

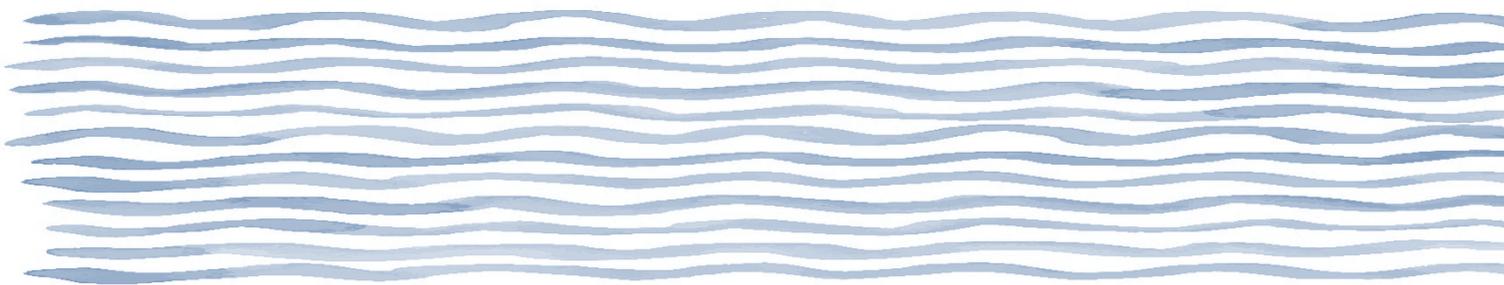
unine

UNIVERSITÉ DE
NEUCHÂTEL

CHYN
Centre d'hydrogéologie
et de géothermie

Dynamiques du stockage en eau souterraine et du régime hydrologique des bassins versants Alpains face aux changements climatiques

M. ARNOUX, D. HUNKELER, F. COCHAND, P. BRUNNER ET B. SCHAEFLI



SUR MANDAT DE L'OFFICE FÉDÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT OFEV – JANVIER 2021

UN PROJET DE RECHERCHE DANS LE CADRE DU THÈME PRIORITAIRE
"BASE HYDROLOGIQUE POUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE" DU NATIONAL
CENTRE FOR CLIMATE SERVICES

Impressum

Mandaté par : Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Hydrologie, CH-3003 Berne. L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire : Université de Neuchâtel, Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie (CHYN), Rue Emile Argand 11, CH-2000 Neuchâtel

Auteurs : A. Arnoux, D. Hunkeler, F. Cochand, P. Brunner, B. Schaefli

Accompagnement OFEV : P. Schmocker-Fackel, F. Hüsler, M. Sinreich

Note : Cette étude/ce rapport a été commandé par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) dans le cadre de la priorité thématique Hydro-CH2018. Le contractant est seul responsable du contenu.

Citation suggérée: Arnoux, A., Hunkeler, D., Cochand, F., Brunner, P. et Schaefli, B. 2020. Dynamiques du stockage en eau souterraine et du régime hydrologique des bassins versants Alpains face aux changements climatiques. Projet Hydro-CH2018. Sur mandat de l'Office Fédéral de l'Environnement (OFEV), Bern, Schweiz, 28 S.

Résumé

Le changement climatique aura un impact particulièrement fort sur le bilan hydrique des régions alpines. L'augmentation de la température entraîne un recul des glaciers, la proportion des précipitations qui tombent en forme de neige diminue, et la fonte des neiges se produit plus tôt dans l'année. Ces changements peuvent entraîner une diminution des débits des cours d'eau en été et en automne et éventuellement des pénuries d'eau régionales. La façon dont le régime hydrologique des bassins versants alpins changent dépend de la quantité d'eau de fonte et de précipitation qui est temporairement stockée sous forme d'eau souterraine. Dans une certaine mesure, le stockage souterrain de l'eau pourrait compenser la diminution du stockage sous forme de neige et de glace. Cependant, on en sait relativement peu à ce jour sur le fonctionnement hydrogéologique des zones alpines.

Le projet poursuivait deux objectifs. D'une part, nous avons étudié la relation entre les caractéristiques géologiques des bassins, le stockage des eaux souterraines et l'écoulement de surface dans les conditions actuelles. D'autre part, nous avons étudié comment le changement climatique pourrait affecter la dynamique des eaux souterraines et des cours d'eau, en mettant l'accent sur les périodes d'étiages estivales. En particulier, nous avons cherché à savoir si les bassins versants comportant des réservoirs d'eaux souterraines plus importants vont subir moins de changement de leur régime hydrologique. Les recherches se sont concentrées sur les petits bassins versants des hautes Alpes dont le bilan hydrique est dominé par la neige et pour lesquels on dispose principalement de données pluriannuelles pour les cours d'eau.

Les recherches sur l'influence de la géologie ont montré que les débits d'étiages augmentent avec l'augmentation de la surface des sédiments non consolidés et sont également influencés dans une moindre mesure par les roches solides à plus forte perméabilité. De vastes dépôts de roche meuble favorisent probablement l'infiltration. Ils peuvent stocker des quantités importantes d'eau et compenser partiellement les déficits saisonniers. Le stockage saisonnier des eaux souterraines dans de tels formations géologiques a été confirmé par des mesures gravimétriques et isotopiques dans un bassin versant de recherche.

Nous avons étudié l'effet du changement climatique sur la dynamique des eaux souterraines et les débits des cours d'eau en couplant les modèles climatiques et les modèles hydro(géo)logiques. Pour un bassin de recherche, un modèle a été utilisé qui simule de manière couplée les processus des eaux souterraines et des eaux de surface. Pour les autres bassins versants, un modèle hydrologique conceptuel a été utilisé. Les simulations ont montré qu'en raison de la fonte des neiges plus précoce, la quantité d'eau souterraine stockée et les débits des cours d'eaux auront tendance à être plus faibles à la fin de l'été/début de l'automne. Toutefois, la diminution relative du volume des eaux souterraines est bien moindre que pour les débits des cours d'eaux. Dans un avenir lointain, le débit des cours d'eaux minimal se déplacera de l'hiver vers les mois d'été. Toutefois, le débit minimal futur en été/automne reste supérieur au minimum actuel en hiver. En outre, les bassins versants présentant des formations géologiques étendues avec une bonne capacité de stockage de l'eau présentent un débit minimal plus élevé. Cela illustre les effets d'équilibrage des processus liés aux eaux souterraines.

Le projet montre que les processus hydrogéologiques jouent un rôle important dans la régulation du bilan hydrique des bassins versants alpins, en particulier dans le contexte du

changement climatique. En fonction des conditions géologiques, il est possible d'estimer comment les bassins versants pourraient réagir à une fonte des neiges plus précoce et à des périodes de sécheresse estivales. Les débits d'étiages actuels en hiver fournissent également des informations importantes sur l'importance des réservoirs d'eaux souterraines dans un bassin versant et leur capacité de stocker et libérer de l'eau sur une échelle de temps de plusieurs mois. À ce jour, cependant, il n'existe que quelques sites de surveillance dans la région alpine où la dynamique des réservoirs d'eaux souterraines peut être observée directement, ce qui a entraîné des incertitudes dans le projet actuel. En outre, les données sur les précipitations dans la région alpine présentent également de grandes incertitudes. Compte tenu des grands changements attendus, la base de données pour les zones alpines devrait être améliorée.

Zusammenfassung

Der Klimawandel wird den Wasserhaushalt von alpinen Gebieten besonders stark beeinflussen. Der Temperaturanstieg führt zu einem Rückzug der Gletscher, der Anteil an Niederschlag der als Schnee fällt nimmt ab, und die Schneeschmelze findet früher im Jahr statt. Diese Veränderungen können zu geringeren Abflüssen im Sommer und Herbst führen und möglicherweise zu einem regionalen Wassermangel. Wie sich das Abflussverhalten von alpinen Einzugsgebieten ändert hängt wesentlich davon ab, wieviel Schmelzwasser und Niederschlag als Grundwasser zwischengespeichert wird. Bis zu einem gewissen Grad könnte die Speicherung von Wasser im Untergrund die Abnahme von der Speicherung in der Form von Schnee und Eis kompensieren. Allerdings ist bislang vergleichsweise wenig über die hydrogeologische Funktionsweise von alpinen Gebieten bekannt.

Das Projekt verfolgte zwei Ziele. Einerseits haben wir den Zusammenhang zwischen geologischen Gebietseigenschaften, Grundwasserspeicherung und dem Abflussverhalten unter aktuellen Bedingungen untersucht. Andererseits haben wir abgeklärt, wie sich der Klimawandel auf die Dynamik im Grundwasser und in Fliessgewässern auswirken könnte mit einem Schwerpunkt auf sommerliche Trockenperioden. Es ging dabei insbesondere um die Frage ob Einzugsgebiete mit grösseren Grundwasserspeichern ein stabileres Abflussverhalten haben. Die Untersuchungen konzentrierten auf kleinere, hochalpine Einzugsgebiete deren Wasserhaushalt durch Schnee dominiert ist und für welche meist mehrjährige Abflussdaten vorhanden sind.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Geologie zeigten, dass der Niedrigwasserabfluss mit zunehmendem Flächenanteil an Lockergesteinsablagerungen steigt und in geringerem Masse auch durch Festgestein mit einer höheren Durchlässigkeit beeinflusst wird. Ausgedehnte Lockergesteinsablagerungen fördern wahrscheinlich die Infiltration. Sie können signifikante Mengen an Wasser speichern, und die saisonalen Defizite zum Teil kompensieren. Die saisonale Speicherung von Grundwasser in solchen Ablagerungen wurde durch gravimetrische und Isotopenmessungen in einem Forschungseinzugsgebiet bestätigt.

Der Effekt des Klimawandels auf die Grundwasser- und Abflussdynamik haben wir mittels einer Kopplung von klimatischen mit hydro(geo)logischen Modellen untersucht. Für ein Forschungseinzugsgebiet kam ein Modell zur Anwendung, welches Grundwasser- und Oberflächenwasserprozesse gekoppelt simuliert. Für die weiteren Einzugsgebiete wurde ein konzeptuelles hydrologisches Modell verwendet. Die Simulationen zeigten, dass aufgrund der früheren Schneeschmelze Ende Sommer/Anfangs Herbst die Menge an gespeichertem Grundwasser und der Abfluss tendenziell geringer sein wird. Die relative Abnahme in der Grundwassermenge ist aber wesentlich geringer als für den Oberflächenabfluss. In der fernen Zukunft verschiebt sich der minimale Abfluss vom Winter- ins Sommerhalbjahr. Der minimale zukünftige Abfluss im Sommer/Herbst bleibt aber höhere als der aktuelle minimale Abfluss im Winter. Zudem weisen Einzugsgebiete mit ausgedehnten geologischen Formationen mit einem guten Wasserspeichervermögen einen höheren Niedrigwasserabfluss auf. Dies verdeutlicht die ausgleichenden Wirkungen von Grundwasserprozessen.

Das Projekt verdeutlicht, dass hydrogeologische Prozesse eine äusserst wichtige Rolle für die Regulierung des Wasserhaushalts in alpinen Einzugsgebieten spielen, insbesondere im Kontext des Klimawandels. Anhand der geologischen Bedingungen lässt sich abschätzen, wie Einzugsgebieten auf eine frühere Schneeschmelze und sommerliche Trockenperioden

reagieren könnten. Aktuelle Niedrigwasserabflüsse im Winter liefern zudem wichtige Hinweise ob in einem Einzugsgebiete Grundwasserspeicher vorhanden sind die über eine Zeitskala von mehreren Monaten grössere Mengen an Grundwasser speichern und wieder freisetzen können. Bistlang gibt es aber nur wenig Messstellen im alpinen Bereich, um die Dynamik von Grundwasserspeichern direkt beobachten zu können, was zu Unsicherheiten im aktuellen Projekt führte. Weiterhin weisen auch Niederschlagsdaten im alpinen Bereich grosse Unsicherheiten auf. Angesichts der grossen zu erwarteten Veränderungen sollten die Datengrundlage für alpine Gebiete verbessert werden.

