

Le réchauffement climatique dans les Alpes

Déclin des glaciers et de l'enneigement, et conséquences sur la ressource en eau

Par Bernard Francou ¹

L'année 2023 a été la plus chaude jamais observée par l'Organisation météorologique mondiale depuis les premiers relevés de température et a été marquée par de nombreuses catastrophes climatiques de grande ampleur, notamment en France. Sécheresses et pénuries d'eau dans le Sud, inondations dantesques dans le Nord, effondrement de parois rocheuses dans les Alpes... : les manifestations du changement climatique redoutées et annoncées depuis des décennies par les scientifiques se multiplient. Dans cet article, Bernard Francou se penche sur le cas particulier des Alpes.

Spécialiste de la haute montagne et notamment glaciologue, il propose une analyse concrète et détaillée de l'impact du changement climatique sur cette région cruciale sur le plan hydrologique. Il présente ainsi de multiples données scientifiques relatives à la température, au volume des glaciers, à l'enneigement, la pluviométrie, etc., et leur évolution sur longue période, qui montrent très clairement un déclin (qui s'accélère) des glaciers et de l'enneigement. Il indique également comment pourrait évoluer cette tendance en fonction des scénarios de hausse des températures planétaires, ainsi que les conséquences qui en découleraient pour la région alpine, mais aussi pour les bassins fluviaux situés en aval et l'hydrologie du pays. S.D.

Les montagnes sont aux avant-postes du réchauffement climatique. Dans les Alpes, ses effets s'observent sur le recul des glaciers et le déclin de l'enneigement, avec un rythme qui s'accélère depuis le début des années 2000. D'autres aspects de l'environ-

1. Directeur de recherche émérite à l'Institut de recherche pour le développement (IRD) ; géomorphologue et glaciologue, spécialiste de la haute montagne, contributeur dans plusieurs rapports du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat).

nement sont concernés : en haute montagne, la dégradation du pergélisol et la remontée des écosystèmes en altitude ; plus bas, la fragilisation des alpages et des forêts². À cela s'ajoutent des tensions sur la ressource en eau à la suite des sécheresses et des fortes chaleurs estivales qui peuvent survenir de nos jours dès la fin du printemps et se prolonger jusqu'à l'automne, comme cela a été le cas en 2022. C'est là un problème nouveau pour les régions de montagne, qui étaient plutôt connues pour être des châteaux d'eau distribuant généreusement la ressource aux régions périphériques. Une telle évolution fait peser des risques sur l'économie de la montagne, les activités traditionnelles comme le pastoralisme et la sylviculture, mais aussi le tourisme, en particulier celui qui repose sur le ski en station, richesse de nombreuses vallées alpines depuis son essor dans les années 1960. On se focalisera ici sur l'impact du recul des glaciers et de la neige sur les régimes des cours d'eau, les tendances observées depuis quelques décennies, et celles que l'on peut prévoir à l'horizon 2050-2100.

Des températures qui s'emballent : ce que disent les données dans les Alpes

Le réchauffement passe pour être plus important en altitude qu'au niveau des plaines, mais la rareté des mesures météorologiques à plus de 2 000 mètres d'altitude ne permet pas de disposer de données suffisamment nombreuses et bien réparties pour étayer cette affirmation de façon systématique. La série de Météo France des stations de Bourg-Saint-Maurice et d'Embrun, situées à 1 000 mètres, pointe une hausse des températures moyennes depuis le début du XX^e siècle de 2,25 °C, avec une accélération de la tendance à partir du milieu des années 1980 où cette hausse atteint 0,5 °C par décennie, une valeur plus élevée que celle relevée à basse altitude sous les latitudes moyennes. Un tel réchauffement a eu pour effet de déplacer les isothermes vers le haut sur plus de 300 mètres.

Tous les mois de l'année enregistrent un réchauffement, mais ce sont les printemps et les étés qui sont les plus touchés, davantage que les automnes et les hivers. Au printemps, la hausse des températures fait que le déneigement vers 1 500-2 000 mètres se produit avec trois semaines d'avance par rapport à la période de référence 1960-1980. Le départ précoce de la neige a à son tour une incidence

2. FRANCOU Bernard et MÉLIÈRES Marie-Antoinette, *Coup de chaud sur les montagnes. Ce qu'elles ont à nous dire sur le réchauffement climatique*, Chamonix / Paris : Guérin / Paulsen, 2021.

sur la température car, avec un albédo ³ moins élevé, le sol dénudé absorbe davantage l'énergie du rayonnement solaire, lequel est à son niveau maximum en cette période de l'année. Des sols plus secs à la fin du printemps contribuent à leur tour à rendre les étés qui suivent plus chauds en l'absence de précipitations, car moins d'énergie est utilisée par l'évapotranspiration. Une telle rétroaction entre déneigement précoce et température explique que la hausse de cette dernière soit plus marquée sur les tranches d'altitude moyenne (1 000-2 000 mètres), tandis qu'à plus haute altitude, au-dessus de 2 500 mètres, l'atmosphère s'échauffe moins en raison d'un enneigement plus persistant. Faut-il en conclure que la haute montagne est épargnée par le réchauffement ?

Ce n'est pas le cas si l'on se fonde sur les carottages effectués dans des surfaces glaciaires au-dessus de 4 000 mètres, là où elles sont froides. Par exemple, au col du Dôme, à 4 250 mètres, dans le massif du Mont-Blanc, sur une épaisseur de glace de 130 mètres, les mesures pratiquées entre 1994 et 2017 montrent une augmentation de la température de 1,5 °C à 50 mètres de profondeur et de 0,9 °C sur tout le profil, alors que le substrat rocheux reste à une température proche de - 10 °C. La pénétration progressive d'une onde de chaleur dans ces glaces froides témoigne que, même à très haute altitude, les glaciers sont entrés dans une phase de déséquilibre et qu'ils pourraient devenir « tempérés » (à température de fusion) d'ici quelques décennies. Un tel réchauffement aurait des conséquences sur la dynamique de ces glaces qui, décollées de leur lit, pourraient se mettre à glisser et devenir instables, avec un risque accru d'écroulements sur les zones habitées ⁴.

