ADAPT MONT-BLANC – WP 3

Changements climatiques dans le massif du Mont-Blanc et impacts sur les activités humaines

Rapport I

Scénarios d'évolutions climatiques

Novembre 2018

Table des matières

À propos **4**

Résumé **5**

1. Contexte et objectifs **6**

Contexte global du changement climatique 6

Contexte du changement climatique dans l'Espace Mont-Blanc (EMB) 7

Des paramètres climatiques aux évolutions de l'environnement naturel et aux secteurs d'activité humaine 7

Objectifs du rapport I – Scénarios climatiques 9

2. Changements climatiques récents observés dans les Alpes et le massif du Mont-Blanc depuis 1900 ..... **10**

Températures 10

Précipitations 12

Évènements extrêmes 12

Jours de gel et gelées tardives *13*

Canicules et sécheresses *14*

3. Projections climatiques dans l'EMB pour les futures décennies **15**

Températures 15

Températures moyennes annuelles *15*

Variations saisonnières *16*

Précipitations 19

Précipitations moyennes annuelles *19*

Variations saisonnières *19*

Evènements extrêmes à l'horizon 2100 21

Jours de gel et de glace *21*

Canicules et sécheresses *23*

Précipitations fortes et inondations *24*

4. Évolution des milieux naturels physiques 25

Réduction de l'enneigement 25

Retrait glaciaire 27

Dégradation du permafrost 28

Modification du régime hydrique 30

Remontée en altitude de la faune et la flore 32

Avancée du printemps 32

Pullulation et disparition d'espèces 34

Annexe 1 : Choix et traitement des données climatiques utilisées 36

Annexe 2 : Liste des indices climatiques à suivre 41

Annexe 3 : Bibliographie 43

Annexe 4 : Définitions et acronymes 45

A propos

Auteurs principaux

Brad Carlson[1*], Gianluca Filippa[2], Irene Alvarez[1], Paolo Pogliotti[2], Anne Delestrade[1], Edoardo Cremonese[2*]

[1] Centre de Recherches sur les Ecosystèmes d'Altitude (CREA Mont-Blanc), Observatoire du Mont-Blanc, 67 lacets du Belvédère, Chamonix-Mont-Blanc 74400, France

www.creamonblanc.org

* bcarlson@creamontblanc.org

[2] Agence Régionale pour la Protection de l'Environnement en Vallée d'Aoste (ARPA), Unité Changement Climatique, 44 Grande Charrière, Saint-Christophe 11020, Italie

www.arpa.vda.it

* e.cremonese@arpa.vda.it

Auteurs contributeurs

Ludovic Ravanel[3], Blanche Mathey[4]

[3] Univ. Grenoble Alpes, USMB, CNRS, EDYTEM, 73000 Chambéry, France

[4] Fondation pour le Développement Durable des Régions de Montagne (FDDM), Pré d'Amédée 17, Sion 1950, Suisse

Pour citer ce rapport

AdaptMB 2019 (2019). *Changements climatiques dans le massif du Mont-Blanc et impacts sur les activités humaines. Rapport I : Evolutions des scénarios climatiques.* Rédigé par le CREA Mont-Blanc et l'ARPA Vallée d'Aoste dans le cadre du projet AdaPT Mont-Blanc financé par le Programme européen de coopération territoriale Alcotra Italie-France 2014-2020, janvier, 2019, 46 p.

Version

Version du 30 janvier 2019, d'après les données CH2011.

Résumé

Changements observés

Dans l'Espace Mont-Blanc, les températures annuelles moyennes ont augmenté de +2 °C depuis la fin du 19ème siècle. La hausse des températures a eu lieu surtout au printemps et en été, et l'augmentation est particulièrement marquée depuis la fin des années 1980. Aucune tendance significative n'a été observée dans le cumul des précipitations annuelles au cours du 20ème siècle, hormis une légère augmentation des précipitations en hiver dans les Alpes du nord. La fréquence des journées caniculaires a augmenté de manière significative depuis la fin du 19ème siècle, avec une hausse en intensité très marquée depuis le début des années 2000. Le risque des gelées tardives au printemps a également augmenté de l'ordre de 30 % depuis les années 1970.

Changements attendus d'ici 2050

Les tendances observées devraient s'accentuer. L'augmentation des températures annuelles se poursuit avec un réchauffement attendu d'entre +1 à +3 °C d'ici le milieu du 21ème siècle, encore plus prononcé en été. Concernant les précipitations annuelles, l'incertitude des modèles reste forte. Néanmoins, les précipitations estivales devraient diminuer de -10 à -20% d'ici 2050. La conjonction de températures plus élevées et de précipitations réduites pendant la période estivale entrainera des canicules* plus fréquentes et intenses ainsi qu'un risque de sécheresse plus important. La fréquence des évènements de fortes précipitations (pluies torrentielles, tempêtes de neige) devrait également s'accroitre. Enfin, il est probable qu'à 2500 m d'altitude, on passe de quatre mois dans l'année avec des températures inférieures à 0° C à seulement trois, voire deux dans un scénario pessimiste.

Impacts sur les milieux naturels

Les changements climatiques attendus au niveau des températures, des précipitations et des évènements extrêmes vont fortement modifier les milieux naturels de l'Espace Mont-Blanc à l'horizon 2050. L'enneigement dans les fonds de vallées et sur les versants sud jusqu'à 2000 m risque d'être réduit d'entre 4 à 5 semaines, et de 2 à 3 semaines à 2500 m d'altitude. Le recul des glaciers continuera à s'accélérer pendant les prochaines décennies : les glaciologues annoncent la disparition de 90% des glaciers suisses d'ici la fin du 21ème siècle. Le réchauffement en cours continuera à dégrader le permafrost dans le massif du Mont-Blanc, ce qui se traduira par une déstabilisation accrue des parois de haute montagne. En été et à l'automne, on peut s'attendre à un assèchement des sols y compris en moyenne montagne à cause du déficit hydrique. Le débit des cours d'eau risque d'être plus fort en hiver en lien avec une augmentation des précipitations sous forme de pluie, et au contraire plus faible en été à cause de précipitations réduites.

Côté vivant, la faune et la flore monteront de plus en plus haut en altitude pour retrouver des conditions climatiques favorables. Croisé avec le recul des glaciers et la fonte des névés, les paysages de montagne seront profondément transformés, vers des milieux végétalisés puis rocheux plus haut en altitude. Certaines espèces emblématiques, patrimoniales ou communes, verront leur habitat diminuer, voire disparaître, changeant ainsi les paysages. D'autres espèces au contraire seront favorisées, notamment certains insectes parasites, comme le scolyte ravageur de l'épicéa, en parallèle d'autres pathogènes agricoles. Le rythme saisonnier des espèces sera aussi impacté, avec un démarrage de plus en plus tôt au printemps et une durée de saison plus longue (mais surement plus sèche) en altitude.

1. Contexte et objectifs

Contexte global du changement climatique

Le changement climatique récent est un phénomène qui dépasse les frontières administratives, à la fois dans ses origines et dans ses conséquences.

Les scientifiques s'accordent et estiment « extrêmement probable » (plus de 95% de certitude) d'une part l'existence d'un changement climatique à l'échelle du globe depuis le XIXe siècle et d'autre part, la responsabilité humaine dans ce changement (Figure 1). Le changement climatique actuel est dû à une forte hausse des émissions de gaz à effet de serre*[1], à laquelle s'ajoute de manière plus marginale l'impact de cycles naturels.

L'incertitude des modèles climatiques sur la hausse globale des températures futures nait surtout de l'incertitude sur le niveau futur des émissions de gaz à effets de serre par les sociétés humaines.

Encadré 1 : des scénarios du GIEC*[1] aux scénarios locaux

Les experts du GIEC*ont établi en 2013 quatre scénarios d'évolution climatique à l'échelle globale, en prenant en compte différentes hypothèses d'émissions de gaz à effet de serre* (GES) en lien avec les activités humaines (Figure 1). Les analyses présentées dans ce rapport s'appuient sur trois scénarios différents. Le scénario le plus optimiste, « RCP* 2.6 », implique de fortes réductions d'émissions de GES. Au vu des émissions depuis 2013, ce scénario est très improbable. Le scénario intermédiaire est le « RCP 4.5 ». Le scénario « RCP 8.5 » est le plus pessimiste ; il demeure probable car il correspond à la prolongation des émissions actuelles. Pour plus de précisions sur les scénarios climatiques, voir l'Annexe 1.

Les climatologues construisent ensuite d'autres modèles pour détailler ces scénarios à l'échelle locale. Plus on « zoome » moins les résultats (« sorties ») des modèles sont fiables car faisant appel à des paramètres locaux et des phénomènes complexes. La montagne est en ce sens très difficile à modéliser, étant donnés les effets de micro-relief, de versant, de saison, de couverture neigeuse etc.

[1] Les mots suivis par un * sont définis dans le glossaire de l'annexe 4.

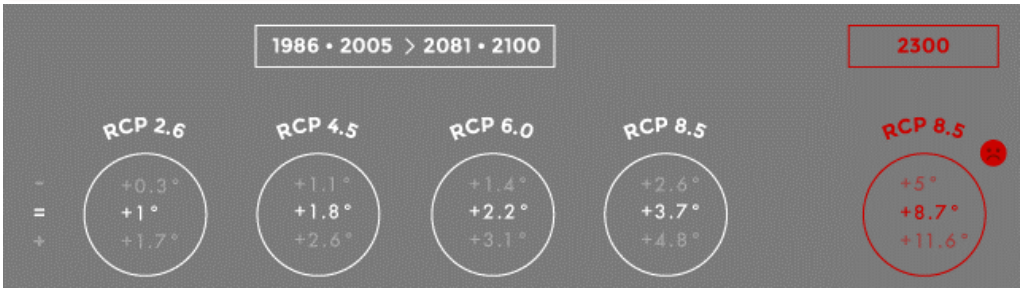
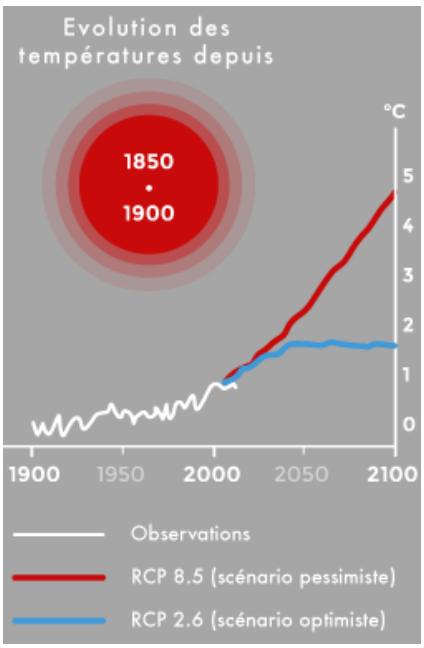


Figure 1. Fourchette de hausse des températures globales, par scénario (RCP*) du GIEC. À ces chiffres doit être ajoutée l'augmentation de température déjà constatée depuis 1850, en moyenne 0,9°C pour l'hémisphère Nord (cf. graphique à droite). *©leclimatchange.fr*



Contexte du changement climatique dans l'Espace Mont-Blanc (EMB)

Le changement climatique n'est pas un futur lointain pour les territoires de montagne mais un sujet d'actualité qui s'amplifie à l'horizon 2050. Le chapitre 2 revient ainsi sur la situation actuelle.

De plus, ses impacts sont amplifiés par des contextes géographiques et économiques comme ceux de l'EMB. Le territoire de l'EMB se caractérise en effet par des vallées dynamiques et peuplées et un relief exceptionnel. La nature des activités et modes de vie dans l'EMB pose une imbrication géographique, économique et sociale, étroite entre le « haut » et le « bas » du massif créant un lien direct entre les évolutions des différents milieux naturels de la « haute » montagne et les activités des sociétés humaines installées en pied de montagne.

Par ailleurs, depuis les vallées jusqu'aux sommets, l'EMB connait un gradient* d'altitude (+ 4 300 m de dénivelée), donc de températures, unique en Europe. On y retrouve des conditions climatiques très variées, d'un climat quasi-méditerranéen dans les vallées suisses et italiennes du Mont-Blanc à un climat quasi-polaire dans les hautes altitudes. Cette diversité climatique préexistante très marquée conduit à des impacts potentiels du changement climatique très localisés et divers.

Pour toutes ces raisons, outre l'importance évidente pour le territoire de mieux appréhender ces changements climatiques, l'EMB est aussi un laboratoire exceptionnel pour cet exercice prospectif, au-delà de ses frontières géographiques.

Des paramètres climatiques aux évolutions de l'environnement naturel et aux secteurs d'activités humaines

Les évolutions climatiques globales d'origine « anthropique » (humaine) entrainent la modification d'une série de paramètres climatiques spécifiques et essentiels à l'échelle locale. Ces paramètres modifient directement les caractéristiques des milieux physiques et vivants de la montagne, donc le cadre naturel qui à son tour dicte les activités humaines. Ainsi, le changement climatique impacte le bien-être économique, social et culturel des habitants de l'EMB :

- directement à travers des paramètres climatiques (températures, précipitations et évènements extrêmes) ;
- de manière indirecte mais plus profonde, par les conséquences de ces modifications climatiques sur des paramètres physiques et vivants (comme la réduction de l'enneigement, la dégradation du permafrost*, le retrait glaciaire, la modification des régimes hydriques, l'avancée des saisons, la remontée des espèces en altitude et la pullulation* ou la disparition d'espèces qui modifient les paysages en profondeur).

Cette chaine d'impacts peut être schématisée ainsi dans l'Espace Mont-Blanc :

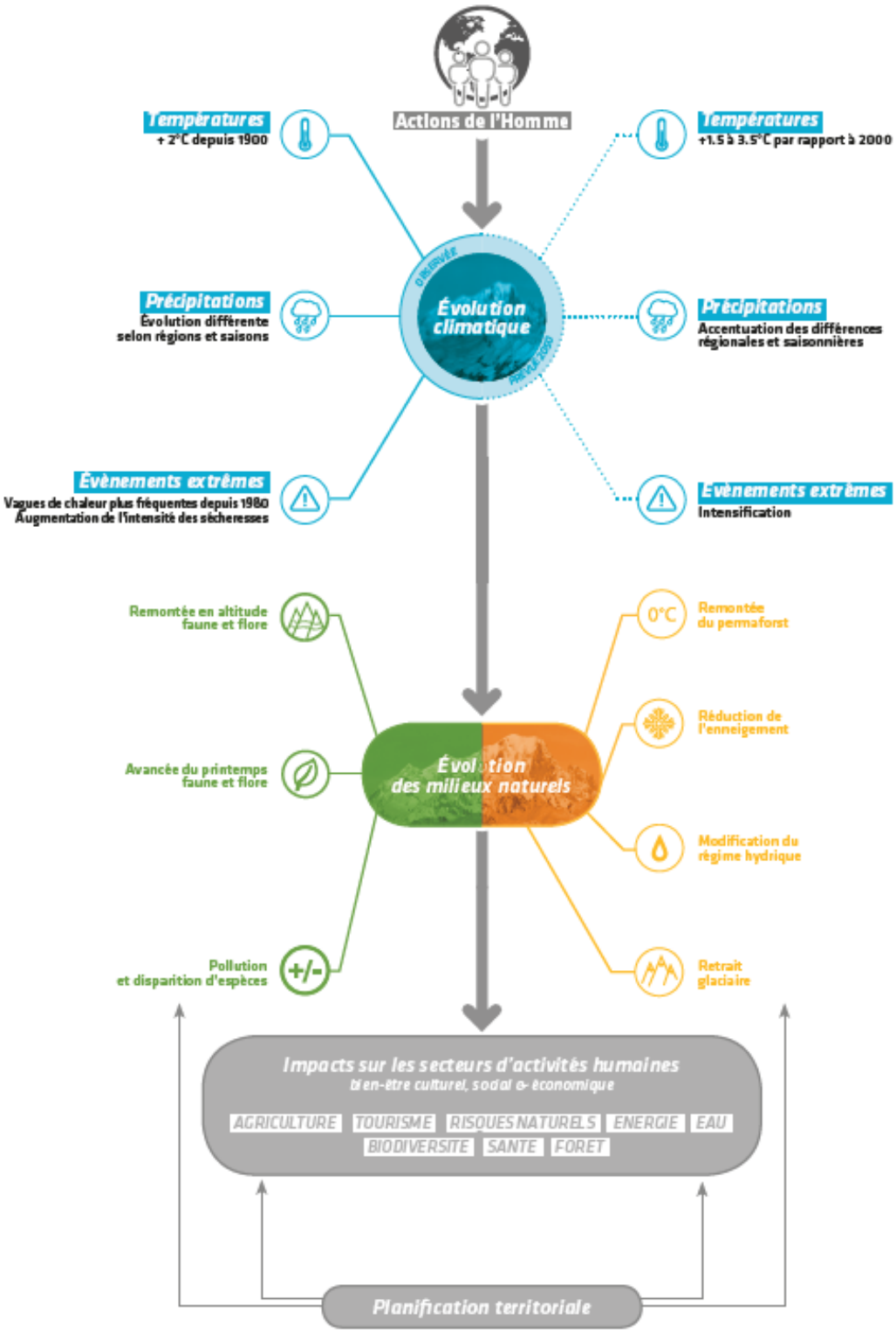


Figure 2. Schéma récapitulatif de l'enchainement des conséquences depuis les paramètres climatiques jusqu'aux activités humaines. C'est cet enchainement qui est repris dans ce rapport et constitue le « work-flow » du volet scientifique du projet Adapt Mont-Blanc. ***© ARPA-CREA Mont-Blanc - Graphisme Acteon***

Objectifs du rapport I – Scénarios climatiques

Avant de passer à la phase de planification territoriale du projet *Adapt Mont-Blanc*, le processus doit démarrer par une mise en commun d'informations entre acteurs et décideurs concernant le changement climatique dans les Alpes et plus particulièrement dans l'EMB. Dans cet esprit, nous avons collaboré entre experts suisses, français et italiens pour synthétiser et présenter les données scientifiques disponibles de manière la plus homogène possible entre les trois pays frontaliers du massif du Mont-Blanc.

L'objectif de ce premier rapport est de fournir des informations claires aux élus et aux décideurs de l'EMB, sur le changement climatique récent et prévu, et sur ses impacts sur les milieux naturels du massif et des vallées alentours. Par milieux naturels, nous entendons l'ensemble des composantes physiques (glaciers, enneigement, permafrost) et vivants (biodiversité, forêts, prairies…) qui structurent les paysages de l'EMB et qui influent sur de nombreux secteurs d'activités humaines. Ce rapport sera ensuite augmenté en 2019 d'une deuxième partie traitant des liens entre ces évolutions et les impacts sur les secteurs d'activités humaines.