Table des Matières

1.	Contexte et objectifs	1
2.	Sites d'étude	3
3.	Approche de recherche	5
3.1.	Evaluation du lien entre la géologie des milieux alpins, leur stockage en eau souterraine et leur régime hydrologique	5
3.2.	Caractérisation de l'évolution du stockage d'eau souterraine et des régimes hydrologiques avec le changement climatique	7
4.	Lien entre stockage d'eau souterraine et géologie	9
4.1.	Lien entre régime hydrologique et du couvert géologique	9
4.2.	Evaluation expérimentale de la dynamique saisonnière des eaux souterraine dans le milieu Alpin	10
5.	Impacts des changements climatiques	12
5.1.	Approche modélisation intégré (HGS)	12
5.2.	Approche modélisation conceptuelle (HBV)	15
6.	Résumé et Conclusions	17
7.	Remerciements	19
8.	Références	20

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Les zones alpines sont définies comme les régions montagneuses à fortes pentes situées principalement au-dessus de la limite des arbres, où le sol et la végétation ne sont pas - ou peu - présents (Hayashi, 2020). Ces zones ont une importance toute particulière dans le cycle hydrologique car elles permettent une redistribution saisonnière de l'eau. En hiver, l'eau qui tombe dans les milieux alpins est stockée sous forme de neige avant d'être libérée pendant les périodes plus chaudes par la fonte. Cette redistribution a l'avantage de pouvoir réduire considérablement les conséquences des sécheresses météorologiques dans les vallées pendant l'été (Beniston and Stoffel, 2014; Rohrer et al., 2013). Ainsi, beaucoup de communes Suisses sont dépendantes des systèmes de montagnes pour leur alimentation en eau et pour leur agriculture. De plus, l'hiver, ces régions sont sollicitées car l'eau y est prélevée pour fournir les stations de ski. Cependant, les régions alpines sont également particulièrement sensibles au changement climatique, notamment à l'évolution du couvert neigeux et de glaciers.

Aujourd'hui la période de basses eaux des bassins alpins dure entre 3 et 6 mois (par exemple de décembre à avril sur le bassin alpin représenté sur la Figure 1), période pendant laquelle les cours d'eau et les eaux souterraines ne reçoivent que très peu d'apports par les précipitations qui tombent majoritairement sous forme de neige. A cette période, les cours d'eau sont alors majoritairement composés des eaux souterraines préalablement stockées dans le sous-sol (Clow et al., 2003; Cras et al., 2007; Hood et al., 2006; Huth et al., 2004; Jodar et al., 2017; Liu et al., 2004). La recharge des eaux souterraine est quasiment inexistante pendant la période de couvert de neige et faible le reste de l'année sauf lors de la fonte, période pendant laquelle la recharge est la plus importante. Inévitablement, les eaux souterraines sont également impactées par les changements climatiques. La quantité totale de neige qui tombe en hiver affecte la recharge des eaux souterraines lors de la fonte. De plus la période à laquelle intervient la fonte dans l'année affecte la quantité d'eau stockée à un instant donné. Ainsi ces deux facteurs influencent indirectement aussi le régime des cours d'eau pendant les périodes plus sèches de l'été et d'automne (Beaulieu et al., 2012; Godsey et al., 2014; Van Loon et al., 2015).

Dans les Alpes Suisse, les projections moyennes annuelles s'accordent sur une augmentation de la température et peu d'évolution des précipitations. D'un point de vue saisonnier, les précipitations devraient augmenter l'hiver et diminuer l'été, avec d'avantage d'évènements extrêmes (CH2018, 2018). L'augmentation des températures entraîne une diminution de la durée de la période de couvert neigeux. Ainsi, d'avantage de précipitations tombent sous forme de pluie que de neige pendant la période hivernale et la quantité de neige accumulée diminue (Harpold and Brooks, 2018; Li et al., 2017; Zhang et al., 2015). Les projections s'accordent sur le fait que d'avantage d'épisodes de fonte pendant l'hiver sont à prévoir, accentuant la diminution de la quantité de neige (Cochand et al., 2019a; Pavlovskii et al., 2019). Ces changements sont dépendants de l'altitude des bassins alpins. La diminution de la quantité de neige devrait entraîner une diminution de l'eau disponible à la fonte (Barnhart et al., 2016; Teutschbein et al., 2015). Ces changements entraîneront à leur tour une diminution des débits des cours d'eau en été et en automne (Barnett et al., 2005; Berghuijs et al., 2014; Lauber et al., 2014; Musselman et al., 2017). Cette évolution dépend également des eaux souterraines disponibles pendant ces périodes. Ces changements pourraient considérablement affecter la gestion des ressources en eau des bassins versants situés en aval.

Le lien entre les changements de quantité des eaux souterraines stockées et l'évolution du régime hydrologique des bassins versants alpins reste à ce jour peu étudiée. Il n'est pas encore connu si les eaux souterraines stockées dans ces bassins peuvent atténuer les effets néfastes des changements climatiques en redistribuant l'eau pendant les périodes plus chaudes et sèches, alors que les eaux des cours d'eau sont de moins en moins alimentées par les eaux de fonte (Hayashi, 2019; Viviroli et al., 2007). Il est donc aujourd'hui nécessaire de mieux comprendre la capacité des zones alpines à stocker de l'eau dans les aquifères et la dynamique interannuelle et saisonnière qui leur est associée. Le rôle important des aquifères superficiels de montagne pour temporairement stocker l'eau souterraine a récemment été mis en évidence. Cependant, le lien entre la géologie et la réponse du régime hydrologique au changement climatique est encore peu exploré. Outre les importantes implications pratiques en matière de gestion des ressources en eau, les processus hydrogéologiques dans les zones alpines sont mal compris d'un point de vue scientifique. Les principales raisons en sont le manque d'accessibilité, et donc d'instrumentation, ainsi que la grande dynamique de ces milieux (i.e. forte variations spatio-temporelles des termes du bilan hydrologique). Cela a pour conséquence un manque de données de suivi fiables, notamment lors des périodes de basses et hautes eaux, nécessaires aux études et modélisations hydrogéologiques. En Suisse, certains exutoires de surfaces de petits bassins alpins sont suivis depuis de nombreuses années et les données mesurées sont assez fiables pour permettre une modélisation robuste des périodes de basses eaux et donc de la contribution souterraine.

Dans ce contexte, les objectifs de ce projet sont les suivants :

- (1) identifier le lien entre la géologie des milieux alpins, leur stockage en eau souterraine et leur régime hydrologique sous conditions climatiques actuelles comme base pour l'évaluer l'impact du changement climatique ;
- (2) déterminer les évolutions du stockage en eau souterraine et des régimes hydrologiques avec le changement climatique, et plus particulièrement l'évolution des débits d'été estivaux. Il s'agit de mieux comprendre si le stockage d'eau souterraine permet de stabiliser les débits d'été malgré la fonte de neige plus précoce.

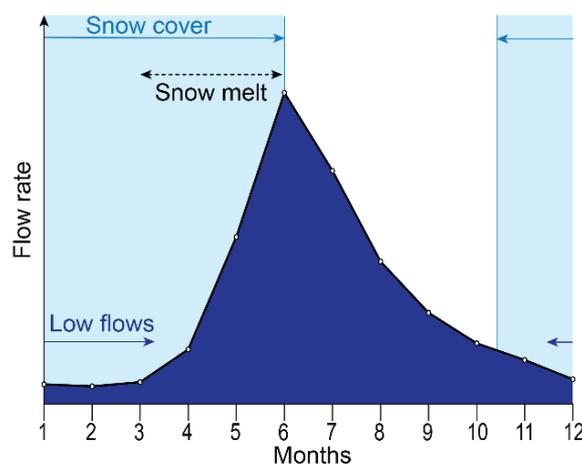


Figure 1. Illustration du hydrographe moyen mensuel typique des bassins versants alpins dominés par la fonte de neige, exemple du bassin Goneri-Oberwald (droite).

2. SITES D'ÉTUDE

La recherche s'est concentrée sur des petits bassins alpins de haute altitude (Figure 2). Les caractéristiques principales de ces bassins sont résumées dans le Tableau 1 et leur gamme d'altitude est illustrée dans la Figure 3. Dans ces bassins, le bilan d'eau est fortement influencé par le manteau neigeux. Les bassins avec une forte influence des glaciers ont été exclus afin d'identifier spécifiquement le rôle de l'eau souterraine. La petite échelle des bassins permet d'identifier les liens entre le comportement hydrologique et le contexte géologique. Les bassins choisis incluent un bassin de recherche du CHYN/CREALP (Vallon de Rechy), un bassin suivi par le canton du Tessin et une série des bassins avec des données de débits de l'office fédérale de l'environnement (OFEV) sur de longue durée. Cette combinaison permet à la fois d'identifier les mécanismes clés et d'atteindre une certaine représentativité. L'analyse des données historiques, disponibles pour certains bassins, montre que des changements dans leur comportement hydrologique se manifestent déjà (Figure 4). Le débit mensuel moyen augmente au printemps et diminue en été, ceci s'explique par à une période de fonte qui intervient plus tôt dans l'année.

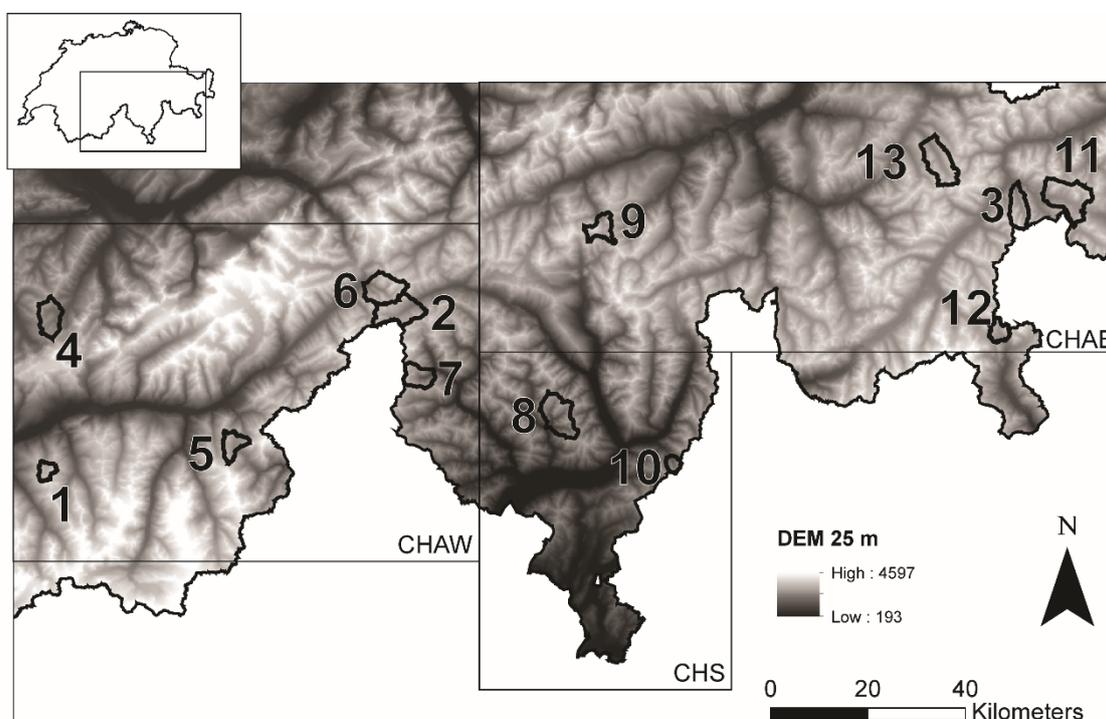


Figure 2 : Emplacements des bassins versants utilisés dans cette étude. Le bassin de recherche du CHYN/Crealp (Vallon de Rechy) correspond au No. 1 (Arnoux et al. 2020a).