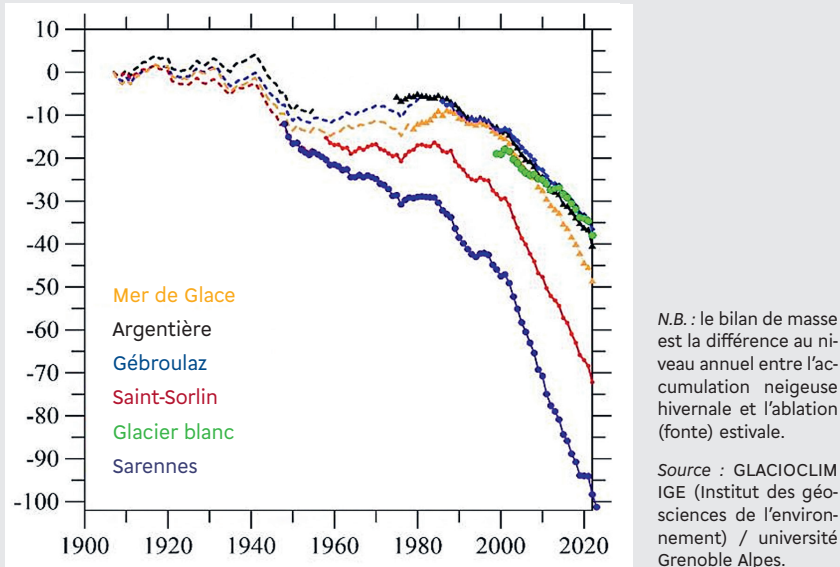
Des glaciers dans une phase de recul historique

On confond souvent le recul séculaire des glaciers avec son accélération observée depuis les années 1980. Après la fin du petit âge glaciaire — une période d'avancée des glaciers au niveau mondial qui débute vers 1300 de notre ère —, la décrue s'installe dans les Alpes entre 1830 et 1850, au point que les glaciers ont déjà perdu, au milieu du XX^e siècle, près de 50 % de leur surface. Il y a eu des périodes de recul rapide, comme au cours des années 1860-1880 et 1940-1950, et des phases de stabilisation entrecoupées de petites

3. L'albédo mesure la quantité de lumière solaire incidente réfléchie par une surface (NDLR).

4. VINCENT Christian *et alii*, « Strong Changes in Englacial Temperatures despite Insignificant Changes in Ice Thickness at Dôme du Goûter Glacier (Mont-Blanc Area) », *The Cryosphere*, vol. 14, n° 3, 2020, p. 925-934. URL : <https://tc.copernicus.org/articles/14/925/2020/>. Consulté le 15 janvier 2024.

Graphique 1. Évolution du bilan de masse cumulé sur six glaciers des Alpes françaises (en mètres d'équivalent-eau)

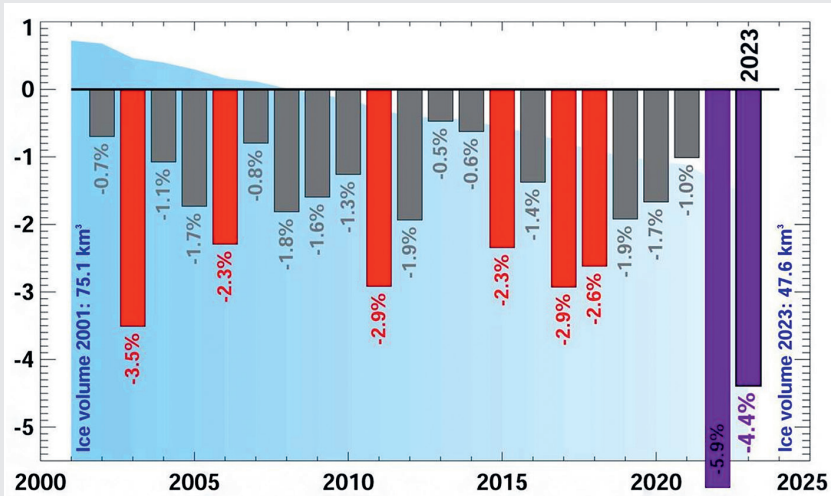


avancées, comme entre 1890 et 1940, et 1950 et 1985. Mais ce recul séculaire n'est en rien comparable à celui qui se produit depuis 1985. On le voit bien sur le graphique 1 où sont présentés les bilans de masse cumulés de six glaciers des Alpes françaises depuis 1900.

Après la stabilité des années 1950-1980, les glaciers enregistrent des pertes moyennes de 0,85 mètre d'équivalent-eau par an de 1985 à 2002, mais ces pertes doublent à partir de 2003 (1,5 à 1,8 mètre par an). Au cours des dernières années, des records d'ablation ont été battus, comme le montre le graphique 2 tracé à partir des valeurs obtenues sur les glaciers suisses. Le recul des glaciers alpins est une évolution conforme à ce qui est observé dans la plupart des régions montagneuses au niveau mondial (voir encadré ci-contre).

La montée en flèche des déficits sur les glaciers alpins est, comme partout ailleurs, associée à des bilans d'énergie excédentaires en surface, ce qui se traduit par une hausse des températures pendant la période d'ablation. Ainsi, sur le petit glacier de Sarennes dans les Grandes Rousses, les taux d'ablation annuels sont passés de deux mètres d'équivalent-eau dans les années 1970 à plus de quatre mètres depuis 2003 (graphique 3). Cette hausse de l'ablation s'explique autant par les fortes valeurs de fonte atteintes au cœur de l'été que par l'extension des conditions de fonte estivale en direc-

Graphique 2. Perte de volume des glaciers suisses entre 2001 et 2023 (en % par rapport au volume de l'année antérieure)



Lecture : le volume total des glaciers suisses est passé entre les deux dates de 75,1 kilomètres cubes (km³) à 47,6 km³ de glace, soit une diminution de plus de 36 %.

Source : données SCNAT (Académie suisse des sciences naturelles) réseau.

AU-DELÀ DES ALPES, LE RECUL DES GLACIERS SE CONFIRME DANS LE MONDE

La combinaison de différentes techniques — données de terrain, photogrammétrie, imagerie satellitaire — a permis de reconstruire l'évolution des bilans de masse de 25 000 glaciers répartis dans 17 régions de monde au cours des six dernières décennies¹. Ces bilans deviennent en majorité déficitaires à partir des années 1990, mais ils montrent une grande disparité. Les glaciers des Alpes subissent des pertes très importantes eu égard à leur taille et à leur volume en général réduits, avec un prélèvement moyen de 20 mètres d'épaisseur d'équivalent-eau sur toute leur surface. C'est moins toutefois que les glaciers de

Patagonie ou d'Alaska aux tailles et aux volumes beaucoup plus conséquents qui, eux, abandonnent 30 à 40 mètres d'équivalent-eau.

