebrates. *River research and application*. *In prep.*

Conférences

SEFS 12 (online) - 2021

Title: Environmental drivers of macroinvertebrate communities in alpine catchments

Becquet J., Lamouroux N., Condom T., Gouttevin I., Forcellini M., Launay B., Cauvy-Fraunié S.

SFS (online) 2021

Title: Hydrological and environmental drivers of macroinvertebrate communities in alpine catchments Becquet J., Lamouroux N., Condom T., Gouttevin I., Forcellini M., Launay B., Cauvy-Fraunié S.

Replay : <https://www.youtube.com/watch?v=e2QpnPx9U>

Colloque HydroES - Société Hydrotechnique de France - L'hydroélectricité, un catalyseur de la transition énergétique en Europe (Lyon, France) - 2021

Title: Impacts of hydrological alterations on mountain aquatic ecosystems.

Becquet J.

SEFS 11 (Zagreb, Croatia) - 2019

Special Session: Hydrology, biogeochemistry and ecology of mountain freshwaters

Title: Reduced glacial influence mediates periphyton composition and quality in alpine streams

Niedrist G. & Cauvy-Fraunié S.

Aquatic Ecology Group of the British Ecological Society (BES) (London, UK) - 2018

Title: High mountain freshwaters: threats and consequences?

Cauvy-Fraunié S.

Limnologia (Coimbra, Portugal) - 2018

Special Session: Hydrology, water resources and ecology of mountain headwaters

Title: Mountain freshwater metacommunity response to multiscale flow alteration

Cauvy-Fraunié S., Blot C., Jestin A., Fabre S., Forcellini M., Condom T.

Poster

Sustainable Summits Conference (SSC, Chamonix, France) - 2018

Title: Spatialized and seasonal estimation of anthropogenic water uses and pressure in the Arvan's catchment

Jestin A., Lamouroux N., Condom T., Gouttevin I., Forcellini M., Malard F., Rabatel A., Cauvy-Fraunié S.

Etudiants

Post doc.

- Anthony Lemoine (INRAE-UGA, 2021-2022) Impacts des changements nivo-glaciologiques sur le régime hydrologique des bassins versants alpins

Phd.

- Juliette Becquet (INRAE-TEREO, 2019-2022) Impact of hydrological alteration on mountain aquatic ecosystems in the French Alps
- Jordi Bolibar (UGA, 2018-2020) Past and future evolution of French Alpine glaciers in a changing climate: a deep learning glacio-hydrological modelling approach

Master.

- Nils Dumarski (M2. Sciences de l'Eau, Lyon, 2021) Hydraulic preference of benthic invertebrates in alpine rivers
- Cristel Blot (M. B2E, Montpellier, 2018) Macroinvertebrates community structure in highly glacial catchment
- Soizic Fabre (M1. Sciences de l'Eau, Lyon, 2018) Les processus structurant la composition des communautés d'invertébrés aquatiques en haute montagne
- Antoinette Jestin (ENSE3, Grenoble, 2018) Estimation spatialisée et saisonnalisée des prélèvements anthropiques sur le bassin versant de l'Arvan à Saint-Jean-d'Arves : implications pour la ressource en eau

Research outcomes

Ce projet a permis la mise en place de deux stations hydrologiques sur le bassin versant de l'Arvan. Une station est située au niveau du site 3 (Fig. 14 et 29) et permet de mesurer directement la fonte glaciaire en continue depuis 2018. L'autre station est située au niveau du site 16 et mesure la composante non glaciaire du bassin versant. Ces deux stations sont en cours de calibration mais pourvoiront à partir de 2023 d'importantes données de débits (hydrologie de la zone) avec un sous-bassin très englacé et un sous-bassin versant non-englacé, tous deux situés à l'amont de la station DREAL historique.

Ce projet a contribué au développement du module glaciaire qui permet de prendre en compte la dynamique des glaciers dans le modèle hydrologique J2000, ce qui reste à ce jour peu fait dans les modèles hydrologiques. Ceci a pu se réaliser grâce à l'aspect interdisciplinaire du projet mettant en relation glaciologues, météorologues, hydrologues et écologues.

Les résultats de cette étude détaillée pour un bassin versant englacé vont être utilisés dans la modélisation hydrologique de l'ensemble du bassin versant du Rhône. Ainsi cette calibration du modèle hydro-glaciologique constitue un prérequis indispensable aux travaux de modélisations futurs.

Les mesures hydrologiques et hydrauliques ainsi que les échantillonnages de macroinvertébrés benthiques effectués dans cette étude vont être utilisés en complément pour le développement de courbes de préférences d'habitats hydrauliques pour les espèces de macroinvertébrés alpins dominants.