Tableau 1. Tableau des bassins versants utilisés dans la Figure 2b, les bassins modélisés avec les scénarios climatiques et les modèles associés (Arnoux et al. 2020a). La plupart des bassins fait partie des bassins de recherches hydrologiques en Suisse (HUG) de l'office fédérale de l'environnement (OFEV).

Numéro sur la Figure 2	Name	Réseau HUG	Débit moyen (mm/yr)	Surface de bassin versant (km ²)	Altitude moyenne (m asl)	Altitude minimum (m asl)	Altitude maximum (m asl)	Pente moyenne (%)	Surface de glaciers (%)	Modélisation HBV-light	Modélisation HydroGeo-Sphere
1	Réchy	non	946	10.5	2567	2100	3100	28	0.0	X	X
2	Station 10	non	968	43.3	2267	1466	3051	40	0.9		
3	Ova da Cluozza	oui	908	27.0	2368	1509	3165	51	0.0	X	
4	Allenbach	oui	1337	28.8	1863	1297	2762	38	0.0		
5	Krummbach	oui	1243	19.8	2276	1795	3268	35	0.4	X	
6	Goneri	oui	2008	38.5	2383	1395	3192	45	4.0	X	
7	Riale di Calneggia	oui	1841	23.9	1996	890	2921	55	0.0	X	
8	Riale di Pincasia	oui	2061	44.5	1705	536	2521	57	0.0		
9	Rein da Sumvitg	oui	2152	21.8	2450	1490	3168	41	1.7	X	
10	Riale di Roggiasca	oui	1990	8.1	1702	981	2316	46	0.0	X	
11	Ova dal Fuorn	oui	594	55.3	2327	1699	3168	36	0.0	X	
12	Poschiavino - La Rösa	oui	1237	14.1	2283	1860	3032	37	0.0	X	
13	Dischmabach	oui	1239	43.2	2372	1668	3146	41	0.7	X	

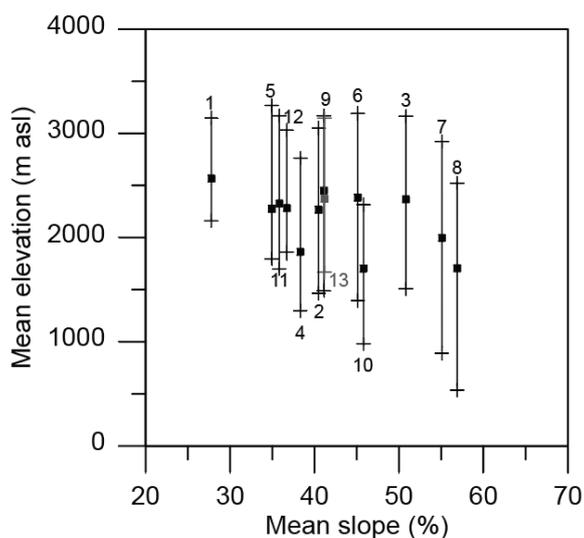


Figure 3 : Altitude (moyenne, minimum et maximum) et pente moyenne des bassins versants (Arnoux et al. 2020a).

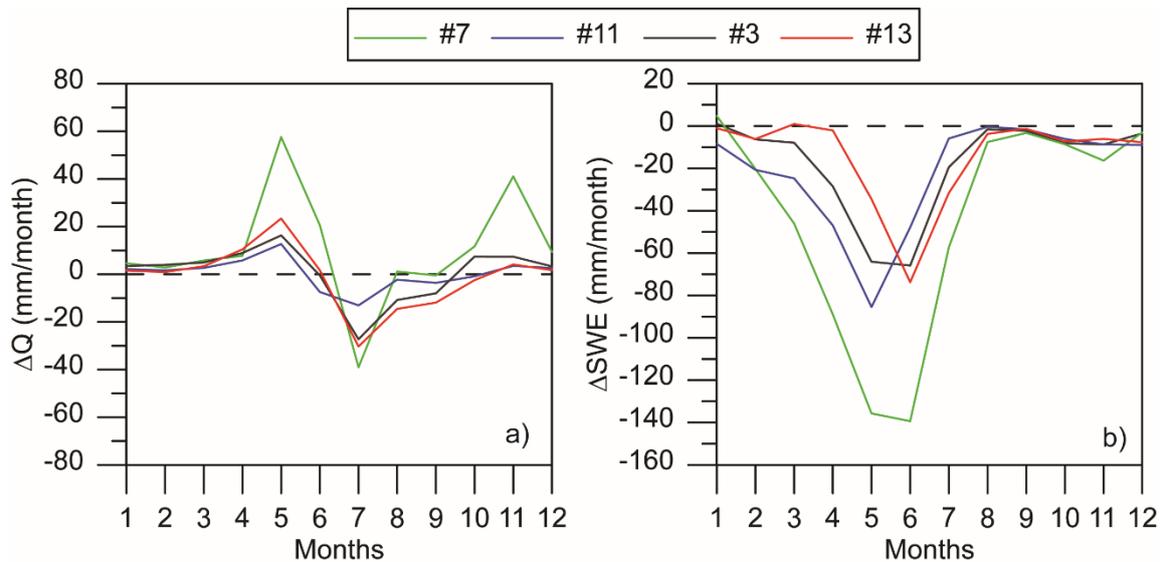


Figure 4 : (a) Changement des débits mensuels moyens mesurés et (b) de la quantité de neige modélisée exprimée en lame d'eau (SWE), entre la période de 30 années de 1988-2017 et 1968-1999 pour quatre bassins alpins. La quantité de neige a été modélisée avec le modèle de neige inclus dans HBV-light à partir de données fournies par le SLF sur 3 ans et des données climatiques historiques (Arnoux et al. 2020a).

3. APPROCHE DE RECHERCHE

Dans cette section, l'approche de recherche est expliquée dans les grandes lignes. Les détails sur les méthodologies peuvent être trouvés dans les articles scientifiques qui sont issus de ce projet. Le projet inclus deux parties :

- Pour évaluer l'influence du contexte géologique sur la dynamique des eaux souterraines et surface, les liens entre le stockage d'eau souterraine, le régime hydrologique et la couverture géologique ont été analysés. Il s'agit surtout d'évaluer si les débits d'étiages peuvent être associés à des facteurs géologiques. Dans ce contexte, nous avons également testé des méthodes pour mettre en évidence la dynamique saisonnière des aquifères alpins plus directement malgré l'absence de piézomètres ;
- Dans un deuxième temps, nous avons évalué comment la dynamique des eaux souterraine et de surface évoluent face au changement climatique et si ces changements dépendent du contexte géologique

3.1. Evaluation du lien entre la géologie des milieux alpins, leur stockage en eau souterraine et leur régime hydrologique

L'objectif de cette partie était d'évaluer comment la dynamique des eaux souterraines est liée au contexte géologique et comment le régime des cours d'eau est influencé par le contexte hydrogéologique. Nous nous sommes surtout intéressés aux facteurs qui contrôlent les débits d'étiage. Un indicateur, calculé à partir des débits d'étiage des séries temporelles de débits, a été mis en lien avec des variables géologiques. Sous les conditions actuelles, les débits les plus bas ont lieu en hiver après une récession de plusieurs mois. Cette longue période de récession permet d'identifier le rôle des eaux souterraines et indirectement de la géologie. Nous avons choisi un indicateur qui a déjà été utilisé dans d'autres régions de montagnes afin de pouvoir faire des comparaisons. Il s'agit du *winter flow index (WFI)* qui est défini comme suit :

$$WFI = Q_{NM7} / Q_{mean}$$

Où QNM7 est le débit minimal sur 7 jours consécutifs et Q_{mean} est le débit moyen annuel. En ce qui concerne le stockage des eaux souterraines, des observations directes des niveaux d'eau souterraine dans les hautes montagnes sont malheureusement quasiment absents. Il fallait ainsi établir une approche indirecte pour quantifier les variations du stockage d'eau souterraine afin de pouvoir faire le lien avec le contexte géologique. Plusieurs approches ont donc été évaluées.

La première approche repose sur un bilan d'eau. Cette approche est uniquement basée sur des données mesurées sans faire recours à des modèles hydrologiques. En admettant que les variations de stockage d'eau sont dominées par les nappes (hors de la neige et de la glace), les variations de stockage sont calculées comme suit :

$$\frac{dS}{dt} = P(t) - Q(t) - E(t) - T(t)$$

où t [T] est le pas de temps, S [L] est le stockage total (souterrain et en surface, y compris les glaciers, et dans le sous-sol), P [L/T] est la précipitation entrante (pluie et neige), Q [L/T] est le flux d'eau total quittant le système comme décharge, E [L/T] est l'échange net d'eau avec l'atmosphère par évaporation, sublimation et condensation et T [L/T] est l'eau transpirée par la végétation. Cette approche a permis de quantifier les variations de stock d'eau souterraine dans le bassin de recherche qui dispose de deux stations de mesure de précipitation et de neige (Cochand et al., 2019b). Par contre, pour les autres bassins sans stations météorologiques directement implantées dans les bassins, cette approche n'a pas donné des résultats plausibles. La quantité d'eau qui sort de ces bassins selon les mesures des débits était généralement plus haute que les flux entrants, probablement en raison d'une sous-estimation des précipitations dans les hautes altitudes par les produits de MétéoSuisse.

La deuxième approche consiste à extraire les variations de stockage d'eau souterraine des modèles hydrologiques ou hydrogéologiques. Dans ces modèles, précipitations estimées ont été corrigées en fonction de l'altitude avec l'objectif d'équilibrer le bilan d'eau.

Les variations saisonnières de stockage des eaux souterraines ont été mises en relation avec la géologie des bassins. L'extension des diverses unités géologiques dans les bassins versants ont été quantifiées à partir des cartes géologiques à l'échelle de 1 :25'000. Il s'agit de surface de couverture par diverses unités. Etant donné la complexité des structures géologiques dans les alpes, il n'était pas possible de quantifier les volumes des diverses unités pour tous les bassins.

Un des défis principaux de cette partie était le manque de données sur la dynamique des nappes et sur le volume de stockage d'eau souterraine dans les régions alpines hors des grandes vallées due à la difficulté d'équipement des sites. Ainsi, en complément aux calculs et modélisation, nous avons testés dans le bassin versant expérimental des méthodes pour évaluer la dynamique des eaux souterraines à l'échelle saisonnière. Cette étude a été réalisée à la marge du projet dans le contexte d'un travail de MSc (Arnoux et al., 2020b). Dans cette étude, nous avons utilisé des méthodes gravimétriques pour mettre en évidence des changements de stock d'eau souterraine entre la fin de la fonte de neige et la fin de la récession estivale. Nous avons également analysé les isotopes stables de la neige, des sources, de la pluie et des cours d'eau pour investiguer l'importance de l'eau de fonte pour assurer l'écoulement des sources pendant l'été et l'automne. Une étude d'un article de synthèse récent et des analyses dans le contexte de ce projet ont mis en évidence l'importance des dépôts quaternaires pour le stockage saisonnier des eaux souterraines. Pour cette raison, nous avons menés cette étude dans une zone où ces processus devraient jouer un rôle important.