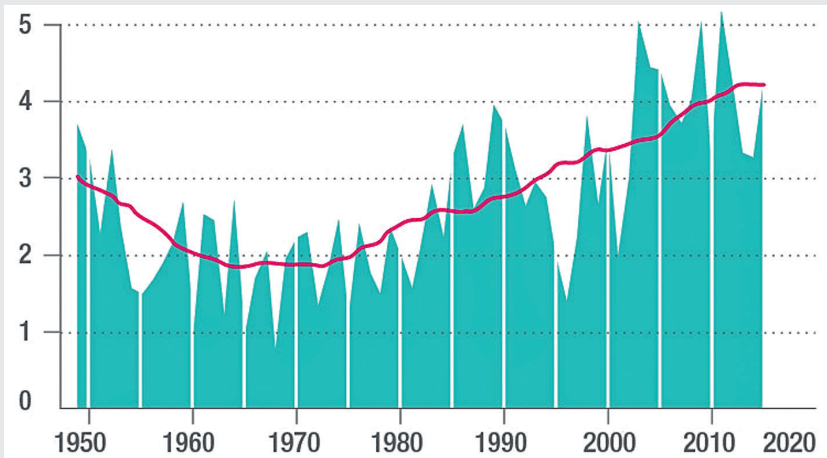
D'ici 2100, selon une étude récente de David Rounce *et alii*², les glaciers et petites calottes devraient avoir perdu 26 % de leur masse de 2015 avec un réchauffement global de 1,5 °C, tandis qu'avec un réchauffement de 4 °C la perte s'élèverait à 41 %. Dans le premier cas, ce serait la moitié des glaciers dans le monde qui aurait disparu, dans le second cas la quasi-totalité (les quatre cinquièmes). ■

B.F.

1. ZEMP Michael *et alii*, « Global Glacier Mass Changes and their Contributions to Sea-level Rise from 1961 to 2016 », *Nature*, vol. 568, 2019, p. 382-386.

2. ROUNCE David R. *et alii*, « Global Glacier Change in the 21st Century: Every Increase in Temperature Matters », *Science*, vol. 379, n° 6627, 5 janvier 2023, p. 78-83.

Graphique 3. Valeurs de fonte mesurées sur le glacier de Sarnennes vers 2 950 mètres en versant sud (en mètres d'eau par an)



Source : THIBERT Emmanuel et alii, « Causes of Glacier Melt Extremes in the Alps Since 1949 », *Geophysical Research Letters*, vol. 45, n° 2, 28 janvier 2018. URL : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2017GL076333>. Consulté le 15 janvier 2024.

tion du printemps et de l'automne : il y a donc une combinaison entre des printemps où le déneigement à basse altitude (moins de 2 500 mètres) intervient de façon plus précoce (en juin), des étés de plus en plus chauds au cours desquels l'isotherme 0 °C grimpe à plus de 5 000 mètres d'altitude, et d'automnes où les conditions d'ablation estivales se prolongent au-delà du 15 septembre, parfois même jusqu'au 15 octobre comme en 2023.

L'accumulation hivernale reste très inégale d'une année sur l'autre, mais elle ne traduit pas de tendance positive / négative à long terme des précipitations. Elle joue comme une variable d'ajustement des bilans de masse, soit en accentuant les déficits annuels, soit en les atténuant. Avec de telles pertes, les glaciers de petite taille situés à moins de 3 400 mètres disparaissent peu à peu. Ainsi, le glacier de Sarnennes s'est éteint en 2023, ce qui a eu pour effet d'interrompre des mesures qui avaient débuté en 1949 et comptaient, à l'échelle mondiale, parmi les plus anciennes pratiquées annuellement sur un glacier.

Les glaciers vont-ils survivre jusqu'à la fin du siècle ?

La vitesse à laquelle s'opère le recul des glaciers dans les Alpes conduit à s'interroger sur leur disparition possible à l'horizon de cette fin de siècle. Les scénarios conçus par le GIEC ont été mis

à contribution pour tracer l'avenir des glaciers. Les glaciologues utilisent plusieurs de ces scénarios, sachant qu'ils ne diffèrent les uns des autres qu'à partir de 2050. Le scénario RCP (*Representative Concentration Pathway*) 4.5 est souvent privilégié par son réalisme : baisse des émissions seulement à partir de 2050, pas de neutralité carbone complète en 2100. Pour appliquer cette trajectoire aux glaciers, il faut faire appel à des modèles de climat régionaux découlant, par descente d'échelle, des modèles globaux (3 °C de hausse de température globale dans le scénario RCP4.5) et les ajuster à tel ou tel massif. On doit aussi simuler la réponse des glaciers à l'évolution de la température sur toutes les tranches d'altitude concernées et connaître, par sondages géophysiques, leur épaisseur depuis leur zone d'accumulation en amont jusqu'à leur langue terminale. Voici les résultats de ces simulations :

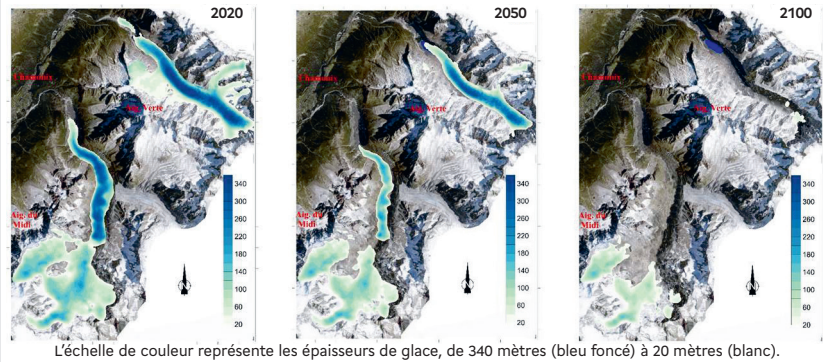
- Les « petits glaciers » (moins de 3 kilomètres carrés [km²]), comme celui de Saint-Sorlin dans le massif des Grandes Rousses, qui ne dépasse pas 3 400 mètres et s'étend sur environ 500 mètres de dénivelé, sont appelés à disparaître vers 2050, soit d'ici environ 25 ans. Ces glaciers à l'échelle alpine sont les plus nombreux et constituent environ les trois quarts des glaciers encore existants ⁵.
- Les « grands glaciers » (plus de 5-10 km²), dont les têtes de bassin dépassent les 3 800-4 000 mètres et qui s'étendent sur plus d'un millier de mètres de dénivelé, ont une durée de vie qui pourrait atteindre l'horizon 2080, voire dépasser de peu 2100, mais au prix d'une perte de masse de 70 % à 90 %. Entrent dans cette catégorie les deux plus grands glaciers français, Argentière (14 km²), qui devrait avoir disparu complètement peu avant 2100, et la mer de Glace (35 km²) ⁶ (graphique 4). Le plus grand glacier des Alpes, celui d'Aletsch (120 km²) en Suisse pourrait demeurer jusqu'à la fin du siècle, mais au prix d'une perte de masse de 70 % à 80 % en 2100 ⁷.
- Ces modèles apportent une autre information : si l'on stabilise les températures à leur niveau actuel au cours des prochaines décennies, les grands glaciers perdent, d'ici 2100, 40 % à 50 % de leur