Encadré 2 : Météo ou climat ?

Pour étudier et appréhender les impacts du changement climatique, il est indispensable de distinguer la météo, qui fait référence à des évènements climatiques ponctuels et de court terme, et le climat, qui fait référence à des tendances de long terme, étudiées sur des périodes d'au moins 30 ans pour être statistiquement pertinentes.

Le climat fait donc référence à des moyennes de valeurs météo observées ou prédites. Comme toute moyenne, elle comprend des valeurs au-dessus et au-dessous de la moyenne. Ainsi, un recul moyen de l'enneigement de 25 jours depuis les années 1960 (indice climatique) n'empêche pas des années à enneigement exceptionnel comme en 2018 (indice météo). De même, une hausse prévue de 2°C des températures estivales est une moyenne qui implique certains étés beaucoup plus chauds encore.

La structure de ce rapport suivra la logique proposée dans la Figure 2. Dans une première partie, nous proposons une synthèse de l'évolution des températures et des précipitations dans la région de l'EMB depuis 1900. Nous présentons ensuite quelques scénarios climatiques pour les décennies à venir, ainsi que l'évolution d'une sélection d'indices climatiques ayant un impact fort sur les activités humaines. Nous terminons par une synthèse des principaux effets du changement climatique sur les milieux naturels de l'EMB, qui à leur tour impactent les activités humaines.

Les références aux articles ou rapports scientifiques indiquées entre parenthèses en fin de phrase ou paragraphe sont à retrouver dans l'annexe 3, « Bibliographie ».

2. Changements climatiques récents observés dans les Alpes et le massif du Mont-Blanc depuis 1900

À l'échelle globale, le réchauffement observé depuis le milieu du 19ème siècle est sans précédent et extrêmement rapide (GIEC 2018, SR1.5). Les reconstructions à partir des calottes de glace montrent que la concentration actuelle des gaz à effets de serre dont le CO_2 (> 400 ppm*) n'a jamais été aussi forte sur les 800 000 dernières années. Plus récemment, à l'échelle mondiale, seize des dix-sept dernières années ont été les plus chaudes jamais enregistrées (GIEC 2014).

Depuis 1864 dans les Alpes, nous constatons un réchauffement des températures annuelles moyennes d'environ 2° C, ce qui est plus de deux fois plus important que le réchauffement mesuré à l'échelle globale de + 0,9° C (CH2011*).

Encadré 3 : Avant 1900…

Le climat en Europe et dans les Alpes a connu des variations importantes au cours des derniers milliers d'années, avec notamment la dernière période glaciaire du Würm terminant il y a environ 12 000 ans (Davis *et al.* 2003). Plus récemment, l'Europe a connu une période relativement chaude et humide (le « *Medieval Warm Period* ») entre 900 et 1350, suivi par une période froide et humide jusque 1850, le Petit Age Glaciaire (Kress *et al.* 2014). Cette époque a été marquée par un regain spectaculaire dans la superficie des glaciers dans les Alpes, avec par exemple la Mer de Glace jusqu'à Chamonix.

Autre aspect d'importance, on ne dispose de relevés météorologiques continus et fiables que depuis le début du 20ème siècle. On reconstitue les variations climatiques passées à partir d'indicateurs indirects (carottes de glace, cernes des arbres…).

Températures

La hausse des températures est particulièrement marquée depuis la fin des années 1980, avec une augmentation observée de 0,5° C par décennie (Gobiet *et al.* 2014 ; Figure 3). Cette hausse équivaut environ à la différence de température que l'on observe entre deux altitudes séparées par 100 m de dénivelée. A ce rythme, pour rester dans les mêmes conditions de température, il faudrait donc monter de 100m de dénivelée tous les 10 ans. En termes de saisonnalité, dans les Alpes le réchauffement mesuré est particulièrement marqué au printemps et durant l'été (Durand *et al.* 2009 ; Figure 4).

Encadré 4 : Pourquoi le réchauffement est-il plus marqué en montagne ?

La sensibilité accrue de la montagne au changement climatique est un sujet de recherche en cours (Palazzi *et al.* 2018). Une des hypothèses est un albédo* réduit, à cause d'une réduction des surfaces de neige et de glace (que la réduction soit absolue pour les glaciers ou en durée saisonnière pour la neige). Les surfaces devenues « sombres » (rocher et végétation en lieu et place de la neige ou de la glace) absorbent une quantité plus importante de chaleur, provoquant une accélération locale du réchauffement. La température moyenne de l'air est ainsi supérieure de 0,4 °C sur une surface déneigée par rapport à un terrain enneigé (Scherrer *et al.* 2012).

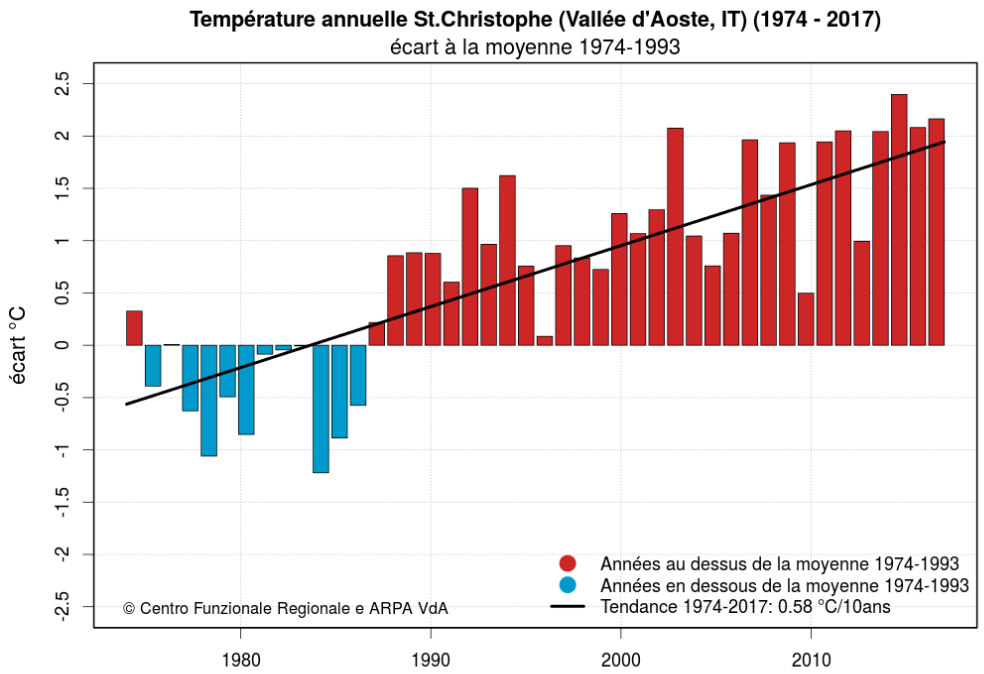


Figure 3. Augmentation des températures moyennes annuelles depuis 1974. Ce graphique représente l'écart des températures moyennes annuelles par rapport à la moyenne de la période 1974-1993 à Saint Christophe en Vallée d'Aoste. On note l'accélération de la hausse des températures à partir de la fin des années 80, ainsi que des moyennes annuelles variables (effet météo ; Encadré 2). ***© Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta et ARPA VdA***

Encadré 5 : Les saisons en climatologie

En climatologie, les saisons ne sont pas les saisons calendaires. Ainsi :

- Hiver : décembre/janvier/février – DJF
- Printemps : mars/avril/mai – MAM
- Été : juin/juillet/aout – JJA
- Automne : septembre/octobre/novembre – SON

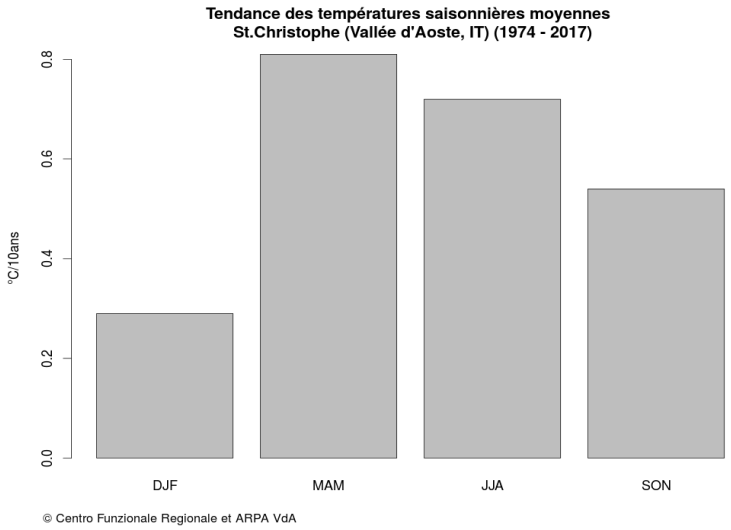


Figure 4. Saisonnalité du réchauffement observé pour la période 1974-2017 à Saint Christophe en Vallée d'Aoste. Par rapport à un réchauffement moyen de 0.58°C par décennie, on note que la hausse des températures a été particulièrement marquée au printemps (+ 0.81 °C par décennie) et en été (+ 0.72 °C par décennie). ***© Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta et ARPA VdA***

Précipitations

Le régime des précipitations moyennes ne montre pas de tendance globale d'évolution au cours du 20ème siècle mais un contraste entre régions et saisons. Depuis les années 1960, le cumul des précipitations hivernales a baissé dans le sud de la France tandis qu'une augmentation a été observé dans le nord du pays (Gibel 2015). En revanche, les précipitations moyennes annuelles et estivales ne montrent pas de tendance significative depuis les dernières décennies (Figure 5). Nous constatons pourtant une forte variabilité dans la quantité des précipitations d'une année à une autre.

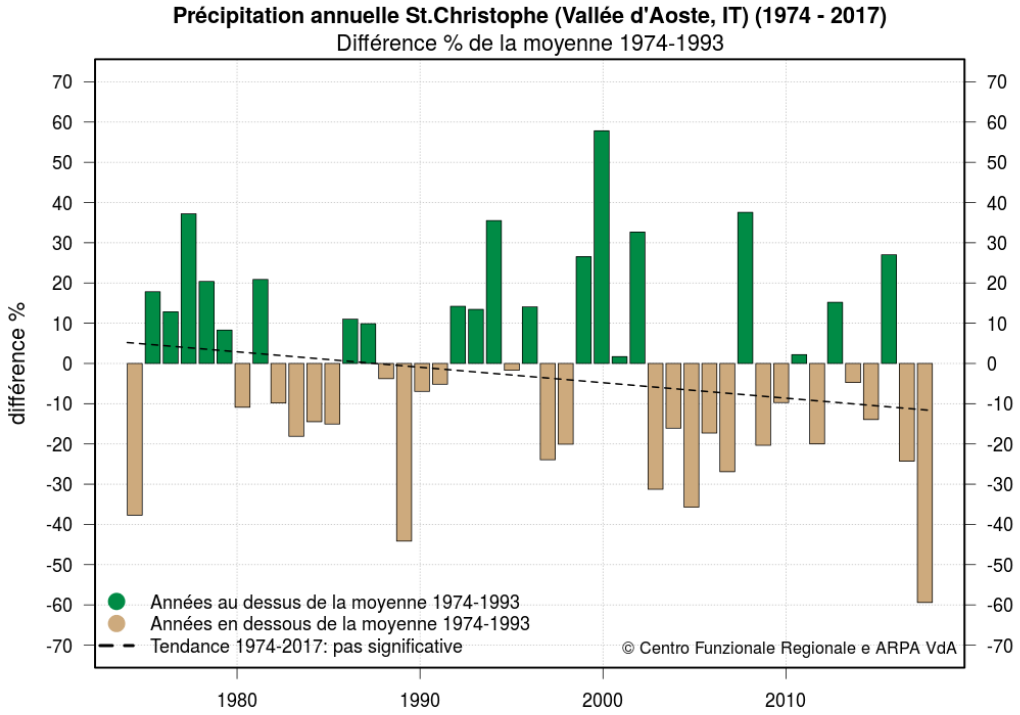


Figure 5. Evolution des précipitations moyennes annuelles depuis 1974. Ce graphique représente l'écart des précipitations moyennes annuelles par rapport à la moyenne de la période 1974-1993 à Saint Christophe en Vallée d'Aoste. On note une absence de tendance significative malgré une légère baisse observée pendant les dernières années, ainsi qu'une grande variabilité entre les années. ***© Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta et ARPA VdA***

Évènements extrêmes

Le GIEC insiste sur la multiplicité *des* changements climatiques, qui ne se traduit pas par une unique et uniforme hausse des températures mais également par une redistribution des précipitations à l'échelle du globe et une augmentation des évènements extrêmes, c'est-à-dire des écarts de plus en plus marqués par rapport à une situation météorologique moyenne. Dans l'EMB, cette augmentation des évènements extrêmes s'est traduite jusqu'à présent par une hausse dans la fréquence et dans la durée des canicules* estivales ainsi qu'un risque de gelées tardives* en altitude qui a fortement augmenté depuis les années 1970.

Les indices climatiques pertinents pour quantifier les évènements extrêmes de canicule* et de froid dans l'EMB sont les suivants :

Jours de gel	Nombre de jours par an avec des températures minimales inférieures à 0°C
Jours de glace	Nombre de jours par an avec des températures maximales inférieures à 0°C
Jours d'été	Nombre de jours par an avec des températures maximales supérieures à 25 °C
Jours tropicaux	Nombre de jours par an avec des températures maximales supérieures à 30°C

Table 1 : indices climatiques pour la quantification des évènements de canicule* et de froid.

Les indices ci-dessous ont donc été calculés suivant les données disponibles décrites en annexe 1.

Jours de gel et gelées tardives

Le réchauffement s'est traduit par une baisse du nombre de jours de gel* dans l'EMB depuis les années 1970 de l'ordre de 6,5 jours par décennie à une altitude de 600 m (Table 1 ; Figure 6). En revanche, au printemps, la hausse des températures a été accompagnée par une exposition plus forte aux évènements de gel au printemps, qu'on appelle les gelées tardives : au-dessus de 800 m d'altitude, le risque de gelées tardives a augmenté de 20 à 40 % entre 1975 et 2016 (Vitasse *et al.* 2018). Les températures printanières en moyenne plus élevées permettent à la végétation (naturelle ou cultivée) de démarrer plus tôt. Cependant, les plantes ne sont pas à l'abri de températures journalières ponctuellement inférieures à 0°C, en général plus fréquentes plus tôt dans le printemps. Or si les plantes résistent bien au gel lorsqu'elles sont en « dormance », elles y sont très sensibles une fois leur cycle végétatif enclenché.

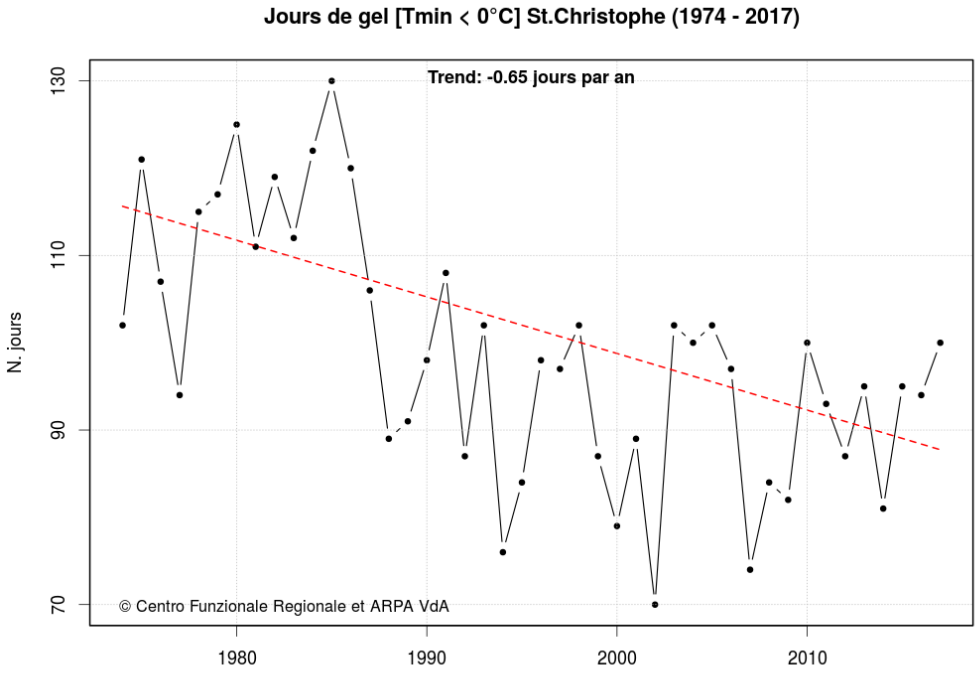


Figure 6. Évolution du nombre de jours de gel* (température minimale journalière inférieure à 0 °C) par an à Saint Christophe en Vallée d'Aoste entre 1974 et 2017. On note une réduction très forte du nombre des jours de gel de 6,5 jours par décennie. ***© Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta et ARPA VdA***

Canicule* et sécheresse

Entre 1880 (fin du Petit Age Glaciaire*) et 2005, en Europe occidentale, la fréquence des canicules* a triplé (on passe en moyenne d'une canicule par décennie à trois ; Della-Marta *et al.* 2007). Dans l'EMB, on observe une augmentation de 7,3 jours par décennie de jours « tropicaux » tels que définis en Table 1). Cette intensification des canicules semble être particulièrement marquée depuis les années 2000. Les étés caniculaires sont devenus plus chauds et plus fréquents, avec par exemple 2003, 2016 et 2017 qui dépassent largement le nombre de jours tropicaux* observés pendant les années 1980 et 1990 (Figure 7).