3.2. Caractérisation de l'évolution du stockage d'eau souterraine et des régimes hydrologiques avec le changement climatique

L'impact du changement climatique sur le stockage d'eau souterraine a été évalué en couplant des données des dernières projections climatiques pour la Suisse (CH2018, 2018) avec des modèles de neige, hydrologiques et hydrogéologique (Figure 5). Pour les projections climatiques, le profil représentatif d'évolution de concentration (RCP) 8.5 et trois combinaisons de chaînes de modèles climatiques globaux et régionaux ont été choisis (Tableau 2). L'impact du changement climatique sur les ressources en eau a été simulé avec deux modèles, HydroGeoSphere (HGS) et HBV-light. HGS est un modèle numérique 3D utilisant les éléments finis. Il simule les processus d'écoulement de surface, l'infiltration à travers la zone non saturée, l'écoulement des eaux souterraines et le couplage entre ces différents domaines. HGS intègre également de manière dynamique l'évaporation des sols, la transpiration et les processus de fonte des neiges. Sur la base du modèle géologique développé, la dynamique de stockage dans les différentes couches peut être analysée. Un des grands avantages de cette approche est que le comportement des eaux souterraines peut être analysé en détail pour différentes unités géologiques et hydrogéologiques. Il s'agit probablement de la première application d'un tel modèle pour un bassin versant alpin couplé à des projections climatiques continues. Avec les ressources disponibles, il n'était pas possible d'utiliser cette approche pour tous les bassins. Ainsi, pour l'ensemble des dix bassins choisis, une approche classique sur la base d'un modèle hydrologique conceptuel (HBV-light) a été appliquée. Le modèle HBV est un modèle conceptuel de bassin versant. Contrairement à la simulation explicite des processus d'écoulement à l'aide d'un modèle comme HGS, le modèle HBV simule la distribution spatiale des flux. Il utilise moins de paramètres et est mis en place beaucoup plus rapidement qu'un modèle HGS. De plus, les durées de calcul sont très courtes. Le modèle peut donc être rapidement utilisé dans différents bassins versants. Cependant, seules les observations du débit des rivières peuvent être intégrées dans la calibration et la vérification du modèle. La dynamique de stockage simulée ne peut pas être associée à des formations géologiques individuelles. Par contre, les variations relatives de stock d'eau souterraine peuvent être estimées grossièrement en analysant les niveaux de stock dans les réservoirs représentant les eaux souterraines. Cette variation du stock d'eau souterraine entre le minimum et le maximum annuel est dénommée ici comme DGS (« dynamic groundwater storage »).

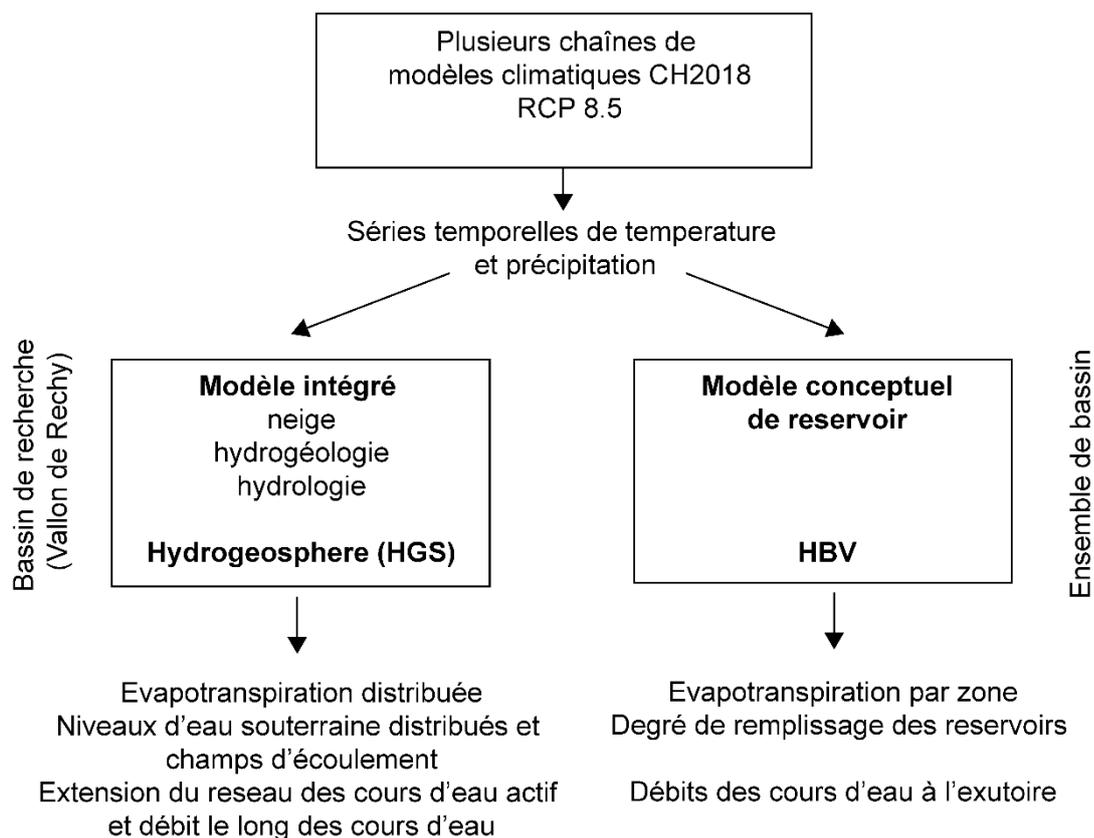


Figure 5 : Vue d'ensemble des approches de modélisation. Des données provenant des modèles climatiques (RCP8.5) ont été intégrés dans des modèles hydrologiques et hydrogéologiques. Pour le bassin de recherche, une modèle intégré (HGS) a été utilisé pour simuler explicitement l'hydrodynamique des différents aquifères et son impact sur l'écoulement de surface. Pour dix bassins, une approche simplifiée a été utilisé sur la base d'un modèle hydrologiques conceptuel à réservoirs (HBV-light).

Tableau 2 : Combinaisons des modèles de climat global (MCG) et régional (MCR) retenus pour le couplage avec deux types de modèles, hydrologique et hydrogéologique.

Abréviation	Modèle de climat global (MCG)	Modèle de climat régional (MCR)	Modèle hydrologique	
			HGS	HBV
S1	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	x	x
S2	CCCma-CanESM2	SMHI-RCA4	x	x
S3	MOHC-HadGEM2-ES	SMHI-RCA4		x

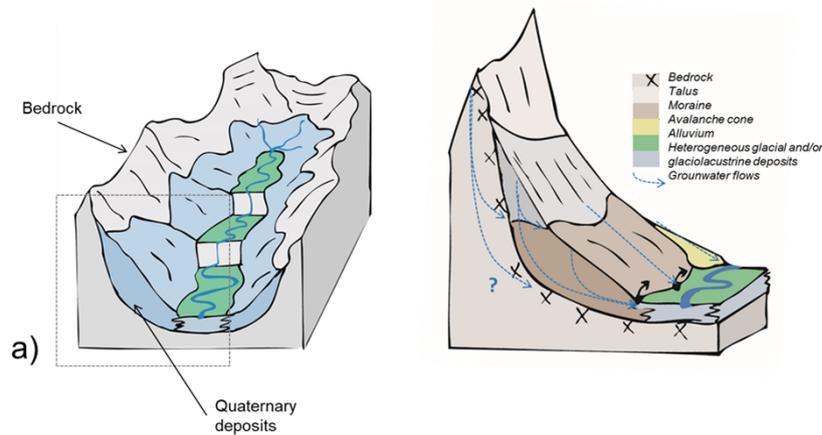
4. LIEN ENTRE STOCKAGE D'EAU SOUTERRAINE ET GÉOLOGIE

4.1. Lien entre régime hydrologique et du couvert géologique

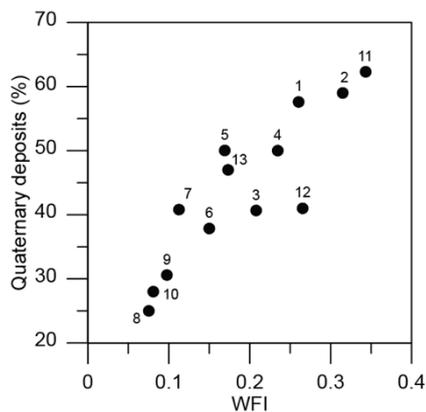
La géologie des milieux alpins est complexe et variée mais des dépôts Quaternaires communs, tels que les moraines, les alluvions, les talus et les éboulis, se retrouvent dans tous les milieux alpins, comme illustré sur la Figure 6a. L'analyse des débits d'étiage de plusieurs petits bassins alpins au travers des Alpes Suisses met en évidence un lien entre régime hydrologique et géologie. En effet la Figure 6b illustre une corrélation entre le pourcentage de dépôts quaternaires d'un bassin et le WFI (c'est-à-dire le débit minimum moyen sur sept jours normalisé par le débit moyen annuel). Cet indice (WFI) augmente avec l'augmentation de la couverture des bassins par dépôts Quaternaires. Avec la modélisation hydrologique, une corrélation est également apparente entre la quantité de stockage d'eau souterraine à l'échelle saisonnière (DGS) normalisé par l'épaisseur maximale du manteau neigeux (SWE) et le pourcentage de dépôts Quaternaires d'un bassin. Ainsi dans les bassins avec un pourcentage de dépôts Quaternaires plus grand, le stockage d'eau souterraine à l'échelle saisonnière est plus important (Figure 6c).

Ces résultats soulignent l'importance des dépôts Quaternaires non consolidés typiques des milieux alpins dans le stockage des eaux souterraines. Dans la littérature récente, il a été mis en évidence que le stockage des eaux souterraines peut être contrôlé par la combinaison de dépôts Quaternaires, par exemple, des éboulis et les prairies humides (Glas et al., 2019) ou par la combinaison d'éboulis et de moraine dans les Alpes Suisses (Cochand et al., 2019b). Il pourrait également être contrôlé par la combinaison de la topographie du substratum rocheux couvert par les dépôts quaternaires ou encore par la variation de la perméabilité à l'intérieur des moraines et des talus (Hayashi, 2019). Le lien entre dépôts Quaternaires et stockage d'eau souterraine pourrait en partie aussi être indirect. Les bassins moins raides ont souvent une couverture de dépôts Quaternaires plus importants mais probablement aussi des gradients hydrologiques plus faibles ce qui ralentit le drainage des systèmes. Une autre raison pouvant expliquer l'importance des dépôts non consolidés pourrait être qu'ils empêchent l'écoulement des eaux de fonte et de pluie grâce à leur forte perméabilité, les gardant ainsi disponibles pour la recharge des eaux souterraines, quel que soit le type d'aquifère responsable du stockage des eaux souterraines. Un tel mécanisme pourrait être particulièrement important pour la recharge vers le substratum fracturé, qui a souvent une capacité d'infiltration limitée ce qui favorise plutôt le ruissellement. Ainsi, le rôle des dépôts quaternaires non consolidés dans le stockage des eaux souterraines a été mis en évidence. Cependant, le substratum rocheux peut également jouer un rôle, surtout s'il est perméable, ce qui peut expliquer une partie de la variation de la Figure 6b et c. De plus, il est important de noter que certaines sources peuvent provenir du stockage à travers du socle fracturé et, bien que parfois petites par rapport au débit des rivières, elles peuvent néanmoins être importantes pour l'approvisionnement en eau en raison de leur stabilité temporelle, moins sujettes aux variations saisonnières.

a)



b)



c)

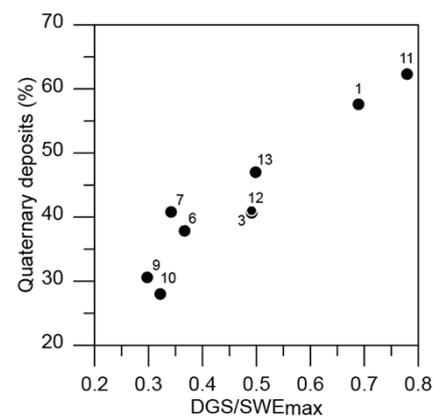


Figure 6. (a) Illustration de l'hydrogéologie simplifiée des milieux alpins, modifiée de Vincent et al. (2019). Relation entre le pourcentage de dépôts quaternaires et (b) un indice pour l'écoulement en hiver (WFI) ou (c) le stockage d'eau souterraine à l'échelle saisonnière (DGS) normalisé par la quantité de neige maximale (SWE_{max}) pour 13 petits bassin alpins Suisses (Arnoux et al. 2020a pour plus de détails).