5. VINCENT Christian *et alii*, « Disparition anticipée du glacier de Saint-Sorlin vers 2050 », *La Météorologie*, n° 121, mai 2023. URL : https://lameteorologie.fr/admin/api/public/api/meteo/website/downloadArticlePDF/meteo_2023_121_39/false. Consulté le 15 janvier 2024.

6. VINCENT Christian *et alii*, « Déclin des deux plus grands glaciers des Alpes françaises au cours du XXI^e siècle : Argentière et mer de Glace », *La Météorologie*, n° 106, août 2019. URL : https://lameteorologie.fr/admin/api/public/api/meteo/website/downloadArticlePDF/meteo_2019_106_49/false. Consulté le 15 janvier 2024.

7. JOUVET Guillaume *et alii*, « Modelling the Retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a Changing Climate », *Journal of Glaciology*, vol. 57, n° 206, 2011, p. 1033-1045. URL : <https://doi.org/10.3189/002214311798843359>. Consulté le 15 janvier 2024.

Graphique 4. Simulation du glacier d'Argentière et de la mer de Glace dans le massif du Mont-Blanc en 2020, 2050 et 2100 (scénario RCP4.5)



Source : VINCENT Christian et alii, « Déclin des deux plus grands glaciers [...] », *op. cit.*, 2019.

masse, ce qui montre qu'ils sont en total déséquilibre avec le climat de ces dernières décennies. Ils n'ont pas d'autre choix que de se réduire pour tendre vers une taille conforme à ce qu'imposent les conditions climatiques de ces dernières années, ce qui rend toute ré avancée improbable.

Les glaciers en fort recul sont plus dangereux...

Quand ils sont dans un tel état de déséquilibre, les glaciers sont connus pour engendrer des risques de toutes sortes : écroulements de pans entiers de glaciers sous l'effet d'une augmentation des écoulements d'eaux sous-glaciaires, ce qui s'est produit début juillet 2022 avec l'effondrement partiel du glacier de la Marmolada dans les Dolomites ; formation de lacs en avant du glacier par suite du recul de la langue, ou en surface sur des parties abandonnées par la glace, comme récemment sur le glacier de Rochemelon en Haute-Maurienne, ou celui d'Arsine dans le massif des Écrins, lacs qu'il a fallu vidanger artificiellement pour prévenir le danger de débordement accidentel ; risques d'emballement de la vitesse d'écoulement de la glace (« surges ») pouvant conduire à des effondrements de pans entiers de langues glaciaires, comme cela s'est produit sur deux glaciers du Tibet en juillet puis en septembre 2016, avec près de 150 millions de mètres cubes de glace déplacés sur plusieurs kilomètres. À ces risques, il faut ajouter celui que la fonte des glaces collées aux hautes parois rocheuses depuis des millénaires fait peser sur le pergélisol et la possibilité que des secteurs entiers cimentés par de la glace s'effondrent en masse, comme cela s'est produit à de

nombreuses reprises dans le massif du Mont-Blanc et ailleurs dans les Alpes — par exemple, au Piz Cengalo (Grisons, Suisse) en 2011 et 2017, et au Fluchthorn (Tyrol, Autriche) en 2023. Les alpinistes qui fréquentent la haute montagne repèrent bien ces phénomènes qui contribuent à modifier profondément leur pratique ⁸.

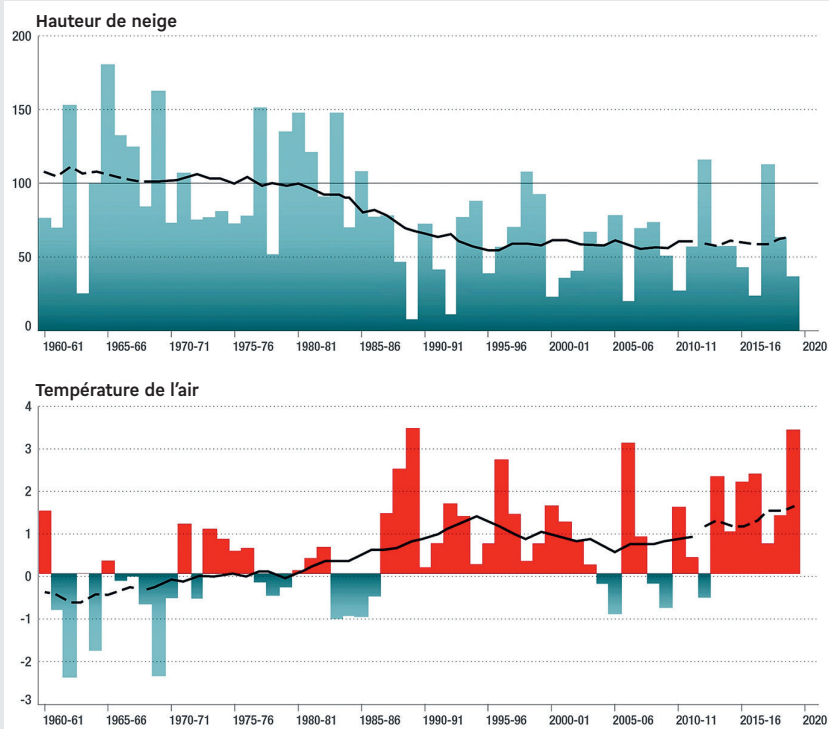
Un enneigement en déclin depuis les années 1980...