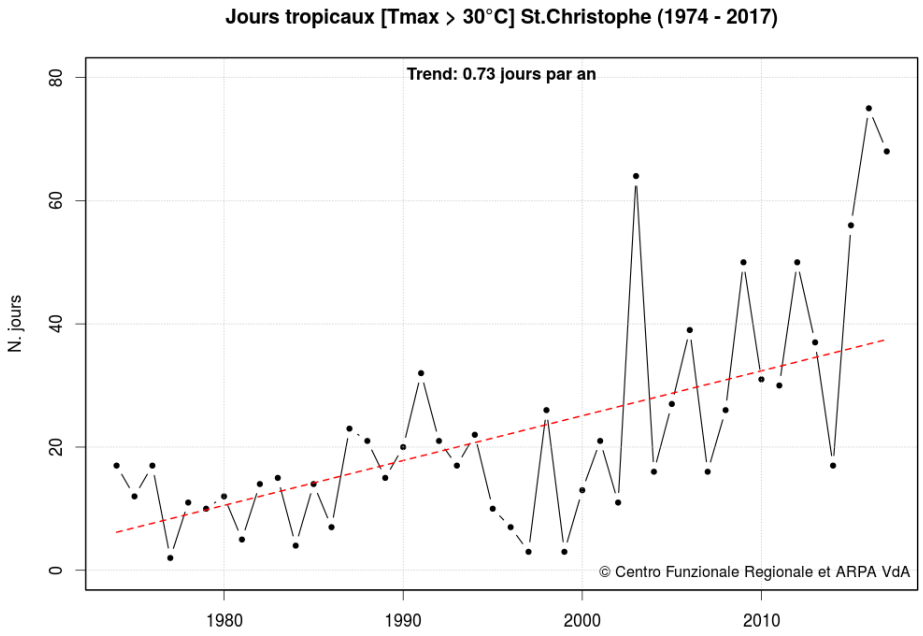


Figure 7. Évolution du nombre de jours « tropicaux » (température maximale journalière supérieure à 30 °C) par an à Saint Christophe en Vallée d'Aoste entre 1974 et 2017. On note un fort contraste entre les années, avec par exemple les canicules de 2003, 2016 et 2017 particulièrement marquées et une forte tendance à l'augmentation du nombre de jours tropicaux* (7,3 jours par décennie). ***© Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta et ARPA VdA***

Un évènement de sécheresse correspond à une période prolongée d'absence de précipitations ou de précipitations insuffisantes, qui se traduit par un déficit en eau. À l'échelle de la Suisse, il n'existe pas d'augmentation significative dans la durée et dans l'intensité des sécheresses depuis la fin du 19ème siècle (CH2018). Dans l'EMB, à ce jour nous n'observons donc pas de tendance claire au niveau de l'occurrence des sécheresses pendant les dernières décennies.

3. Projections climatiques dans l'EMB pour les futures décennies

Les modèles indiquent une accentuation des tendances déjà observées dans les décennies à venir. Nous nous attendons surtout à une poursuite de la hausse des températures, en toute saison mais notamment en été, accompagnée par une baisse des précipitations particulièrement marquée en été. Pour projeter ces évolutions, nous nous sommes appuyés sur trois types de données :

- les résultats d'analyses existantes à l'échelle alpine, tirés d'articles scientifiques (voir bibliographie)
- les projections jusqu'en 2035, 2060 et 2085 des données journalières de quelques stations météorologiques sur le versant suisse de l'EMB, réalisées par MétéoSuisse (CH2011-CHAW, Center for Climate Systems Modeling C2SM @ETH Zurich) et analysées par l'ARPA VdA
- une projection des données climatiques CHELSA* (Karger *et al.* 2017) disponible à l'échelle mondiale, « zoomées » à l'échelle de l'EMB à l'horizon 2050. Ces analyses et représentations cartographiques ont été réalisées par le CREA Mont-Blanc.

Encadré 6 : Lire les graphiques – Moyenne et fourchette d'incertitude

L'évolution future d'un indice climatique s'exprime par un chiffre qui représente une valeur moyenne (dans un graphique en général un point ou une courbe), au sein d'une marge d'incertitude (dans un graphique en général une barre ou un trait vertical) au sein de laquelle la valeur pourrait se situer.

Les trois sources de données font que les modèles utilisés ne sont pas les mêmes, mais leurs résultats restent pourtant comparables. Pour rappel, les scénarios appelés « A1B » et « RCP 4.5 » représentent des scénarios médians, tandis que « A2 » et « RCP 8.5 » représentent des scénarios pessimistes basés sur une poursuite de nos émissions actuelles (cf. Encadré 1). L'annexe 1 détaille le choix et l'utilisation de ces jeux de données pour obtenir des indicateurs et cartes transfrontaliers, communs à l'ensemble de l'EMB. En 2019, ce rapport sera mis à jour avec les nouveaux scénarios disponibles depuis le 14/11/2018 (CH2018).

Températures

Températures moyennes annuelles

Les températures moyennes annuelles poursuivent leur hausse, entre +1°C et +3°C en 2060 suivant les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre retenus, par rapport à la période 1980-2009. Par rapport à la fin du 19ème siècle, cela fera donc une hausse d'entre 3 et 5°C, ce qui correspond à l'écart de température entre la dernière période glaciaire il y a 12 000 ans et la période actuelle (Davis *et al.* 2003).

Au fil des décennies, les différents scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5) sont de plus en plus divergents avec une augmentation des températures encore plus marquée dans le scénario pessimiste : la différence entre les deux scénarios n'est que de 0,6°C en 2050 mais de 2°C en 2090. Cette divergence s'explique par l'inertie relative du climat par rapport aux émissions de gaz à effet de serre : les effets d'une émission aujourd'hui sont retardés dans le temps. Dans le scénario RCP 4.5 où les émissions sont fortement réduites à court terme, l'inertie reste forte à court terme (car fonction de nos émissions passées) mais plus faible à un horizon lointain par rapport au scénario RCP 8.5 dans lequel nos émissions continuent d'augmenter dans le futur proche.

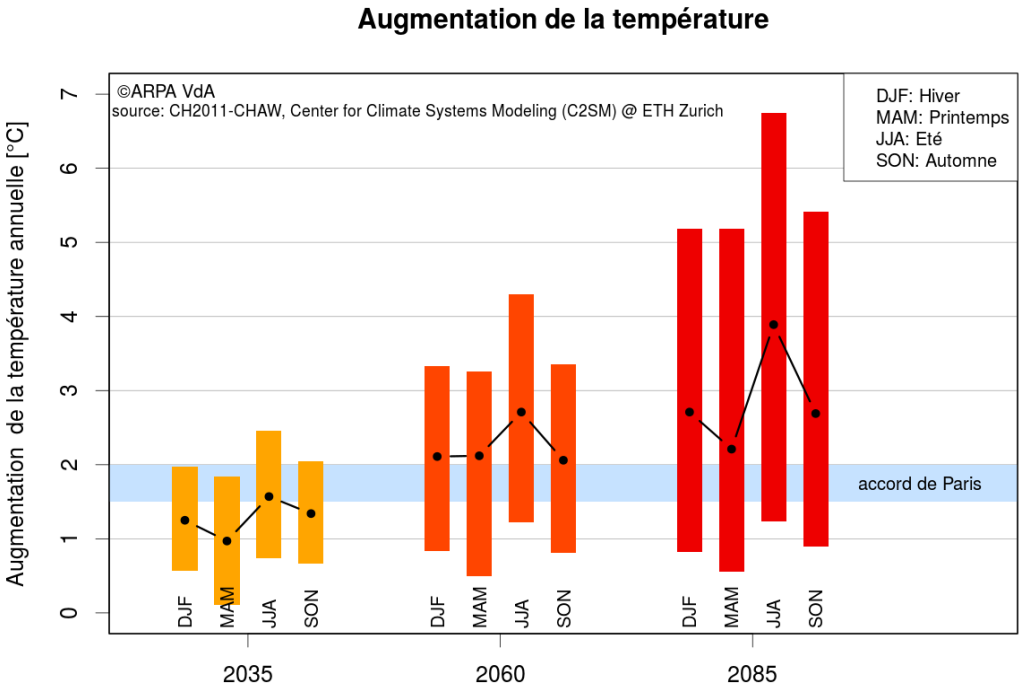


Figure 8. Variation de la température moyenne par saison pour l'EMB pour trois périodes futures (2035, 2060 et 2085). Ces chiffres sont la synthèse de divers scénarios et modèles climatiques. Les barres représentent la fourchette d'incertitude, qui augmente au fil des décennies (notamment car les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre divergent). On note un impact différent et de plus en plus divergent selon les saisons. ***Source : CH2011-CHAW © ARPA VdA***

Variations saisonnières

Les températures continueront à augmenter à toutes les saisons, avec une hausse attendue plus marquée en été, quel que soit l'horizon temporel. Dès 2060, la hausse des températures sera nettement plus importante dans l'EMB que celle prévue dans le cadre des accords de Paris en 2015 (Figure 8).

On observe également une augmentation différenciée le long du gradient d'altitude, surtout en hiver (Figure 9). L'augmentation des températures en hiver est en effet plus marquée dans les fonds de vallée qu'en haute montagne.

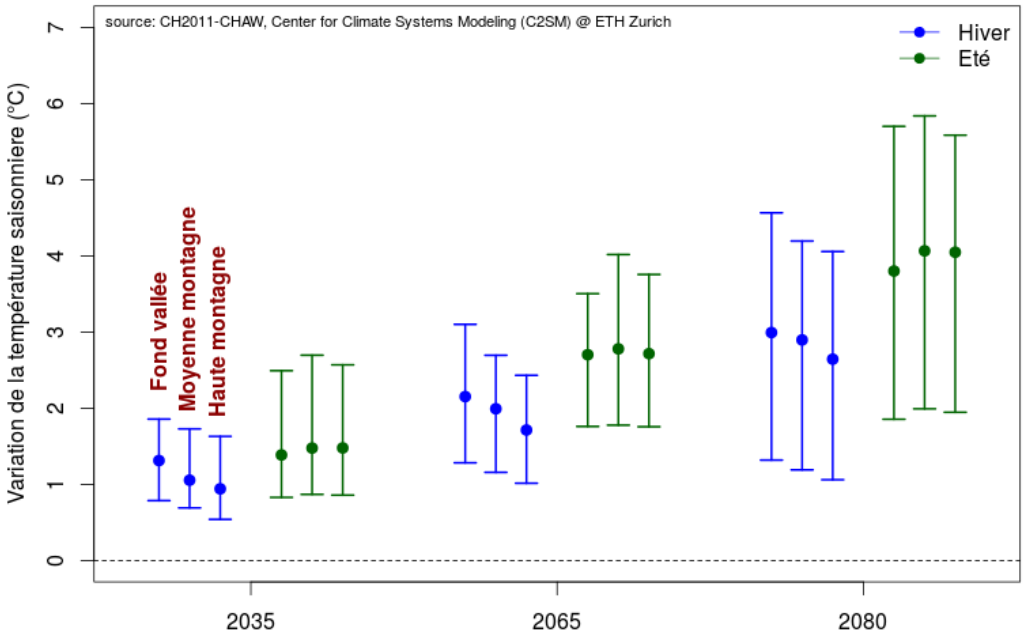


Figure 9. Variation des températures moyennes hivernales et estivales pour l'EMB pour trois périodes futures (2035, 2060 et 2085). Les points représentent la moyenne des 3 scénarios d'émissions. Les barres représentent la fourchette d'incertitude, tous scénarios et tous modèles confondus. ***Source : CH2011-CHAW © ARPA VdA***

Encadré 7 : Lire les graphiques – Bandes altitudinales

L'analyse de nombreux indices a été faite en s'appuyant sur un découpage en bandes altitudinales caractéristiques de l'EMB et sur la distribution altitudinale des stations du réseau MeteoSuisse dont de nombreuses projections sont tirées, soit :

- fond de vallée : entre 420 et 640 m
- moyenne montagne : entre 1320 et 1640 m
- haute montagne : entre 2300 et 2700 m

En été, l'isotherme* 0°C – intéressant à la fois en hiver car il détermine la limite pluie/neige et en été car il détermine l'altitude des neiges éternelles, d'accumulation glaciaire et la distribution du permafrost – remonte de 300 m de dénivelée, passant de 3 800 m aujourd'hui pendant la saison estivale à 4 100 m en 2050 (Figure 10). Cette remontée de l'isotherme 0°C correspond à un réchauffement en été de 2°C sur l'EMB. Dans le scénario plus pessimiste (RCP 8.5), ce recul sera de l'ordre de 400 m en lien avec un réchauffement de presque 3°C. Dans les deux scénarios, en 2050, l'isotherme 0°C sera en été au-dessus de 4 100 m d'altitude laissant seulement quelques points culminants de l'EMB à l'abri de la fonte. Au printemps, l'isotherme 0°C passera d'environ 2200 m aujourd'hui à 2400 à 2500 m en 2050, en fonction du scénario climatique et du versant.

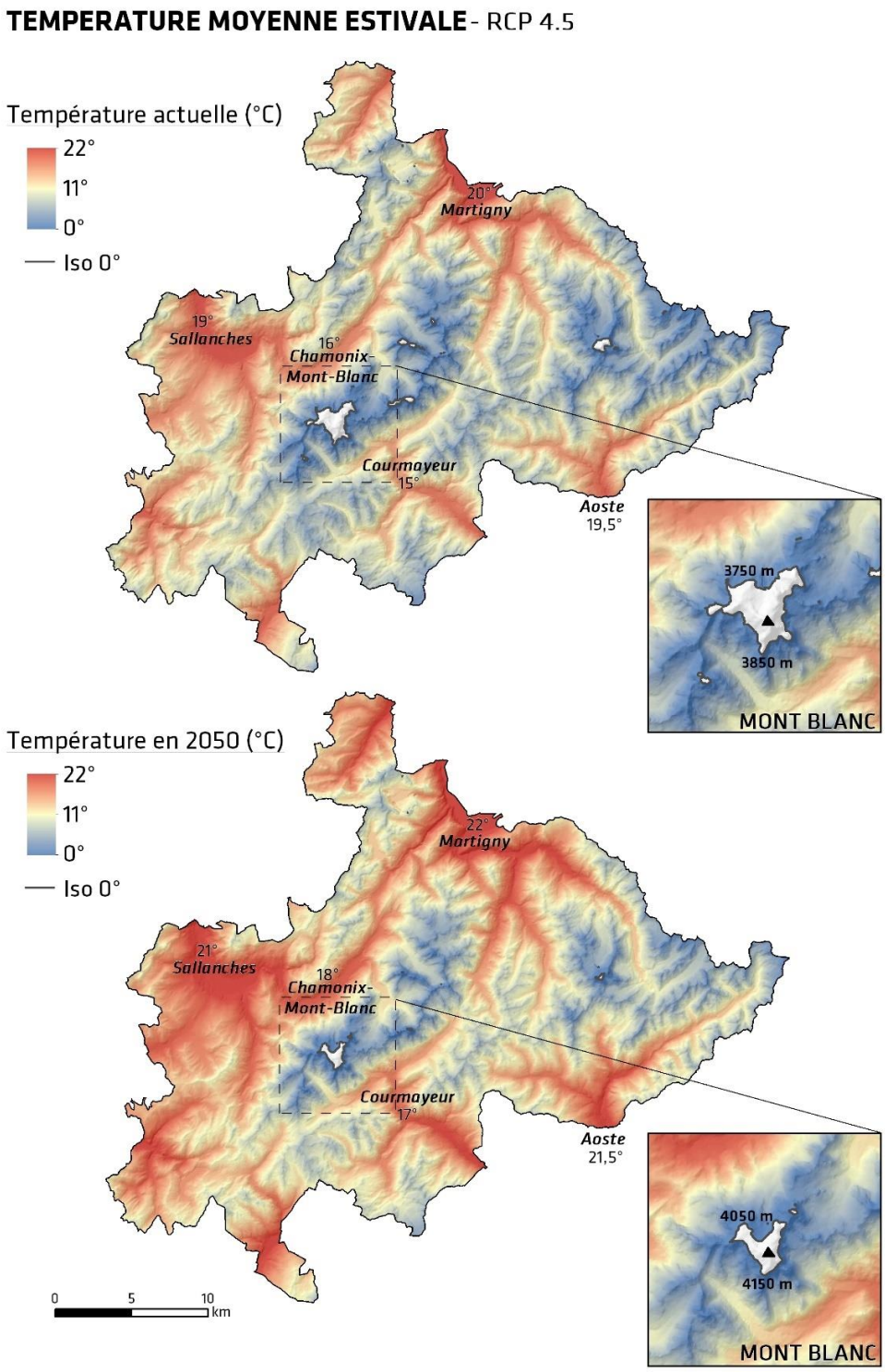


Figure 10. Les températures estivales moyennes aujourd'hui et en 2050 dans l'Espace Mont-Blanc, selon le scénario médian RCP 4.5. On note que seulement le sommet du Mont Blanc et quelques hauts sommets autour (Grandes Jorasses, Grand Combin) restent au-dessus de la limite du dégel. ***Source : WSL*/CHELSA © CREA Mont-Blanc***

Précipitations

Précipitations moyennes annuelles

Concernant les précipitations annuelles, l'incertitude reste forte (de -7 à +12 %). Néanmoins, on s'attend à une baisse des précipitations estivales de l'ordre de -10 à -30 % d'ici 2050.