4.2. Evaluation expérimentale de la dynamique saisonnière des eaux souterraine dans le milieu Alpin

Alors que l'étude discutée ci-dessus indique l'importance des dépôts Quaternaires pour le comportement hydrologique des bassins, nous nous sommes intéressés ici à comprendre les processus qui expliquent ce lien. Nous avons confirmé le stockage d'eau souterraine au niveau saisonnier dans ces dépôts par des approches expérimentales. Dans cette étude complémentaire, nous avons testé des approches qui ne nécessitent pas l'implantation de piézomètres. Ainsi des mesures gravimétriques ont été utilisées pour mettre en évidence des changements de stock d'eau souterraine. Ces mesures ont été complétées par des analyses isotopiques de l'eau afin d'évaluer la provenance de l'eau qui sort du système lors de la récession estivale. La campagne gravimétrique a été menée dans un sous bassin du bassin de recherche (vallon de Rechy) qui possède une couverture importante de dépôts morainiques et de talus. Ces dépôts se trouvent en amont de sources pérennes qui alimentent le Tsalet, un tributaire de la rivière principale.

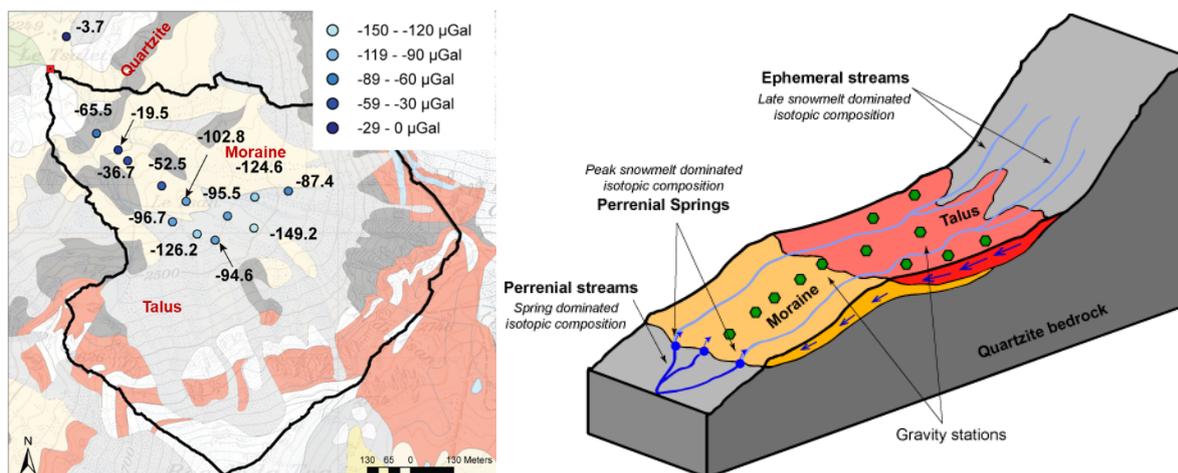


Figure 7. Résultats de l'étude gravimétrique (gauche) ; Changement de la force de gravité entre fin de la période de fonte neige (Juillet) et fin de période de récession estivale (Octobre). Modèle conceptuel du fonctionnement hydrogéologique du sous bassin étudié (droite) ; voir Arnoux et al. 2020b pour plus de détails

Les mesures gravimétriques ont montré une diminution systématique de la force de gravité dans la zone d'étude entre la fin de la fonte de neige en Juillet et Octobre (Figure 7), suggérant ainsi une diminution du stock d'eau souterraine. La diminution était plus important dans la partie amont avec des dépôts de talus que dans la moraine en aval. Les sources du Tsalet montrent tout le long de la période de récession une signature isotopique appauvrie en isotopes lourds. Cette signature est proche de la signature de la neige au printemps et nettement différente de celle des précipitations estivales. Ces signatures confirment que (a) la recharge des eaux souterraines dans la zone est dominée par la fonte de neige et (b) cette eau emmagasinée dans les dépôts meubles est suffisante pour soutenir les écoulements des sources pendant plusieurs mois. Ces observations sont en accord avec les résultats gravimétriques qui indiquent un déstockage important des réserves en eau souterraine. La récession et le déstockage lent pendant plusieurs mois peuvent être expliqués par la configuration des dépôts quaternaires. La présence de dépôts morainiques moins perméable à l'aval des dépôts de talus permettent de mieux retenir l'eau souterraine (Figure 7). Cette configuration pourrait aussi permettre de retenir une partie de l'eau de ruissellement des falaises au-dessus des dépôts de talus. La probable présence de moraine de fonds sur une partie des dépôts de talus pourrait également contribuer à ralentir la récession. La combinaison : dépôts de moraine en aval et dépôts de talus en amont est très fréquente dans les Alpes et pourrait avoir une influence nette sur le fonctionnement hydrologique des bassins Alpains.

5. IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Dans une première partie, les résultats pour le bassin de recherche (Réchy) sont présentés. Ces résultats sont issus d'un modèle intégré et permettent ainsi d'analyser les réponses dans diverses unités hydrogéologiques. Dans une deuxième partie, les résultats de la modélisation conceptuelle effectuée sur dix bassins et donc couvrant une plus grande diversité géologique sont discutés.

5.1. Approche modélisation intégré (HGS)

L'impact du changement climatique sur les processus hydrologiques et hydrogéologiques ont été simulés d'une manière transitoire jusqu'à 2100 en utilisant deux chaînes de modèles climatiques (Tableau 2). D'abord, l'évolution des moyennes annuelles est présentée suivi d'une discussion des effets sur la variation saisonnière des stocks et des écoulements d'eau. Des changements systématiques d'ici 2100 peuvent être identifiés. La moyenne annuelle de la quantité de neige (exprimé en SWE) diminue environ par la moitié d'ici 2100 menant à une forte diminution de la quantité d'eau de fonte (Figure 8). L'évapotranspiration augmente d'environ 50%, en raison des températures plus hautes et d'une période plus longue sans neige. Le débit moyen annuel montre une légère tendance vers le bas. La moyenne annuelle du stock d'eau souterraine diminue progressivement (Figure 9a). Une analyse plus détaillée des contributions des différentes unités hydrogéologiques montre que cette diminution est dû à une diminution du stock dans les aquifères du socle (Figure 9b). Cette diminution est probablement liée à la diminution de la recharge moyenne annuelle au niveau des crêtes du bassin, plus dynamiques que les vallées, et composées majoritairement de socle rocheux. Le stockage dans les dépôts meubles Quaternaires perméables reste relativement stable voir augmente légèrement avec les projections du modèle climatique S1 (Figure 9c).

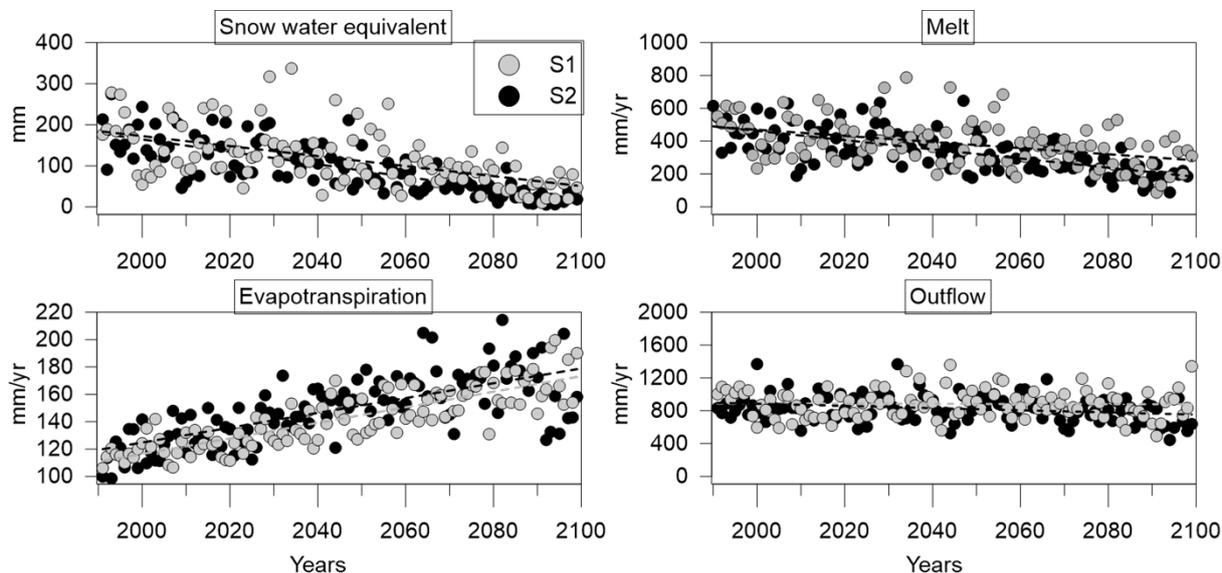


Figure 8 : Moyennes annuels de l'équivalent en eau de la neige (SWE), de la fonte, de l'évapotranspiration (ET), du débit à l'exutoire du bassin dans le bassin de recherche (Réchy) pour deux scénarios climatiques (voir Tableau 2) (Arnoux et al. en prep.).

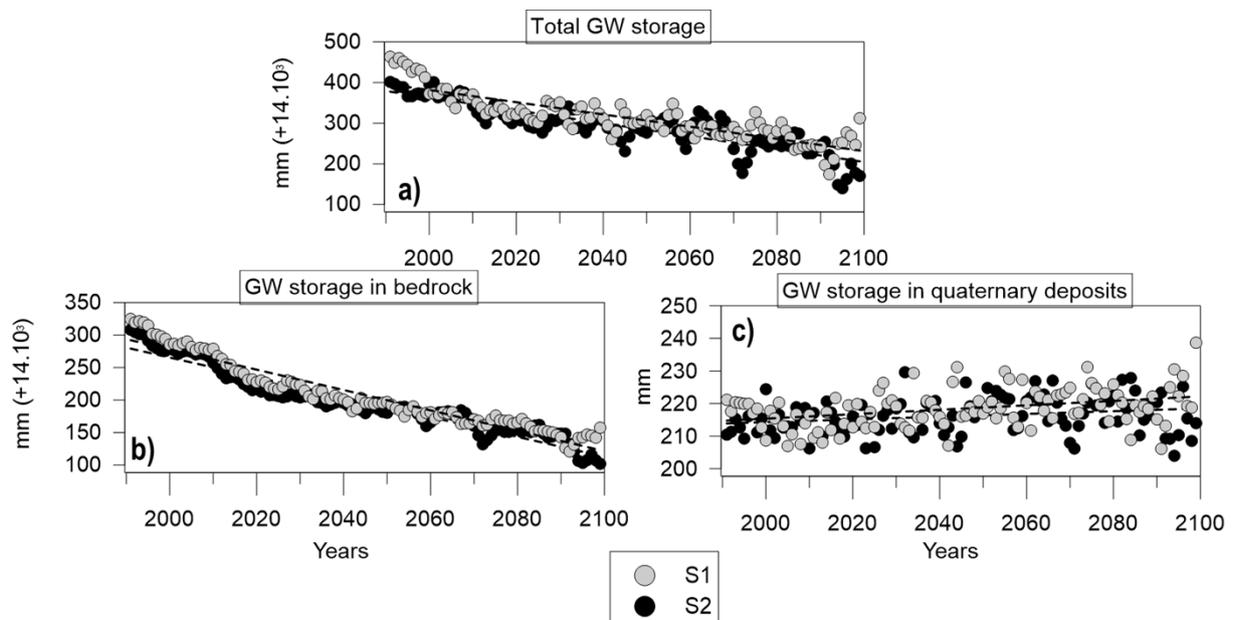


Figure 9. Moyennes annuelles du stockage d'eau souterrain total (a), du stockage dans le socle rocheux peu perméable (b) et du stockage dans les dépôts meubles Quaternaires perméables (c) (Arnoux et al. en prep.).