Certaines espèces capturées lors des échantillonnages de macroinvertébrés, notamment chez les EPT, ont permis de compléter les inventaires nationaux menés par l'Opie-Benthos

REFERENCES

- Auberson A. (1952) Torrent de l'Arvan. *La Houille Blanche*: 8-20.
- Badré M, et al. (2009) Neige de culture: état des lieux et impacts environnementaux-Note socio-économique.
- Barnett TP, et al. (2005) Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438: 303-309.
- Bauernfeind E & Soldan T. (2012) The Mayflies of Europe (Ephemeroptera) Apollo Books. *Ollerup, Denmark*: 781.
- Beniston M, et al. (2018) The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12: 759-794.
- Bilotta GS & Brazier RE. (2008) Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota. *Water research*, 42: 2849-2861.
- Bolibar J. (2020a). Past and future evolution of French Alpine glaciers in a changing climate: a deep learning glacio-hydrological modelling approach. Phd thesis. Université Grenoble Alpes,
- Bolibar J, et al. (2020b) Deep learning applied to glacier evolution modelling. *The Cryosphere*, 14: 565-584.
- Bolibar J, et al. (2020c) A deep learning reconstruction of mass balance series for all glaciers in the French Alps: 1967–2015. *Earth System Science Data*, 12: 1973-1983.
- Bolibar J, et al. (2022) Nonlinear sensitivity of glacier mass balance to future climate change unveiled by deep learning. *Nature Communications*, 13: 1-11.
- Braud I, et al. (2017). J2000-Rhône: a distributed hydrological model including water-use modelling to assess sustainability of the water resource. Paper presented at the 10th HyMeX workshop.
- Brown LE, et al. (2007) Vulnerability of alpine stream biodiversity to shrinking glaciers and snowpacks. *Global Change Biology*, 13: 958-966.
- Campion T. (2002) Etude de l'impact de la production de neige de culture sur la ressource en eau, en hiver, en montagne. Mémoire de Mastère, stage réalisé à l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse.
- Castella E, et al. (2001) Macrobenthic invertebrate richness and composition along a latitudinal gradient of European glacier-fed streams. *Freshwater Biology*, 46: 1811-1831.
- Cauvy-Fraunié S & Dangles O. (2019) A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. *Nature ecology & evolution*: 1-11.
- Cauvy-Fraunié S, et al. (2015) Invertebrate metacommunity structure and dynamics in an andean glacial stream network facing climate change. *PloS one*, 10: e0136793.
- Clarke GK. (2005) Subglacial processes. *Annual Review of Earth Planetary Sciences*, 33: 247-276.
- Degrange C & Sowa R. (1988) Note complémentaire sur deux espèces de Rhithrogena du groupe alpestris (Ephemeroptera, Heptageniidae) des Alpes françaises. *Polskie Pismo Entomologiczne*, 58: 711-714.
- Dolédec S & Chessel D. (1994) Co-inertia analysis: an alternative method for studying species–environment relationships. *Freshwater Biology*, 31: 277-294.
- Doledec S, et al. (2007) Modelling the hydraulic preferences of benthic macroinvertebrates in small European streams. *Freshwater Biology*, 52: 145-164.
- Durand Y, et al. (2009) Reanalysis of 44 yr of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48: 429-449.
- Farinotti D, et al. (2019) A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nature geoscience*, 12: 168-173.
- Forcellini M, et al. (2020) Microhabitat selection by macroinvertebrates: generality among rivers and functional interpretation. *Journal of Ecohydraulics*: 1-14.
- Fuereder L & Niedrist GH. (2020) Glacial stream ecology: Structural and functional assets. *Water*, 12: 376.

- Gabbud C & Lane SN. (2016) Ecosystem impacts of Alpine water intakes for hydropower: the challenge of sediment management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3: 41-61.
- Gardent M, et al. (2014) Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change*, 120: 24-37.
- Girard V, et al. (2014) Modeling point velocity and depth statistical distributions in steep tropical and alpine stream reaches. *Water Resources Research*, 50: 427-439.
- Gottardi F. (2009). Estimation statistique et réanalyse des précipitations en montagne: utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement, application aux grands massifs montagneux français. Grenoble INPG,
- Gouttevin I, et al. (2017). Action Neige 2016-2017: Amélioration de la modélisation hydrologique distribuée en conditions naturelles dans les Alpes. Irstea.
- Gupta, HV et al. 2009 Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91
- Hannah DM, et al. (2007) Hydroecology and ecohydrology: a potential route forward? *Hydrological Processes*, 21: 3385-3390.
- Hock R, et al. (2019) GlacierMIP—A model intercomparison of global-scale glacier mass-balance models and projections. *Journal of Glaciology*, 65: 453-467.
- Huss M & Farinotti D. (2012) Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117.
- Huss M & Hock R. (2018) Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change*: 1.
- Jacobsen D, et al. (2012) Biodiversity under threat in glacier-fed river systems. *Nature Climate Change*, 2: 361-364.
- Lamouroux N, et al. (2016) Débits écologiques: la place des modèles d'habitat hydraulique dans une démarche intégrée. *Hydroécologie Appliquée*.
- Lamouroux N, et al. (1992) An unconventional approach to modeling spatial and temporal variability of local shear stress in stream segments. *Water Resources Research*, 28: 3251-3258.
- Larsen S, et al. (2021) Combining hydrologic simulations and stream-network models to reveal flow-ecology relationships in a large Alpine catchment. *Water Resources Research*, 57: e2020WR028496.
- Larsen TH, et al. (2005) Extinction order and altered community structure rapidly disrupt ecosystem functioning. *Ecology Letters*, 8: 538-547.
- Lliboutry L. (1974) Multivariate statistical analysis of glacier annual balances. *Journal of Glaciology*, 13: 371-392.
- Magnier E. (2013). Neige artificielle et ressource en eau en moyenne montagne: impacts sur l'hydrosystème. Les exemples d'Avoriaz (France) et de Champéry (Suisse). Université Paris-Sorbonne-Paris IV; Université de Lausanne,
- Matiu M, et al. (2021) Observed snow depth trends in the European Alps: 1971 to 2019. *The Cryosphere*, 15: 1343-1382.
- Merigoux S, et al. (2009) Invertebrate hydraulic preferences and predicted impacts of changes in discharge in a large river. *Freshwater Biology*, 54: 1343-1356.
- Milner AM, et al. (2017) Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114: 9770-9778.
- Nepal S, et al. (2014) Understanding the hydrological system dynamics of a glaciated alpine catchment in the Himalayan region using the J2000 hydrological model. *Hydrological Processes*, 28: 1329-1344.
- Paul F, et al. (2020) Glacier shrinkage in the Alps continues unabated as revealed by a new glacier inventory from Sentinel-2. *Earth System Science Data*, 12: 1805-1821.
- Pepin N, et al. (2015) Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 5: 424-430.
- Picouet C. (2012) PARTIE 2: Structuration d'un modèle neige à l'échelle du pixel au droit des chroniques historiques SWE.