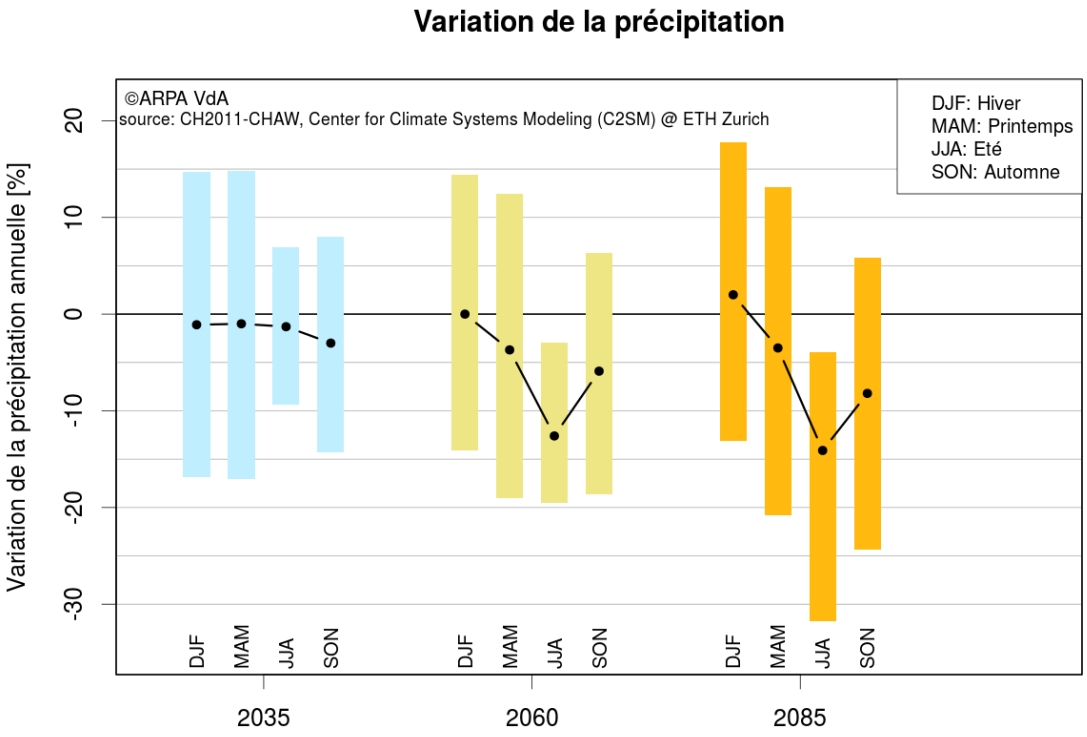


Figure 11. Variation en pourcentage des précipitations saisonnières pour l'EMB pour trois dates à venir (2035, 2060 et 2085). Les barres représentent la fourchette d'incertitude, tous scénarios et modèles confondus. L'incertitude (représentée par la hauteur de la barre) est moins forte en été jusqu'en 2060 que pour les autres saisons. On note un assèchement de plus en plus marqué en été ainsi dans une moindre mesure qu'au printemps et à l'automne. Les précipitations hivernales sont en légère hausse, mais à croiser avec une altitude de la limite pluie/neige également en hausse. ***Source : CH2011-CHAW © ARPA VdA***

Variations saisonnières

Les précipitations moyennes au niveau régional montrent une diminution pour la période estivale de 10-20% d'ici 2060, tandis que pour les autres périodes de l'année l'incertitude est haute (Figure 11). Croisé avec la hausse importante des températures estivales (Figures 10), dans l'EMB on peut s'attendre à un risque de canicule* et de sécheresse plus important dans les décennies à venir. Il est important à noter que la baisse des précipitations est plus importante en valeur absolue dans la partie ouest de l'EMB (Figure 12), mais vu que cette région reçoit plus de précipitations actuellement, la différence en pourcentage est équivalente sur les versants est et ouest du Mont-Blanc.

Si la variation des précipitations estivales sembleraient relativement constates en fonction de l'altitude (Figure 13), les modèles prédisent des précipitations hivernales plus abondantes en

moyenne montagne (autour de 1500 m) par rapport à la haute montagne et les fonds de vallée. A cause du réchauffement des températures hivernales, ces précipitations ne se traduiront pas forcément par une augmentation dans la quantité de neige à ces altitudes.

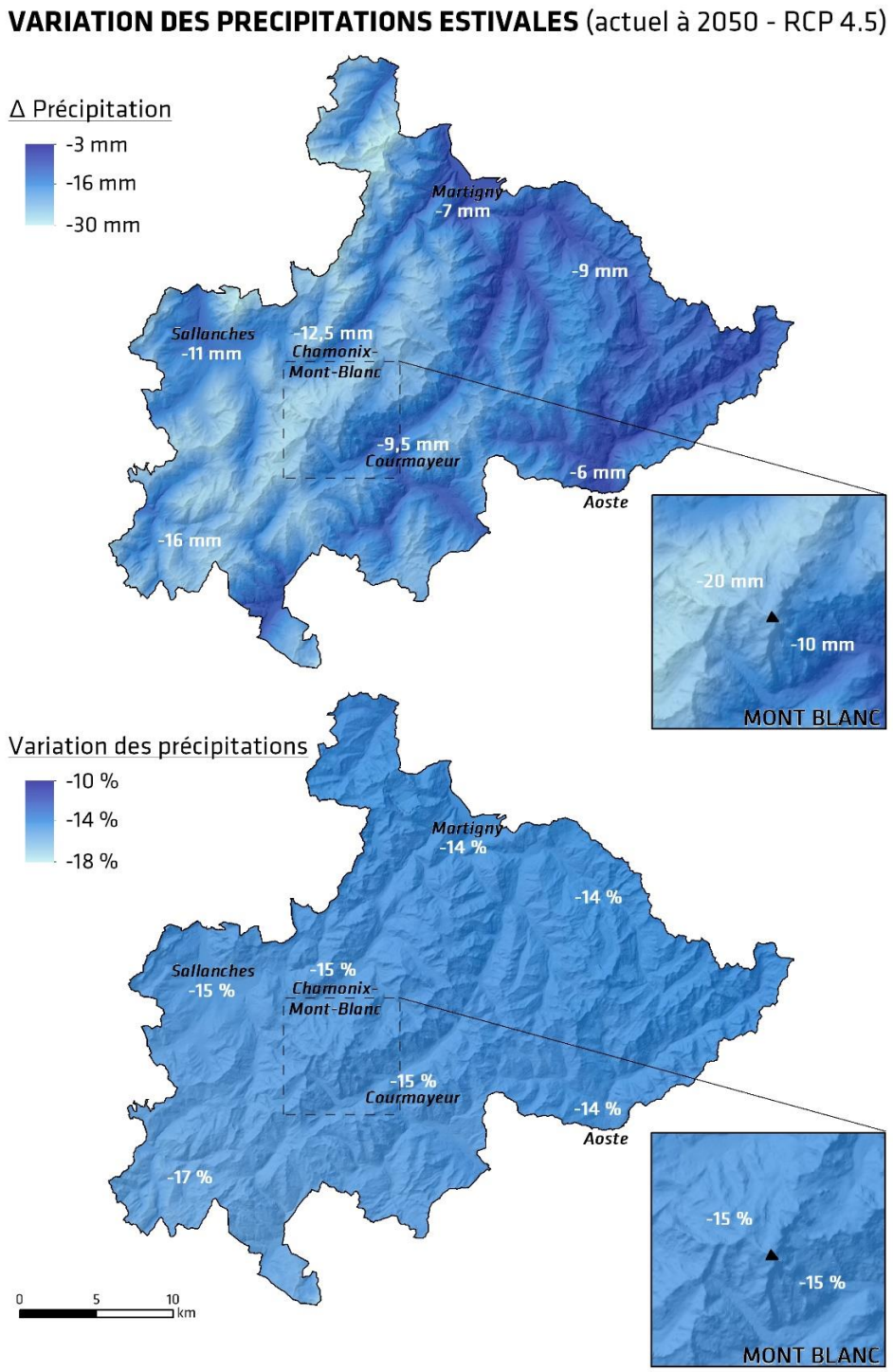


Figure 12. Variation des précipitations en été entre aujourd'hui et en 2050 dans l'Espace Mont-Blanc, selon le scénario médian RCP 4.5. On note une réduction d'environ 15% des précipitations sur l'ensemble du territoire, qui augmente à 18% dans le cas du scénario RCP 8.5. ***Source : WSL/CHELSA © CREA Mont-Blanc***

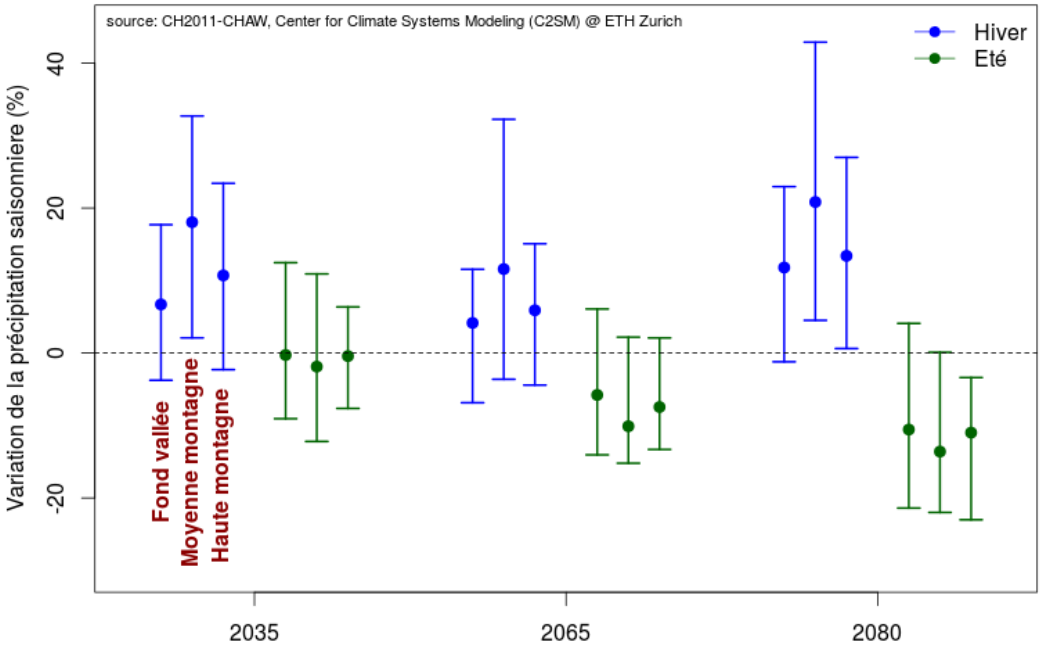


Figure 13. Variation des précipitations moyennes hivernale et estivale pour l'EMB pour trois périodes futures (2035, 2060 et 2085) et pour trois bandes altitudinales (fond vallée, entre 420 et 640 m ; moyenne montagne, entre 1320 et 1640 m ; haute montagne, entre 2300 et 2700 m.) Les points représentent la moyenne de trois scénarios d'émissions (A1B, A2, RCP3PD). Les barres représentent la fourchette d'incertitude, tous scénarios et modèles confondus. ***Source : CH2011-CHAW © ARPA VdA***

Les phénomènes de sècheresse et de canicule* sont abordés ci-dessous, dans le chapitre « évènements extrêmes ».

Evènements extrêmes à l'horizon 2100

Jours de gel et de glace

Dans l'EMB, en moyenne on s'attend à une diminution importante du nombre de jours de gel* de l'ordre de -20 à -80 jours par an d'ici 2085 (Figure 14) avec un impact différent selon l'altitude considérée. La réduction la plus marquée est prévue au-dessus de 2300m d'altitude, tous scénarios et horizons temporels confondus. Dans cette tranche d'altitude particulièrement concernée par l'enneigement ou les risques naturels, on s'attend à une réduction de 20 jours minimum dès 2035, même dans le scénario optimiste. Les fonds de vallées seront particulièrement touchés par le recul du gel à partir de 2060, mais avec une incertitude plus importante qu'en haute altitude. En 2085, il est possible que les jours de gel puissent complètement disparaître dans les fonds de vallée de l'EMB (moyenne historique de 97 jours de gel par an et possibilité d'une diminution de plus de 85 jours du nombre de jours de gel en 2085 ; Figure 14).

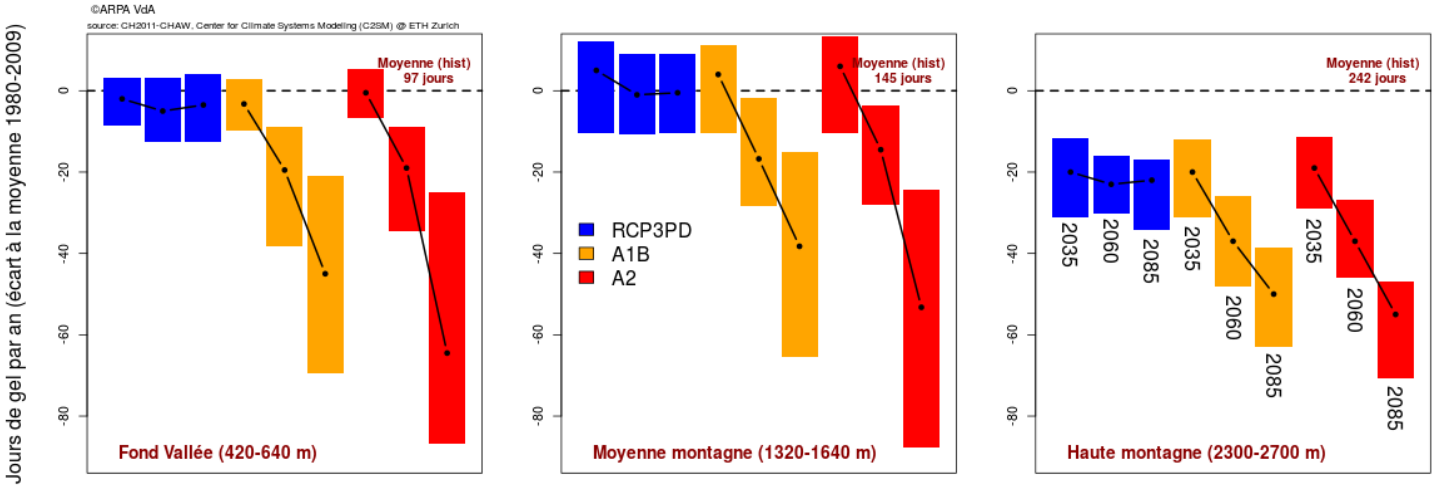


Figure 14. Variation du nombre annuel de jours de gel (nombre de jours par an avec une température minimale inférieure à 0°C) entre aujourd'hui et 2085 selon trois scénarios d'émission et pour trois bandes altitudinales. Les barres bleues représentent le scénario optimiste en 2035, 2060 et 2085 ; les barres jaunes le scénario médian et les barres rouges le scénario pessimiste. La hauteur des barres représente l'incertitude (10eme et 90eme percentile), prenant en compte le fait que 10 différents modèles et plusieurs stations dans des lieux géographiques différents sont considérés. ***Source : CH2011-CHAW © ARPA VdA***

A l'heure actuelle l'incidence du changement climatique sur les gelées tardives est un sujet de recherche en cours. Klein et al. (2018) avancent l'hypothèse que la baisse d'enneigement en montagne couplée avec des printemps plus précoces devraient augmenter l'exposition des plantes aux gelées tardives dans les décennies à venir, malgré les températures en moyenne plus douces.

Le nombre de jours de glace* (où la température maximale est inférieure à 0°C) est un paramètre également très important pour les milieux de haute altitude, notamment pour la conservation du permafrost et des glaciers. Historiquement, entre 2300 m et 2700m, on observe plus de quatre mois de jours de glace par an. Cette durée risque de diminuer de plus d'un mois pour le scénario d'émissions médian, et jusqu'à deux mois pour le scénario pessimiste, c'est-à-dire une réduction de 50% des jours de glace par rapport à la période actuelle (Figure 15).

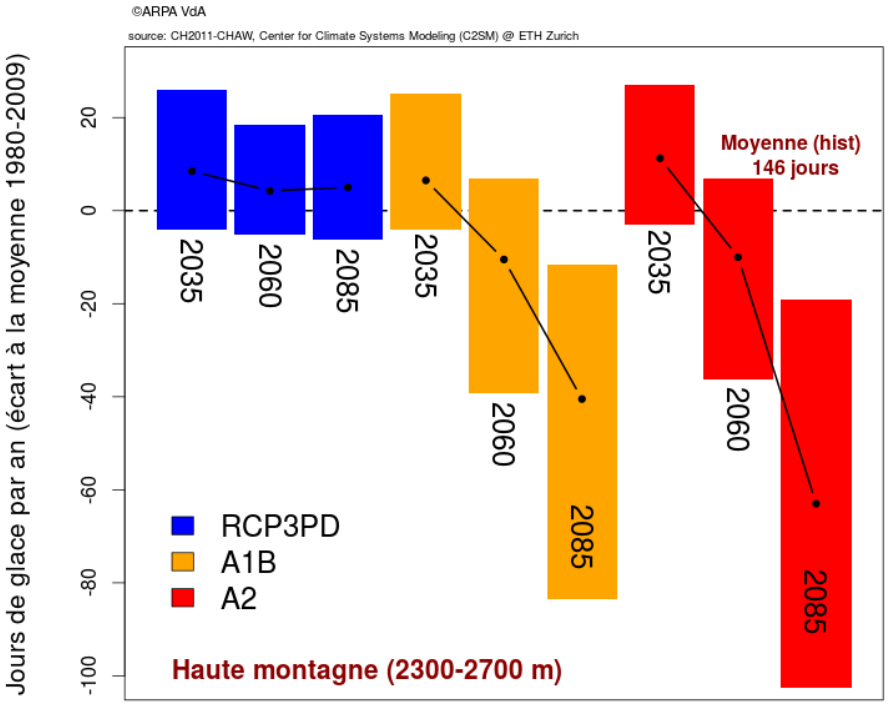


Figure 15. Variation du nombre annuel de jours de glace (nombre de jours par an avec des températures maximales inférieures à 0°C) entre aujourd'hui et 2085 selon trois scénarios d'émission pour la tranche d'altitude 2300m-2700m. La durée des périodes où les températures sont inférieures à 0°C se réduisent de 25 à 50%. On note également une augmentation de l'incertitude pour les horizons temporels plus loin et pour les scénarios à plus fortes émissions. Les barres représentent l'incertitude (10eme et 90eme percentile) de 10 modèles différents croisée avec la variabilité spatiale des stations considérées. ***Source : CH2011-CHAW © ARPA VdA***

Canicule* et sécheresse

En 2100, un été sur deux dans les Alpes devrait être au moins aussi chaud que l'été caniculaire de 2003 (Gobiet *et al.* 2014). Dans l'EMB, d'ici 2085 on s'attend à avoir entre 15 et 70 jours d'été* (températures maximales journalières supérieures à 25 °C ; Figure 16) de plus par an dans la bande altitudinale correspondante aux fonds de vallée, c'est-à-dire une augmentation d'entre 25 et 100%. En moyenne montagne, où le nombre de jours d'été est à présent proche de zéro, on arrivera à environ un mois d'ici la fin du siècle. En été les canicules risquent donc de devenir des phénomènes présents non seulement dans les fonds de vallées de l'EMB mais également en altitude sur les versants (Figure 16). En résumé, tous les modèles indiquent une hausse dans la fréquence et dans la durée des canicules estivales dans les décennies à venir.

Si pour le moment aucune étude quantitative sur la fréquence des sécheresses n'est disponible pour l'EMB, au vu de l'évolution des précipitations et températures estivales nous pouvons nous attendre à des évènements de sécheresse plus fréquents et sévères dans les futures décennies.