La diminution de la quantité de neige et de la durée de la période de couvert neigeux a un impact évident sur la saisonnalité de l'hydrologie alpine. Pour évaluer des changements à échelle saisonnière, c'est à dire les changements de régime, il est pertinent de représenter les moyennes mensuelles pour divers périodes de l'avenir (Figure 10). Pour les périodes futures, on constate une diminution du pic de débit qui a lieu plus tôt dans l'année et, une diminution du débit d'été (Figure 10). La diminution de la période de neige entraîne une prolongation de la période d'évapotranspiration et donc une augmentation de la quantité annuelle de perte par ce biais (Figure 8). Le stockage dynamique de l'eau souterraine est également affecté par l'évolution de la neige. Les résultats montrent que le stockage dans les dépôts quaternaires perméables augmente en hiver et printemps liés à une période plus courte avec peu de recharge (Figure 10). En revanche, en été le niveau de stock est plus faible car la fonte intervient plus tôt avec un volume plus faible. Ainsi le stockage dynamique des eaux souterraines (différence entre maximum et minimum) diminue (Figure 10). Plus en détail, on va de nouveau un comportement contrasté entre le stockage dans les dépôts Quaternaire et le socle. Pour les dépôts Quaternaire, les variations saisonnières diminuent alors que le niveau de stockage moyen reste relativement stable comme déjà indiqué dans la Figure 9b. Par contre pour le socle, on observe surtout une diminution successive alors que la saisonnalité est déjà faible sous les conditions actuelles. Pour la période de fin été (Aout, Septembre), le débit du cours d'eau diminue nettement plus entre référence et période 2085 (30-40%) que le stock d'eau souterraine dans les dépôts quaternaires (5-10%). Ceci montre que la réponse des eaux souterraines est plus tamponnée que celle des cours d'eau, même pour les dépôts perméables proche de la surface.

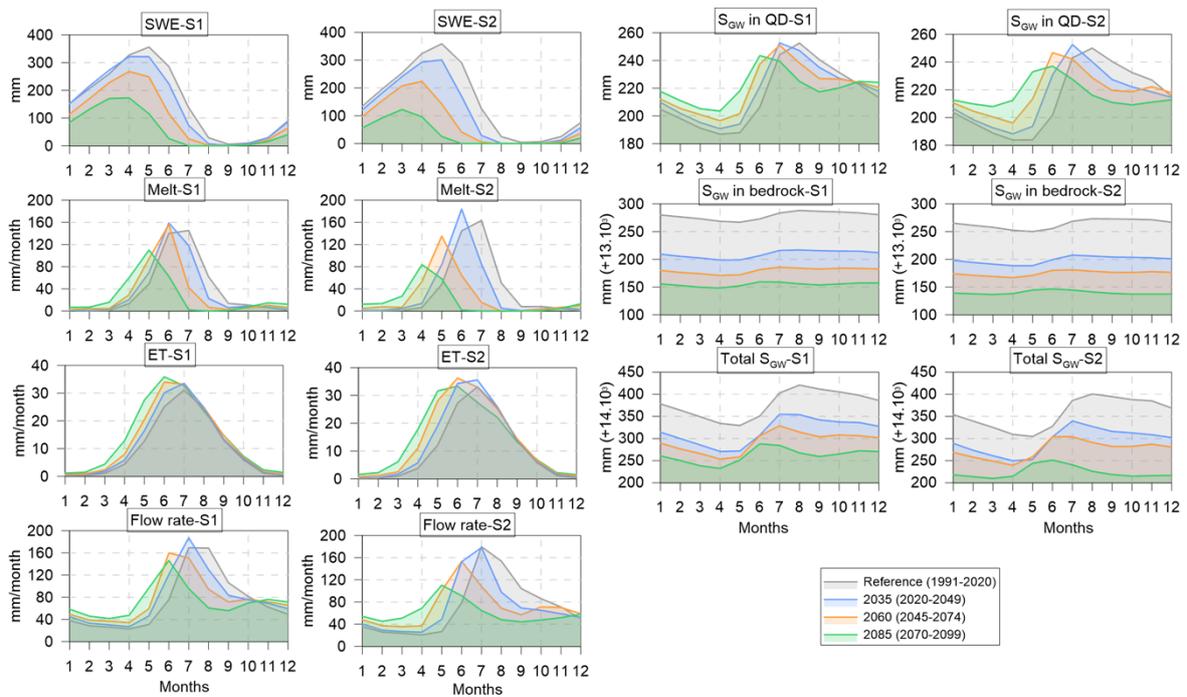


Figure 10. Evolutions saisonnières selon les deux scénarios RCP 8.5, S1 and S2 pour le bassin de recherche (Réchy). Moyennes saisonnières de l'équivalent en eau de la neige (SWE), de la fonte (Melt), de l'évapotranspiration (ET), du débit à l'exutoire du bassin (Flow rate), du stockage souterrain (S_{GW}) dans les dépôts Quaternaires perméables (QD), dans le socle rocheux peu perméable (bedrock) et le stockage souterrain total (voir Arnoux et al. en prep. pour plus de détails). Les unités du stockage souterrain représentent la quantité d'eau présente dans les différents réservoirs souterrains normalisée à la taille du bassin versant, ici les variations relatives sont importantes, les valeurs absolues dépendent du volume des couches géologiques et de leur porosité.

Les modifications du régime deviennent aussi évidentes si on analyse l'évolution des débits minimaux en hiver (Figure 11a) et en été ainsi que le stockage minimal d'eau souterraine (Figure 11b). Le débit minimum commence à se décaler de l'hiver vers l'été dans la seconde moitié du siècle (Figure 11a). Le débit minimum à l'horizon 2085 (été) reste supérieur au débit minimum actuel (hiver), bien qu'il s'en rapproche fortement lors des étés particulièrement secs. Le stockage minimal des eaux souterraines dans les dépôts quaternaires se décale également de l'hiver vers l'été et reste généralement plus haut dans l'été à l'avenir qu'actuellement en hiver (Figure 11b). On voit de nouveau que le changement relatif est plus faible pour le stockage de l'eau souterraine que pour le débit du cours d'eau. Alors que le débit minimal estival diminue d'environ 4 mm/s à 1 mm/s (-75%) pour les étés secs, le stockage en eau souterraine diminue uniquement de 240 à 200 mm en moyenne (-17%).

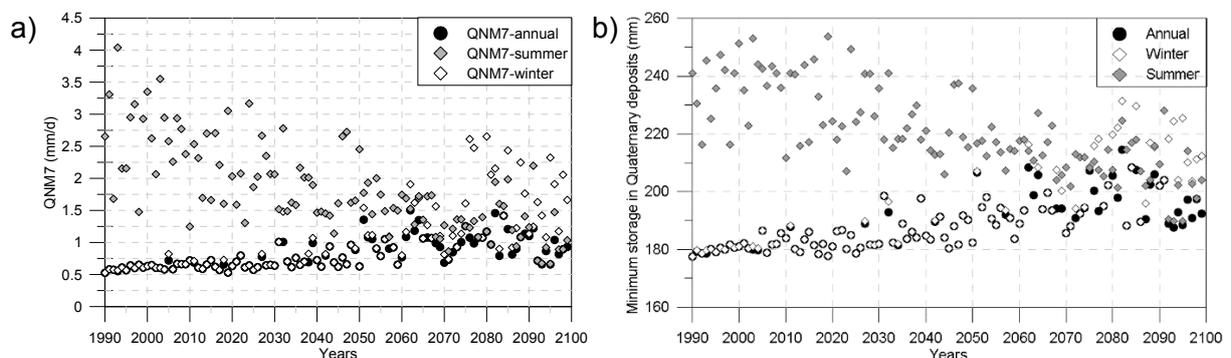


Figure 11 : Débit minimale (a) ou stockage minimale de l'eau souterraine dans les dépôts quaternaires (b) sur sept jours consécutifs par an, à la fin d'été (août-septembre) et à la fin d'hiver (avril-mai) pour S2 (Arnoux et al. en prep.).

Ces résultats permettent aussi de tirer quelques conclusions en ce qui concerne le comportement des sources qui peuvent être associés à ces divers types d'aquifères. Les débits des sources drainant des dépôts Quaternaires perméables devraient voir leurs variations saisonnières se stabiliser avec une augmentation l'hiver et une diminution l'été. Leurs débits moyens annuels devraient rester relativement stables. Les sources drainant des systèmes plus profonds et moins perméables sont moins sensibles aux variations saisonnières. Leurs débits ne devraient pas voir d'importants changements à court terme mais devraient diminuer à plus long terme.

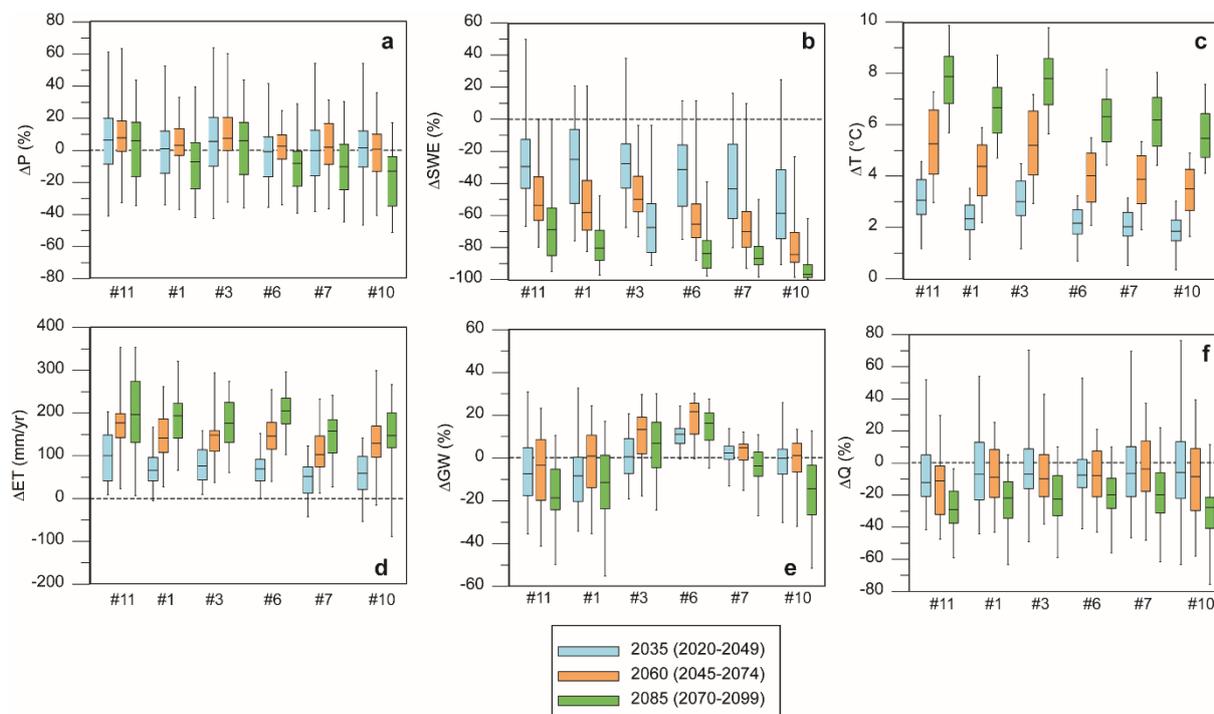


Figure 12 : Variation des précipitations annuelles moyennes (a), de l'équivalent en eau de la neige (b), de la température (c), de l'évapotranspiration (d), du stockage des eaux souterraines (e), du débit (f) pour les bassins versants n° 11, n° 1, n° 3, n° 6, n° 7 et n° 10 pour les 3 périodes futures : 2035 (2020-2049) en bleu, 2060 (2045-2074) en orange et 2085 (2070-2099) en vert, par rapport à la période de référence (1982-2011) pour le scénario S2 (Arnoux et al. 2020a).