- Reveillet M, et al. (2017) Which empirical model is best suited to simulate glacier mass balances? *Journal of Glaciology*, 63: 39-54.
- Robinson CT, et al. (2004) Drift benthos relationships in the seasonal colonization dynamics of alpine streams. *Archiv Fur Hydrobiologie*, 160: 447-470.
- Schmidt-Kloiber A & Hering D. (2015) www. freshwaterecology. info—An online tool that unifies, standardises and codifies more than 20,000 European freshwater organisms and their ecological preferences. *Ecological Indicators*, 53: 271-282.
- Sowa R. (1984). Contribution à la connaissance des espèces européennes de Rhithrogena Eaton (Ephemeroptera, Heptageniidae) avec le rapport particulier aux espèces des Alpes et des Carpates. Paper presented at the International conference on Ephemeroptera. 4.
- Sowa R & Degrange C. (1987) Taxinomie et répartition des Rhithrogena EATON du groupe alpestris (Ephemeroptera, Heptageniidae) des Alpes et des.
- Tachet H, et al. (2010). Invertébrés d'eau douce: systématique, biologie, écologie (Vol. 15): CNRS éditions Paris.
- Thollet F, et al. (2021) Long term high frequency sediment observatory in an alpine catchment: the Arc-Isère rivers, France. *Hydrological Processes*, 35: e14044.
- Verfaillie D, et al. (2017) The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geoscience Model Development*, 10: 4257-4283.
- Verfaillie D, et al. (2018) Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. *The Cryosphere*, 12: 1249-1271.
- Vernay M, et al. (2019) The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958–present). *AERIS [data set], France*, 10: 37.
- Vernay M, et al. (2021) The S2M meteorological and snow cover reanalysis over the French mountainous areas, description and evaluation (1958–2020). *Earth System Science Data Discussions*: 1-36.
- Vincent C, et al. (2000) Dynamic behaviour analysis of glacier de Saint Sorlin, France, from 40 years of observations, 1957–97. *Journal of Glaciology*, 46: 499-506.
- Zemp M, et al. (2019) Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, 568: 382.

APPENDICES

Appendice 1. Liste des références utilisées pour l'identification des macroinvertébrés.

Ephemeroptera

- Bauernfeind, E., & Humpesch, U. H. (2001). Die Eintagsfliegen Zentraleuropas (Insecta: Ephemeroptera): Bestimmung und Ökologie. Wien, Verlag des Naturhistorischen Museums Wien.
- Bauernfeind, E., & Soldán, T. (2012). The Mayflies of Europe (Ephemeroptera). Vester Skerninge, Apollo Books.
- Degrange, C., & Sowa, R. (1988). Note complémentaire sur deux espèces de Rhithrogena du groupe alpestris (Ephemeroptera, Heptageniidae) des Alpes françaises. *Polskie Pismo Entomologiczne*, 58, 711–714.
- Eiseler, B. (2005). Bildbestimmungsschlüssel für die Eintagsfliegenlarven der deutschen Mittelgebirge und des Tieflandes. *Lauterbornia*, 53, 1–112.
- Soldán, T., & Landa, V. (1999). A key to the Central European species of the genus Rhithrogena (Ephemeroptera: Heptageniidae). *Klapalekiana*, 38, 25–37.
- Sowa, R. (1984). Contribution à la connaissance des espèces Européennes de Rhithrogena Eaton (Ephemeroptera, Heptageniidae) avec le rapport particulier aux espèces des Alpes et des Carpates. *International conference on Ephemeroptera*, 4, 37–52.
- Sowa, R., & Degrange, C. (1987). Taxinomie et répartition des Rhithrogena Eaton du groupe alpestris (Ephemeroptera: Heptageniidae) des Alpes et des Carpates. *Polskie Pismo Entomologiczne*, 57(3), 475–493.
- Studemann, D., Landolt, P., Sartori, M., Hefti, D., & Tomka, I. (1992). Ephemeroptera, *Insecta Helvetica*, Fauna 9. Lausanne, Schweizerische Entomologische Gesellschaft.
- Tomka, I., & Rasch, P. (1993). Beitrag zur Kenntnis der europäischen Rhithrogena-Arten (Ephemeroptera, Heptageniidae): R. intermedia Metzler, Tomka & Zurwerra, 1987 eine Art der alpestris-Gruppe sowie ergänzende Beschreibungen zu fünf weiteren Rhithrogena-Arten. *Mitteilungen der Schweizerischen Entomologischen Gesellschaft*, 66, 255–281.