À l'échelle des surfaces continentales de l'hémisphère Nord soumises à un enneigement saisonnier, on observe, à partir du milieu des années 1980, un net déclin du manteau neigeux sur les mois d'avril et juin. En montagne, cette baisse est surtout perceptible à moins de 2 000 mètres. Ainsi, dans les Préalpes de Chartreuse, la station du col de Porte à 1 325 mètres a perdu, depuis les années 1960, près de la moitié de l'épaisseur de son manteau neigeux entre décembre et fin avril, passant de près d'un mètre en moyenne dans les années 1960-1980 à une soixantaine de centimètres dans les années 1990-2020. La baisse est maximale en mars-avril, avec un taux de diminution de la couche proche de 20 centimètres par décennie. Les précipitations sur cette période de l'année n'ont ni augmenté ni diminué, mais les températures ont connu une hausse sensible, prenant près de 2 °C durant cette période de l'année (graphique 5, page suivante). En conséquence, avec un gradient moyen de baisse des températures de 1 °C par 150 mètres, on constate que les conditions d'enneigement moyennes des années 1960 sont à rechercher de nos jours environ 300 mètres plus haut en altitude.

L'origine du déclin de la neige à basse altitude est donc directement liée au réchauffement. Se combinent deux phénomènes : une élévation de la limite pluie-neige le long des massifs pendant l'hiver, qui fait se multiplier les épisodes pluvieux à basse altitude et empêche le manteau de se constituer de manière permanente, et des épisodes de fonte de plus en plus nombreux sur un manteau qui se trouve le plus souvent à température de fusion. En revanche, à plus haute altitude, au-dessus de 2 500 mètres, deux avantages persistent : les précipitations continuent à tomber majoritairement sous forme solide et le manteau une fois constitué reste suffisamment froid pour résister aux épisodes de redoux jusqu'à la fin de l'hiver.

8. MOUREY Jacques *et alii*, « Effects of Climate Change on High Alpine Mountain Environments: Evolution of Mountaineering Routes in the Mont Blanc Massif (Western Alps) over Half a Century », *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, vol. 51, n° 1, 2019. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15230430.2019.1612216>. Consulté le 15 janvier 2024.

Graphique 5. **Évolution des hauteurs de neige (en cm) et des températures (en °C) moyennes du 1^{er} décembre au 30 avril au col de Porte en Chartreuse, à 1 325 mètres, entre 1960 et 2020**



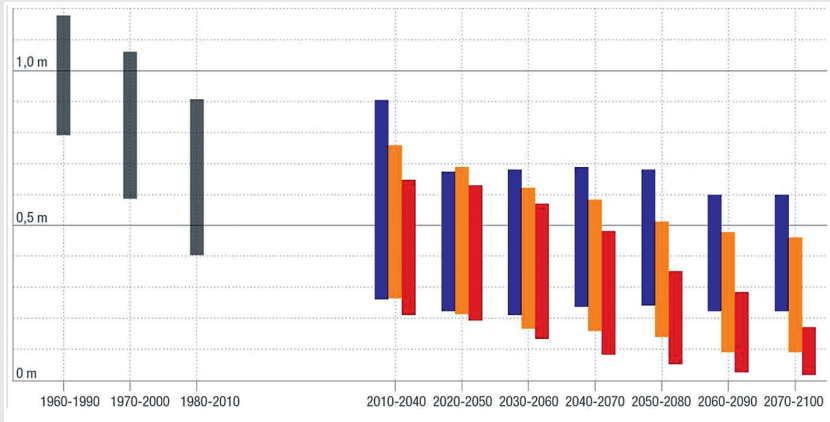
N.B. : valeurs annuelles et valeurs glissantes sur 15 ans.

Source : Météo France.

Un manteau neigeux de plus en plus malmené par la hausse de la température dans le futur...

Plusieurs équipes dans les Alpes ont tenté de simuler l'avenir de l'enneigement selon les divers scénarios d'émissions du GIEC. Certaines simulations découlent de l'emboîtement de plusieurs modèles, des modèles climatiques régionaux combinés à d'autres modèles décrivant finement la physique du manteau. D'autres s'attachent à décrire la sensibilité du manteau neigeux aux conditions climatiques de ces dernières décennies, sans entrer dans l'analyse fine des processus. Toutes concordent pour souligner la fragilité grandissante de l'enneigement à basse altitude. Au col de Porte, ces simulations prévoient une diminution de 30 % à 40 % de la hauteur de neige d'ici 2040, suivie d'une stabilisation dans le scénario à émissions contrôlées RCP2.6 ou d'une disparition quasi

Graphique 6. Hauteurs de neige historiques (en gris) et prévisions d'enneigement d'ici 2100 vers 1 500 mètres en Chartreuse selon trois scénarios du GIEC* (en mètres)



*RCP2.6 (bleu), RCP4.5 (orange) et RCP8.5 (rouge), avec incertitudes et fluctuations de hauteurs de neige selon les années (longueur des barres).

Sources : CEN (Centre d'études de la neige), Météo France, CNRS (Centre national de la recherche scientifique).

complète du manteau vers la fin du siècle dans le scénario à fortes émissions RCP8.5 (graphique 6).

Une telle érosion du manteau neigeux affecte déjà et va affecter de plus en plus une activité comme le ski en station⁹. Dans un premier temps, ce sont les stations dont le domaine se situe en dessous de 2 000 mètres d'altitude qui seront les plus touchées (encadré ci-après). Certaines dans les Préalpes tentent de s'adapter à ces nouvelles conditions, soit en fermant les parties les plus vulnérables de leur domaine de ski, soit en diversifiant leurs activités en dehors du ski. D'autres enfin font le choix risqué d'investir pour augmenter les parties de leur domaine couvertes de neige de culture.

L'impact du recul des glaciers et du déclin du manteau neigeux sur l'hydrologie

De nombreux fleuves et rivières ont une part importante (40 % à 50 %) de leur débit annuel issue de la fonte des neiges et des glaciers, comme l'Amou-Daria et le Syr-Daria en Asie centrale, ou l'Indus en Himalaya, ou encore le Colorado et le Fraser en Amérique du Nord. Dans d'autres bassins, la part glacio-nivale est plus faible (moins de 20 %), comme en Europe le Pô, le Rhin ou le Rhône.