5.2. Approche modélisation conceptuelle (HBV)

Pour les dix des bassins alpins choisis, nous considérons de la même manière que précédemment d'abord les tendances pour les moyennes annuelles et, par la suite, les changements de la distribution saisonnière. L'évolution des moyennes annuelles des paramètres hydrologiques est illustrée pour 6 des 10 bassins modélisés par la Figure 12. On constate de nouveau une forte diminution de la quantité moyenne de neige (Figure 12b) et une augmentation de l'évapotranspiration (Figure 12d). Il est intéressant de constater que le débit des cours d'eau (Figure 12f) et le stockage d'eau souterraine (Figure 12e) montrent des tendances contrastées. Alors que le débit diminue dans tous les bassins, la quantité moyenne de stock d'eau souterraine montre une évolution variable. Dans quelques bassins, le stock d'eau souterraine diminue en moyenne alors que dans d'autres, il y a peu de changement ou le stock augmente (Figure 12e). Une analyse plus approfondie de la cause de ces différences est difficile avec des modèles conceptuels car il n'est pas possible de différencier les types d'aquifères.

Pour la gestion de l'eau, les informations sur les débits d'étiage futurs sont particulièrement importantes. Les comparaisons des débits d'étiages hivernaux actuels aux débits d'étiage d'été futurs suivant trois chaînes de modèles de scénarios RCP 8.5 montrent des tendances dans les valeurs futures en lien avec les valeurs actuelles (Figure 13). Les bassins qui ont un important stockage souterrain ont des variations hydrologiques saisonnières plus atténuées et montrent des débits d'étiage normalisés aux précipitations plus élevés que les bassins alpins avec moins de stockage souterrain. De plus, il est observé que, même suivant les projections de scénario climatique extrême (RCP 8.5), le futur débit d'étiage d'été, qui diminue principalement en raison du décalage de la fonte plus tôt dans l'année, reste en moyenne supérieur au débit d'étiage d'hiver actuel, ce qui est en accord avec les résultats du modèle intégré (Figure 13). De plus, les différences de comportement observées dans le présent entre les faibles débits des différents bassins restent les mêmes dans le futur.

Ainsi le débit d'étiage d'hiver actuel apparaît comme un bon indicateur de la limite basse du débit d'été futur pour les petits bassins versant alpins. Les eaux souterraines ont la capacité d'atténuer les changements climatiques futurs en contribuant majoritairement au débit des cours d'eau en période d'étiage. Cependant, il est important de noter ici que cette atténuation dépend fortement du régime de précipitations futur permettant la recharge des eaux souterraines.

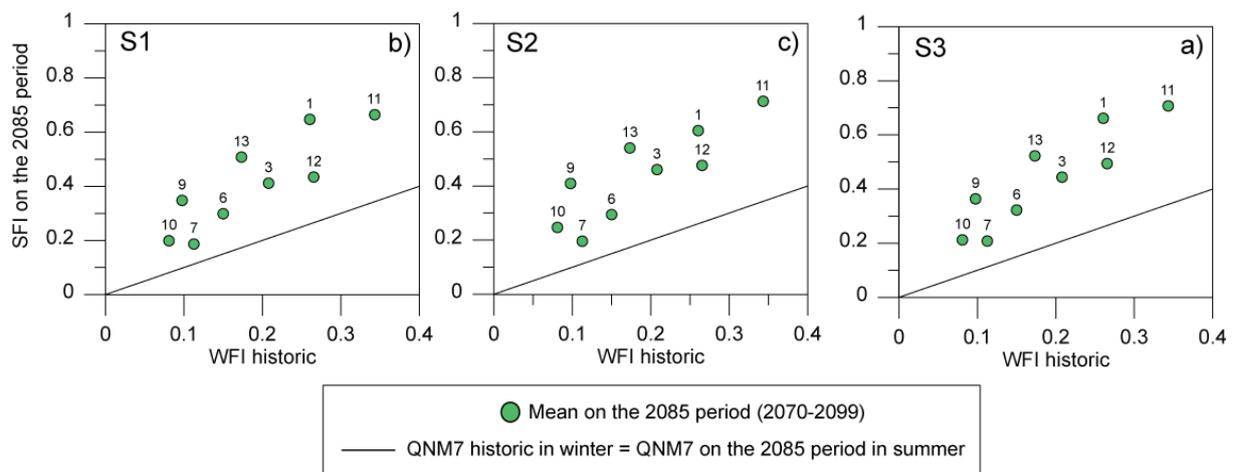


Figure 13. SFI (débit minimal d'été moyen sur sept jours consécutifs divisé pour la débit moyen annuel) pour la période 2085 pour a) S1, b) S2, et c) S3, contre WFI (débit minimal d'hiver moyen sur sept jours consécutifs divisé pour le débit moyen annuel) historique calculé sur les périodes de surveillance des bassins versants (Arnoux et al. 2020a).

6. RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Dans ce chapitre nous tirons des conclusions sur les divers thématiques qui ont fait les objectifs de ce projet. D'abord nous discuterons les conclusions par rapport aux stratégies de monitoring et modélisations. Par la suite nous résumerons les grandes tendances de changement attendues pour les bassins de montagne dans le contexte du changement climatique et l'influence du contexte géologique. Pour finir, nous discuterons de quelques implications pour la gestion des eaux à venir.

Monitoring

- Selon le modèle intégré, l'impact du changement climatique devrait varier selon le type d'aquifère. Actuellement, il y a très peu de points d'observation des eaux souterraines à haute altitude pour pouvoir anticiper et documenter ces changements. Avec des changements particulièrement importants attendus pour les régions de montagne et l'importance de ces zones pour les régions en aval, il semble primordial d'améliorer le suivi des eaux souterraines dans les montagnes. La très forte hétérogénéité géologique des mieux alpins constitue un défi pour définir des emplacements représentatifs pour le monitoring des niveaux de nappes. Le suivi des sources pourrait être une bonne alternative aux mesures de niveaux des nappes car celles-ci intègrent les dynamiques hydrogéologiques sur une plus grande zone. Les résultats de simulation montrent l'importance de suivre des sources qui sont associées à différents types d'aquifères. Mais étant donné que les connaissances de l'hydrogéologie alpine sont en forte amélioration, il devrait être possible de définir des points d'observation avec une bonne représentativité. Des observations directes du niveau d'eau souterraine seraient aussi très précieuses pour améliorer la calibration des modèles hydrologiques qui tiennent compte de l'eau souterraine explicitement.
- La quantité d'eau qui entre dans un bassin sous forme de précipitation est un paramètre fondamental qui influence tous les calculs qui en découlent. Pour les bassins de haute montagne cette quantité est en général connue que d'une manière grossière ce qui introduit des incertitudes considérables dans les calculs des bilans d'eau et de modélisation. Il semble important d'inclure plus de stations de mesure de précipitation liquide et solide à haute altitude. Cela semble d'autant plus important que la limite pluie-neige est en train de monter. Du point de vue hydrologique, les stations susmentionnées seraient les plus utiles dans les bassins de montagne dans lesquels le débit est mesuré depuis longtemps.
- De plus, une amélioration de la mesure des débits d'étiage hivernaux actuels, qui sont parfois difficile en raison de la glace qui se forme, ainsi que leur mesure sur d'autres petits bassins alpins non-influencés par des infrastructures, permettraient d'améliorer les prédictions des régimes hydrologiques futurs en milieux alpins.

Modélisation

- Cette étude a démontré que les modèles intégrés qui tiennent compte explicitement des eaux souterraines sont applicables pour des études d'impacts du changement climatique en contexte Alpin et permettent de tirer des conclusions différées selon les types d'aquifères. Dans ce projet, cette méthode n'était appliquée qu'à un bassin car l'élaboration d'un modèle géologique, même simplifié, comme base pour le modèle d'écoulement nécessite du temps. Il serait utile d'élargir dans l'avenir cette approche à d'autres bassins. Les résultats de modélisation conceptuelle pourraient aider à prioriser les bassins afin de couvrir une gamme de comportement aussi large que possible en incluant des bassins qui pourraient voir leur stockage d'eau souterraine augmenter ou

diminuer. Cette modélisation serait plus robuste si des observations directes des eaux souterraines étaient disponibles.

Tendance avec le changement climatique

- Les résultats de cette étude suggèrent que différents types d'aquifères montrent une évolution contrastée avec le changement climatique, bien que ces tendances devraient encore être confirmés par des simulations pour d'autres bassins. Les changements peuvent intervenir sur différentes échelles de temps. Le régime des eaux souterraines va très probablement subir des modifications. De plus, des changements à long terme du stock d'eau souterraine peuvent avoir lieu. On s'attend à ce que, ces deux tendances soient combinées de différentes manières selon le type d'aquifère.
- Au niveau du régime, on peut s'attendre à ce que les variations saisonnières de stock d'eau souterraine suivent une tendance à la baisse. L'étiage hivernal devient moins long et, malgré l'évaporation pendant l'été, la recharge continue à avoir lieu. Ceci suggère que l'eau souterraine est disponible d'une manière plus régulière sur l'année. Sur une échelle relative (% de diminution), la diminution du stock total d'eau souterraine à la fin de l'été est nettement moins important que la diminution du débit des cours d'eau. Ceci démontre la plus grande stabilité des aquifères aussi dans un contexte Alpin malgré des gradients élevés et des perméabilités importantes.
- Le contexte géologique et hydrogéologique influence la manière dont les bassins réagissent au changement climatique. Les bassins qui ont un important stockage d'eau souterraine ont des réponses plus tamponnées de leur régime hydrologique et montrent des débits d'étiage normalisés aux débits moyens plus élevés que les bassins alpins avec moins de stockage souterrain, comme illustré sur la Figure 14. Les dépôts quaternaires semblent jouer un rôle important pour assurer l'écoulement pendant les périodes d'étiage. Ce phénomène peut être lié à deux facteurs. Ces dépôts peuvent agir comme des unités de stockage à une échelle de temps suffisante pour contribuer à la régulation des débits saisonniers. De plus, la présence étendue de ces dépôts perméables peut contribuer à retenir l'eau de pluie et/ou fonte et à ainsi favoriser la recharge des aquifères en dessous. La présence du bedrock avec une forte ou moyenne perméabilité (calcaire, évaporites) peut également contribuer à un débit d'étiage plus haut.