Plecoptera

- Aubert, J. (1946). Les Plécoptères de la Suisse Romande. *Bulletin de la Société Entomologique Suisse*, 20(1), 7–128.
- Aubert, J. (1949). Plécoptères helvétiques - Notes morphologiques et systématiques. *Bulletin de la Société Entomologique Suisse*, 22(2), 217–236.
- Aubert, J. (1959). Plecoptera, *Insecta Helvetica*, Fauna 1. Genève, Société entomologique Suisse.
- Consiglio, C. (1980). Plecotteri (Plecoptera). Guide per il riconoscimento delle specie animali delle acque interne italiane. *Consiglio Nazionale delle Ricerche AQ/1/77*, 9, 1.
- Lillehammer, A. (1986). Nymphs of the Fennoscandian Nemoura Latreille (Plecoptera: Nemouridae), with a key to species. *Insect Systematics & Evolution*, 17(4), 511–519. <https://doi.org/10.1163/187631286X00080>
- Lillehammer, A. (1988). Stoneflies (Plecoptera) of Fennoscandia and Denmark. *Fauna entomologica scandinavica*, 21.

- Lubini, V., Knispel, S., & Vinçon, G. (2012). Die Steinfliegen der Schweiz: Bestimmung und Verbreitung / Les plécoptères de Suisse: identification et distribution. Fauna Helvetica 27. Neuchâtel, CSCF & SEG.
- Reding, J. P. G. (2020). Les Plécoptères du Massif du Jura : Guide d'identification des larves au genre et à l'espèce (Identification guide (generic and specific level) to the Plecoptera larvae of the Jura Mountains). Neuchâtel, independently published, 4–502.
- Reding, J. P. G., Launay, B., Le Doaré, J., Ruffoni, A., & Vinçon, G. (2019). Two new species of Dictyogenus klapálek, 1904 (Plecoptera: Perlodidae) from the Jura mountains of France and Switzerland, and from the French Vercors and Chartreuse massifs. *Illiesia*, 15(2), 27–64.
- Zwick, P. (2004). Key to the West Palaearctic genera of stoneflies (Plecoptera) in the larval stage. *Limnologia*, 34, 315–348. [https://doi.org/10.1016/S0075-9511\(04\)80004-5](https://doi.org/10.1016/S0075-9511(04)80004-5)

Trichoptera

- Coppa, G., Graf, W., & Tachet, H. (2012). A revised description of the larvae of three species of the Rhyacophila tristis group: Rhyacophila aquitanica, Rhyacophila pubescens and Rhyacophila tristis (Trichoptera: Rhyacophilidae). *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 48(2), 215–223. <https://doi.org/10.1051/limn/2012014>
- Eiseler, B. (2010). Taxonomie für die Praxis: Bestimmungshilfen-Makrozoobenthos. LANUV-Arbeitsblatt, 14(1), 1–184.
- Neu, P. J., & Tobias, W. (2004). Die Bestimmung der in Deutschland vorkommenden Hydropsychidae (Insecta: Trichoptera). *Lauterbornia*, 51, 1–68.
- Urbanic, G., & Waringer, J. (2002). The larva of Beraea dira McLachlan, 1875 (Trichoptera, Beraeidae). *Aquatic Insects*, 24(3), 213–217. <https://doi.org/10.1076/aqin.24.3.213.8116>
- Waringer, J., & Graf, W. (2011). Atlas of Central European Trichoptera Larvae. Dinkelscherben, Erik Mauch Verlag.
- Waringer, J., & Graf, W. (2013). Key and bibliography of the genera of European Trichoptera larvae. *Zootaxa*, 3640(2), 101–151. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.3640.2.1>
- Waringer, J., Vitecek, S., & Graf, W. (2016). Larval morphology and identification of Rhyacophila meyeri McLachlan 1879 (Trichoptera: Rhyacophilidae). *Zootaxa*, 4093(4), 559–565. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4093.4.7>
- Weinzierl, A., Malicky, H., & Waringer, J. (2021). The larva of Rhyacophila albardana McLachlan 1879, including a discriminatory matrix to the Rhyacophila larvae with comb-shaped gills of Austria, Germany and Switzerland (Rhyacophilidae, Trichoptera). *Zootaxa*, 4908(1), 133–140. <https://doi.org/10.11646/zootaxa.4908.1.9>
- Wiberg-Larsen, P. (1979). Revised key to larvae of Beraeidae in NW Europe (Trichoptera). *Insect Systematics & Evolution*, 10(2), 112–118.

Diptera

- Mauch, E. (2017). Aquatische Diptera-Larven in Mittel-, Nordwest- und Nordeuropa. Übersicht über die Formen und ihre Identifikation. *Lauterbornia*, 83.
- Nilsson, A. N. (éd.). (1996). Aquatic Insects of North Europe: Ephemeroptera, Plecoptera, Heteroptera, Neuroptera, Megaloptera, Coleoptera, Trichoptera, Lepidoptera. Stenstrup, Apollo Books.

Others

- Tachet, H., Richoux, P., Bournaud, M., Dessaix, P., & Pattée, E. (2009). Initiation aux invertébrés des eaux douces (familles, quelques genres et espèces). Association Française de Limnologie.

Tachet, H., Richoux, P., Bournaud, M., Usseglio-Polatera, P. (2010). Invertébrés d'eau douce : systématique, biologie, écologie. Paris : CNRS éditions.