9. FRANCOU Bernard et MÉLIÈRES Marie-Antoinette, *op. cit.*

CONSÉQUENCES DU DÉCLIN DE L'ENNEIGEMENT SUR LE SKI EN STATION

L'enjeu est de taille car l'économie du ski représente en Europe un marché de près de 30 milliards d'euros. Ce continent concentre un peu plus de 50 % des stations de ski dans le monde et 60 % des journées-skieurs vendues, dont 43 % dans les Alpes. C'est l'activité touristique à ce jour la plus rentable en montagne et c'est en partie grâce à elle que les régions de montagne ont pu inverser, dans les années 1960, leur tendance séculaire à perdre de leurs habitants. Un tel enjeu explique le nombre d'études scientifiques dédiées à l'avenir du ski en station.

Une des dernières en date offre une perspective sur le futur de cette activité à l'échelle européenne¹. Le risque concernant cette activité y est défini en se référant aux 20 % des années où les conditions d'enneigement ont été les plus mauvaises au cours de la période de référence 1961-1990. Partant des divers scénarios de réchauffement définis par le GIEC, conduisant à des températures globales de 2 °C à 4 °C supérieures à celles de la période préindustrielle, l'étude montre comment les stations vont supporter les changements, selon les tranches d'altitude où s'étend le gros de leur domaine skiable, et la possibilité ou non de pallier un enneigement déficitaire par la capacité à faire de la neige de culture sur au moins 50 % du domaine skiable.

Il ressort qu'avec un réchauffement global de 2 °C, 53 % des

stations disposant du seul enneigement naturel s'exposent à un risque important, un pourcentage qui monte à 98 % avec + 4 °C. En revanche, l'apport de la neige de culture réduit le nombre de stations à risque à 27 % avec + 2 °C, mais le risque reste haut avec + 4 °C (71 %). Les stations les plus à risque se situent dans la tranche d'altitude 1 000-2 000 mètres, où même l'apport des canons à neige risque d'être rapidement insuffisant. C'est le cas des stations situées dans les Préalpes ou dans le Jura : ainsi Métabief (900-1 500 mètres) se trouve déjà en dessous du seuil de « skiabilité » pour un tiers des années, même avec l'apport de la neige de culture ; une proportion qui monte à 50 % en 2040 tous scénarios climatiques confondus. Dans les stations de basse altitude, il est donc urgent de mettre en place des alternatives au ski de piste, voire au ski de fond. Dans les autres, situées en grande partie au-dessus de 2 000 mètres, la skiabilité n'est pas menacée à l'horizon 2050, mais s'y poseront de plus en plus les questions de la disponibilité de l'eau et de la consommation d'énergie pour pallier la raréfaction de l'enneigement naturel par de la neige de culture. Quant aux efforts à faire pour maîtriser leur bilan carbone, les stations devront les faire porter d'abord sur les transports (accès aux stations) et le logement, ces deux secteurs étant responsables à eux seuls de 50 % à 80 % de leurs émissions. ■

B.F.

1. FRANÇOIS Hugues *et alii*, « Climate Change Exacerbates Snow-water-energy Challenges for European Ski Tourism », *Nature Climate Change*, vol. 13, 2023, p. 935-942.

La fonte des glaciers est importante car elle intervient en été pour soutenir les basses eaux et réduire les périodes d'étiage dès lors que les précipitations diminuent. La question qui se pose est de savoir ce qui va advenir de ces apports nivaux et glaciaires dans un contexte climatique où ces réserves d'eau permanentes ou saisonnières vont diminuer.

Des études sur l'impact de la diminution des masses glaciaires sur les régimes des cours d'eau se sont multipliées ces dernières années, car les enjeux sont importants, touchant aux secteurs énergétique (hydroélectricité, refroidissement des centrales nucléaires), agricole (irrigation), industriel, domestique (eau potable) et récréatif (sports de rivière).

Par exemple, dans la haute vallée du Rhône, en amont du lac Léman où les sous-bassins présentent des stocks de glace très variables, il s'est déjà produit une augmentation des débits dans les bassins les plus englacés, mais cette augmentation va atteindre un pic au-delà duquel les débits vont commencer à diminuer dès lors que les stocks de glace auront été suffisamment réduits¹⁰. Ce point de bascule aura lieu dans tout le bassin avant 2050. Il s'en suivra un régime davantage contrôlé par la fonte des neiges et les pluies d'hiver : de « glacio-nival », avec un pic des débits se produisant entre mai et août (la crue nivale suivie de la crue glaciaire), le régime deviendra « pluvio-nival », c'est-à-dire plus conforme à la distribution saisonnière des précipitations, mais avec encore une crue nivale au printemps. Un tel point de bascule où les débits glaciaires sont devenus résiduels s'est déjà produit dans de nombreux bassins alpins, comme par exemple celui de la Durance en amont d'Embrun.

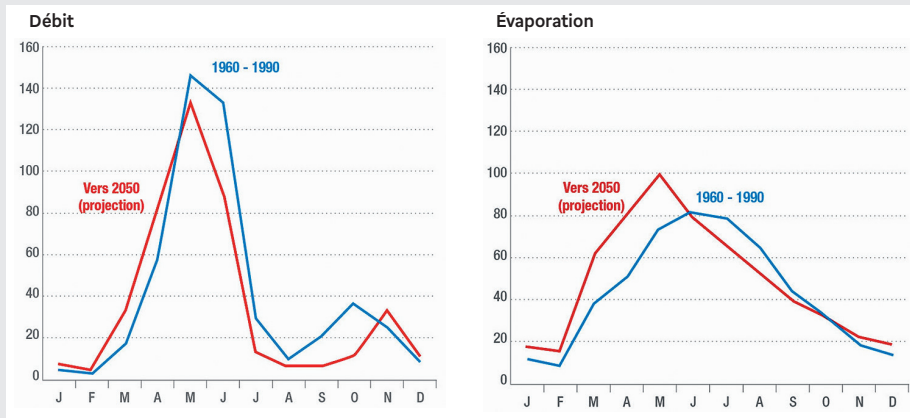
Le cas de la Durance

La Durance joue un rôle important pour répondre aux besoins en eau de la Provence, grâce notamment aux barrages de Serre-Ponçon et du Verdon. Elle subvient à près de 75 % des besoins agricoles, industriels et domestiques de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, avec en sus, une part de 10 % dans la production hydroélectrique nationale.

En zoomant sur les débits de la rivière à Briançon (1 300 mètres) alors qu'elle est encore proche des têtes de bassin (dont certaines

10. FARINOTTI Daniel *et alii*, « Runoff Evolution in the Swiss Alps: Projections for Selected High-alpine Catchments Based on ENSEMBLES Scenarios », *Hydrological Processes*, vol. 26, n° 13, 30 juin 2012, p. 1909-1924 ; et HUSS Matthias et HOCK Regine, « Global-scale Hydrological Response to Future Glacier Mass Loss », *Nature Climate Change*, vol. 8, 2018, p. 135-140.