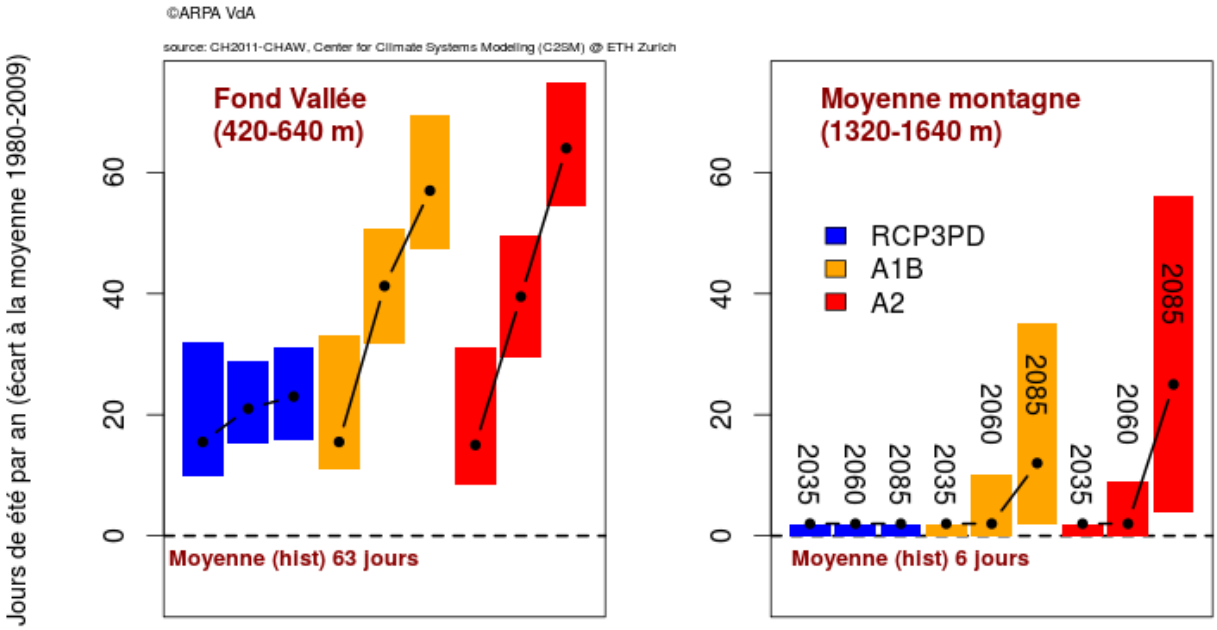


Figure 16. Variation du nombre annuel de jours d'été (nombre de jours par an avec une température maximale supérieur à 25°C) entre aujourd'hui et 2085 selon trois scénarios d'émission et pour deux bandes altitudinales. Le nombre de journées chaudes pourrait doubler en 2085 à basse altitude, hormis dans le scénario le plus optimiste. A moyenne altitude, l'effet est moindre mais la notion de canicule* pourrait y faire son entrée en fin deuxième partie du 21e siècle. Les barres représentent l'incertitude (10eme et 90eme percentile) de 10 modèles différents croisée avec la variabilité spatiale des stations considérées. ***Source : CH2011-CHAW © ARPA VdA***

Précipitations fortes et inondations

Dans les Alpes, on anticipe une augmentation dans la fréquence des évènements de fortes précipitations dans toutes les saisons (par exemple pluies torrentielles, tempêtes de neige). Plus précisément, pour la période 2071-2100, dans les Alpes on s'attend à avoir entre 40 et 80 jours de fortes précipitations de plus par an par rapport à la période actuelle. Ce changement risque d'être particulièrement fort dans les Alpes du nord (+30 % d'intensité ; Gobiet *et al.* 2014).

De ce fait, le risque d'inondation en hiver et au printemps est susceptible d'augmenter, à cause des précipitations plus erratiques et des températures plus élevées, donc plus de précipitations sous forme de pluie que de neige et une fonte des neiges accélérée. Jusqu'à 1500 m d'altitude, dans le cas d'un réchauffement de 2°C et une augmentation de 10% dans l'intensité des précipitations, il est probable que les crues hivernales centennales deviendront des évènements plus réguliers avec une occurrence tous les 20 ans en moyenne, soit une chance sur 20 de crue hivernale en moyenne chaque année au lieu d'une chance sur 100 (Gobiet *et al.* 2014).

4. Évolution des milieux naturels physiques

L'évolution des différents paramètres climatiques que sont les températures, les précipitations et les évènements extrêmes (le gel, les canicules* et l'intensité des précipitations, y compris les sécheresses) ont un impact direct sur des éléments des milieux naturels de l'EMB. L'évolution de ces paramètres modifie en profondeur les paysages et saisons dans l'EMB, ce qui implique des impacts importants sur les différents secteurs d'activités humaines (Figure 2).

Paramètres physiques	Paramètres vivants
réduction de l'enneigement	avancée des saisons
remontée du permafrost	remontée des espèces en altitude
retrait glaciaire	pullulation ou disparition d'espèces
modification des régimes hydriques	

Table 2 : principaux paramètres naturels impactés par le changement climatique dans l'EMB.

Réduction de l'enneigement

La présence de neige au sol pendant une période plus ou moins longue selon le contexte topographique (altitude, exposition, pente...) est une des principales caractéristiques de la montagne. Elle façonne l'environnement par son pouvoir d'isolation pour les organismes vivant au sol et fournit une importante réserve en eau au printemps. La hausse des températures, en hiver mais surtout au printemps, réduit la durée d'enneigement* à travers deux processus principaux : (i) la remontée en altitude de la limite des précipitations tombant sous forme de neige et (ii) les à une fonte accélérée du manteau neigeux au printemps et pendant l'été en haute montagne. Depuis les années 1970 dans les Alpes du nord, la durée du manteau neigeux entre 1100 m et 2500 m s'est réduite de 5 semaines (Klein *et al.* 2016). Plus localement, à Cignana (2150 m) en Vallée d'Aoste, on constate une baisse de 50% de la hauteur de neige moyenne par rapport à la période 1961-1990 (-12% par décennie ; Figure 17).

A l'horizon 2050 dans l'EMB, nous nous attendons à une poursuite de la réduction d'enneigement, notamment en moyenne montagne et dans les versants ensoleillés. Dans la vallée de Chamonix à 1000 m, on risque d'avoir entre 25 et 45 jours d'enneigement en moins par rapport à la période 1973-2013, en fonction du scénario climatique (Figure 18). Plus haut et en versant nord (vers le sommet des Grands Montets), autour de 3000m d'altitude, on s'attend à perdre entre 10 et 15 jours d'enneigement (Figure 18). Le contexte topographique jouera un rôle important donc dans le degré de réduction d'enneigement, bien qu'on s'attende à une réduction généralisée dans l'EMB jusqu'à 3000 m et sur toutes les orientations de pente. Ces prédictions pour l'EMB sont corroborées, en termes d'ordre de grandeur, par des simulations réalisées ailleurs dans les Alpes du nord. Dans le massif de la

Chartreuse notamment, au Col de Porte à 1500 m, Verfaillie *et al.* (2018) prédisent une baisse dans la durée d'enneigement d'entre -26 et -48 jours à l'horizon 2050, pour le scénario médian (RCP 4.5).

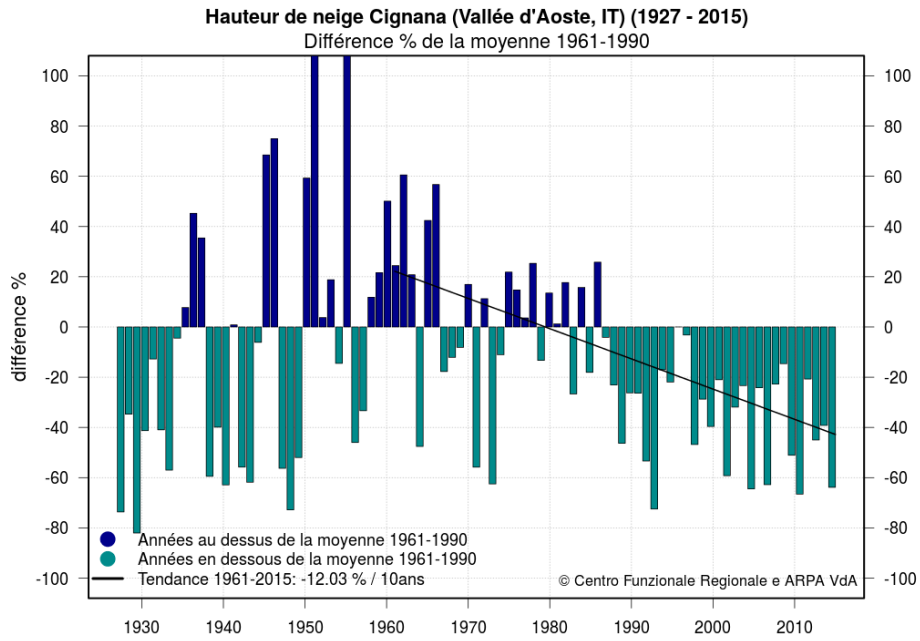


Figure 17. Diminution de la hauteur de neige annuelle à la station météo du lac de Cignana (2150 m) par rapport à la période de référence 1961-1990. On note une réduction marquée de l'enneigement pendant les dernières années ainsi qu'une variabilité interannuelle importante. ***© Centro Funzionale Regione Autonoma Valle d'Aosta e ARPA VdA***

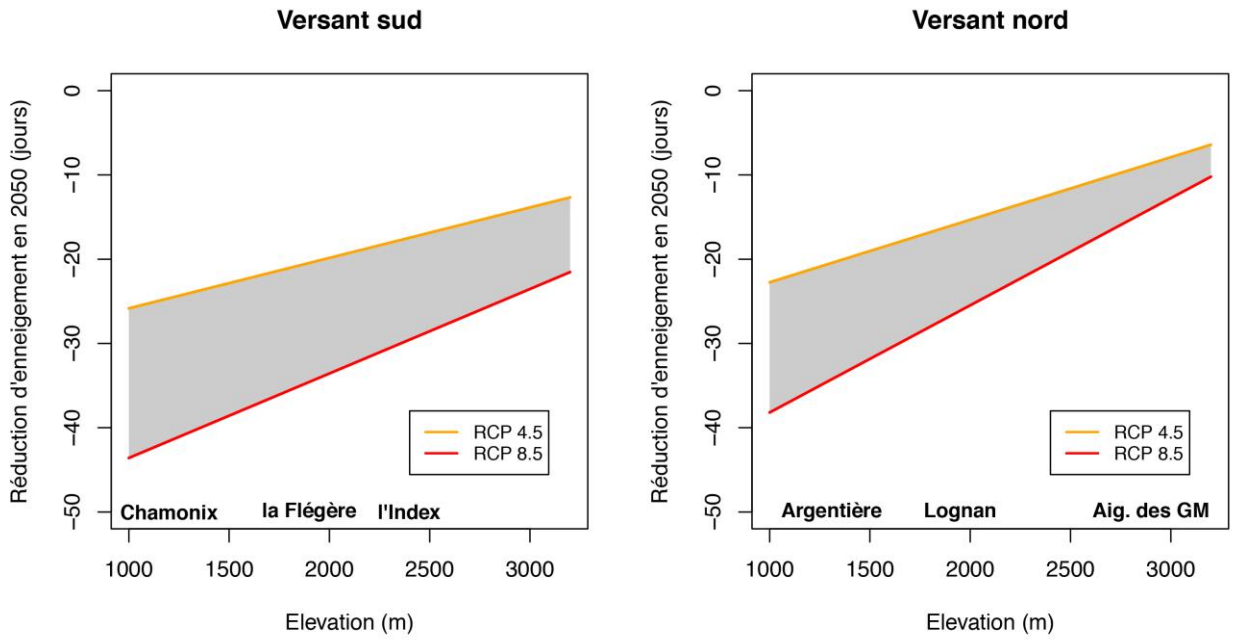


Figure 18. Réduction de la durée d'enneigement entre la période actuelle et 2050 sur les versants sud et nord de la vallée de Chamonix. On remarque que la réduction d'enneigement sera probablement plus importante au-dessous de 2000 m et en versant sud. Par exemple, on s'attend à 4-5 semaines d'enneigement en moins à Chamonix, comparé à seulement 10 à 15 jours de moins au sommet des Grands Montets. La courbe jaune représente la réduction d'enneigement selon le scénario médian et la courbe rouge selon le scénario pessimiste. ***Source : WSL/CHELSA © CREA Mont-Blanc***

Retrait glaciaire

Figure 19. Evolution du glacier d'Argentière (Vallée de Chamonix) entre 1890 et 2015 ***© Amis du Vieux Chamonix (photo de gauche) et CREA Mont-Blanc (photo de droite)***

Les glaciers des Alpes ont perdu 30 à 40% de leur surface et la moitié de leur volume depuis 1850, avec une perte supplémentaire de 10 à 20% de leur volume restant depuis 1980 (Figure 19). Dans les Alpes françaises, les glaciers ont perdu environ 25% de leur surface depuis la fin des années 1960 (Gardent *et al.* 2014). Cette perte a été plus accentuée dans les Alpes du sud (-32% dans les Ecrins par rapport à seulement -10% dans le massif du Mont-Blanc). A noter que ce recul s'est beaucoup accéléré pendant les dernières années, avec par exemple un recul de plus de 400 m de la Mer de Glace depuis 2003 (Vincent *et al.* 2014).

Les prédictions de recul glaciaire dans les Alpes pour les décennies à venir ne sont pas optimistes : les glaciologues suisses anticipent la disparition de 90% des glaciers sur leur territoire d'ici 2090 dans un scénario climatique médian (A1B ; CH2014-Impacts). A plus court terme, 73% des petits glaciers (<0,1 km^2) auront disparu d'ici 2030 en Suisse (Hüss et Fischer 2016). En 2040, la Mer de Glace se sera beaucoup rétrécie et amincie, et aura reculé jusque sous l'arête des Flammes de Pierre (Vincent *et al.* 2014 ; Figure 20). Dans l'EMB de manière générale, les tendances observées et prédites tendent clairement vers une accélération du retrait des glaciers par rapport au passé récent.

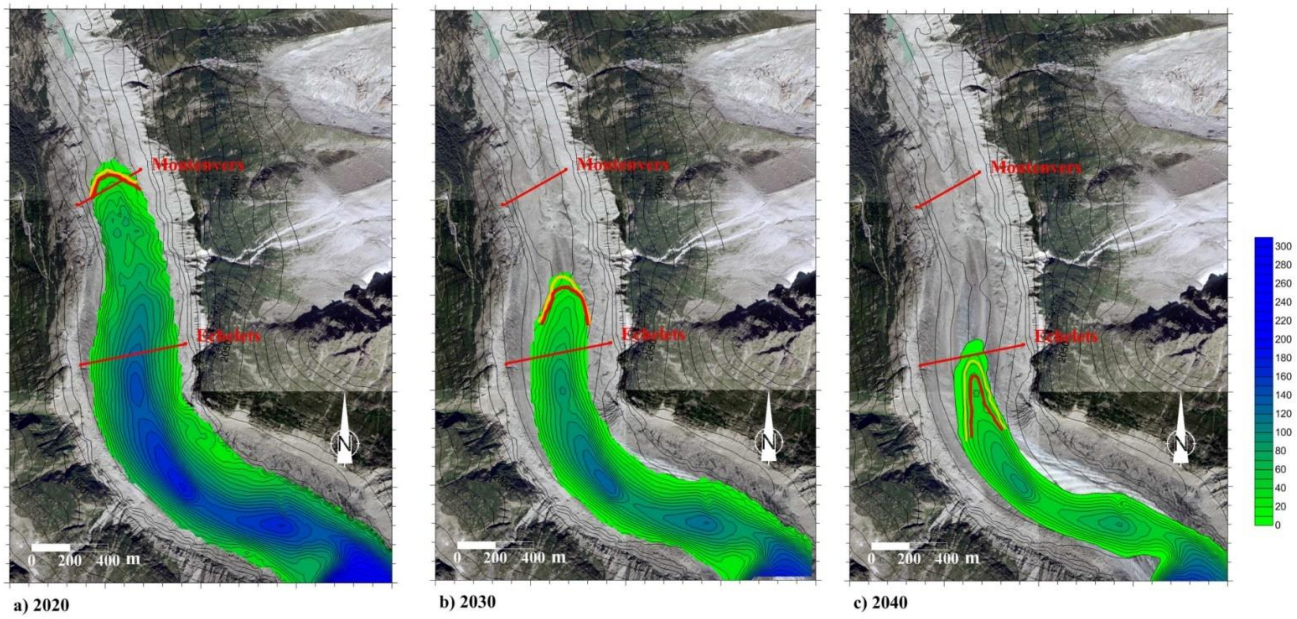


Figure 20. Evolution de la Mer de Glace (Vallée de Chamonix) modélisée en 2020, 2030 et 2040 en fonction des données climatiques et des paramètres physiques du glacier. L'échelle de la couleur correspond à l'épaisseur de glace. On note ainsi un retrait du front de la Mer de Glace mais aussi une rapide réduction de son épaisseur. Les traits rouges sont des repères fixes, le Montenvers et les Echelets. ***Source :* Vincent *et al.* 2014 – IGE*/CNRS*, Grenoble.**

Recul du permafrost

Le permafrost, qui se définit par tout substrat gelé en permanence, joue un rôle capital dans la stabilité des terrains de haute montagne. Bien qu'imperceptible, il couvre une surface importante des parois de montagne. Dans le massif du Mont-Blanc actuellement, le permafrost peut être présent à partir de 2600 m en versant nord et à partir de 3000 m en versant sud, pourtant il ne couvrirait l'ensemble des parois qu'à partir de 3600 m (Magnin *et al.* 2015).

Avec la hausse des températures en été, le permafrost fond, provoquant une plus forte instabilité des terrains rocheux. Durant les 20 dernières années, le permafrost a presque disparu dans les faces sud du massif du Mont-Blanc jusqu'à 3300m et le permafrost d'une température supérieure à -2°C est remonté de 3300m à 3850m. D'ici 2100 il ne devrait plus se trouver dans les faces sud en dessous de 4300 m ou même, d'après les scénarios les plus critiques, totalement disparaitre des faces sud du Mont-Blanc (Magnin *et al.* 2017). La Figure 22 indique la dégradation potentielle du permafrost sur trois sites emblématiques dans le massif du Mont-Blanc. On remarque le dégel attendu au niveau des Grands Montets (3295 m) et de l'Aiguille du Midi (3842 m), ce qui peut déstabiliser ces sites aménagés de téléphériques et fortement fréquentés par les touristes (Magnin *et al.* 2017).