Websites

Freshwater ecology: <http://www.freshwaterecology.info>

GBIF: <https://www.gbif.org>

Opie benthos: <http://www.opie-benthos.fr>

Perla: <http://www.perla.developpement-durable.gouv.fr>

Appendice 2. Liste des taxons identifiés dans les trois bassins versants (Arvan, Vanoise, Arve)

L'abondance totale par bassin versant de chaque taxon est indiqué dans les colonnes (Arvan, Van pour Vanoise, et Arve). La colonne **M** (pour Modèle) indique si un modèle de préférence hydraulique a été testé dans l'étude de Forcellini et al. (2020), et si le taxon correspondant présentait **H** ou pas **N** de réponse significative à l'hydraulique.

Ordre	Sous Ordre	Super Famille	Famille	Sous Famille	Tribu	Genre	Especie	Taxon	Arvan	Van	Arve	M
Amphipoda			Niphargidae			Niphargidae		Niphargidae	0	0	7	
Coleoptera	Adephaga	Dytiscoidea	Dytiscidae	Agabinae	Agabini	Agabus	Agabus sp.	Agabus sp.	3	0	1	N
Coleoptera	Adephaga	Dytiscoidea	Dytiscidae	Colymbetinae				Colymbetinae	0	1	0	
Coleoptera			Elmidae	Elminae		Elmis	Elmis sp.	Elmis sp.	206	0	0	H
Coleoptera			Elmidae	Elminae		Limnius	Limnius sp.	Limnius sp.	147	1	1	N
Coleoptera			Elmidae	Elminae		Riolus	Riolus sp.	Riolus sp.	2	0	0	N
Coleoptera		Staphylinoidea	Hydraenidae	Hydraeninae	Hydraenini	Hydraena	Hydraena lapidicola	Hydraena lapidicola	0	0	12	
Coleoptera		Staphylinoidea	Hydraenidae	Hydraeninae	Hydraenini	Hydraena	Hydraena sp.	Hydraena sp.	5	0	0	H
Coleoptera			Hydrophilidae	Hydrophilinae	Anacaenini	Anacaena	Anacaena globulus	Anacaena globulus	0	0	4	
Coleoptera		Scirtoidea	Scirtidae			Elodes	Elodes sp.	Elodes sp.	0	0	32	
Coleoptera		Scirtoidea	Scirtidae			Elodes/Odeles		Elodes/Odeles	2	0	0	
Coleoptera		Scirtoidea	Scirtidae			Odeles	Odeles sp.	Odeles sp.	5	0	4	
Coleoptera		Scirtoidea	Scirtidae			Scirtidae		Scirtidae	1	0	0	
Cyclopoïda								Cyclopoïda	0	0	1	
									0	2	97	
Diptera	Brachycera	Tabanoidea	Athericidae			Atherix	Atherix sp.	Atherix sp.	29	0	0	H
Diptera	Brachycera	Tabanoidea	Athericidae			Atrichops	Atrichops crassipes	Atrichops crassipes	0	0	1	N
Diptera	Nematocera		Blephariceridae			Hapalothrix	Hapalothrix sp.	Hapalothrix sp.	0	1	0	
Diptera	Nematocera		Blephariceridae			Liponeura	Liponeura sp.	Liponeura sp.	69	6	16	H
Diptera	Nematocera		Blephariceridae					Blephariceridae	1	0	0	
Diptera	Brachycera		Brachycera					Brachycera	0	0	1	
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Ceratopogonidae	Ceratopogoninae				Ceratopogoninae	22	15	44	N
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Ceratopogonidae	Dasyheleinae				Dasyheleinae	0	0	1	
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae			Boreoheptagyia	Boreoheptagyia sp.	Boreoheptagyia sp.	2	0	2	
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae	Orthocladiinae		Corynoneura	Corynoneura sp.	Corynoneura sp.	306	71	256	
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae	Orthocladiinae		Krenosmittia	Krenosmittia sp.	Krenosmittia sp.	0	31	78	
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae					Chironomidae	10	0	5	N
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae	Chironominae	Chironomini			Chironomini	3	1	23	H
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae	Diamesinae				Diamesinae	713	2798	693	
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae	Orthocladiinae				Orthocladiinae	2333	2166	8996	H
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae	Prodiamesinae				Prodiamesinae	0	0	16	
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae	Tanypodinae				Tanypodinae	200	0	73	N
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Chironomidae	Chironominae	Tanytarsini			Tanytarsini	157	151	543	H
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Cylindrotomidae			Triogma	Triogma sp.	Triogma sp.	0	0	1	
Diptera	Nematocera		Dixidae			Dixa	Dixa sp.	Dixa sp.	5	0	24	
Diptera	Nematocera		Dixidae			Dixella	Dixella sp.	Dixella sp.	0	0	1	