Graphique 7. Débit mensuel de la Durance à Embrun (en mètres cubes par seconde) et évaporation mensuelle sur le bassin de la Durance à Embrun (en millimètres)



Légende : en bleu, période de mesures (1960-1990) ; en rouge, projections pour 2050 à l'aide de modèles.

Source : AUBÉ Damien, *Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse. Bilan actualisé des connaissances*, Lyon : Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse (coll. Eau & connaissance), 2017. URL : https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2018-02/bilan_connaissances_chgtclim_2016.pdf. Consulté le 15 janvier 2024.

comportent quelques volumes glaciaires résiduels), on voit déjà apparaître une différence entre les débits moyens des années 1960-1990 et ceux des années récentes 1990-2020. Entre les deux périodes, se sont produits une avancée du pic de fonte nivale vers le début du printemps (avril) et son amortissement en raison d'un stockage neigeux moins abondant, ainsi qu'une baisse sensible des débits estivaux jusqu'au début septembre. La même évolution est visible sur la Romanche à Mizöen, quand elle est encore proche de sa zone de contribution glaciaire. Cette évolution traduit une fonte des neiges de nos jours davantage centrée sur avril que sur mai-juin. La baisse des débits estivaux s'explique à la fois par la réduction des stocks de glace disponibles et par l'augmentation de l'évapotranspiration.

Les projections faites sur la base d'une comparaison de modèles climatiques et hydrologiques pour ce haut bassin des Alpes du Sud au niveau d'Embrun (à 50-80 kilomètres des têtes de bassin) laissent prévoir, entre la période de référence 1960-1990 et 2050, une diminution du pic des débits au printemps avec une baisse de la contribution de la fonte des neiges et son déplacement de mai-juin vers mars-avril. L'étiage estival deviendra plus creux en raison de la disparition de la majorité des glaciers du bassin et de l'assèchement des sols au printemps après la disparition du manteau

neigeux (graphique 7, gauche). Car c'est au printemps que l'évapotranspiration va le plus augmenter en raison du départ anticipé du manteau neigeux (graphique 7, droite). À noter que les débits du début de l'automne se creusent aussi, comme conséquence de l'extension des conditions estivales en cette période de l'année.

Qu'observe-t-on à l'échelle d'un grand fleuve comme le Rhône ?

Avec ses 810 km de long, une superficie drainée de 98 400 km² et un débit moyen de 1 700 m³ par seconde à l'embouchure, le Rhône est le plus puissant des fleuves français. Il prend sa source dans les Alpes suisses où son haut bassin atteint 6 700 km² avant de se jeter dans le lac Léman, la plus grande masse d'eau douce d'Europe avec un volume de 89 km³ et une surface de 582 km². Il reçoit ensuite sur sa rive gauche des affluents alpins fortement influencés par l'hydrologie de montagne comme l'Arve, l'Isère et la Durance. L'irrigation est à l'origine de près de 48 % des prélèvements nets annuels sur la partie française du fleuve et l'eau du bassin permet une production hydroélectrique d'environ 41 térawattheures par an, soit 60 % de la production hydroélectrique française. La température moyenne annuelle de l'air à échelle du bassin a augmenté sur la période 1960-2020 de 1,8 °C (+ 0,3 °C par décennie) et l'été est la période de l'année où cette augmentation a été la plus forte (+ 2,7 °C sur la période 1960-2020). En conséquence, l'évapotranspiration potentielle (ETP) a augmenté de 23 % sur la période 1960-2020 ¹¹.

La baisse des précipitations solides sur le Rhône

Les précipitations totales (solides + liquides) ne montrent pas d'évolution significative au niveau des totaux annuels et saisonniers sur tous les secteurs, mais la forme des précipitations a changé depuis le début des années 1960, avec une baisse de la part solide au profit de la part liquide. En conséquence, en hiver, le stockage par la neige se réduit et les précipitations pluvieuses sont plus abondantes, ce qui fait augmenter les écoulements en cette saison, et avec eux les risques de crue. Les crues de novembre-décembre 2023 dans les Alpes préfigurent sans doute ce qui risque de se produire avec une plus grande fréquence dans l'avenir.

11. BRL INGÉNIERIE, *Étude de l'hydrologie du fleuve Rhône sous changement climatique. Mission 1 : diagnostic actualisé de la situation hydrologique du fleuve. Synthèse*, Nîmes / Lyon : BRL Ingénierie / Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, 2023. URL : https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2023-03/a00820_mission1_synthese_vf.pdf. Consulté le 11 janvier 2024.

Une baisse importante des précipitations neigeuses dans le futur, selon les projections

Ces projections sur le bassin du Rhône sont issues de comparaisons de modèles couplés (CMIP5 / *Coupled Model Intercomparison Project 5th phase*) régionalisés pour divers scénarios climatiques, parmi lesquels a été choisi le plus probable, le RCP4.5, qui table sur la baisse des émissions à partir de 2050¹². Entre 2005 et 2040, les résultats varient peu entre les scénarios car les températures dépendent des émissions de gaz à effet de serre déjà réalisées. On voit une augmentation de 1,8 °C par rapport à la période de référence 1976-2005, avec un réchauffement plus fort pendant les mois d'été. C'est dans la partie alpine que l'augmentation des températures tend à être la plus importante par rapport au reste du bassin. Cette différence est suffisante pour avoir un impact sur le cycle hydrologique où le régime est à dominance nivale, avec comme conséquence une remontée de la limite pluie-neige et une avancée du début et de la fin de la fonte du manteau neigeux en zone montagneuse. À un horizon à moyen terme (2041-2070), les projections tablent sur une baisse importante des précipitations solides annuelles, variant de - 16 % à - 29 % dans ce scénario RCP4.5, et de - 21 % à - 40 % dans le scénario à fortes émissions (RCP8.5).

Le déclin des glaciers sur l'ensemble des Alpes françaises

À cette échelle, la réduction du stock glaciaire n'a plus pour effet d'augmenter de façon transitoire les débits des cours d'eau, ce qui laisse penser que la période de contribution maximale de la fonte des glaciers au débit est déjà passée. Concernant les Alpes françaises, les travaux récents de Jordi Bolibar *et alii*¹³, sur la période 1967-2015, portant sur 661 glaciers, donnent une perte moyenne de 0,69 (± 0,21) mètre d'équivalent-eau par an, soit une réduction d'épaisseur moyenne des glaciers de 33 mètres. Ces pertes s'accroissent fortement depuis 2003, comme cela a déjà été signalé plus haut sur un échantillon plus réduit de glaciers.