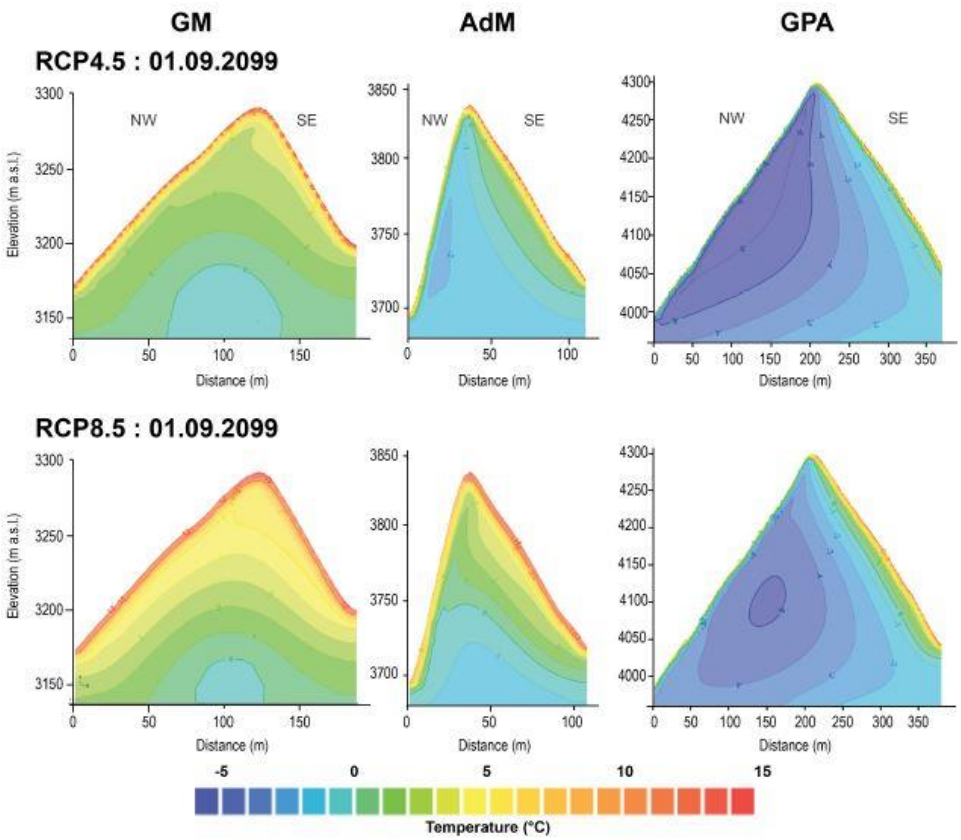


Figure 22. Températures en coupe au mois de septembre 2099 pour trois sites du massif du Mont-Blanc, en fonction des scénarios RCP 4.5 et 8.5 (Aiguille des Grands Montets, Aiguille du Midi et Grand Pilier d'Angle). Ces schémas montrent les températures de surface et en profondeur (en bleu les températures négatives). On note un dégel quasi-complet des Grands Montets (GM) dont les températures de surface sont largement au dessus des 0° dans les deux scénarios. La température de l'Aiguille du Midi (AdM) dépend fortemment du scénario utilisé. Dans le cas du Grand Pilier d'Angle (GPA) à plus de 4000 m d'altitude, le degré de fonte en versant sud-est dépend également fortement du scénario d'émissions. ***Source :*** **Magnin *et al.* 2017, EDYTEM*/CNRS, Chambéry.**

Modification du régime hydrique

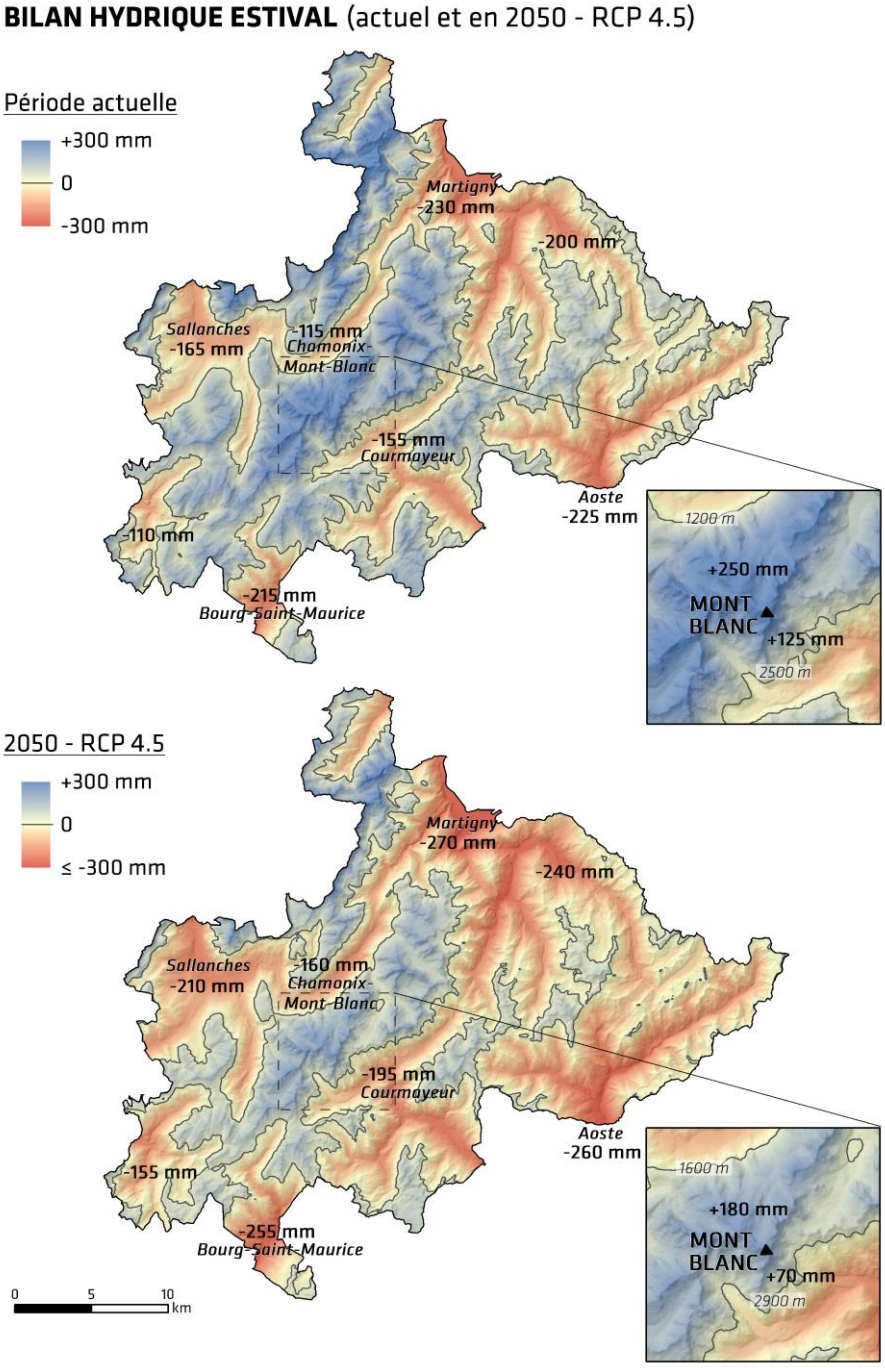


Figure 23. Bilan hydrique estival pour la période actuelle et en 2050. Une valeur de 0 représente un équilibre entre l'eau qui arrive sous forme de précipitations et l'eau qui part sous forme d'évaporation ; les valeurs positives indiquent un excès de de précipitations tandis que les valeurs négatives indiquent un déficit en eau. On anticipe un déficit hydrique de plus en plus important sur le territoire en lien avec une baisse des précipitations estivales et une hausse des températures. On remarque que ce bilan est à équilibre environ 1300 m plus bas sur le versant français du massif du Mont-Blanc par rapport au versant italien, dû à des précipitations plus abondantes sur le côté ouest et également les températures plus fraîches en versant nord. ***Source : WSL/CHELSA © CREA Mont-Blanc***

La hausse des températures associée à une réduction des précipitations provoque des sécheresses estivales plus fréquentes et un déficit en eau des sols. De plus, ce phénomène est aggravé par la réduction de l'enneigement. Ces conditions induisent un stress hydrique plus fréquent pour la végétation pendant leur période annuelle de croissance. Dans l'EMB, les modélisations prévoient un assèchement des sols en altitude en période estivale, avec une remontée de la zone déficitaire en eau de 600 m à 900 m selon le scénario (Figure 23). Dans le scénario médian (RCP 4.5), on s'attend à un déficit hydrique qui s'accentue : une diminution d'environ 40 mm à 60 mm d'eau sur l'ensemble du territoire, avec une baisse légèrement plus marquée en altitude. Ces nouveaux déficits en eau auront donc un impact non seulement sur les villes et cultures en plaine mais également plus haut au niveau des alpages et des stations de ski, avec notamment une capacité réduite de stockage d'eau. Il est important à signaler que ces chiffres sont basés uniquement sur le climat estival (précipitations et évapotranspiration), et ne tiennent ni compte de l'apport en eau issu du manteau neigeux ni des propriétés du sol, notamment la capacité de stockage en eau.

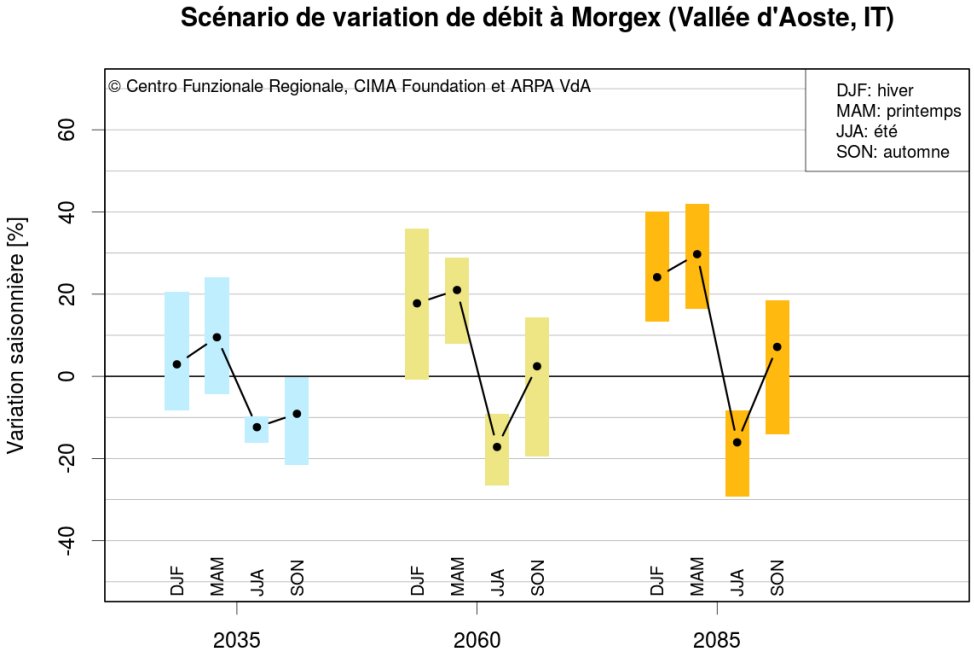


Figure 24. Modification du régime hydrique (débits) sur le côté italien de l'EMB (Morgex, Vallée d'Aoste). Les simulations sont basées sur trois scénarios d'émissions confondus (RCP 2.6, 4.5, 8.5), un modèle climatique (EC-EARTH-RCA4) et un modèle hydrologique qui tient compte de la dynamique glaciaire et nivale. La variation simultanée des températures et des précipitations, ainsi que leurs effets sur la fonte des glaciers et sur la neige mèneront à une augmentation des débits en hiver et au printemps et une réduction des débits en été. ***Source : CIMA Foundation, Centro Funzionale Regione Valle d'Aosta e ARPA Valle d'Aosta***

La modification des températures et des précipitations impactera aussi le régime hydrique et le débit des cours d'eau. La Figure 24 montre l'évolution du débit sur le côté italien de l'EMB (Morgex, Vallée d'Aoste) selon trois scénarios d'émissions, en tenant compte de la dynamique glaciaire et nivale. L'augmentation des températures en hiver et au printemps mènera à une diminution des

précipitations sous forme de neige et donc une augmentation des débits pendant l'hiver. Au contraire, la réduction des précipitations en été se traduira par une baisse des débits estivaux. Ces dynamiques vont interagir avec les processus de fonte des glaciers : la réduction des précipitations estivales pourra être compensée dans la première moitié du siècle par la fonte des glaciers (Figure 24).

5. Évolution des milieux naturels vivants

Remontée en altitude de la faune et la flore

Les paysages de l'EMB sont composées d'espèces qui réagissent chacune différemment au changement climatique. La présence d'une espèce, qu'elle soit dominante (l'épicéa ou le mélèze par exemple) ou patrimoniale (bouquetin, lièvre variable, androsace des Alpes…), sur un territoire dépend, entre autres, des conditions climatiques optimales pour son développement (Figure 25). Une des stratégies d'adaptation de l'ensemble des espèces est de monter en altitude pour retrouver les conditions climatiques idéales pour leur développement. Chaque espèce a cependant ses exigences. Toutes les espèces ne migrent donc pas à la même vitesse et toutes ne réagissent pas de la même manière aux canicules*, sécheresses, recul de l'enneigement, etc., ce qui recompose les paysages.

Avec le réchauffement climatique, on observe ces dernières décennies une montée en altitude de la plupart des espèces, de 30 à 100m par décade pour les animaux. Chez les plantes forestières une remontée d'environ 30m a été observée dans les Alpes au cours du 20ème siècle (Lenoir *et al.* 2008). Monter en altitude implique cependant une perte de surface disponible étant donné la forme « en pointe » des montagnes. De manière générale, les espèces adaptées aux conditions plus chaudes et venant de plus basse altitude gagneront du terrain au détriment des espèces alpines adaptées à des conditions froides mais mauvaises compétitrices. Ceci dit, la fonte des névés et des glaciers pourrait temporiser cette perte en offrant de nouveaux espaces disponibles dans des contextes de haute montagne.

Avancée du printemps

Pour survivre au changement climatique, les espèces ont le choix de migrer pour suivre les conditions climatiques qui leur conviennent, ou bien de changer leur physiologie ou leur comportement saisonnier pour s'adapter aux nouvelles conditions dans leur environnement actuel. On observe déjà une tendance générale à l'avancée des évènements saisonniers au cours des 50 dernières années de 2 à 5 jours par décennie pour les plantes et animaux terrestres. Par exemple, l'arrivée des oiseaux migrateurs est avancée au printemps d'environ 15 jours en 30 ans, ou bien la ponte des amphibiens comme le crapaud commun est plus précoce (un mois plus tôt qu'il y a 25 ans sur un site suivi à 1850m en Suisse ; Vittoz *et al.* 2011).

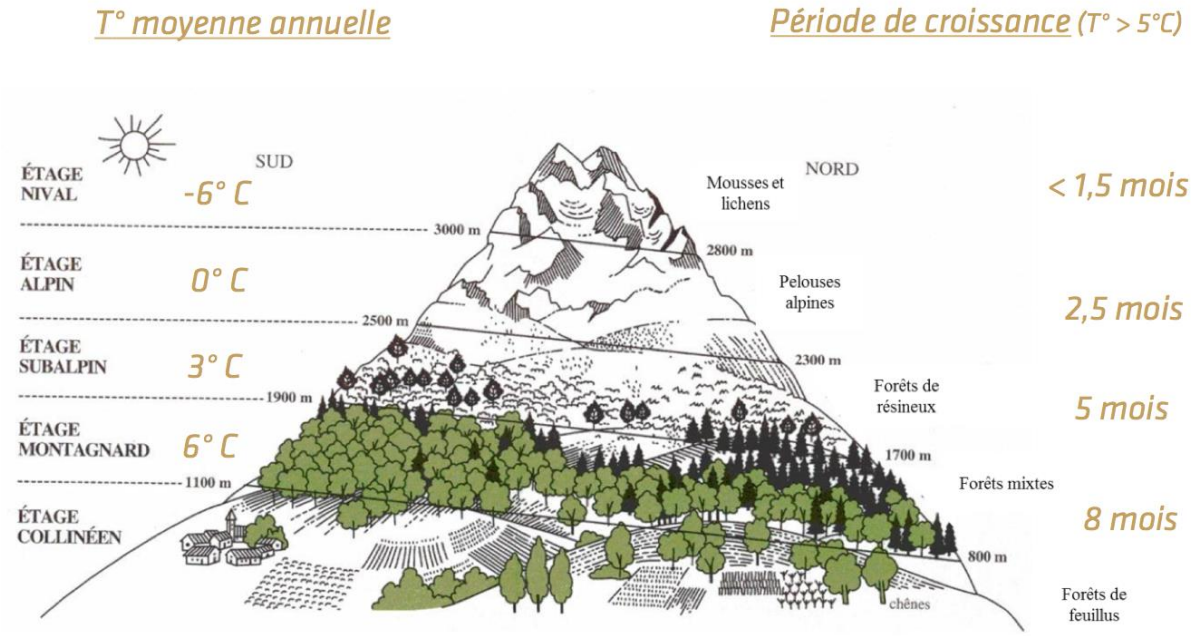


Figure 25. Conditions climatiques et période propice au développement de la végétation en fonction de l'altitude. Les températures à gauche représentent la température annuelle moyenne par altitude. Pour les arbres, par exemple, il faut en moyenne une température supérieure à 5°C pour que la photosynthèse et donc la croissance ait lieu. Plus on monte en altitude plus le nombre de jours par an où la température est supérieure à 5°C se réduit ; c'est la durée de cette période, dite « de végétation » qui est représentée à droite. Pour croître, les arbres dit « pionniers » ont besoin d'une durée de saison de végétation d'au moins trois mois (Paulsen et Körner 2014). Avec la hausse des températures printanières et automnales, cette durée augmente, ce qui permet aux arbres et aux arbustes de monter en altitude. ***© adpatation CREA Mont-Blanc***

Pour la végétation, la hausse des températures printanières couplée avec la fonte plus précoce du manteau neigeux permet, pour la majorité des espèces, un développement également plus précoce (Figure 26). De ce fait, la saison de végétation est plus longue et la productivité est meilleure. La durée de la saison de végétation actuelle dure entre deux à quatre semaines plus longtemps par rapport aux années 1960 (CH2018). Cependant, pour certaines espèces cette précocité n'est pas toujours un avantage. Pour la myrtille par exemple, très sensible au gel, un démarrage plus précoce augmente le risque de dommages liés aux évènements plus fréquents de gel tardif* au printemps.