Diptera	Nematocera		Dixidae					Dixidae	2	0	0	
Diptera	Brachycera	Empipoidea	Dolichopodidae					Dolichopodidae	0	1	1	
Diptera	Brachycera	Empipoidea	Empididae	Clinocerinae				Clinocerinae	58	84	20	N
Diptera	Brachycera	Empipoidea	Empididae					Empididae	1	0	1	
Diptera	Brachycera	Empipoidea	Empididae	Hemerodromiinae				Hemerodromiinae	5	0	66	N
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Limoniidae		Pediciini	Dicranota	Dicranota sp.	Dicranota sp.	64	43	194	N
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Limoniidae		Hexatomini	Eloeophila	Eloeophila sp.	Eloeophila sp.	0	0	16	
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Limoniidae		Eriopterini	Eriopterini		Eriopterini	17	243	19	H
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Limoniidae		Hexatomini	Hexatoma	Hexatoma sp.	Hexatoma sp.	0	0	6	N
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Limoniidae		Hexatomini	Hexatomini		Hexatomini	0	0	1	
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Limoniidae		Eriopterini	Scleroprocta	Scleroprocta sp.	Scleroprocta sp.	0	0	1	
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Limoniidae					Limoniidae	2	0	4	
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Limoniidae		Pediciini			Pediciini	0	0	3	
Diptera	Brachycera		Muscidae					Muscidae	0	7	18	
Diptera	Nematocera		Psychodidae					Psychodidae	7	25	325	H
Diptera	Nematocera		Ptychopteridae					Ptychopteridae	1	0	0	
Diptera			Sciaridae					Sciaridae	4	1	0	
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Simuliidae					Simuliidae	658	17	399	H
Diptera	Brachycera	Stratiomyidea	Stratiomyidae			Stratiomyidae		Stratiomyidae	1	0	1	N
Diptera	Nematocera	Chrionomoidea	Thaumaleidae			Thaumalea	Thaumalea sp.	Thaumalea sp.	2	1	4	
Diptera	Nematocera	Tipuloidea	Tipulidae					Tipulidae	2	1	5	N
Diptera								Diptera	3	33	4	
Ephemeroptera			Baetidae			Alainites	Alainites muticus	Alainites muticus	78	0	0	
Ephemeroptera			Baetidae			Baetis	Baetis alpinus	Baetis alpinus	167	263	86	H
Ephemeroptera			Baetidae			Baetis	Baetis gr.alpinus	Baetis gr.alpinus	646	57	538	
Ephemeroptera			Baetidae			Baetis	Baetis melanonyx	Baetis melanonyx	49	0	2	
Ephemeroptera			Baetidae			Baetis	Baetis rhodani	Baetis rhodani	37	0	18	H
Ephemeroptera			Baetidae			Baetis	Baetis sp.	Baetis sp.	246	9	1718	N
Ephemeroptera			Baetidae			Baetis	Baetis vernus	Baetis vernus	50	0	0	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Ecdyonurus	Ecdyonurus alpinus	Ecdyonurus alpinus	1	0	0	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Ecdyonurus	Ecdyonurus gr.helveticus	Ecdyonurus gr.helveticus	0	35	6	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Ecdyonurus	Ecdyonurus gr.venosus	Ecdyonurus gr.venosus	0	0	2	H
Ephemeroptera			Heptageniidae			Ecdyonurus	Ecdyonurus helveticus	Ecdyonurus helveticus	5	0	0	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Ecdyonurus	Ecdyonurus parahelveticus	Ecdyonurus parahelveticus	13	0	0	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Ecdyonurus	Ecdyonurus sp.	Ecdyonurus sp.	127	18	72	N
Ephemeroptera			Heptageniidae			Epeorus	Epeorus alpicola	Epeorus alpicola	3	0	45	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Epeorus	Epeorus sp.	Epeorus sp.	4	0	0	H
Ephemeroptera			Heptageniidae			Rhithrogena	Rhithrogena alpestris	Rhithrogena alpestris	2	18	0	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Rhithrogena	Rhithrogena cf.hybrida	Rhithrogena cf.hybrida	0	3	0	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Rhithrogena	Rhithrogena cf.loyolaea	Rhithrogena cf.loyolaea	0	6	0	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Rhithrogena	Rhithrogena delphinensis	Rhithrogena delphinensis	21	0	0	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Rhithrogena	Rhithrogena hybrida	Rhithrogena hybrida	6	5	0	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Rhithrogena	Rhithrogena loyolaea	Rhithrogena loyolaea	34	10	2	
Ephemeroptera			Heptageniidae			Rhithrogena	Rhithrogena nivata	Rhithrogena nivata	36	1	0	