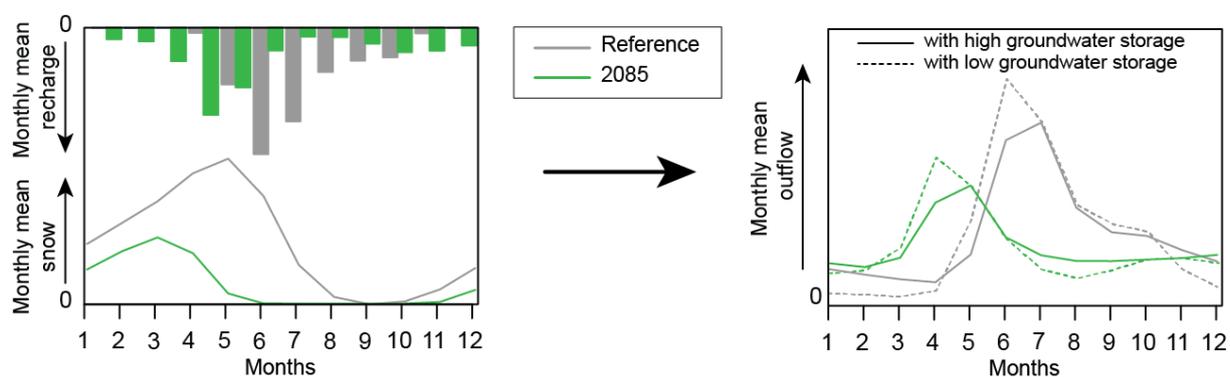


Figure 14. Schéma conceptuel de l'évolution du débit des cours d'eau dans le futur avec une forte augmentation des températures et une diminution des précipitations estivales mettant en évidence le rôle tampon des eaux souterraines (Arnoux et al. 2020a).

Implication pour la gestion des ressources en eau avec accent sur les périodes d'étiage

- Les implications pour la gestion des eaux doivent être différenciées selon si on s'intéresse aux eaux souterraines ou aux eaux de surface. Lors de la période d'étiage,

le débit du cours d'eau représente la « performance » des exutoires de tous les aquifères alors que pour l'approvisionnement en eau souterraine, un aquifère/exutoire spécifique est souvent utilisé favorisant les unités les plus « performantes ».

- Au niveau des cours d'eau, l'étude montre que la période d'étiage maximale va migrer de l'hiver à l'été. Mais, le débit d'étiage estival dans l'avenir devrait rester plus haut que le débit d'étiage hivernal du passé. Dans les années sèches, le débit d'étiage estival s'approche au débit d'hiver du passé. Ainsi les données de débits d'étiage hivernal actuel permettent d'estimer une limite inférieure pour le débit d'étiage estival dans l'avenir. En absence de données, selon notre étude, l'ampleur de la couverture avec dépôts quaternaire semble un bon indicateur pour les débits étiages, même si cette relation devrait encore être confirmée avec des données d'autres sites.
- Au niveau des eaux souterraines, un comportement varié peut être attendu. Pour des dépôts perméables proches de la surface qui ont une bonne capacité de stockage, la présence de l'eau souterraine devient plus régulière à l'échelle saisonnière et la baisse à la fin de l'été reste relativement modeste. Par contre, pour les aquifères avec une perméabilité plus faible et/ou plus profonde, la disponibilité d'eau souterraine pourrait diminuer à long terme. Face à la possible évolution des débits de sources de montagne, il semble important de combiner l'alimentation en eau potable par différents types de sources : (1) des sources provenant de systèmes perméables (par exemple des dépôts quaternaires), sensibles aux variations saisonnières mais plus résilients et (2) des systèmes moins perméables (par exemple du socle peu fracturé), moins sensibles aux variations saisonnières à court terme mais moins résilients.

7. REMERCIEMENTS

Nous remercions Tobias Jonas, Rebecca Mott et Adam Winstral de l'institute pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF) pour la modélisation du manteau neigeux des bassins expérimentaux. Nous remercions également Roberto Costa et Laurent Marguet pour leur soutien lors des travaux de terrain ainsi que Landon J.S. Halloran et Eléonore Berdat pour leur contribution à l'étude expérimentale sur le bassin du Tsalet. Nous remercions également le Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) pour son soutien aux travaux réalisés dans le vallon de Réchy.

8. RÉFÉRENCES

- Arnoux M., Brunner P., Schaefli B., Mott R., Cochand F. and Hunkeler D., 2020a *Low-flow behavior of alpine catchments with varying quaternary cover under current and future climatic conditions*, Journal of Hydrology DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125591.
- Arnoux M., Cochand F., Brunner P., Schaefli B., Winstral A., and Hunkeler D., *In prep.*, Storage in quaternary deposits buffers the discharge response to climate change of a small alpine catchment, en preparation pour être soumis dans Groundwater.
- Arnoux M., Halloran L.J.S., Berdat E. and Hunkeler D., 2020b Characterizing seasonal groundwater storage in alpine catchments using time-lapse gravimetry, water stable isotopes and water balance methods, Hydrological Processes. DOI: 10.1002/hyp.13884
- Barnett, T.P., Adam, J.C., Lettenmaier, D.P., 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. Nature, 438(7066): 303-9. DOI:10.1038/nature04141
- Barnhart, T.B. et al., 2016. Snowmelt rate dictates streamflow. Geophysical Research Letters, 43(15): 8006-8016. DOI:10.1002/2016gl069690
- Beaulieu, M., Schreier, H., Jost, G., 2012. A shifting hydrological regime: a field investigation of snowmelt runoff processes and their connection to summer base flow, Sunshine Coast, British Columbia. Hydrological Processes, 26(17): 2672-2682. DOI:10.1002/hyp.9404
- Beniston, M., Stoffel, M., 2014. Assessing the impacts of climatic change on mountain water resources. Sci Total Environ, 493: 1129-37. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.11.122
- Berghuijs, W.R., Woods, R.A., Hrachowitz, M., 2014. A precipitation shift from snow towards rain leads to a decrease in streamflow. Nature Climate Change, 4(7): 583-586. DOI:10.1038/nclimate2246
- Clow, D.W. et al., 2003. Ground Water Occurrence and Contributions to Streamflow in an Alpine Catchment, Colorado Front Range. Groundwater, 41(7): 937-950. DOI:10.1111/j.1745-6584.2003.tb02436.x
- Cochand, F., Therrien, R., Lemieux, J.-M., 2019a. Integrated Hydrological Modeling of Climate Change Impacts in a Snow-Influenced Catchment. Groundwater, 57(1): 3-20. DOI:10.1111/gwat.12848
- Cochand, M., Christe, P., Ornstein, P., Hunkeler, D., 2019b. Groundwater Storage in High Alpine Catchments and Its Contribution to Streamflow. Water Resources Research, 55(4): 2613-2630. DOI:10.1029/2018wr022989
- Cras, A., Marc, V., Travi, Y., 2007. Hydrological behaviour of sub-Mediterranean alpine headwater streams in a badlands environment. Journal of Hydrology, 339(3-4): 130-144. DOI:10.1016/j.jhydrol.2007.03.004
- Glas, R. et al., 2019. Hydrogeology of an alpine talus aquifer: Cordillera Blanca, Peru. Hydrogeology Journal, 27(6): 2137-2154. DOI:10.1007/s10040-019-01982-5
- Godsey, S.E., Kirchner, J.W., Tague, C.L., 2014. Effects of changes in winter snowpacks on summer low flows: case studies in the Sierra Nevada, California, USA. Hydrological Processes, 28(19): 5048-5064. DOI:10.1002/hyp.9943
- Harpold, A.A., Brooks, P.D., 2018. Humidity determines snowpack ablation under a warming climate. Proc Natl Acad Sci U S A, 115(6): 1215-1220. DOI:10.1073/pnas.1716789115
- Hayashi, M., 2019. Alpine Hydrogeology: The Critical Role of Groundwater in Sourcing the Headwaters of the World. Groundwater, n/a(n/a). DOI:10.1111/gwat.12965
- Hood, J.L., Roy, J.W., Hayashi, M., 2006. Importance of groundwater in the water balance of an alpine headwater lake. Geophysical Research Letters, 33(13). DOI:10.1029/2006gl026611

- Huth, A.K., Leydecker, A., Sickman, J.O., Bales, R.C., 2004. A two-component hydrograph separation for three high-elevation catchments in the Sierra Nevada, California. *Hydrological Processes*, 18(9): 1721-1733. DOI:10.1002/hyp.1414
- Jodar, J. et al., 2017. Groundwater discharge in high-mountain watersheds: A valuable resource for downstream semi-arid zones. The case of the Berchules River in Sierra Nevada (Southern Spain). *Sci Total Environ*, 593-594: 760-772. DOI:10.1016/j.scitotenv.2017.03.190
- Lauber, U., Kotyla, P., Morche, D., Goldscheider, N., 2014. Hydrogeology of an Alpine rockfall aquifer system and its role in flood attenuation and maintaining baseflow. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(11): 4437-4452. DOI:10.5194/hess-18-4437-2014
- Li, D., Wrzesien, M.L., Durand, M., Adam, J., Lettenmaier, D.P., 2017. How much runoff originates as snow in the western United States, and how will that change in the future? *Geophysical Research Letters*, 44(12): 6163-6172. DOI:10.1002/2017gl073551
- Liu, F., Williams, M.W., Caine, N., 2004. Source waters and flow paths in an alpine catchment, Colorado Front Range, United States. *Water Resources Research*, 40(9). DOI:10.1029/2004wr003076
- Musselman, K.N., Clark, M.P., Liu, C., Ikeda, K., Rasmussen, R., 2017. Slower snowmelt in a warmer world. *Nature Climate Change*, 7(3): 214-219. DOI:10.1038/nclimate3225
- Pavlovskii, I., Hayashi, M., Itenfisu, D., 2019. Midwinter melts in the Canadian prairies: energy balance and hydrological effects. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23(4): 1867-1883. DOI:10.5194/hess-23-1867-2019
- Rohrer, M., Salzmann, N., Stoffel, M., Kulkarni, A.V., 2013. Missing (in-situ) snow cover data hampers climate change and runoff studies in the Greater Himalayas. *Sci Total Environ*, 468-469 Suppl: S60-70. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.09.056
- Teutschbein, C., Grabs, T., Karlsen, R.H., Laudon, H., Bishop, K., 2015. Hydrological response to changing climate conditions: Spatial streamflow variability in the boreal region. *Water Resources Research*, 51(12): 9425-9446. DOI:10.1002/2015wr017337
- Van Loon, A.F. et al., 2015. Hydrological drought types in cold climates: quantitative analysis of causing factors and qualitative survey of impacts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(4): 1993-2016. DOI:10.5194/hess-19-1993-2015
- Vincent, A., Violette, S., Aðalgeirsdóttir, G., 2019. Groundwater in catchments headed by temperate glaciers: A review. *Earth-Science Reviews*, 188: 59-76. DOI:10.1016/j.earscirev.2018.10.017
- Viviroli, D., Dürr, H.H., Messerli, B., Meybeck, M., Weingartner, R., 2007. Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resources Research*, 43(7). DOI:10.1029/2006wr005653
- Zhang, D., Cong, Z., Ni, G., Yang, D., Hu, S., 2015. Effects of snow ratio on annual runoff within the Budyko framework. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19(4): 1977-1992. DOI:10.5194/hess-19-1977-2015