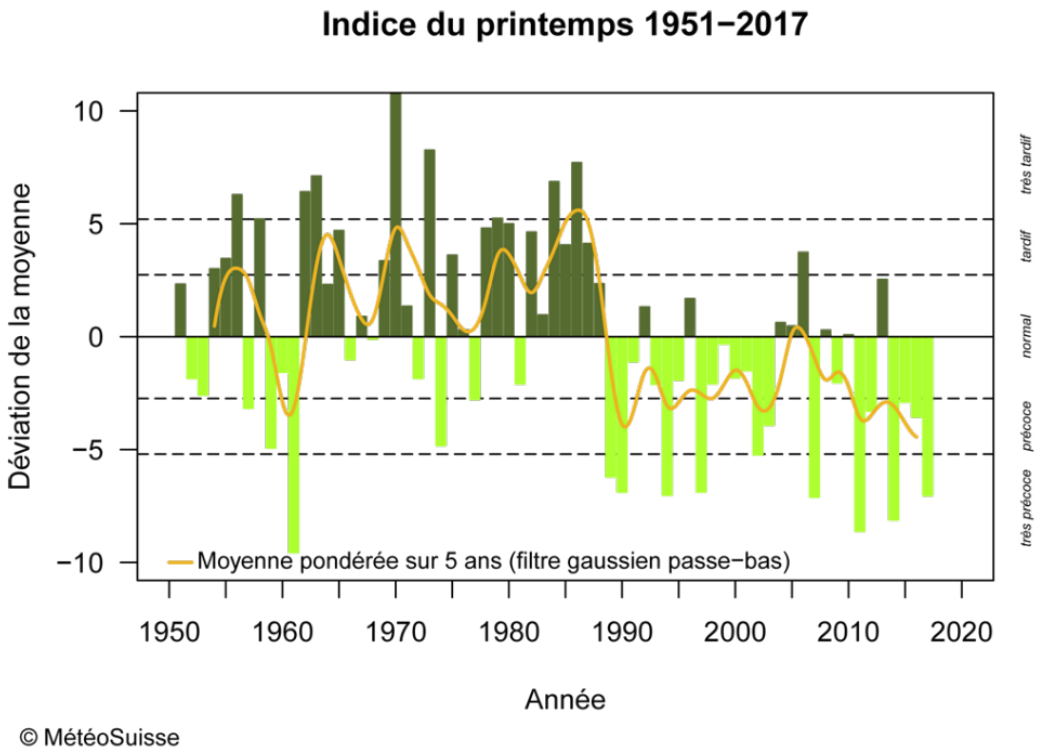


Figure 26. Evolution des dates de débourrement (éclosion des bourgeons) de la végétation en Suisse depuis 1951. On note une avancée sensible du printemps, de plus en plus au-delà de 5 jours d'avance par rapport à la moyenne ***©MétéoSuisse***

Toutes les espèces ne répondent donc pas de la même façon au changement climatique. Il s'en suit un risque important de désynchronisation au sein de l'écosystème. Pour les grands herbivores comme le bouquetin, la date de mise bas ne dépend pas des conditions printanières mais plutôt de la date de l'accouplement qui a lieu à l'automne. Les années à hiver et/ou printemps chaud, il en résulte un décalage entre le pic de production de la végétation et les besoins en herbe des bouquetins qui sont maximum au moment du sevrage des jeunes. Ainsi une mortalité plus importante des jeunes bouquetins est observée dans le Parc National du Grand Paradis les années aux printemps précoces (Pettorelli *et al.* 2007).

Pullulation et disparition d'espèces

La remontée en altitude des espèces et des saisons de croissance plus longues contribuent à un "verdissement" des Alpes, avec une couverture et une diversité végétale de plus en plus importante en haute montagne (Carlson *et al.* 2017 ; Steinbauer *et al.* 2018). Croisé avec le recul des glaciers et la fonte des névés, on peut s'attendre à une transformation des paysages de haute montagne, même dans le massif du Mont-Blanc, vers des milieux de plus en plus rocheux et végétalisés.

Chez les animaux, notamment ceux qui ne régulent pas la température de leur corps (parasites, insectes, amphibiens, reptiles), les variations de température ont un impact direct sur leur physiologie et leur capacité de reproduction. C'est le cas du scolyte, un petit insecte de l'ordre des coléoptères qui s'immisce sous l'écorce des épicéas et se nourrit du bois tendre, provoquant à terme la mort de l'arbre. Or, les scolytes, comme de nombreux parasites (notamment en milieu agricole) se développent beaucoup plus vite avec la hausse des températures (3 fois plus vite à 30°C qu'à 15°C pour le scolyte), et menacent de faire une génération supplémentaire pendant la saison estivale (CH2014-Impacts).

La pullulation de certaines espèces en fragilise d'autres, avec pour conséquence des modifications profondes de l'écosystème. L'épicéa, dominant aujourd'hui en versant nord de l'EMB, est par exemple très vulnérable aux parasites (scolyte) et aux sècheresses estivales. L'opportunité que constitue le changement climatique d'augmenter son aire de répartition en montant en altitude est donc contrecarrée par ces vulnérabilités. On prévoit ainsi une fuite vers le haut de l'épicéa sur les pentes de l'EMB.

Par ailleurs, l'abondance de certaines espèces patrimoniales typiquement alpines sera directement mise à mal par le changement climatique jusqu'à parfois leur possible disparition. C'est le cas surtout des spécialistes des environnements froids et enneigés dites « arctico-alpines ». Dans le scénario pessimiste, le lagopède alpin (Figure 27A) risque par exemple de perdre environ 60% de son habitat favorable dans le massif du Mont-Blanc d'ici 2050, et plus de 90% à l'horizon 2090. D'autres milieux à la fois riches en espèces et fortement dépendant des températures et de l'enneigement (Figure 27B-C), comme les combes à neige* et les zones humides, sont particulièrement menacés par les changements climatiques en cours. Ces prévisions seront approfondies dans le rapport suivant sur les impacts sectoriels.

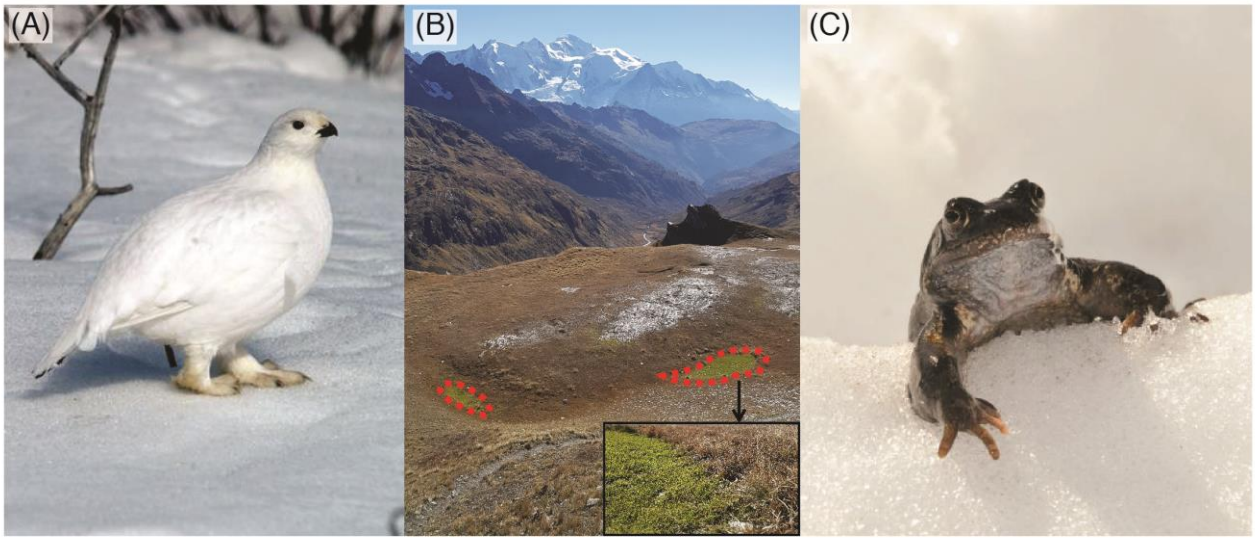


Figure 27. Des espèces particulièrement menacées par les changements climatiques en cours dans l'EMB : (A) le lagopède alpin (*Lagopus mutus helveticus*), (B) les plantes de combe à neige* et (C) la grenouille rousse (*Rana temporaria*) ainsi que la faune et la flore des zones humides plus généralement. ***© CREA Mont-Blanc***

Annexe 1 : Choix et traitement des données climatiques utilisées

Parmi les différents produits et données disponibles, nous avons fait le choix d'utiliser deux sources de données différentes : 1) les données CHELSA (Karger *et al.* 2017) pour cartographier l'évolution du climat à l'échelle de l'EMB, et 2) les données de station de Météo Suisse (CH2011) pour quantifier l'évolution de certains paramètres climatiques nécessitant des observations journalières. Nous expliquerons par la suite la méthodologie que nous avons utilisée pour produire les analyses présentées dans ce rapport.

Données spatiales CHELSA

Disponible depuis 2017, CHELSA (Climatologies at High resolution for the Earth's Land Surface Areas ; Karger *et al.* 2017) est une base de données climatiques dérivée du modèle physique ERA-Interim, développé et entretenu par le European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Le projet CHELSA répond au besoin récurrent des scientifiques en écologie et en sciences naturelles d'avoir des données climatiques à haute résolution spatiale pour les périodes actuelles et futures. L'algorithme, développé par D. Karger au WSL à Zurich, prend le forçage climatique à grande échelle (80 x 80 km) d'ERA-Interim pour estimer avec une approche statistique de « downscaling » les températures et précipitations à une résolution de 4 km x 4 km, et ceci pour la surface terrestre du globe. Le modèle a été conçu pour être utilisé dans des territoires de montagne, et tient compte des vents dominants et des effets orographiques dans l'estimation des précipitations. Le produit de base consiste donc à des températures et précipitations mensuelles, sur une maille de 4 km.

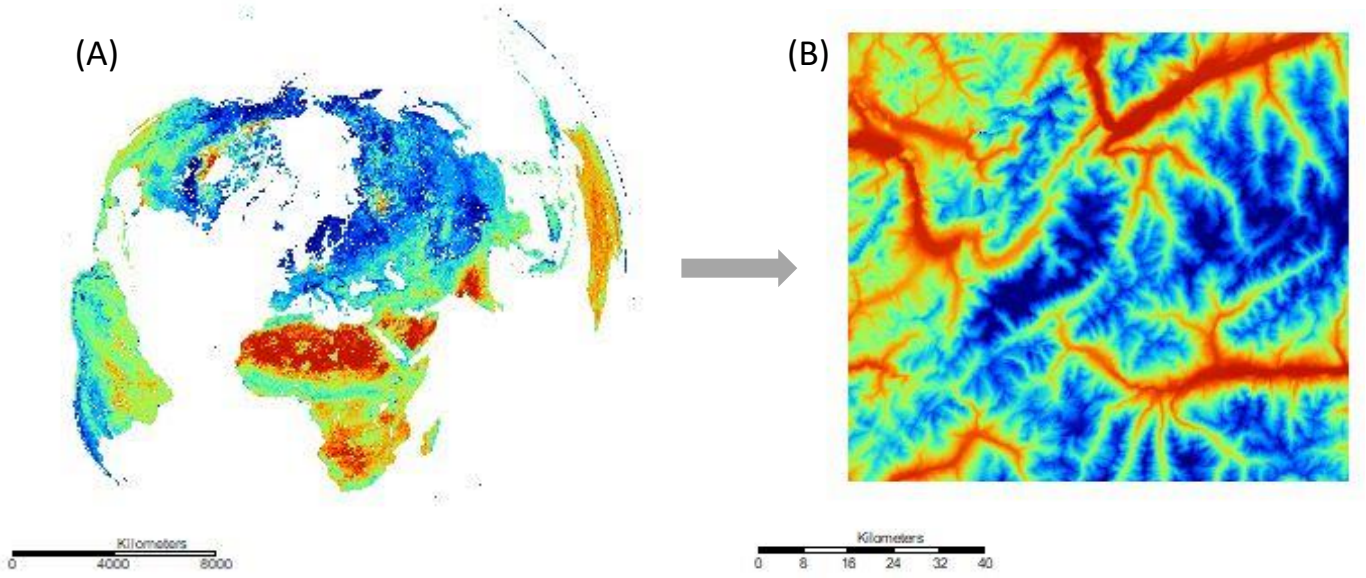


Figure A1. (A) Exemple des données brutes de CHELSA (températures), disponibles à l'échelle mondiale à une résolution de 4 x 4 km. (B) La démarche méthodologique a consisté à adapter les données brutes au relief de l'EMB, en tenant compte de l'altitude et l'ensoleillement. La résultion des cartes des températures et des précipitations produites pour l'EMB est de 25 x 25 m.

La période actuelle de référence pour CHELSA court de 1979 au 2013. Une climatologie a été produite pour cette période par Karger *et al.* (2017), qui met à disposition les températures et les précipitations moyennes pour la période 1979-2013 par mois. Dans ce rapport par exemple, la carte des températures estivales est donc la moyenne des mois juin-juillet-août issus de cette climatologie. Le traitement réalisé dans le cadre de ce projet a consisté à passer de la résolution initiale de 4 x 4 km à la topographie de l'EMB, c'est-à-dire une maille de 25 m x 25 m (Figure A1). Cette descente d'échelle spatiale a été faite en utilisant un algorithme de « geographic weighted regression » pour prédire les températures et les précipitations locales en fonction de l'altitude.

Concernant les températures, une manipulation supplémentaire a consisté de passer des températures de l'air aux températures de surface, qui sont plus représentatives de l'environnement alpin vécu par l'homme ainsi que par la faune et la flore. Pour cela, il a fallu calculer le bilan mensuel des radiations solaires pour l'EMB, en tenant compte du relief et de la nébulosité moyenne estimée par le satellite MODIS (https://www.earthenv.org/cloud). Ensuite le bilan radiatif a été croisé avec la carte des températures de l'air en utilisant l'outil « Land Surface Temperature » dans le logicel SAGA GIS. L'algorithme est détaillé dans Boehner et Antonic (2009). Nous avons utilisé cette méthodologie pour estimer les températures mensuelles minimales, maximales et moyennes pour chaque mois.

Pour les scénarios d'émissions futurs, nous avons choisi le scénario médian (RCP 4.5) et le scénario pessimiste (RCP 8.5) parmi les quatre scénarios disponibles (Figure A3). Nous avons ensuite sélectionné cinq modèles climatiques du cinquième rapport du GIEC (CMIP5) qui sont représentatifs de la variation de l'ensemble des nombreux modèles disponibles (plus d'explications ici : http://chelsa-climate.org/future/). Pour chaque scénario et pour chaque mois à l'horizon 2050, nous avons fait une moyenne des résultats des cinq modèles pour estimer les températures et les précipitations. Ensuite nous avons appliqué la même méthode de descente d'échelle spatiale décrite précédemment.

Plusieurs modules ont été développés dans le logiciel SAGA GIS pour estimer à partir des données CHELSA différents paramètres environnementaux : évapotranspiration, humidité du sol, durée d'enneigement et durée de la saison végétative. Selon l'avis de D. Karger, ces outils sont « research grade » et en cours de validation. Néanmoins, les algorithmes sont basés sur des publications scientifiques existantes et constituent des outils puissants pour estimer des paramètres à fort intérêt dans un territoire tel que l'EMB.

La limite principale des données CHELSA étaient la résolution temporelle mensuelle, qui ne permettait pas le calcul d'indice climatique nécessitant les observations journalières (jours de gel, canicule, etc. ; voir l'annexe 2).

Données temporelles de station : CH2011

Les scénarios CH2011 (CH2011) sont basés sur des analyses statistiques de simulations de modèles climatiques globaux (GCM) et régionaux (RCM) axés sur les changements de température (T) et de précipitation (P). En particulier, les données disponibles sont basées sur la combinaison de 8 GCM et 14 RCM développé dans différentes institutions et utilisé dans le projet européen ENSEMBLES (van der Linden & Mitchell, 2009). Seulement une partie de tous les combinaisons GCM/RCM ont été simulées, produisant un total de 20 simulations. Pour chaque simulation, trois scénarios d'émission sont considérés : deux scénarios de non-intervention (A1B et A2) qui montrent une croissance future des émissions de gaz à effet de serre, et un scénario d'intervention (RCP3PD) qui donne une stabilisation de concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre d'ici la fin du siècle.

Les résultats des projections sont donnés pour trois intervalles de 30 ans : 2020-2049, 2045-2074 et 2070-2099. Ces périodes sont indiquées par l'année médiane correspondante à la fenêtre temporelle (2035, 2060 et 2085). La période de référence pour le calcul des écarts est 1980-2009. Pour le projet Adapt Mont-Blanc, parmi les nombreux produits de CH2011, nous avons choisi d'utiliser les projections « *daily-local* », un produit journalier qui comprend les changements dans le cycle moyen des températures et des précipitations à l'échelle locale, notamment, sur les points correspondant aux stations Météo Suisses.

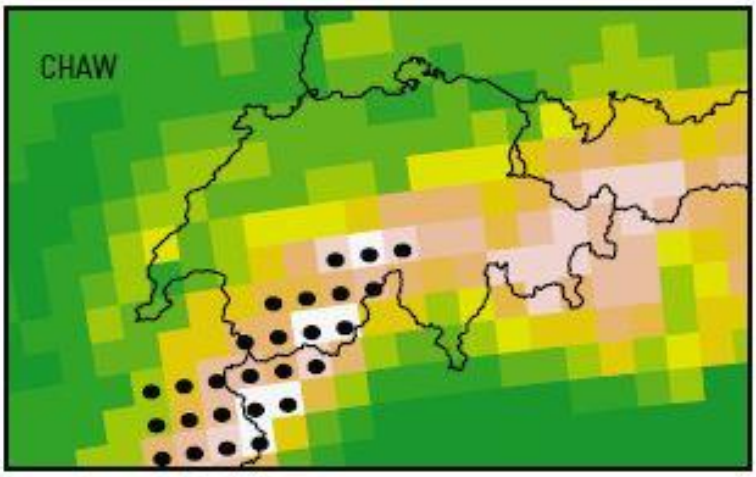


Figure A2. Localisation des stations de Météo Suisse dans les Alpes suisses occidentales (CHAW). Les données utilisées dans ce rapport sont issues d'une sélection des sites chevauchant l'EMB.