Ephemeroptera		Heptageniidae		Rhithrogena	Rhithrogena sp.	Rhithrogena sp.	229	692	17	N
Ephemeroptera		Heptageniidae				Heptageniidae	5	0	6	H
Gastropoda						Gastropoda	3	0	0	
Gordioidea		Gordiidae				Gordiaca sp.	0	0	5	
Harpacticoïda		Harpacticoïda				Harpacticoïda	0	0	4	
Hydracarina						Hydracarina	48	255	693	
Hydrozoa						Hydrozoa	0	0	8	
Lepidoptera	Pyraloidea	Pyralidae		Lispe	Lispe sp.	Lispe sp.	1	0	0	
Littorinimorpha	Rissooidea	Amnicolidae		Potamopyrgus	Potamopyrgus antipodarum	Potamopyrgus antipodarum	0	0	240	N
Lymnaeioidea	Lymnaeioidea	Lymnaeidae		Radix	Radix sp.	Radix sp.	0	0	3	N
Nematoda						Nematoda	13	66	1346	
Oligochaeta		Haplotaxidae				Haplotaxidae	0	0	1	
Oligochaeta						Oligochaeta	212	46	2503	
Ostracoda						Ostracoda	2	140	784	
Plecoptera		Capniidae		Capnia	Capnia sp.	Capnia sp.	5	3	0	
Plecoptera		Chloroperlidae		Chloroperla	Chloroperla sp.	Chloroperla sp.	4	0	0	N
Plecoptera		Chloroperlidae		Chloroperla	Chloroperla susemicheli	Chloroperla susemicheli	3	2	0	
Plecoptera		Chloroperlidae		Siphonoperla	Siphonoperla montana	Siphonoperla montana	1	87	0	
Plecoptera		Chloroperlidae		Siphonoperla	Siphonoperla sp.	Siphonoperla sp.	0	3	0	N
Plecoptera		Chloroperlidae				Chloroperlidae	0	27	0	
Plecoptera		Leuctridae		Leuctra	Leuctra gr.inermis	Leuctra gr.inermis	19	6	0	
Plecoptera		Leuctridae		Leuctra	Leuctra inermis	Leuctra inermis	2	0	0	
Plecoptera		Leuctridae		Leuctra	Leuctra leptogaster	Leuctra leptogaster	1	0	1	
Plecoptera		Leuctridae		Leuctra	Leuctra major	Leuctra major	1	0	1	
Plecoptera		Leuctridae		Leuctra	Leuctra rosinae	Leuctra rosinae	1	4	0	
Plecoptera		Leuctridae		Leuctra	Leuctra schmidi	Leuctra schmidi	0	0	35	
Plecoptera		Leuctridae		Leuctra	Leuctra schmidi/braueri	Leuctra schmidi/braueri	0	0	69	
Plecoptera		Leuctridae		Leuctra	Leuctra sp.	Leuctra sp.	151	5	103	H
Plecoptera		Nemouridae		Nemoura	Nemoura mortoni	Nemoura mortoni	4	296	95	
Plecoptera		Nemouridae		Nemoura	Nemoura sinuata	Nemoura sinuata	1	0	6	
Plecoptera		Nemouridae		Nemoura	Nemoura sp.	Nemoura sp.	17	5	64	N
Plecoptera		Nemouridae		Nemurella	Nemurella picteti	Nemurella picteti	0	0	1506	
Plecoptera		Nemouridae		Protonemura	Protonemura algovia	Protonemura algovia	0	16	0	
Plecoptera		Nemouridae		Protonemura	Protonemura brevistyla	Protonemura brevistyla	4	30	1	
Plecoptera		Nemouridae		Protonemura	Protonemura lateralis	Protonemura lateralis	6	5	95	
Plecoptera		Nemouridae		Protonemura	Protonemura nimborella	Protonemura nimborella	120	95	0	
Plecoptera		Nemouridae		Protonemura		Protonemura nimborella/algovia	0	0	7	
Plecoptera		Nemouridae		Protonemura	Protonemura nitida	Protonemura nitida	7	21	59	N
Plecoptera		Nemouridae		Protonemura	Protonemura risi	Protonemura risi	7	0	0	
Plecoptera		Nemouridae		Protonemura	Protonemura sp.	Protonemura sp.	630	86	199	H
Plecoptera		Nemouridae				Nemouridae	3	0	30	
Plecoptera		Perlidae		Perla	Perla sp.	Perla sp.	1	0	0	
Plecoptera		Perlodidae		Dictyogenus	Dictyogenus alpinum	Dictyogenus alpinum	0	84	0	
Plecoptera		Perlodidae		Dictyogenus	Dictyogenus sp.	Dictyogenus sp.	5	280	1	