Des simulations faites à l'échelle de l'ensemble des Alpes montrent que d'ici la fin du siècle, 63 %, 80 % et 94 % des glaciers devraient

12. *Ibidem*.

13. BOLIBAR Jordi *et alii*, « Deep Learning Applied to Glacier Evolution Modelling », *The Cryosphere*, vol. 14, n° 2, 2020, p. 565-584. URL : <https://tc.copernicus.org/articles/14/565/2020/>. Consulté le 15 janvier 2024.

disparaître en fonction, respectivement, des scénarios RCP2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5 ¹⁴.

L'évolution des débits constatée ces dernières décennies va s'accroître dans le futur...

À l'échelle des affluents majeurs du Rhône, il existe une même tendance à la baisse des débits estivaux atteignant, entre les années 1960-1990 et 1990-2020, 18 % pour l'Isère et 23 % pour la Durance aux confluences. Cette baisse des débits estivaux se répercute sur ceux du Rhône qui diminuent de 7 % à Lagnieu (peu avant la confluence de l'Ain) et de 14 % à Valence. Sur la même période, les débits d'hiver quant à eux augmentent de façon significative, prenant + 7 % à Lagnieu. Va-t-on à l'avenir vers des débits plus contrastés entre l'hiver et l'été pour ce fleuve ?

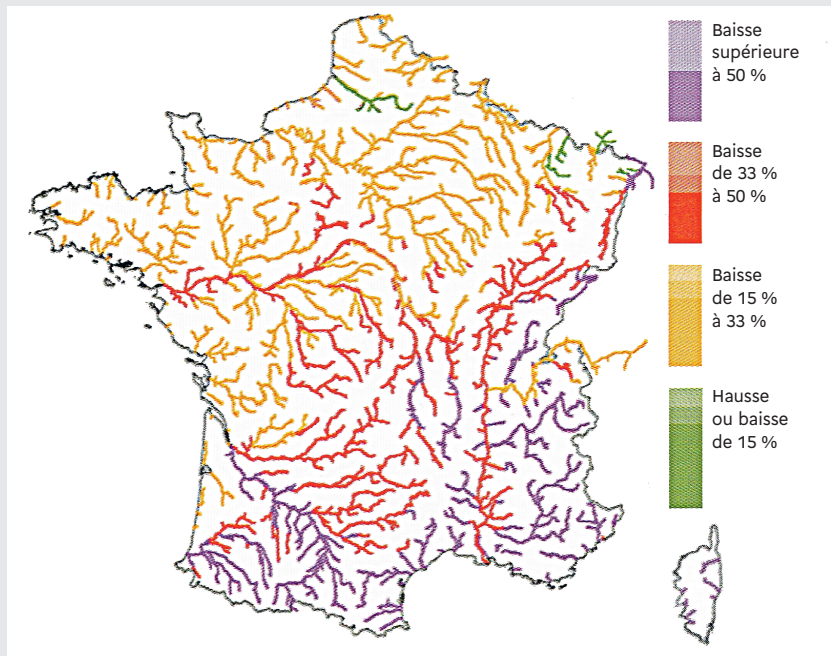
À l'horizon 2055, les modèles tablent sur une accentuation des contrastes saisonniers sous l'influence des parties alpines du bassin, avec une avancée du pic de fonte des neiges vers le début du printemps, le creusement des étiages en été et la hausse des débits en hiver. En été, la contribution des secteurs alpins du bassin (haut Rhône français en amont de Pougny, Isère, Durance en amont de Cadarache) au débit du Rhône à Beaucaire — qui représentait encore récemment près de 70 % des débits de juillet-août — pourrait baisser vers 2055 autour de 65 %, ce qui n'est pas négligeable compte tenu des besoins en eau croissants en cette période estivale.

Les montagnes vont-elles rester des châteaux d'eau ?

La perte des glaciers et le caractère de plus en plus éphémère de l'enneigement hivernal au cours de la seconde partie du XXI^e siècle conduisent à s'interroger sur ce que deviendra la fonction naturelle (hors barrages) de stockage de l'eau des régions de montagne. Les modèles prévoient que le régime des rivières de montagne sera de plus en plus calqué sur la distribution des précipitations au cours de l'année, du fait du déclin du stockage des glaciers et de la couverture nivale. Pour simuler le climat du futur, on sait que la variable « précipitations » est plus difficile à modéliser que la variable « températures ». Cependant, la majorité des travaux traitant de cette question montre une tendance à des bilans hydriques de plus en plus déficitaires en été dans la partie sud de la France, en

14. ZEKOLLARI Harry, HUSS Matthias et FARINOTTI Daniel, « Modelling the Future Evolution of Glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM Ensemble », *The Cryosphere*, vol. 13, n° 4, 2019, p. 1125-1146. URL : <https://tc.copernicus.org/articles/13/1125/2019/>. Consulté le 15 janvier 2024.

Carte 1. Évolution du débit estival en 2070 selon une projection climatique de + 3,5 °C en hiver et + 6,5 °C en été



Source : DAYON Gildas, *op. cit.*

raison d'une baisse des pluies en été, déjà sensible depuis plusieurs décennies sur le pourtour méditerranéen, et d'une montée de l'évapotranspiration qui est la conséquence directe de la hausse des températures.

La carte issue du travail de Gildas Dayon ¹⁵ donne une projection des débits estivaux des cours d'eau à l'échelle du territoire en 2070, avec un climat dont la température aurait augmenté de 3,5 °C en hiver et de 6,5 °C en été d'ici la fin du siècle (carte 1). Sous de telles conditions, les régions montagneuses de la moitié sud de la France verraient les débits estivaux de leurs cours d'eau baisser dans des proportions qui pourraient être supérieures à 50 %. Sans verser dans l'alarmisme, cela doit conduire vers une gestion plus raisonnée de la ressource en eau, notamment celle qui vient des montagnes, car avec le changement climatique en cours, cette ressource ne peut plus être considérée comme inépuisable. ■

15. DAYON Gildas, *Évolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies*, thèse / université Paul Sabatier, Toulouse III, CERFACS (Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique), 2015. URL : <https://theses.hal.science/tel-01380675>. Consulté le 15 janvier 2024.