Aux fins du projet le produit daily-local est idéal car il permet le calcul de nombreux indices climatiques (voir l'annexe 2) dans différentes bandes d'altitude en fournissant la base pour les études d'impact et adaptation prévues dans le cadre d'AdaPT Mont-Blanc. Le tableau A1 montre les caractéristiques des stations météo sélectionnées pour le calcul des indices climatiques. Ils ont été choisis en fonction de leur proximité à l'Espace Mont-Blanc (si possible) et organisées en trois bandes d'altitude : fond de la vallée (400-600m), moyenne montagne (1100-1800m) et haute montagne (2500-3500m).

ID	Altitude	latN	lonE	T	P	Bande d'altitude
VAZ	453	46.13	7.03	yes	yes	Fond V.
SIO	482	46.22	7.33	yes	yes	Fond V.
VIS	639	46.3	7.85	yes	yes	Fond V.
CTA	1130	46.07	6.95	no	yes	Moyenne Mont.
MVE	1427	46.3	7.47	yes	no	Moyenne Mont.
ZER	1638	46.03	7.75	yes	yes	Moyenne Mont.
BSP	1664	45.95	7.22	no	yes	Moyenne Mont.
EVO	1825	46.12	7.52	yes	no	Moyenne Mont.
GSB	2472	45.87	7.17	yes	yes	Haute Mont.
DIA	2966	46.33	7.2	yes	no	Haute Mont.
GOR	3130	45.98	7.78	yes	no	Haute Mont.
COV	3305	46.42	9.82	no	yes	Haute Mont.
PRO	3480	45.93	7.7	yes	no	Haute Mont.

Table A1 : caractéristiques des stations météo suisses qui ont été utilisées pour calculer les indices de changement climatique. ***Source : C2SM © ARPA VdA***

Un point sur les scénarios climatiques utilisés

Comme évoqué précédemment, nous nous sommes basés sur deux jeux de données climatiques différents dans l'élaboration de ce rapport : CH2011 et CHELSA, afin de profiter de la haute résolution temporelle (CH2011) d'un côté et de la haute résolution spatiale (CHELSA) de l'autre. Ce choix nécessite un certain nombre de précisions techniques qui sont présentées dans le tableau A2. Comme le montre la Figure A3, les différents scénarios d'émission ne sont ni parfaitement équivalents ni directement comparables. Par simplicité, on retiendra que le scénario A2 qui est plus près du RCP 8.5, le scénario A1B qui est intermédiaire entre RCP 8.5 et 4.5, et le scénario RCP 3PD qui est nettement plus optimiste que le RCP 4.5 (Figure A3).

Scénario d'émission	Famille	Année de publication	Période de référence	Périodes de prédiction	Réchauffement prédit en 2100 (°C)
RCP3D	SRES	2001	1980-2009	2035 ; 2060 ; 2085	1°
A1B	SRES	2001	1980-2009	2035 ; 2060 ; 2085	2,8°
A2	SRES	2001	1980-2009	2035 ; 2060 ; 2085	3,6°
RCP 4.5	RCP	2014	1973-2013	2030 ; 2050 ; 2070 ; 2100	1,8°
RCP 8.5	RCP	2014	1973-2013	2030 ; 2050 ; 2070 ; 2100	3,7°

Table A2 : caractéristiques des différents scénarios climatiques utilisés dans le projet. SRES = « Special Report on Emissions Scénarios » ; RCP* = « Representative Concentration Pathway ».

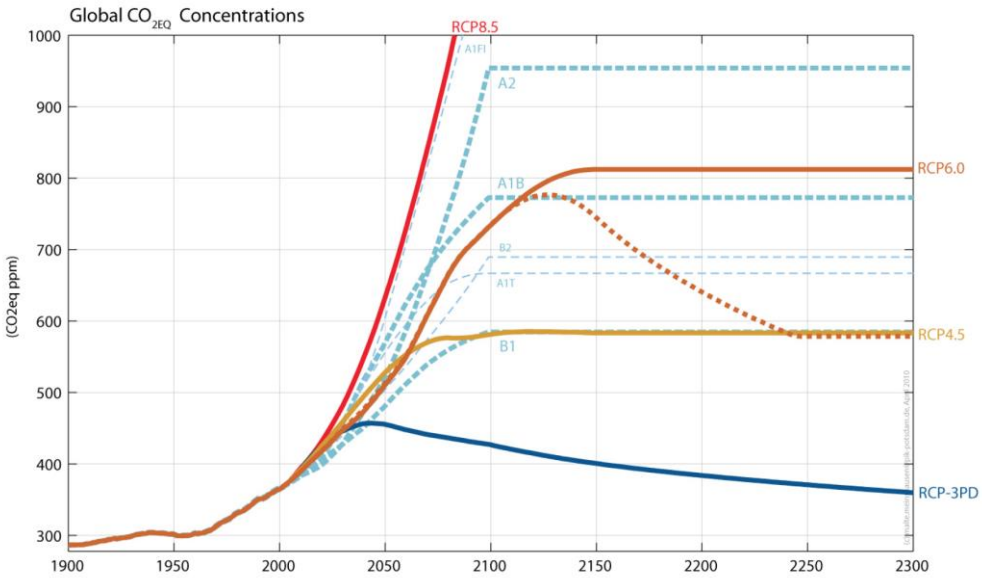


Figure A3. Comparaison des différents scénarios d'émissions du CO_2, qui met en correspondance les SRES (RCP3PD, B1, B2, A1T, B2, A1B, A2, A1F1) avec les RCP* (2.6, 4.5, 6.0, 8.5 ; Table A2).
Source : GIEC, https://unfccc.int/sites/default/files/ipcc_van_ypersele.pdf

Annexe 2 : Liste des indices climatiques à suivre

Le tableau A3 liste les indicateurs climatiques identifiés dans la littérature scientifique que nous avons identifié comme important à suivre dans l'EMB dans les années à venir. Tous ces indices peuvent être calculés pour les stations météo du tableau A1, à partir des données CH2011, et ceci pour les trois périodes futures (2035, 2060, 2085) et pour les trois scénarios d'émission (A1B, A2, RCP3PD). Nous avons déjà fait une sélection d'indices dans le cadre de ce rapport, et nous attendons les retours des autres membres du projet pour savoir quels indices il faudra mettre en avant pour le rapport suivant sur les impacts sectoriels du changement climatique dans l'EMB.

Secteur	Index	Description	Domaine temporel	Données necessaires	Référence
General	Jours d'été*	Nombre de jours par an avec Tx > 25°C	Annuel/ mensuel	Tx daily	http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml CH2011 (2011)
	Nuits tropicales	Nombre de jours par an avec Tn > 20°C	Annuel/ mensuel	Tn daily	
	Jours de gel	Nombre de jours par an avec Tn < 0°C	Annuel/ saisonnier	Tn daily	
	Jours de glace	Nombre de jours par an avec Tx < 0°C	Annuel/ saisonnier	Tx daily	
	Durée de la saison de végétation	N jours entre premiers 6 jours consecutifs avec Tm >5°C et premiers 6 jours consecutifs avec Tm <5°C après le 1er Juillet	Annuel	Tm daily	
Extrêmes climatiques	Indice de la durée caniculaire	Somme des cas avec au moin 6 jours consécutifs avec Tx > 90eme percentile	Annuel/ saisonnier	Tx daily	http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml CH2011 (2011)
	Indice de la durée des périodes froides	Somme des cas avec au moin 6 jours consécutifs avec Tn < 10eme percentile	Annuel/ saisonnier	Tn daily	
	Nombre de nuits froides	Pourcentage de nuits avec Tn < 10th percentile	Annuel/ saisonnier	Tn daily	
	Durée maximale de sécheresse	Le nombre maximal de jour consécutifs avec P < 1mm	Annuel/ saisonnier	P daily	
	Précipitations intenses maximales	Précipitation cumulée maximale pendant 5 jours consécutifs	Annuel/ saisonnier		
Agriculture	Standardized Precipitation-Evapotranspiration* Index	Calcul de bilan hydrique	Saisonnier/ mensuel	Tm daily, P daily	Begueria et al., 2014
	Indice de température et d'humidité	Calculé comme en Thom (1958), l'index exprime le stress pour l'élevage	Annuel/ mensuel	Tn daily, Tm daily, P daily	Thom, 1958 Johnson, 1994

	Indice de Huglin	Une somme thermique adaptée pour les vignobles	Annuel/ Mensuel	Tn, Tx, Tm, P daily	Huglin, 1978
Energie	Degrés jours de chauffage	Somme annuelle des différences entre Tm et une Tref (20°C), en-dessous de laquelle le chauffage devient nécessaire	Annuel	Tm	Christenson et al., 2006
	Degrés jours de refroidissement	Somme annuelle des différences entre Tm et une Tref de (18.3*C), au-dessus de laquelle le refroidissement des locaux devient nécessaire	Annuel	Tm daily	
Santé	Concentration maximale de pollens	Modèle phénologique pour les pollens	Annuel	Tm daily, P daily	Hufkens et al., 2018

Table A3 : liste complète des indicateurs climatiques à suivre dans l'EMB dans les décennies à venir. Tn = température minimale ; Tm = température moyenne ; Tx = température maximale ; Tref = température de référence ; P = précipitation.

Annexe 3 : Bibliographie

Beguería S., Vicente-Serrano SM, Reig F, Latorre B. 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology, 34*(10), 3001-3023.

Boehner, J., Antonic, O. (2009): Land-surface parameters specific to topo-climatology. *Developments in Soil Science, 33,* 195-226.

Carlson, B. Z., Corona, M. C., Dentant, C., Bonet, R., Thuiller, W., & Choler, P. (2017). Observed long-term greening of alpine vegetation—a case study in the French Alps. *Environmental Research Letters, 12*(11).

CH2011 (2011), Swiss Climate Change Scénarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7.

CH2014-IMPACTS. Toward quantitative scénarios of climate change impacts in Switzerland. OCCR, FOEN, Meteoswiss, C2SM, Agroscope, Proclim, 2014, 136.

CH2018 (2018), CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0

Christenson, M., H. Manz, et al. (2006). Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. *Energy Conversion and Management, 47*, 671–686.

Davis, B. A., Brewer, S., Stevenson, A. C., & Guiot, J. (2003). The temperature of Europe during the Holocene reconstructed from pollen data. *Quaternary Science Reviews*, 22, 1701-1716.

Della-Marta, P. M., Haylock, M. R., Luterbacher, J., & Wanner, H. (2007). Doubled length of western European summer heat waves since 1880. *Journal of Geophysical Research, 112*.

Durand, Y., Laternser, M., Giraud, G., Etchevers, P., Lesaffre, L., et Mérindol, L. (2009). Reanalysis of 44 years of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology, 48,* 29–449.

Gardent, M., Rabatel, A., Dedieu, J. P., & Deline, P. (2014). Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change, 120,* 24-37.

GIEC (IPCC), 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Gibel, A.-L. "Evolution du climat passé en France metropolitaine depuis les années 50. Rencontres Nationales de l'Agrométérologie, janvier 2015. Méteo France.

Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—a review. *Science of the Total Environment, 493,* 1138-1151.

Hufkens K., Basler D., Milliman T., Melaas E.K., Richardson A.D. (2018). An integrated phenology modelling framework in Rjacob. *Methods in Ecology and Evolution, 9,* 1276–1285.

Huglin, P. (1978). Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes rendus des séances.*

Hüss, M., & Fischer, M. (2016). Sensitivity of very small glaciers in the Swiss Alps to future climate change. *Frontiers in Earth Science, 4,* 34.

Johnson, H. D. (1994). Animal Physiology. In Griffiths, J. F. (ed.) Handbook of Agricultural Meteorology, 256–263. New York: Oxford University Press.

Karger, D. N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R. W., Zimmermann, N.E., Linder, H.P. & Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the earth's land surface areas. *Scientific Data, 4,* 170-122.

Klein, G., Rebetez, M., Rixen, C., & Vitasse, Y. (2018). Unchanged risk of frost exposure for subalpine and alpine plants after snowmelt in Switzerland despite climate warming. *International Journal of Biometeorology, 62*(9), 1755-1762.

Klein, G., Vitasse, Y., Rixen, C., Marty, C., & Rebetez, M. (2016). Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset. *Climatic Change*, *139*, 637-649.

Paulsen, J., & Körner, C. (2014). A climate-based model to predict potential treeline position around the globe. *Alpine Botany, 124*(1), 1-12.

Kress, A., Hangartner, S., Bugmann, H., Büntgen, U., Frank, D. C., Leuenberger, M. & Saurer, M. (2014). Swiss tree rings reveal warm and wet summers during medieval times. *Geophysical Research Letters*, *41*(5), 1732-1737.

Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., & Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science, 320*(5884), 1768-1771.

Magnin, F., Brenning, A., Bodin, X., Deline, P., & Ravanel, L. (2015). Statistical modelling of rock wall permafrost distribution: application to the Mont Blanc massif. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, *20*.

Magnin, F., Josnin, J. Y., Ravanel, L., Pergaud, J., Pohl, B., & Deline, P. (2017). Modelling rock wall permafrost degradation in the Mont Blanc massif from the LIA to the end of the 21st century. *The Cryosphere*, *11*(4), 1813.

Palazzi, E., Mortarini, L., Terzago, S., & von Hardenberg, J. (2018). Elevation-dependent warming in global climate model simulations at high spatial resolution. *Climate Dynamics*, 1-18.

Pettorelli N., Pelletier F., Von Hardenberg A., Festa-Bianchet M. & Côté S.D. 2007. Early onset of vegetation growth vs. Rapid green-up: impacts on juvenile mountain ungulates. *Ecology*, *88*.

Scherrer, S. C., Ceppi, P., Croci-Maspoli, M., & Appenzeller, C. (2012). Snow-albedo feedback and Swiss spring temperature trends. *Theoretical and Applied Climatology*, *110*(4), 509-516.

GIEC 2018, SR1.5 : Summary for Policymakers. In: *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.

Steinbauer, M. J., Grytnes, J. A., Jurasinski, G., Kulonen, A., Lenoir, J., Pauli, H. & Bjorkman, A. D. (2018). Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature*, *556*(7700), 231.

Thom, E. C. (1958). The discomfort index. *Weatherwise*, *12*, 57–60.

Van der Linden, P., and J. F. B. Mitchell, 2009: ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project, Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 160 pp.

Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., & Morin, S. (2018). Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. *The Cryosphere, 12*(4), 1249-1271.

Vincent, C., Harter, M., Gilbert, A., Berthier, E., & Six, D. (2014). Future fluctuations of Mer de Glace, French Alps, assessed using a parameterized model calibrated with past thickness changes. *Annals of Glaciology*, *55*(66), 15-24.

Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., & Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agricultural and Forest Meteorology*, *248*, 60-69.

Vittoz, P., Cherix, D., Gonseth, Y., Lubini, V., Maggini, R., Zbinden, N., & Zumbach, S. (2013). Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: A review. *Journal for Nature Conservation*, *21*(3), 154-162.

Annexe 4 : Définitions et acronymes

(définitions signalées par un * dans le texte)

Albédo : Proportion de radiation solaire qui est réfléchie par la surface de la terre (e.g. la neige, blanche, a un albédo plus élevé que la roche, plus sombre)

Canicule : réchauffement important de l'air, ou invasion d'air très chaud sur un vaste territoire ; généralement elle dure de quelques jours à quelques semaines (Organisation Mondiale de Météorologie)

CHELSA : Base de données mondiale qui met à disposition des cartes de paramètres climatiques à haute résolution spatiale (maille de 4km) ; CHELSA = Climatologies at High resolution for Earth's Land Surface Areas - http://chelsa-climate.org/

CH2011 : Données climatiques journalières pour des stations en Suisse, disponibles pour différents scénarios jusqu'à 2100 – http://data.c2sm.ethz.ch/dataset/CH2011plus/seasonal_regional/

Combe à neige : milieu alpin caractérisé par une durée d'enneigement* longue et une flore spécifique capable de profiter d'une saison de végétation* extrêmement courte

CNRS : Centre National [français] de la Recherche Scientifique

Durée d'enneigement : Nombre de jours dans une année hydrologique (de début septembre à fin août) avec une présence de neige au sol

EDYTEM : Environnements, Dynamiques et Territoires de Montagne – laboratoire de recherche spécialisé dans les géosciences et sciences humaines et sociales à Chambéry, FR

EMB : Espace Mont Blanc - http://www.espace-mont-blanc.com/

Evapotranspiration : Quantité d'eau transférée vers l'atmosphère par l'évaporation et par la transpiration des plantes

Gradient d'altitude : Variation altitudinale qui correspond à des variations climatiques (e.g. baisse des températures, augmentation des précipitations et de la nébulosité en montant)

Gaz à effet de serre : Composants gazeux qui contribuent à l'effet de serre à l'échelle planétaire (vapeur d'eau, carbone dioxyde, méthane …)

Gelée tardive : Evènements de gel qui ont lieu au printemps après le démarrage de la saison de végétation (cf. définition ci-dessous)

GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat – http://www.ipcc.ch/

IGE : Institut des Géosciences de l'Environnement – laboratoire de recherche spécialisé en glaciologie et en hydrologie à Grenoble, FR

Isotherme 0° : Limite du gel, qui peut être cartographié sous forme de ligne, en-dessous de laquelle les températures sont supérieures à 0°C et au-dessus laquelle les températures sont inférieures à 0°C

Jour d'été : Jour où les températures maximales sont supérieures à 25 °C

Jour de gel : Jour où les températures minimales sont inférieures à 0°C

Jour de glace : Jour où les températures maximales sont inférieures à 0°C

Jour tropical : Jour où les températures maximales sont supérieures à 30°C

Permafrost : Tout terrain ou substrat (sol, roche, éboulis…) qui reste gelé tout au long de l'année

Petit âge glaciaire : Période climatique dans les Alpes entre 1500 et 1850 caractérisée par des conditions humides et froides

PPM : « Parties par million », exprime la concentration en gaz à effet de serre* dans l'atmosphère, soit le nombre de molécules de gaz à effet de serre* (CO2, méthane, etc.) considéré par million de molécules d'air

Pullulation : Augmentation très importante et parfois hors de contrôle de l'abondance d'une espèce à un endroit donné

RCP : « Representative concentration pathway », terme issu du 5ème rapport du GIEC qui correspond à un scénario socio-économique et la concentration correspondante des gaz à effet de serre*

Saison de végétation : Période dans l'année propice à la croissance des plantes, donc sans neige et avec des températures journalières supérieures à 5° C (pour les arbres ; le seuil pour les plantes alpines est de 0°)

WSL : Institut fédéral suisse dédié à l'étude de la forêt, de la neige et des paysages