Plecoptera			Perlodidae			Isoperla	Isoperla rivulorum	Isoperla rivulorum	7	1	1	H
Plecoptera			Perlodidae			Isoperla	Isoperla sp.	Isoperla sp.	39	111	391	N
Plecoptera			Perlodidae			Perlodes	Perlodes sp.	Perlodes sp.	1	40	22	N
Plecoptera			Perlodidae					Perlodidae	0	1	0	
Plecoptera			Taeniopterygidae			Brachyptera/Rhabdiopteryx		Brachyptera/Rhabdiopteryx	6	89	1	
Plecoptera			Taeniopterygidae			Rhabdiopteryx	Rhabdiopteryx sp.	Rhabdiopteryx sp.	0	400	39	
Plecoptera								Plecoptera	1	0	6	
Sphaeriida		Sphaerioidea	Sphaeriidae			Pisidium	Pisidium casertanum	Pisidium casertanum	0	0	44	
Sphaeriida		Sphaerioidea	Sphaeriidae			Pisidium	Pisidium obtusale	Pisidium obtusale	0	0	18	
Sphaeriida		Sphaerioidea	Sphaeriidae			Pisidium	Pisidium subtruncatum	Pisidium subtruncatum	0	0	1	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Apataniidae			Apatania	Apatania sp.	Apatania sp.	5	5	13	
Trichoptera	Integripalpia	Sericostomatoidea	Beraeidae			Beraea	Beraea maurus	Beraea maurus	0	0	6	
Trichoptera	Integripalpia	Sericostomatoidea	Beraeidae			Beraea	Beraea pullata	Beraea pullata	0	0	3	
Trichoptera	Spicipalpia	Glossosomatoidea	Glossosomatidae	Agapetinae		Synagapetus	Synagapetus iridipennis	Synagapetus iridipennis	0	0	1	
Trichoptera	Spicipalpia	Glossosomatoidea	Glossosomatidae	Agapetinae				Agapetinae	0	0	2	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Goeridae			Lithax	Lithax niger	Lithax niger	2	0	83	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Goeridae			Silo	Silo nigricornis	Silo nigricornis	0	0	37	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Goeridae			Silo/Lithax	Silo/Lithax	Silo/Lithax	24	0	0	
Trichoptera	Annulipalpia	Hydropsychoidea	Hydropsychidae	Hydropsychinae		Hydropsyche	Hydropsyche sp.	Hydropsyche sp.	4	0	0	H
Trichoptera	Annulipalpia	Hydropsychoidea	Hydropsychidae	Hydropsychinae		Hydropsyche	Hydropsyche tenuis	Hydropsyche tenuis	2	0	0	
Trichoptera	Annulipalpia	Hydropsychoidea	Hydropsychidae					Hydropsychidae	1	0	0	
Trichoptera	Spicipalpia	Hydroptiloidea	Hydroptilidae	Ptilocolepinae		Ptilocolepus	Ptilocolepus granulatus	Ptilocolepus granulatus	0	0	118	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Lepidostomatidae			Crunoecia	Crunoecia irrorata	Crunoecia irrorata	0	0	115	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Limnephilinae	Stenophylacini	Allogamus	Allogamus hilaris	Allogamus hilaris	0	0	1	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Limnephilinae	Stenophylacini	Allogamus	Allogamus sp.	Allogamus sp.	47	0	4	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Limnephilinae	Chaetopterygini	Chaetopteryx	Chaetopteryx sp.	Chaetopteryx sp.	0	0	8	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Limnephilinae	Stenophylacini	Consortophylax	Consortophylax sp.	Consortophylax sp.	0	4	1	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Drusinae		Drusus	Drusus biguttatus/kronion	Drusus biguttatus/kronion	1	0	0	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Drusinae		Drusus	Drusus chrysotus	Drusus chrysotus	0	0	2	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Drusinae		Drusus	Drusus discolor	Drusus discolor	0	26	79	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Drusinae		Drusus	Drusus melanchaetes	Drusus melanchaetes	13	1	0	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Drusinae		Drusus	Drusus monticola	Drusus monticola	0	1	0	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Drusinae		Drusus	Drusus sp.	Drusus sp.	31	25	0	N
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Limnephilinae	Stenophylacini	Melampophylax	Melampophylax sp.	Melampophylax sp.	4	0	1	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Drusinae				Drusinae	1	3	92	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae					Limnephilidae	8	49	202	
Trichoptera	Integripalpia	Limnephiloidea	Limnephilidae	Limnephilinae				Limnephilinae	51	36	8	N
Trichoptera	Integripalpia	Leptoceroidea	Odontoceridae			Odontocerum	Odontocerum albicorne	Odontocerum albicorne	13	0	1	N
Trichoptera	Annulipalpia	Philopotamoidea	Philopotamidae	Philopotaminae		Philopotamus	Philopotamus ludificatus	Philopotamus ludificatus	3	0	6	
Trichoptera	Annulipalpia	Philopotamoidea	Philopotamidae	Philopotaminae		Philopotamus	Philopotamus sp.	Philopotamus sp.	4	0	6	H
Trichoptera	Annulipalpia	Philopotamoidea	Philopotamidae	Philopotaminae		Wormaldia	Wormaldia sp.	Wormaldia sp.	3	0	3	
Trichoptera	Annulipalpia	Philopotamoidea	Philopotamidae					Philopotamidae	3	0	0	
Trichoptera	Annulipalpia	Hydropsychoidea	Polycentropodidae			Plectrocnemia	Plectrocnemia geniculata	Plectrocnemia geniculata	1	0	0	
Trichoptera	Annulipalpia	Hydropsychoidea	Polycentropodidae			Plectrocnemia	Plectrocnemia sp.	Plectrocnemia sp.	5	0	7	

Trichoptera	Annulipalpia	Hydropsychoidea	Polycentropodidae				Polycentropodidae	1	0	2	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Hyperrhyacophila	Hyperrhyacophila sp.	1	0	3	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Hyporhyacophila	Hyporhyacophila sp.	2	0	26	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Pararhyacophila	Pararhyacophila sp.	2	87	0	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila	Rhyacophila aquitanica	22	0	0	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila	Rhyacophila glareosa	0	1	0	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila	Rhyacophila intermedia	0	12	0	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila	Rhyacophila praemorsa	6	1	0	H
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila	Rhyacophila sp.	43	26	121	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila	Rhyacophila torrentium	0	3	0	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila	Rhyacophila tristis	10	0	24	H
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila	Rhyacophila vulgaris	0	2	0	
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila s.l.	Rhyacophila s.l.	0	47	0	H
Trichoptera	Spicipalpia	Rhyacophiloidea	Rhyacophilidae			Rhyacophila s.s.	Rhyacophila s.s.	0	0	4	
Trichoptera	Integripalpia	Sericostomatoidea	Sericostomatidae			Sericostoma	Sericostoma sp.	19	0	99	
Tricladida		Geoplanoidea	Dugesidae			Dugesia	Dugesia sp.	0	0	54	N
Tricladida		Geoplanoidea	Dugesidae			Dugesia	Dugesia tigrina	0	0	3	
Tricladida		Geoplanoidea	Planariidae			Crenobia	Crenobia alpina	125	1058	2631	
Tricladida							Tricladida	14	12	37	